

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

周兴^{1,2}, 廖育林^{2,3}, 鲁艳红^{2,3}, 谢坚^{2,3}, 杨曾平^{2,3}, 聂军^{2,3}, 曹卫东⁴

(1. 湖南农业大学资源环境学院, 长沙 410128; 2. 湖南省土壤肥料研究所, 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: 研究紫云英与稻草不同利用模式在化肥减量条件下稻田表层土壤有机碳及其活性组分的差异, 为合理利用有机物料调控土壤肥力提供参考。采用湖南省南县连续5年(2011—2015年)大田定位试验的方法, 研究了减量施肥下洞庭湖地区紫潮泥双季稻田0—20 cm表层土壤总有机碳(TOC)、微生物量碳(MBC)、可溶性有机碳(DOC)、易氧化有机碳(EOC)和轻组有机碳(LFOC)对紫云英与稻草不同利用模式的响应。结果表明: 与不施肥(CK)相比, 单施化肥(F100)TOC、MBC、DOC、EOC和LFOC的含量均有显著上升, 增幅分别为12.2%, 19.5%, 18.6%, 11.3%和100.9%。化肥减量20%条件下紫云英与稻草利用模式更有助于有机碳组分的积累, 其中晚稻留高桩还田冬种紫云英(F80+HR+A)处理效果最为突出, 与CK相比, 增幅分别为18.3%, 47.2%, 24.1%, 20.0%和204.0%。减量施肥下紫云英单独利用相比稻草单独还田更益于MBC、DOC与EOC的积累, 增幅分别为9.8%, 4.0%和0.6%, 土壤LFOC则相反, 下降了34.8%。敏感指数分析表明土壤有机碳及其活性组分中LFOC对土壤质量变化最为敏感, 其次是MBC, 二者可作为衡量土壤质量状况的良好指标。F80+HR+A各有机碳组分敏感性均显著高于F100处理。相关性分析表明水稻产量、土壤有机碳及其组分之间均呈极显著相关($p < 0.01$)。综上所述, 化肥减量条件下不同紫云英与稻草利用模式对紫潮泥稻田土壤有机碳及其活性组分含量的影响存在明显差异, 稻草还田能够显著提高土壤总有机碳和轻组有机碳的含量, 紫云英的利用则有利于土壤微生物量碳、可溶性有机碳和易氧化有机碳的积累, 而紫云英与稻草协同利用模式, 尤其是晚稻留高桩还田冬种紫云英更有助于土壤有机碳及其活性组分的积累。

关键词: 减量施肥; 紫云英; 稻草; 协同利用; 土壤有机碳组分

中图分类号: S143.1; S153.6⁺2 **文献标识码:** A **文章编号:** 1009-2242(2017)03-0283-08

DOI: 10.13870/j.cnki.stbcxb.2017.03.047

Responses of Contents of Soil Organic Carbon Fractions to Chinese Milk Vetch-rice Straw Synergistic Dispatching Under the Condition of Reducing Fertilizer Application

ZHOU Xing^{1,2}, LIAO Yulin^{2,3}, LU Yanhong^{2,3}, XIE Jian^{2,3},

YANG Zengping^{2,3}, NIE Jun^{2,3}, CAO Weidong⁴

(1. College of Resources and Environment, Hunan Agricultural University, Changsha 410128;

2. Soil and Fertilizer Institute of Hunan Province, Changsha 410125; 3. Scientific Observing and

Experimental Station of Arable Land Conservation (Hunan), Ministry of Agriculture, Changsha 410125;

4. Institute of Agricultural Resources and Regional Planning, Chinese Academy of Agricultural Sciences, Beijing 100081)

Abstract: Effects of different utilization models of Chinese milk vetch and rice straw on characteristics of paddy soil organic carbon fractions under chemical fertilizer reduction were studied in order to provide a reference for rational utilization of organic materials for soil fertility control. A field experiment for five consecutive years (during 2011—2015) was designed to study the responses of the contents of purple soil total organic carbon (TOC), microbial biomass carbon (MBC), dissolved organic carbon (DOC), easily-oxidized organic carbon (EOC) and light fraction organic carbon (LFOC) to different utilization models of Chinese milk vetch and rice straw in double-rice cropping field of the Dongting Lake region in Nan Country of Hunan Province. The results indicated that F100 significantly increased the contents of soil TOC, MBC, DOC, EOC and

收稿日期: 2016-12-12

资助项目: 农业公益性行业科研专项(201103005-08); 国家“十二五”科技支撑计划项目(2012BAD05B05-3); 国际植物营养研究所科研项目(Hunan-16)

第一作者: 周兴(1986—), 男, 博士研究生, 主要从事植物营养与施肥研究。E-mail: evenxing@sina.cn

通信作者: 聂军(1972—), 男, 博士, 研究员, 主要从事土壤与施肥原理研究。E-mail: junnjie@foxmail.com

LFOC, which was 12.2%, 19.5%, 18.6%, 11.3% and 100.9% greater than that of the unfertilized control, respectively. Compared with F100, different utilization models of Chinese milk vetch and rice straw could be more suitable for the accumulation of TOC, MBC, DOC, EOC and LFOC under chemical fertilizer reduction. Wherein the optimal was F80+HR+A, which was 18.3%, 47.2%, 24.1%, 20.0% and 204.0% greater than that of the unfertilized control, respectively. Applying Chinese milk vetch alone under chemical fertilizer reduction favored the buildup of MBC, DOC and EOC, which was 9.8%, 4.0% and 0.6% greater than that of rice straw alone, respectively, but the LFOC was the opposite, being 34.8% lower. Sensitive index showed that the LFOC and MBC had high activity, LFOC was more labile than MBC, and they could be used to evaluate soil quality. The sensitive indices of all organic carbon fractions in F80+HR+A were significantly higher than those of F100. Correlation analysis showed that there was a significant relationship among rice yield, TOC and its labile organic carbon fractions ($p < 0.01$). In conclusion, there were significant differences in TOC, labile organic carbon fractions among treatments amended with Chinese milk vetch and rice straw under chemical fertilizer reduction in purple soil. Returning rice straw could be prone to increase TOC and LFOC pool, and application of Chinese milk vetch was favorable to promote MBC, DOC and EOC. The pattern of Chinese milk vetch-rice straw synergistic dispatching, especially returning high pile of straw and winter planting Chinese milk vetch, could be prone to increase TOC and labile organic carbon fractions.

Keywords: fertilizer reduction; Chinese milk vetch; rice straw, synergistic dispatching; organic carbon fractions

土壤活性有机碳组分(微生物量碳、可溶性有机碳、易氧化有机碳和轻组有机碳)是土壤有机碳中有效性较高,易被土壤微生物分解利用,对植物养分供应最直接的部分^[1]。土壤有机碳不同组分由于其化学性质和存在方式的不同,其生物有效性和肥力作用也不同。因此,深入研究连续定位施肥对水稻土有机碳不同组分特征的影响,对于更好的了解定位施肥下土壤有机碳稳定机制和肥力作用机制具有一定科学意义,为合理施肥和土壤地力提升提供实践依据。

化肥的过量施用带来的环境风险以及对土壤副作用促使有机肥源得到重视。稻草作为一种农业废弃物资源,富含钾素,其钾素营养功能与化学肥料中钾素营养功能相同,因此稻草还田能补充土壤钾素营养^[2],同时稻草还田配施化肥能够提高作物产量^[3]。然而,稻草碳氮比较高,氮磷含量较低,还田腐解后还会导致微生物短暂固定土壤氮素,从而影响作物的前期生长^[4]。针对此,有研究者提出稻草与豆科绿肥协同利用以缓解稻草单独还田的不利影响^[5]。紫云英(*Astragalus sinicus* L.)作为豆科绿肥作物可以通过生物固氮固定空气中的氮,且能活化土壤中营养元素。因此紫云英还田能够减少化肥的施用^[6]。紫云英与稻草协同利用一方面稻草高含量钾素能缓解冬种紫云英土壤钾素的下降,另一方面紫云英固氮特性能解因稻草还田引起的作物前期氮素供应不足之渴。因此豆科绿肥与秸秆协同利用能平衡二者之间营养元素缺陷并达到互补。与秸秆单独还田相比,孙锐锋等^[7]研究绿肥—玉米种植模式下绿肥与秸秆联合利用可以有效提高土壤硝态氮等有效养分含量,提高作物产量。Aulakh 等^[8]研究印度稻麦轮作系统发现,绿肥与秸秆联合还田减少化

肥投入的条件下相比秸秆单独利用,水稻、小麦分别增产 5.4% 和 4.9%。与单施绿肥相比,绿肥与秸秆联合利用有机质、全氮、有效磷、速效钾分别上升了 1.4%, 1.5%, 3.0%, 2.5%, 能明显提升土壤肥力^[9]。由此看出,绿肥与秸秆协同利用相比秸秆或者绿肥单独利用更具有土壤培肥效果。

目前,国内外研究绿肥和秸秆还田大都侧重单独利用对于土壤肥力的影响,而豆科绿肥和秸秆协同利用对土壤培肥的研究甚少,尤其是紫云英与稻草协同利用及其不同协同利用模式还鲜有报道。随着农业机械化的发展,稻草留高桩还田成为一种常见还田形式。因此,本研究试图在连续(2011—2015 年)定位试验的基础上,探究紫云英与稻草不同利用模式对稻田土壤有机碳及其组分的影响,旨在结合当前农作方式,为探索稻田紫云英与稻草协同利用在化肥减量下对土壤有机碳库的影响机制及农田土壤碳库管理优化提供理论基础。

1 材料与amp;方法

1.1 试验材料

试验定位于湖南省南县三仙湖乡万元桥村(北纬 29°13', 东经 112°28', 海拔 30 m)。该地位于中亚热带到北亚热带的过渡区,属季风湿润气候,年平均气温 16.6℃,年平均降水量 1 237.7 mm,年日照时间 1 775.7 h。供试土壤为洞庭湖地区典型水稻土—河流沉积物发育的紫潮泥。试验前 0—20 cm 土壤 pH 为 7.7,有机质含量 47.5 g/kg,全氮、全磷、全钾含量分别为 3.28, 1.28, 22.2 g/kg,碱解氮、有效磷、有效钾含量分别为 261, 15.6, 98 mg/kg。供试水稻品种早稻为“原早 1 号”,晚稻为“黄华占”。

1.2 试验设计

试验开始于2011年,共设计6个处理,分别为:(1)CK,稻—稻—冬闲,不施任何肥料;(2)F100,稻—稻—冬闲,单施全量化肥(早稻施肥量为 $N\ 150\ \text{kg}/\text{hm}^2$, $P_2O_5\ 75\ \text{kg}/\text{hm}^2$, $K_2O\ 90\ \text{kg}/\text{hm}^2$;晚稻施肥量为 $N\ 180\ \text{kg}/\text{hm}^2$, $P_2O_5\ 45\ \text{kg}/\text{hm}^2$, $K_2O\ 120\ \text{kg}/\text{hm}^2$);(3)F80+A,稻—稻—紫云英,紫云英原田翻压(氮、磷、钾肥均减量20%,下同);(4)F80+R,稻—稻—冬闲,稻草原位还田;(5)F80+R+A,稻—稻—紫云英,紫云英与稻草原田翻压;(6)F80+HR+A,稻—稻—紫云英,晚稻留高桩(35 cm),紫云英与稻草均原田翻压(其他处理稻草桩高均控制在5 cm)。每处理3次重复,随机区组排列,小区面积为 $20\ \text{m}^2$ 。小区间田埂(高20 cm,宽30 cm)覆膜隔离,实行单独排灌。紫云英于每年10月上旬播种,不施任何肥料,各小区播种量一致,均为 $30\ \text{kg}/\text{hm}^2$,鲜草于早稻移栽前10 d翻压入田,用浅水湿润腐解。早稻一般每年3月底播种,4月中、下旬移栽。晚稻于6月中旬播种,7月中、下旬移栽。N、P、K化肥品种分别为尿素、过磷酸钙和氯化钾。氮肥50%作基肥于移栽前1 d施入,50%作追肥在分蘖盛期施入。磷肥和钾肥均在移栽前作基肥施入。基肥施入后立即用铁耙耙入5 cm深的土层中。在水稻整个生育期内,各处理农田管理措施完全一致。

1.3 样品采集与指标测定

试验前采集试验区0—20 cm表层土壤用于基本理化性状分析。2015年10月晚稻成熟期每个小区按照“S”形采集0—20 cm土层土样,装入无菌袋,迅速带回实验室,捡去可见动、植物残体和小石块,用四分法分成2部分,一份新鲜土样于 $4\ ^\circ\text{C}$ 下冷藏保存用于测定微生物量碳和可溶性碳,一份自然风干磨碎过筛后用于测定有机碳、易氧化有机碳和轻组有机碳。土壤有机碳含量采用TOC分析仪测定^[10];土壤微生物量碳测定参照吴金水的《土壤微生物生物量测定方法及其应用》^[11],土壤可溶性碳采用 $0.5\ \text{mol}/\text{L}\ K_2SO_4$ 浸提(水土比4:1)土样,浸提液经 $0.45\ \mu\text{m}$ 滤膜过滤后,滤液中的可溶性有机碳采用TOC分析仪测定^[12];易氧化有机碳的测定采用 $333\ \text{mmol}/\text{L}\ KMnO_4$ 氧化法^[1];轻组有机碳采用Kolbl等^[13]的方法测定。

1.4 计算方法与数据处理

有机碳组分敏感指数(SI)表征不同有机碳组分相对更稳定的参考土壤的变化幅度,本文参考土壤设定为无肥区(CK)土壤。敏感指数计算公式为^[14]:

敏感指数=(处理组土壤有机碳含量—对照组土壤有机碳含量)/对照组土壤有机碳含量 $\times 100$

用Microsoft Excel 2003软件进行数据处理;用

IBM SPSS Statistic 19.0进行方差分析。

2 结果与分析

2.1 紫云英与稻草不同利用模式下土壤有机碳含量的变化

土壤有机碳含量是土壤质量评价的一个重要指标。不同施肥模式下对稻田表层土壤(0—20 cm)有机碳含量(TOC)影响显著(表1)。与CK相比,各施肥处理增加土壤有机碳含量的作用显著。F100土壤有机碳含量增幅达12.2%。这可能是化肥施用后水稻根系和根茬还田增加而给土壤带来更多外源碳输入所致。紫云英与稻草利用模式增加土壤有机碳含量的作用尤为显著。F80+A、F80+R、F80+R+A和F80+HR+A增幅分别为13.1%、17.2%、15.3%和18.3%。这说明经过5 a连续定位施肥处理,化肥减量20%的情况下稻草与紫云英的利用稻田表层土壤有机碳积累优于单施全量化肥,尤以晚稻留高桩还田冬种紫云英更突出。

化肥减量下紫云英与稻草不同利用模式对土壤有机碳的影响存在一定差异。稻草单独还田提高土壤有机碳含量的效果显著高于紫云英单独利用的效果。F80+R处理土壤有机碳含量比F80+A处理高3.6%。紫云英利用下不同稻草协同利用模式对增加土壤有机碳含量的影响差异显著。相比F80+A,F80+HR+A土壤有机碳含量增加4.6%,达显著水平($p<0.05$);F80+R+A仅提高了1.9%。同时,不同稻草利用模式下种植紫云英对土壤有机碳的影响也不一样。传统稻草利用模式下种植紫云英(F80+R+A处理)的土壤增加有机碳含量的作用低于单独稻草利用(F80+R处理),而高茬稻草与紫云英协同利用(F80+HR+A处理)增加土壤有机碳的作用高于单独稻草利用(F80+R处理)。这可能是由于高茬稻草可以为紫云英生长前期保墒保温,有利于紫云英早发壮苗,提高紫云英鲜草产量所致。

表1 不同处理土壤有机碳含量

单位:g/kg

处理	土壤有机碳
CK	24.30d
F100	27.26c
F80+A	27.49bc
F80+R	28.48a
F80+R+A	28.02ab
F80+HR+A	28.75a

注:不同小写字母表示不同处理间差异显著($p<0.05$)。下同

2.2 不同紫云英与稻草利用模式下土壤活性有机碳组分特征

2.2.1 土壤微生物量碳 土壤微生物量碳(MBC)是反映土壤有机碳质量的重要指标。试验土壤(0—

20 cm)MBC 变化范围在 755~1 111 mg/kg(图 1)。经过 5 年的单施化肥处理,土壤 MBC 含量相比 CK 处理提高了 19.5%,原因可能是紫潮泥本身有机质含量高并且短期内水稻根的生长与根茬能够给予土壤微生物充足的碳源。紫云英与稻草协同利用模式也能显著提高表层土壤 MBC 含量,与 CK 相比,F80+A、F80+R、F80+R+A 和 F80+HR+A 分别增加了 32.5%,20.7%,25.6%和 47.2%,这说明紫云英与稻草不同利用模式在化肥减量 20%条件下相比单施全量化肥更有利于提高水稻表层微生物活性,其中晚稻留高桩还田冬种紫云英效果最优。

减量施肥下紫云英与稻草的不同利用模式对土壤微生物活性影响不一。紫云英单独还田与稻草单独还田处理之间 MBC 的差异显著($p<0.05$),F80+R 土壤 MBC 含量相比 F80+A 下降了 8.9%。紫云英利用下不同稻草协同利用模式对土壤 MBC 影响不同。与 F80+A 相比,F80+HR+A 土壤 MBC 含量增加了 11.7%,差异显著($p<0.05$)。F80+R+A 显著下降了 5.7%($p<0.05$)。这可能是稻草覆盖还田这种传统的稻草利用模式有碍紫云英出苗及苗期生长。而不同稻草利用模式下种植紫云英对土壤 MBC 的含量影响不一样。F80+HR+A、F80+R+A 的土壤 MBC 相比 F80+R 分别增加了 21.1%和 4.1%。这说明即使在化肥减量 20%情况下冬种紫云英翻压还田能有效刺激土壤微生物活性,促进微生物量碳的积累。

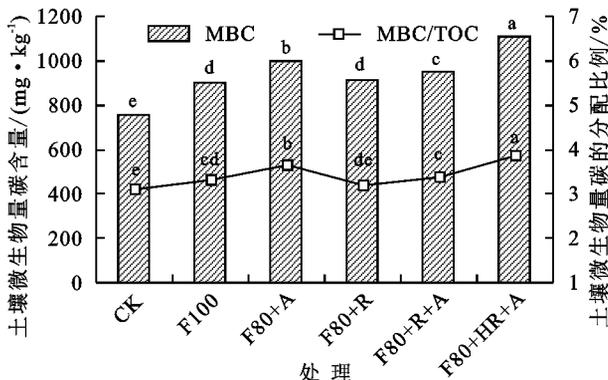


图 1 不同处理下土壤微生物量碳及其分配比例的变化

土壤微生物量碳的分配比例(MBC/TOC)比例是评价土壤有机质质量和碳转化量的指标^[15]。不同处理 MBC/TOC 存在明显差异(图 1)。MBC/TOC 比值范围在 3.11%~3.86%,施肥处理相比 CK 均有上升趋势。F100、F80+A、F80+R、F80+R+A 和 F80+HR+A 增幅分别为 6.5%,16.0%,2.5%,8.7%和 22.4%。这说明化肥减量 20%下冬种紫云英稻田表层土壤微生物量碳的分配比例高于单施化肥,其中以晚稻留高桩还田冬种紫云英更高。化肥减量下各处理土壤 MBC/TOC 比例同样存在一定差

异。F80+A 处理 MBC/TOC 比例远高于 F80+R,差异显著($p<0.05$),原因在于稻草单独还田后土壤有机碳的增加幅度要远高于微生物量碳的累积数量。紫云英与稻草不同利用模式对 MBC/TOC 比例的影响与土壤微生物量碳保持一致,其中以晚稻留高桩还田冬种紫云英 MBC/TOC 比例最为突出。

2.2.2 土壤可溶性有机碳 土壤可溶性有机碳(DOC)是环境变化的敏感性指标。施肥能显著提高表层(0—20 cm)土壤 DOC 含量(图 2)。与 CK 相比,施肥处理土壤 DOC 含量增加了 15.1~20.7 mg/kg,经过 5 年连续试验,F100 相比 CK 显著增加了土壤 DOC 含量,增幅为 18.5%,原因可能是单施化肥相对 CK 其水稻根的生长量与根茬的还田量高,为微生物分解形成可溶性有机碳提供了原料。F80+A、F80+R、F80+R+A 和 F80+HR+A 较 CK 增幅分别为 25.4%,20.6%,22.9%和 24.1%,且差异显著($p<0.05$)。这说明化肥减量 20%下冬种紫云英相比单施化肥有助于紫潮泥稻田表层土壤可溶性有机碳积累。

化肥减量下不同处理对土壤 DOC 含量影响存在差异。F80+A 土壤 DOC 高于 F80+R 4.0%,差异显著($p<0.05$)。紫云英利用下不同稻草协同利用模式对土壤 DOC 含量的影响无显著差异,同样不同稻草利用模式下种植紫云英无显著差异,这可能是还田有机物料的分解,土壤可溶性有机碳快速恢复到原水平。

各处理土壤 DOC 占土壤有机碳分配比例(DOC/TOC)变化趋势与土壤 DOC 含量的变化类似(图 2)。与 CK 相比,F80+A、F80+R+A 和 F100 DOC/TOC 比值增长显著($p<0.05$)。F80+HR+A 与 F80+R DOC/TOC 比值略有上升,这由于两者土壤 TOC 增长幅度要高于 DOC 增长幅度。这一结果说明土壤 DOC 含量复杂多变,而不同紫云英与稻草利用模式对其产生重要影响。

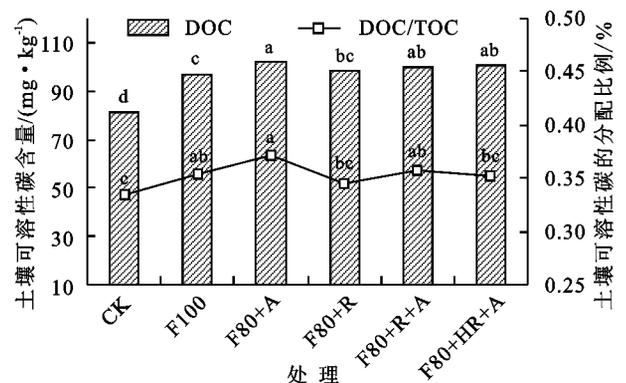


图 2 不同处理下土壤可溶性有机碳含量及其分配比例的变化

2.2.3 土壤易氧化有机碳 土壤易氧化有机碳(EOC)是土壤有机质变化的早期指标。不同处理对稻田表层土壤 EOC 影响趋势类似于土壤 DOC 含量(图 3)。施肥也能显著提高土壤 EOC,各处理土壤 EOC 的高低顺序

为: $F80+HR+A \geq F80+A, F80+R \geq F80+R+A, F100 > CK$, 较 CK 分别提升了 20.0%, 17.4%, 16.8%, 13.1% 和 11.3%, 差异显著 ($p < 0.05$)。这同样说明化肥减量 20% 的情况下稻草与紫云英的利用均有助于稻田表层土壤易氧化有机碳积累, 其中以晚稻留高桩还田冬种紫云英更有助于土壤 EOC 积累。

化肥减量下紫云英与稻草不同利用模式影响土壤 EOC 含量。F80+A 与 F80+R 无明显差异, 而紫云英与稻草利用模式对土壤 EOC 的积累效果类似于土壤 DOC。与紫云英单独利用或者稻草单独还田相比, F80+HR+A 和 F80+R+A 无显著变化, 而 F80+HR+A 相比 F80+R+A 土壤 EOC 含量提升了 6.1%, 差异显著 ($p < 0.05$)。这说明高桩稻草还田与紫云英协同利用增加土壤 EOC 的作用优于传统稻草利用模式下种植紫云英。

土壤易氧化有机碳含量分配比例 (EOC/TOC) 受施肥措施的影响, 但是各处理 EOC/TOC 比值变化幅度无明显差异, 这是由于土壤 EOC 含量变化幅度低于土壤 TOC 变化。

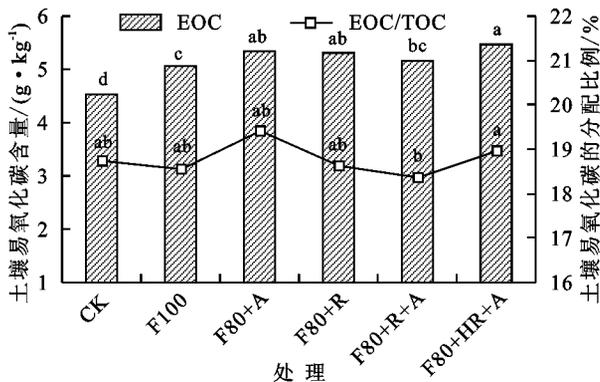


图 3 不同处理下土壤易氧化有机碳含量及其分配比例的变化

2.2.4 土壤轻组有机碳 土壤轻组有机碳是评价土壤碳库动态变化的指标。稻田表层土壤轻组有机碳含量 (LFOC) 受不同施肥措施的影响更加明显 (图 4)。施肥提高稻田表层土壤 LFOC 含量幅度较大, 其中 F100、F80+A、F80+R、F80+R+A 和 F80+HR+A 土壤 LFOC 含量较 CK 分别提升了 100.9%, 108.7%, 220.0%, 249.7% 和 204.0%, 差异显著 ($p < 0.05$)。这表明化肥减量 20% 的情况下稻草与紫云英的利用有益于稻田表层土壤轻组有机碳积累且效果优于单施全量化肥。

化肥减量下紫云英与稻草不同利用模式对土壤 LFOC 的影响存在明显差异。与 F80+A 相比, F80+R 处理土壤 LFOC 含量增幅达 53.3%, 差异显著 ($p < 0.05$), 这说明稻草还田对轻组有机碳的贡献要高于紫云英, 究其原因在于稻草相对于盛花期翻压利用的紫云英其纤维素及木质素含量高, 易促进由纤维

素、木质素等难分解物质构成土壤轻组有机碳的积累。不同稻草协同利用模式也能显著提高土壤 LFOC 含量, F80+HR+A、F80+R+A 相比 F80+A 分别增长了 45.7% 和 67.6% ($p < 0.05$)。而不同稻草利用模式下种植紫云英对土壤 LFOC 含量影响差异不一样。与 F80+R 相比, F80+HR+A 土壤 LFOC 含量显著下降, 降幅达 5.0%, F80+R+A 则增长了 9.3%, 差异显著 ($p < 0.05$)。

由图 4 可知, 各处理土壤轻组有机碳分配比例 (LFOC/TOC) 变化趋势与土壤 LFOC 变化保持一致。施肥能显著提高 LFOC/TOC 比值, F100、F80+A、F80+R、F80+R+A 和 F80+HR+A 较 CK 分别提高 79.7%, 85.4%, 159.9%, 206.0% 和 171.9% ($p < 0.05$)。这说明减量施肥下紫云英与稻草利用模式也能有效提升土壤 LFOC 的比例。

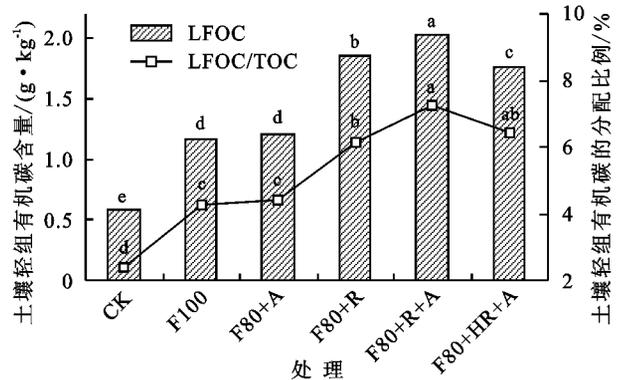


图 4 不同处理下土壤轻组有机碳含量及其分配比例的变化

2.3 不同处理下各有机碳组分敏感度指数变化

比较有机碳组分对不同处理敏感指数发现, TOC、MBC、DOC、EOC 和 LFOC 变化范围分别为 12.2%~18.3%, 19.5%~47.2%, 18.6%~25.5%, 12.9%~21.8% 和 101.0%~249.9% (图 5)。因此, 这说明 LFOC 是对于施肥措施最为敏感的指标。其次是 MBC。最后是 DOC、EOC 和 TOC。另外, 不同处理有机碳组分敏感同样存在差异, 其中 F80+HR+A 各有机碳组分敏感指数均与 F100 存在显著差异。

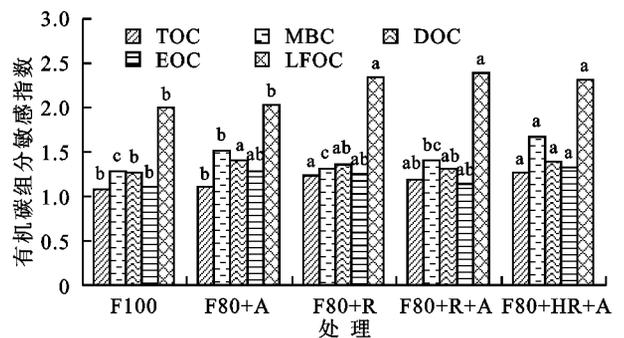


图 5 有机碳组分敏感指数

2.4 水稻产量与土壤有机碳及其组分的相关性

结合 2015 年水稻产量分析水稻产量与土壤有机

碳及其组分的相关性发现(表 2),水稻产量与有机碳及组分之间均呈极显著正相关。通过对相关系数比较发现,水稻产量与微生物量碳、可溶性有机碳以及易氧化有机碳相关性要高于水稻产量与土壤有机碳、

轻组有机碳,原因在于前者活性有机碳直接参与水稻养分吸收利用。土壤有机碳及其组分之间相互呈正显著相关,这说明活性有机碳组分能够作为衡量土壤有机碳状况甚至是土壤质量状况的良好指标。

表 2 土壤有机碳及其组分与水稻产量之间的相关性分析

项目	水稻产量	有机碳	微生物量碳	可溶性碳	易氧化碳	轻组碳
水稻产量	1					
有机碳	0.905**	1				
微生物量碳	0.919**	0.738**	1			
可溶性碳	0.918**	0.896**	0.814**	1		
易氧化碳	0.909**	0.842**	0.864**	0.903**	1	
轻组碳	0.766**	0.883**	0.609*	0.726**	0.709**	1

注: * 表示显著相关($p < 0.05, n = 18$); ** 表示极显著相关($p < 0.01, n = 18$)。

3 讨论

3.1 紫云英与稻草利用模式下土壤有机碳变化

土壤有机碳一方面能够提供作物生长所需的各种营养成分及土壤生物的能量来源,对土壤物理、化学和生物学性质都有着深刻影响。另一方面,土壤有机碳对全球碳循环起着重要作用,被认为是影响全球气候变化和温室效应的主要因素^[16]。本研究表明,5 a 定位施肥条件下,与不施肥相比,单施全量化肥处理提高了表层土壤有机碳。这与 Kong 等^[17]和李文军等^[18]就单施化肥对土壤有机碳的研究结果存在明显不同,可能与各研究土壤性质、土壤肥力水平及肥料配施方式不同有关。连续有机物料利用模式表层土壤有机碳增加更为明显,这应该与有机物料的还田直接向土壤补充大量有机物质和间接促进作物生长增加根茬和枯枝落叶残留,以及促进土壤微生物对新鲜有机物质的固定有关^[19-20]。本研究中化肥减量 20% 下紫云英、稻草利用模式稻田表层土壤有机碳含量表现为晚稻留高桩还田冬种紫云英 > 稻草单独还田 > 传统稻草还田冬种紫云英 > 紫云英单独利用 > 单施全量化肥 > 不施肥,恰好证明此观点。稻草单独还田提高土壤有机碳含量效果优于紫云英,这也说明不同种类的有机肥对土壤有机碳的影响有所差异。而据统计历年紫云英鲜草产量表现为:晚稻留高桩还田冬种紫云英 > 冬种紫云英 + 稻草传统还田与冬种紫云英。因此本研究中土壤有机碳含量趋势可能因为化肥施用比例、水稻生长、紫云英还田量不同、还田物料比例不同及其还田后腐解速度,紫云英与稻草协同利用而产生的互作效应,以及所造成的土壤微生物和碳氮代谢差异有关,其影响机制尚需进一步研究。

3.2 紫云英与稻草利用模式下土壤活性有机碳组分

活性有机碳分为两类,一类不仅是土壤养分和土壤生物化学反应的能量和动力,而且还直接参与土壤生物化学转化^[21],包括土壤微生物量碳(MBC)、可溶性有机碳(DOC)和易氧化有机碳(EOC)。因此,这部分活性有机碳与输入到土壤中有有机碳源的生物有效性密切相关。本研究中化肥减量下不同紫云英、稻草利用模

式提高表层(0—20 cm)土壤 MBC、DOC 与 EOC 含量效果优于单施化肥。这与杨滨娟等^[22]在红壤和梁尧等^[23]在黑土研究结果类似。有机物料的还田为微生物生长提供更多碳源,同时通过微生物作用形成 DOC 和 EOC 的积累。紫云英与稻草协同利用中晚稻留高桩还田冬种紫云英处理提高稻田表层土壤 MBC、DOC 与 EOC 含量效果优于其他模式。一方面 C/N 比较低的紫云英易被微生物分解利用,为水稻生长提供了直接营养,使其生物量增大,残留归还到土壤中的有机物料增加,从而为微生物活动提供了碳源,促使土壤微生物活性增强。另一方面可能由于高茬稻草为紫云英前期生长保墒保温而使紫云英鲜草产量提高,致使紫云英与稻草比例增大,而混合低碳氮比的紫云英有助于秸秆腐解^[24]。本研究中化肥减量下紫云英单独利用作用效果好于稻草单独还田,紫云英与稻草在水分含量、化学组成以及裂解特征上存在较大差异,碳氮比较低的紫云英更容易被微生物利用,一部分被微生物吸收成为其机体而提高微生物量碳,另一部分形成可溶、易氧化的有机碳进入土壤。另一类活性有机碳是一定程度腐解并处在腐解初期的有机物料残体,如轻组有机碳(LFOC)^[25]。有研究认为有机无机配施的土壤 LFOC 含量提升效果优于无肥处理或者单施化肥^[26]。本研究表明化肥减量 20% 下不同紫云英、稻草利用模式同样能明显提高紫潮泥土壤 LFOC 含量,紫云英利用下晚稻留高桩还田处理后土壤 LFOC 含量明显低于稻草传统方式还田,这可能是晚稻留高桩还田下紫云英鲜草产量高于稻草传统方式还田处理致使晚稻留高桩还田处理中紫云英鲜草与稻草比例大于稻草传统方式还田,混合的低碳氮比紫云英鲜草有助于稻草腐解^[23]。另外紫云英单独利用土壤 LFOC 含量远低于稻草单独还田。究其原因在于土壤 LFOC 是游离态的有机碳,由植物碎片、植物根系和木炭等组成^[27],新鲜紫云英含有大量简单糖类与氨基酸等易氧化物质而稻草纤维素等难分解含量高易形成植物碎片等。因此这在某种程度上证明这类活性有机碳数量与归还到土壤中的有机物料种类性质密切相关。同时说明土壤 LFOC 与归还有机物

料种类比例也有一定关系。综上土壤有机碳活性组分来看,紫云英与稻草协同利用一晚稻留高桩还田冬种紫云英更有助于活性有机碳积累。紫云英与稻草协同利用模式中碳氮比低的紫云英易腐解而提高土壤微生物量,同时碳氮比高的稻草难腐解而缓释养分,加之冬种紫云英翻压还田能缓解稻草还田在短期内致使微生物对土壤氮素的固定而限制了微生物活性的不利影响^[4]。因此紫云英与稻草协同利用模式不失为一种提高土壤活性有机碳组分有效方法,其中晚稻留高桩还田冬种紫云英表现更突出。但是紫云英与稻草协同利用对土壤有机碳影响机制、长期定位后对土壤养分的影响,还需做进一步研究。

3.3 紫云英与稻草利用模式下土壤有机碳各组分敏感指数及相关性

本研究中土壤 LFOC 的敏感指数远高于 MBC、DOC、EOC 和 TOC,说明土壤 LFOC 能敏感的反应不同施肥措施下土壤质量的变化,这与 Zhang 等^[28]的研究结果一致。另外,不同处理有机碳组分敏感同样存在差异,化肥减量 20% 下晚稻留高桩还田冬种紫云英处理各有机碳组分敏感指数均高于单施全量化肥,表明晚稻留高桩还田冬种紫云英能有效提高土壤有机碳活性,因此从这方面来讲化肥减量 20% 条件下晚稻留高桩还田冬种紫云英优势明显。相关性分析表明,水稻产量与有机碳各组分极显著相关,有机碳各组分之间极显著相关,说明有机碳各组分之间存在一定动态平衡,同样说明有机碳活性组分是有机碳的一个主要决定因素,因此有机碳中这些活性有机碳组分制约着土壤肥力。

4 结论

(1)在洞庭湖紫潮泥双季稻区,5 年连续定位单施化肥相比不施肥能显著提升稻田表层土壤有机碳含量,增幅达 12.2%。而紫云英、稻草利用也能有效提升稻田表层土壤有机碳含量,积累效果优于单施全量化肥,其中晚稻留高桩还田冬种紫云英更突出,相比不施肥提升 18.3%。减量施肥下稻草单独还田提高土壤有机碳含量效果优于紫云英单独利用。

(2)与不施肥相比,单施化肥能显著提高土壤微生物量碳(MBC)、可溶性有机碳(DOC)、易氧化有机碳(EOC)和轻组有机碳(LFOC)含量,增幅分别为 19.5%,18.5%,11.3%,100.9%。而紫云英与稻草不同利用模式更利于有机碳组分不同程度的积累,其中晚稻留高桩还田冬种紫云英最为突出,增幅分别为 47.2%,24.1%,20.0%,204.0%。化肥减量下紫云英单独利用相比稻草单独还田能明显提高土壤 MBC、DOC 和 EOC 含量,而土壤 LFOC 恰好相反。

(3)晚稻留高桩还田冬种紫云英处理各有机碳组分敏感性均显著高于单施化肥。水稻产量、土壤有机

碳及其活性组分均呈极显著相关,因此减量施肥下紫云英与稻草协同利用能有效改善土壤有机碳质量,进而提高土壤肥力。

参考文献:

- [1] Belay T A, Zhou X, Su B, et al. Labile, recalcitrant, and microbial carbon and nitrogen pools of a tallgrass prairie soil in the US Great Plains subjected to experimental warming and clipping[J]. *Soil Biology and Biochemistry*, 2009, 41(1): 110-116.
- [2] 廖育林,郑圣先,聂军,等.长期施用化肥和稻草对红壤水稻土肥力和生产力持续性的影响[J]. *中国农业科学*, 2009, 42(10): 3541-3550.
- [3] 刘红江,陈留根,朱普平,等.稻草还田对小麦产量、地表径流 NPK 流失量及土壤肥力的影响[J]. *水土保持学报*, 2010, 24(6): 6-10.
- [4] Yadvinder S Bijay S, Timsina J. Crop residue management for nutrient cycling and improving soil productivity in rice-based cropping systems in the Tropics[J]. *Advances in Agronomy*, 2005, 85(4): 269-407.
- [5] 黄山,汤军,李木英,等.双季稻“双还双减”机械化生产技术模式[J]. *江西农业大学学报*, 2014, 36(1): 38-43.
- [6] 周兴,李再明,谢坚,等.紫云英利用后减施化肥对水稻产量和产值及土壤碳氮含量的影响[J]. *湖南农业大学学报(自然科学版)*, 2014, 40(3): 225-230.
- [7] 孙锐锋,李剑,肖厚军,等.绿肥与秸秆混合还土效果试验[J]. *贵州农业科学*, 2007, 35(5): 72-74.
- [8] Aulakh M S, Khera T S, Doran J W, et al. Managing crop residue with green manure, urea, and tillage in a rice-wheat rotation[J]. *Soil Science Society of America Journal*, 2001, 65(3): 820-827.
- [9] 艾可根.施用秸秆和紫云英对水稻产量和土壤肥力影响[J]. *农技服务*, 2014, 31(6): 145.
- [10] 鲍士旦.土壤农化分析[M].第3版.北京:中国农业出版社,2000:39-114.
- [11] 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,2006:54-60.
- [12] 李玲,朱捍华,苏以荣,等.稻草还田和易地还土对红壤丘陵农田土壤有机碳及其活性组分的影响[J]. *中国农业科学*, 2009, 42(3): 926-933.
- [13] Kolbl A, Kogelknabner I. Content and composition of free and occluded particulate organic matter in a differently textured arable cambisol as revealed by solid-state ¹³C NMR spectroscopy[J]. *Journal of Plant Nutrition & Soil Science*, 2004, 167(1): 45-53.
- [14] Banger K, Toor G S, Biswas A, et al. Soil organic carbon fractions after 16-years of applications of fertilizers and organic manure in a Typic Rhodalfs in semi-arid tropics[J]. *Nutrient Cycling in Agroecosystems*, 2010, 86(3): 391-399.
- [15] Li J, Zhao B Q, Li X Y, et al. Effects of long-term combined application of organic and mineral fertilizers on microbial biomass, soil enzyme activities and soil

- fertility[J]. *Agricultural Sciences in China*, 2008, 7(3): 336-343.
- [16] 张旭博,孙楠,徐明岗,等. 全球气候变化下中国农田土壤碳库未来变化[J]. *中国农业科学*, 2014, 47(23): 4648-4657.
- [17] Kong A Y Y, Six J, Bryant D C, et al. The relationship between carbon input, aggregation, and soil organic carbon stabilization in sustainable cropping systems[J]. *Soil Science Society of America Journal*, 2005, 69(4): 1078-1085.
- [18] 李文军,彭保发,杨奇勇. 长期施肥对洞庭湖双季稻区水稻土有机碳、氮积累及其活性的影响[J]. *中国农业科学*, 2015, 48(3): 488-500.
- [19] 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.
- [20] Pan G, Zhou P, Li Z, et al. Combined inorganic/organic fertilization enhances N efficiency and increases rice productivity through organic carbon accumulation in a rice paddy from the Tai Lake region, China[J]. *Agriculture, Ecosystems and Environment*, 2009, 131(3): 274-280.
- [21] Wander M M, Traina S J, Stinner B R, et al. Organic and conventional management effects on biologically active soil organic matter pools[J]. *Soil Science Society of America Journal*, 1994, 58(4): 1130-1139.
- [22] 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.
- [23] 梁尧,韩晓增,宋春,等. 不同有机物料还田对东北黑土活性有机碳的影响[J]. *中国农业科学*, 2011, 44(17): 3565-3574.
- [24] 宋莉,韩上,鲁剑巍,等. 油菜秸秆、紫云英绿肥及其不同比例配施还田的腐解及养分释放规律研究[J]. *中国土壤与肥料*, 2015(3): 100-104.
- [25] 芦思佳,韩晓增,尤孟阳,等. 施肥对黑土密度分组中碳、氮的影响[J]. *水土保持学报*, 2011, 25(2): 177-180.
- [26] 韩晓日,苏俊峰,谢芳,等. 长期施肥对棕壤有机碳及各组分的影响[J]. *土壤通报*, 2008, 39(4): 730-733.
- [27] 倪文海,刘欢,刘振涛,等. 水稻秸秆腐解过程溶解性有机质红外光谱研究[J]. *土壤*, 2013, 45(2): 1220-1226.
- [28] Zhang J, Song C, Wang S. Dynamics of soil organic carbon and its fractions after abandonment of cultivated wetlands in northeast China[J]. *Soil and Tillage Research*, 2007, 96(1): 350-360.

(上接第 282 页)

- [7] 李书田,邢素丽,张炎,等. 钾肥用量和施用时期对棉花产量品质和棉田钾素平衡的影响[J]. *植物营养与肥料学报*, 2016, 22(1): 11-121.
- [8] 赵文艳,张晓敏,石宗琳,等. 氮钾肥施用对土壤有效养分和盐分及番茄生长的影响[J]. *水土保持学报*, 2011, 25(4): 100-103, 109.
- [9] 张辉,张立花,黄玉芳,等. 施钾对小麦—玉米产量及土壤钾素平衡的影响[J]. *麦类作物学报*, 2013, 33(5): 988-995.
- [10] 李书田,金继运. 中国不同区域农田养分输入、输出与平衡[J]. *中国农业科学*, 2011, 44(20): 4207-4229.
- [11] Wang H Y, Zhou J M, Du C W, et al. Potassium fractions in soils as affected by monocalcium phosphate, ammonium sulfate and potassium chloride application[J]. *Pedosphere*, 2010, 20(3): 368-377.
- [12] 陈建国,张杨珠,曾希柏,等. 不同施肥对缺钾红壤性水稻土的生态效应[J]. *中国农业科学*, 2010, 43(21): 4418-4426.
- [13] Dong H Z, Kong X Q, Li W J, et al. Effects of plant density and nitrogen and potassium fertilization on cotton yield and uptake of major nutrients in two fields with varying fertility[J]. *Field Crops Research*, 2010, 119(1): 106-113.
- [14] 李宗泰,陈二影,张美玲,等. 施钾方式对棉花叶片抗氧化酶活性、产量及钾肥利用效率的影响[J]. *作物学报*, 2012, 28(3): 487-494.
- [15] 耿计彪,马强,张民,等. 包膜氯化钾一次基施对棉花生长周期钾素供应、产量及品质的影响[J]. *植物营养与肥料学报*, 2016, 22(4): 1064-1070.
- [16] 王贺正,陈明灿,贺文闯,等. 磷钾对小麦幼苗抗寒性的影响[J]. *麦类作物学报*, 2009, 29(1): 141-145.
- [17] 唐旭,计小江,李超英,等. 水稻—大麦长期轮作体系钾肥效率及土壤钾素平衡[J]. *中国农业科学*, 2014, 47(1): 90-99.
- [18] 张务帅,陈宝成,李成亮,等. 控释氮肥控释钾肥不同配比对小麦生长及土壤肥力的影响[J]. *水土保持学报*, 2015, 29(3): 178-183.
- [19] 孙云保,张民,郑文魁,等. 控释氮肥对小麦—玉米轮作产量和土壤养分状况的影响[J]. *水土保持学报*, 2014, 28(4): 115-121.
- [20] Rosolem C A, Sgariboldi T, Garcia R A, et al. Potassium leaching as affected by soil texture and residual fertilization in tropical soils[J]. *Communications in Soil Science and Plant Analysis*, 2010, 41(16): 1934-1943.
- [21] 韩国君,陈年来,黄海霞,等. 钾肥类型与施用量对土壤持水特性的影响[J]. *干旱区资源与环境*, 2013, 27(6): 26-29.
- [22] 王伟妮,鲁剑巍,鲁明星,等. 湖北省早、中、晚稻施钾增产效应及钾肥利用率研究[J]. *植物营养与肥料学报*, 2011, 17(5): 1058-1065.