

有机肥绿肥配施对水稻土有机碳组分和水稻产量的影响

刘小粉¹, 贺小思¹, 易柏宁¹, 刘春增^{2*}, 曹卫东³

(1. 河北工程大学, 河北 邯郸 056038; 2. 河南省农业科学院植物营养与资源环境研究所, 河南 郑州 450002; 3. 中国农业科学院农业资源与农业区划研究所, 北京 100081)

摘要: 该研究以两年稻田定位试验为基础, 设置有机肥 (OF)、有机肥 + 绿肥 2 000 kg · hm⁻² (OF+GM1)、有机肥 + 绿肥 3 000 kg · hm⁻² (OF+GM2) 和有机肥 + 绿肥 4 000 kg · hm⁻² (OF+GM3) 4 个处理, 探讨不同处理对土壤有机碳组分和水稻产量的影响。结果表明, 与 OF 处理相比, 有机肥绿肥配施未提高土壤及团聚体有机碳含量, 却显著提高水稻产量 (OF<OF+GM1<OF+GM2 和 OF+GM3); 把 0.25 ~ 2 mm 团聚体直接分成 3 个组分后发现, 有机碳含量随各组分粒径增大而提高, 与 OF 处理相比, 绿肥还田能显著提高 0.05 ~ 0.25 和 <0.05 mm 两个组分有机碳含量, 通过密度分组实验对比, 发现这两个组分有机碳变化主要由游离轻组有机碳引起; 相关分析表明, 水稻产量与 0.25 ~ 2 mm 团聚体和 0.05 ~ 0.25 mm 组分有机碳含量显著正相关, 由于 0.25 ~ 2 mm 团聚体有机碳在处理间无显著差异, 绿肥还田可能主要通过 0.05 ~ 0.25 mm 组分有机碳含量变化间接影响水稻产量。综上所述, 水稻生产中, 提倡有机肥配施绿肥以提高水稻产量和进行土壤培肥, 配施绿肥量可根据田间绿肥实际产草量选择 3 000 ~ 4 000 kg · hm⁻² 较为适宜。

关键词: 绿肥还田; 水稻产量; 有机碳; 物理分组

豫南稻区为单季稻产区, 每年有大量冬闲田, 当地习惯种植冬绿肥紫云英, 并于水稻插秧前翻压还田用于土壤培肥。绿肥翻压还田能使化肥施用量减少 40% 仍能保证水稻不减产^[1], 还能活化土壤养分、改善土壤结构和防止水土流失^[1-5], 从而缓解化肥过度施用导致的土壤板结、食品安全和环境风险问题, 对土壤培肥和保障农业可持续生产意义重大^[5-6]。

土壤有机质是土壤重要组成部分, 含量虽少却对土壤结构改善、肥力保持、功能调节及植物生长发育起着关键作用^[7], 因此, 提升土壤有机质 / 有机碳含量和质量对农业生产意义重大。研究表明, 绿肥还田能显著提高稻田土壤总有机碳含量及土壤活性有机碳含量^[4, 8-10], 连续种植绿肥还能促进有机碳在大团聚体中固持^[11], 但也有研究发现绿肥还田未显著提高土壤有机碳含量^[1, 12], 需要进一步研究。另外, 目前关于有机碳的研究多集

中于绿肥与化肥、秸秆配施效果, 绿肥与有机肥配施效果报道较少, 已有相关报道主要关注绿肥有机肥配施与其他施肥模式的差异性比较^[13], 不同绿肥翻压量与有机肥配施效果如何, 尚缺乏相关报道。随着人们生活水平和消费理念提升, 不施化肥的稻米越发受到青睐, 而豫南稻区利用冬闲田种植绿肥翻压还田并配施有机肥, 是水稻清洁生产 (有机生产) 值得借鉴的培肥模式, 但尚未开展相关科学研究。因此, 该研究拟从宏观 (土壤) 和微观 (团聚体) 两个层面探讨施有机肥条件下配施不同量绿肥对土壤有机碳组分和水稻产量的影响, 为水稻清洁生产高效培肥和保障产量提供理论支撑。

1 材料与方法

1.1 试验设置

该试验位于信阳市农科院水稻试验田, 土壤耕层质地为粘壤, 种植制度为单季稻, 水稻品种为籼稻两优 6326, 水稻收获后移除秸秆部分。共设置 4 个处理: (1) 有机肥 (OF); (2) 有机肥 + 绿肥 2 000 kg · hm⁻² (OF+GM1); (3) 有机肥 + 绿肥 3 000 kg · hm⁻² (OF+GM2); (4) 有机肥 + 绿肥 4 000 kg · hm⁻² (OF+GM3)。每个处理重复 3 次,

收稿日期: 2020-01-27; 录用日期: 2020-03-27

基金项目: 国家绿肥产业技术体系 (CARS-22); 河北省青年拔尖人才经费支持 (2018-2020); 河北省自然科学基金 (D2016402029)。

作者简介: 刘小粉 (1985-), 女, 河南上蔡县人, 副教授, 博士, 主要研究方向为绿肥资源综合利用。E-mail: liuxiaofenok@126.com。

通讯作者: 刘春增, E-mail: pinkpigs2010@126.com。

每个重复面积为 15.3 m²，重复间做田埂并用塑料板隔开以防串水串肥，留 0.8 m 宽沟以便灌排及其它田间管理。4 个处理均施用商品有机肥做基肥，施用量为 100 kg · hm⁻²，其氮、磷、钾含量分别为 1.81%、1.22%、2.38%。除 OF 处理外，其它 3 个处理于每年 9 月底水稻收获后种植绿肥（当地紫云英），并于下茬水稻插秧前（约 4 月上、中旬）至少提前两周收获绿肥，按各试验处理绿肥用量不同，称重后翻压还田。试验连续开展两年。

1.2 样品采集与测定

水稻收获后以挖剖面方式采集 0 ~ 15 cm 耕层原状土壤，每个小区随机采集 6 点进行混合，用方形大铁盒带回实验室。过 8 mm 筛后放置于牛皮纸上自然风干，用湿筛法^[14]分离团聚体得到 >2、0.25 ~ 2、0.05 ~ 0.25 和 <0.05 mm 4 个团聚体粒级。选取占绝对优势的 0.25 ~ 2 mm 团聚体，采用改进后密度浮选法^[15]进行分组，具体步骤为：（1）取 5 g 团聚体放入离心管中，加入 1.85 g · cm⁻³ 的碘化钠溶液 35 mL，用手左右晃动离心管使其充分混合，待静置 20 min 后放入离心机进行离心，弃去上层溶液，再用去离子水重复洗涤 - 离心 3 ~ 5 次；（2）将土样完全转移到三角瓶中，并用少量去离子水冲洗干净，在三角瓶中加入 0.5 mol · L⁻¹ 的六偏磷酸钠 10 mL，再加入约 50 mL 去离子水，之后放入震荡箱中持续震荡 8 h，把震荡好的土样依次过 0.25 和 0.05 mm 筛，将得到的三部分土粒分别转移到小铝盒中，在烘箱中烘干 24 h，即得到加碘化钠预处理的 <0.05、0.05 ~ 0.25 和 0.25 ~ 2 mm 3 个粒级的烘干土样。同时取 5 g 土样放入三角瓶，重复步骤（2），即得到不加碘化钠处理的 <0.05、0.05 ~ 0.25 和 0.25 ~ 2 mm 3 个粒级的烘干土样。以上步骤如图 1 所示。土壤、团聚体及各组分有机碳含量采用重铬酸钾外加热法^[16]测定。水稻产量为各小区实打实收。

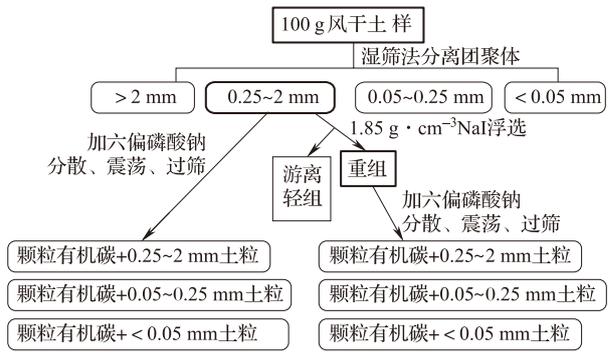


图 1 土壤团聚体各组分有机碳分组流程图

1.3 统计分析

用 SPSS 19 进行数据的显著性差异和相关分析。采用单因素（one-way ANOVA）-Duncan 法进行处理间显著性差异分析，采用 Pearson 法进行各变量之间的相关性分析，显著性水平均为 P<0.05。

2 结果与分析

2.1 有机肥绿肥配施对土壤和团聚体有机碳含量的影响

由表 1 看出，水稻实测产量在处理间产生了显著差异（P<0.05），表现趋势为 OF<OF+GM1<OF+GM2 和 OF+GM3，OF+GM1、OF+GM2、OF+GM3 处理水稻产量比 OF 分别提高 37.2%、62.0% 和 63.1%。由表 1 还看出，土壤有机碳含量在 12.0 ~ 12.5 g · kg⁻¹ 之间，处理间差异不显著（P>0.05）。在团聚体尺度，有机碳含量随团聚体粒径减小明显降低，从大到小各粒径平均值分别为 17.8、13.0、10.4 和 7.6 g · kg⁻¹；但在处理间有机碳含量未产生显著差异。该试验点前期研究^[12]发现，除 <0.05 mm 团聚体外，其它团聚体含量均在处理间产生了显著差异，团聚体分布的变化引起了团聚体稳定性相应改变，与 OF 相比，配施绿肥的 3 个处理团聚体稳定性提高 26% ~ 42%。即绿肥还田虽未显著提高土壤和团聚体有机碳含量，却引起土壤团

表 1 不同处理对土壤及团聚体有机碳含量和水稻产量的影响

处理	水稻产量 (kg · hm ⁻²)	整土	>2 mm	0.25 ~ 2 mm	0.05 ~ 0.25 mm	<0.05 mm
		有机碳含量 (g · kg ⁻¹)				
OF	370.4 ± 1.8c	12.0 ± 0.4a	16.8 ± 1.4a	12.1 ± 0.3a	10.1 ± 0.2a	7.6 ± 0.7a
OF+GM1	508.4 ± 41.1b	12.5 ± 0.6a	18.8 ± 2.6a	13.0 ± 0.6a	10.3 ± 0.4a	8.0 ± 0.7a
OF+GM2	599.9 ± 26.9a	12.4 ± 1.0a	16.0 ± 1.0a	13.5 ± 1.7a	11.0 ± 1.3a	7.1 ± 0.5a
OF+GM3	604.2 ± 38.0a	12.3 ± 0.4a	19.4 ± 1.4a	13.2 ± 0.7a	10.1 ± 0.9a	7.7 ± 0.2a

注：“±”后面数据为标准差，同一列数值后不同小写字母表示处理间差异显著（P<0.05）。

聚体分布变化,从而提高其稳定性。鉴于团聚体形成和有机碳周转密切相关^[17-19],笔者假设团聚体内有机碳分布发生了变化,后面选取占绝对优势的粒级(0.25~2mm团聚体),对有机碳分布展开进一步分析。

2.2 有机肥绿肥配施对团聚体各组分有机碳含量的影响

不同处理0.25~2mm团聚体经分散、筛分得到各组分有机碳含量如图2所示。对于同一处理,不同组分有机碳含量存在明显差异:组分粒径越大其有机碳含量越高,即0.25~2mm>0.05~0.25mm><0.05mm。处理间相比较,0.25~2mm粒级有机碳含量无显著差异($P>0.05$)。<0.05mm粒级为OF≤OF+GM2和OF+GM3≤OF+GM1,其中OF+GM1、OF+GM2、OF+GM3比OF处理有机碳含量分别提高42.0%、13.2%、13.1%。0.05~0.25mm粒级为OF≤OF+GM1≤OF+GM2和OF+GM3,其中OF+GM1、OF+GM2、OF+GM3比OF处理有机碳含量分别提高11.7%、20.7%、27.6%。因此,配施绿肥能有效提高各组分有机碳含量。

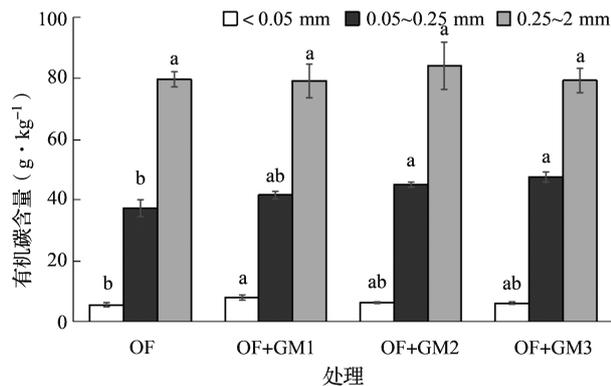


图2 不同处理0.25~2mm团聚体各组分有机碳含量
注:柱形图上方字母表示处理间差异显著性($P<0.05$)。下同。

2.3 有机肥绿肥配施对团聚体重组各组分有机碳含量的影响

不同处理0.25~2mm团聚体经碘化钠浮选后,弃去上部游离轻组(因该土样轻组肉眼几乎不可见、量少,很难收集够量以达到测定有机碳含量,因此弃去),只保留重组,再对重组进行分散、筛分后得到的各组分有机碳含量如图3所示。对于同一处理,不同粒级有机碳含量存在明显差异:粒径越大其有机碳含量越高,即0.25~2mm>0.05~0.25mm><0.05mm,与图2不经碘化钠浮选趋势一致。对于同一粒级,各组分有机碳含量在处理间无显著性差异($P>0.05$)。

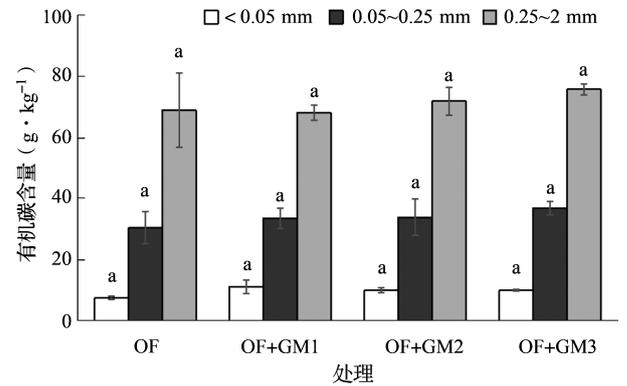


图3 不同处理0.25~2mm团聚体重组各组分有机碳含量(加碘化钠浮选)

3 讨论与结论

该研究经过两年定位试验发现,在施有机肥基础上配施绿肥未显著提高土壤及各粒级团聚体有机碳含量。杨艳^[13]也发现,单施紫云英、单施有机肥、有机肥紫云英减半后配施未使水稻土团聚体有机碳含量发生显著变化,这与笔者的研究结果一致。而多数研究表明,绿肥还田不仅显著提高土壤有机碳含量^[9-10],还提高土壤活性有机碳和团聚体有机碳含量^[8-11],与笔者研究结果不一致。这除了受土壤本底值、试验设置及试验年限等外因影响,还和有机碳自身性质有关:土壤有机碳含量仅能反映土壤总有机碳输入与矿化平衡结果,并不能反映各功能库情况。事实上,土壤有机质/有机碳由不同的功能库组成,各自有特定的稳定机制和周转速率,某些碳库可能对不同农业措施的反映比土壤总有机碳更灵敏,因此,有机质分组是阐明土壤有机质关键功能的常用方法^[15, 20-21]。其中,物理分组法对有机质结构破坏程度小,分离出的有机质组分能较真实反映原状有机质结构与功能,尤其能反映有机质的位置和周转特征^[22-23]。该研究物理分组结果也证明了这一点:尽管土壤和团聚体有机碳无显著变化,但对0.25~2mm团聚体进行物理分组后发现,与OF处理相比,有机肥绿肥配施有机碳含量在<0.05和0.05~0.25mm这两个组分(粒级)中显著提高(图2)。

该研究采用密度分组法把0.25~2mm团聚体分为游离轻组和重组两部分,进一步分析导致图2中有机碳含量产生差异的关键组分。结果表明,弃去游离轻组保留重组后,用同样的方法把重组分成3个组分,每个组分有机碳含量在处理间均无显著差异(图3),这与图2有机碳含量在处理间差异显著

不一致(表现在 <0.05 和 0.05 ~ 0.25 mm 两个组分)。在实验处理过程中,图 3 比图 2 多了弃去游离轻组这个步骤,说明游离轻组是导致有机肥绿肥配施处理有机碳含量提高的原因。这与杨艳^[13]研究结果一致,她发现与单施有机肥、单施紫云英相比,有机肥紫云英减半配施能显著提高土壤轻组有机碳含量。但杨艳^[13]研究结果显示,单施有机肥重组有机碳含量比单施紫云英、有机肥紫云英减半配施显著提高,这与图 3 重组结果不一致。这可能和本研究试验只有 2 年、时间较短有关(对方试验 4 年),因为重组有机质主要存在于有机-无机复合体中,周转较慢,物理保护程度高,对农业管理措施响应较慢^[24]。反之,轻组有机质主要成分为动植物残体、菌丝体、孢子、单糖、多糖、半木质素等生物活性高的有机物,转化分解较重组迅速,一般几周到几十年^[25-27],对耕作、施肥等农业生产措施响应更快,也是判断土壤有机碳固持特征变化快速而有效的手段^[28-29]。因此,该研究在实验步骤中弃去游离轻组后,不同

处理有机碳含量由图 2 存在差异变为图 3 无显著性差异,也恰好说明轻组易变、重组不易变。

鉴于水稻产量和部分组分有机碳含量在处理间都产生了显著变化,该研究对两者进行了相关分析(表 2)。结果表明,产量与 0.25 ~ 2 mm 团聚体有机碳含量和 0.05 ~ 0.25 mm 组分有机碳含量呈显著正相关($P<0.05$)。因此,绿肥还田除直接提高水稻产量,还通过提高 0.25 ~ 2 mm 团聚体和 0.05 ~ 0.25 mm 组分有机碳含量间接影响水稻产量。但由于团聚体有机碳在处理间并未产生显著差异(表 1),因此,绿肥还田可能主要通过 0.05 ~ 0.25 mm 组分有机碳含量变化间接影响水稻产量。表 2 还显示,水稻产量与土壤、<0.05 mm 组分和 0.25 ~ 2 mm 组分有机碳含量正相关但相关性不显著,可能因为土壤、0.25 ~ 2 mm 组分有机碳含量在处理间无显著差异,虽然 <0.05 mm 组分有机碳含量在处理间差异显著,但与 0.05 ~ 0.25 mm 组分相比,其有机碳含量水平很低(图 2),因此对水稻产量影响相对较小。

表 2 水稻产量与土壤、团聚体及各组分有机碳含量的相关分析

土壤	有机碳含量			
	0.25 ~ 2 mm 团聚体	<0.05 mm 组分	0.05 ~ 0.25 mm 组分	0.25 ~ 2 mm 组分
0.828	0.968*	0.232	0.969*	0.429

注:采用 Pearson 法进行各变量之间的相关性分析,*表示显著相关($P<0.05$)。

综上所述,两年施肥试验表明:(1)在施有机肥条件下,绿肥还田不能提高土壤及团聚体有机碳含量,却显著提高水稻产量。(2)进一步对 0.25 ~ 2 mm 团聚体物理分组发现,所得 3 个组分有机碳含量随粒径增大而升高;与 OF 处理相比,绿肥还田使 0.05 ~ 0.25 mm 和 <0.05 mm 组分有机碳含量显著提高,这些变化主要由游离轻组引起。(3)相关分析发现,绿肥还田除直接提高水稻产量,还通过提高 0.05 ~ 0.25 mm 组分有机碳含量间接影响水稻产量。因此,水稻清洁生产(有机生产)中,提倡有机肥绿肥配施,绿肥配施量可根据轮作绿肥产草量选择 3 000 ~ 4 000 kg · hm⁻²。

参考文献:

- [1] 刘小粉,刘春增,潘兹亮,等.施用绿肥条件下减施化肥对土壤养分及持水供水能力的影响[J].中国土壤与肥料,2017,(3):75-79.
- [2] 杨曾平,徐明岗,聂军,等.长期冬种绿肥对双季稻种植下红壤性水稻土质量的影响及其评价[J].水土保持学报,2011,25(3):92-98.

- [3] 李继明,黄庆海,袁天佑,等.长期施用绿肥对红壤稻田水稻产量和土壤养分的影响[J].植物营养与肥料学报,2011,17(3):563-570.
- [4] 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,2016,54(3):657-669.
- [5] 焦彬,顾荣申,张学上.中国绿肥[M].北京:农业出版社,1986.
- [6] 崔玉亭.化肥与农业生态环境保护[M].北京:化学工业出版社,2001.
- [7] 黄昌勇.土壤学[M].北京:中国农业出版社,2000.
- [8] 刘立生,徐明岗,张璐,等.长期种植绿肥稻田土壤颗粒有机碳演变特征[J].植物营养与肥料学报,2015,21(6):1439-1446.
- [9] 龙攀,苏姗,黄亚男,等.双季稻田冬季种植模式对土壤有机碳和碳库管理指数的影响[J].应用生态学报,2019,30(4):1135-1142.
- [10] 李峰,周方亮,黄雅楠,等.减施化肥下紫云英和秸秆还田对土壤养分及活性有机碳的影响[J].华中农业大学学报,2020,39(1):67-75.
- [11] 张钦,于恩江,林海波,等.连续种植不同绿肥的土壤团聚体碳

- 分布及其固持特征 [J]. 中国土壤与肥料, 2019, (1): 71-78.
- [12] 刘春增, 刘小粉, 李本银, 等. 绿肥还田对水稻产量、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.
- [13] 杨艳. 施用有机物料对水稻土有机碳物理组分的影响 [D]. 杭州: 浙江农林大学, 2014.
- [14] Kemper W D, Rosenau R C. Aggregate stability and size distribution [M]//Methods of soil analysis. Part 1 (2nd ed). Agron. Monogr. No. 9 ASA. Wisconsin: Madison, 1986.425-442.
- [15] 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: 1367-1377.
- [16] 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.
- [17] Oades J M. Soil organic matter and structural stability: mechanisms and implications for management [J]. Plant Soil, 1984, 76: 319-337.
- [18] Elliott E T. Aggregate structure and carbon, nitrogen, and phosphorus in native cultivated soils [J]. Soil Science Society of America Journal, 1986, 50: 627-633.
- [19] Six J, Elliot E T, Paustian K. Aggregate and soil organic matter dynamic under conventional and no-tillage systems [J]. Soil Science Society of America Journal, 1999, 63: 1350-1358.
- [20] Six J, Guggenberger G, Paustian K, et al. Sources and composition of soil organic matter fractions between and within soil aggregates [J]. European Journal of Soil Science, 2001, 52: 607-618.
- [21] Gregorich E G, Beare M H, McKim U F, et al. Chemical and biological characteristics of physically uncomplexed organic matter [J]. Soil Science Society of America Journal, 2006, 70: 975-985.
- [22] Elliott E T, Cambardella C A. Physical separation of soil organic matter [J]. Agriculture Ecosystems & Environment, 1991, 34: 407-419.
- [23] Christensen B T. Physical fractionation of soil and organic matter in primary particles and density separates [J]. Advances in Soil Science, 1992, 20: 1-90.
- [24] Bremer E, Janzen H H, Johnston A M. Sensitivity of total, light fraction and mineralizable organic matter to management practices in a Lethbridge soil [J]. Canada Journal of Soil Science, 1994, 74: 589-601.
- [25] Turchenek L W, Oades J M. Fractionation of organ-mineral complexes by sedimentation and density techniques [J]. Geoderma, 1979, 21: 311-343.
- [26] Christensen B T. Physical fractionation of soil and functional complexity in organic matter turnover [J]. European Journal of Soil Science, 2001, 52: 345-353.
- [27] 黄运湘, 王改兰, 冯跃华, 等. 长期定位试验条件下红壤性水稻土有机质的变化 [J]. 土壤通报, 2005, 36 (2): 181-184.
- [28] Buyanovsky G A, Aslam M, Wagner G H. Carbon turnover in soil physical fractions [J]. Soil Science Society of America Journal, 1994, 58: 1167-1173.
- [29] Janzen H H, Campbell C A, Brandt S A, et al. Light-fraction organic matter in soils from long-term crop rotations [J]. Soil Science Society of America Journal, 1992, 56: 1799-1806.

Effect of applying organic fertilizer and green manure on organic carbon fractions and rice yield in a paddy soil

LIU Xiao-fen¹, HE Xiao-si¹, YI Bo-ning¹, LIU Chun-zeng^{2*}, CAO Wei-dong³ (1. Hebei University of Engineering, Handan Hebei 056038; 2. Institute of Plant Nutrition and Resource Environment, Henan Academy of Agriculture Sciences, Zhengzhou 450002; 3. Institute of Agricultural Resources and Regional Planning, Chinese Academy of Agricultural Sciences, Beijing 100081)

Abstract: Based on the 2-year experiment, four fertilization treatments (organic fertilizer; organic fertilizer plus 2 000 kg · hm⁻² green manure; organic fertilizer plus 3 000 kg · hm⁻² green manure; organic fertilizer plus 4 000 kg · hm⁻² green manure) were established to investigate their effects on soil organic carbon fractions and the rice yield. The results showed that compared with organic fertilizer alone (OF), no significant differences on soil and aggregate organic carbon concentrations were seen under the three treatments with green manure return, while the rice yield was significantly increased. With aggregates of 0.25 ~ 2 mm divided into three fractions, it was found that the organic carbon concentration increased with the increase of their particle size. Compared with OF, green manure return significantly increased organic carbon concentrations within the 0.05 ~ 0.25 and < 0.05 mm fractions, which was probably caused by changes of the free light fraction, demonstrated through the density floating experiment. Correlation analysis showed that the rice yield was positively correlated with organic carbon concentrations within the 0.25 ~ 2 mm aggregates and within the 0.05 ~ 0.25 mm fraction. Green manure return could indirectly affect the rice yield by increasing organic carbon concentration within the 0.05 ~ 0.25 mm fraction. Therefore, during the clean production (organic production) of rice, it is recommended to combine organic fertilizer with green manure to improve the rice yield and soil fertility and the application rates of green manure could be from 3 000 ~ 4 000 kg · hm⁻² accordingly.

Key words: green manure return to field; rice yield; organic carbon; physical fractionation