

绿肥根茬还田和化肥用量对土壤团聚性及碳氮分布的影响

刘小粉¹, 王清涛¹, 白双宇¹, 卢彦琦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: 通过3年定位试验探讨绿肥根茬还田和化肥用量对土壤团聚性及碳氮分布特征的影响。试验依据绿肥根茬还田和化肥用量共设置5个处理: 100%化肥即常规施肥(100%CF); 绿肥根茬还田(GM); 100%化肥+绿肥根茬还田(100%CF+GM); 90%化肥+绿肥根茬还田(90%CF+GM); 80%化肥+绿肥根茬还田(80%CF+GM)。土壤团聚体采用湿筛法分离, 有机碳和全氮含量用碳氮仪测定。结果表明: (1) 0.25 ~ 2 mm团聚体在土壤中占绝对优势, 但在处理间无显著差异($P>0.05$)。与100%CF相比, 绿肥根茬还田4个处理GM、100%CF+GM、90%CF+GM和80%CF+GM使0.05 ~ 0.25和<0.05 mm团聚体向>2 mm大团聚体转变, 并显著提高团聚体稳定性, 但4个处理间无显著差异; (2) 有机碳和全氮含量随团聚体粒径增大而提高。>0.25 mm大团聚体对土壤有机碳和全氮贡献率最高(有机碳和全氮贡献率分别为60.1% ~ 82.9%和66.6% ~ 83.0%), 绿肥根茬还田使这一趋势增强, 即随着微团聚体向大团聚体转变, 有机碳和全氮也被大团聚体固持; (3) 相关分析表明, 团聚体稳定性与>2 mm大团聚体质量百分比及其有机碳贡献率均极显著相关, 团聚体质量百分比与该粒级团聚体有机碳贡献率极显著正相关。综上, 绿肥根茬还田有利于土壤结构稳定和碳氮积累, 短期内还能减施化肥, 是豫南地区冬闲田综合利用和发展畜牧业的推荐途径。

关键词: 绿肥根茬还田; 团聚体; 平均重量直径; 有机碳; 全氮

团聚体作为土壤肥力的调节器, 在协调土壤水、肥、气、热, 改善土壤结构及促进植物根系生长方面发挥着重要作用^[1-3]。有机碳作为土壤肥力和土壤质量好坏的重要衡量指标, 也直接或间接影响土壤生态系统中的养分循环、水分保持、土壤结构改良及植物生长发育等^[1-3], 土壤碳库大小及转化速率还可能引起环境温室气体变化。因此, 土壤团聚体和有机碳的相关研究不仅受到土壤学家的重视, 也在全球环境变化研究中得到极大的关注^[4-5]。近年来, 随着团聚体形成模型^[6-7]的建立, 学者们在探索土壤有机碳固持和转化机制时往往从团聚体层面着手展开, 土壤团聚体形成、分布、稳定性与

有机碳固持的关系及其对农业管理措施的响应成为土壤学研究的热点^[1-3]。

绿肥作为一种清洁肥源, 翻压还田能替代20% ~ 60%的化学氮肥而保证不减产, 还田后能增加土壤碳氮、改善土壤团聚性、影响微生物碳和酶活性, 同时为作物生长提供大量养分和良好生长环境^[8-12], 在农业可持续发展中越来越被重视。赵秋等^[13]发现, 短期冬绿肥翻压还田对玉米产量、土壤pH、速效氮、有效磷含量无显著影响, 但能显著提高土壤有机碳含量, 且二月兰显著高于毛叶苕子。也有研究发现, 翻压绿肥能显著提高土壤全氮、有效磷和速效钾含量, 使土壤C/N降低高达21%^[14]。张钦等^[15]发现, 连续进行绿肥根茬还田会改变土壤和团聚体有机碳含量, 且不同绿肥(箭筈豌豆、肥田萝卜、蓝花苕子、毛叶苕子、光叶苕子)效果有差别。可见, 绿肥翻压效果如何与土壤本身性质、绿肥种类及绿肥还田方式(绿肥还田、根茬还田等)关系密切。

豫南作为单季稻产区, 每年有大量冬闲田, 受当地财政支持、科研投入等多种因素影响, 近年来紫云英作为当地受欢迎的绿肥品种重新受到农民

收稿日期: 2020-04-20; 录用日期: 2020-06-23

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支持计划(第三批); 河北省自然科学基金(C2020402022); 国家自然科学基金(41401246); 河北省教育厅青年基金项目(QN2017312)。

作者简介: 刘小粉(1985-), 女, 河南省上蔡县人, 副教授, 博士, 主要从事土壤培肥和绿肥资源利用方面的研究工作。E-mail: liuxiaofenok@126.com。

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

欢迎,通常种植于冬闲田,与水稻进行轮作,紫云英轮作后主要有两种利用方式:水稻插秧前作为绿肥翻压还田或收割秸秆以储存鲜草作饲料(仅留根茬还田)。绿肥翻压还田对节省化肥、土壤养分含量、碳氮固持、水稻产量等的影响已有大量研究^[9, 16-17],而绿肥根茬还田效果缺乏广泛研究^[15, 18],尤其是紫云英根茬还田配施化肥效果如何尚未见报道。该研究拟通过短期(3年)定位试验探讨绿肥根茬还田和化肥施用量对土壤团聚性及碳氮分布特征的影响,为土壤培肥和发展畜牧业提供理论依据。

1 材料与方法

1.1 试验设计

该定位试验于2009年设置在河南省信阳市农科院试验田(32°07' N, 114°05' E),该土壤为典型水稻土,耕层土壤质地为粘壤,耕作制度为单季稻(冬季田地空闲,称为冬闲田)。水稻种植季当地常规施肥(该试验称为100%化肥),氮(N)、磷(P₂O₅)和钾(K₂O)施用量分别为225、135和135 kg/hm²,磷钾肥(普通过磷酸钙和氯化钾)全部基施,氮肥(碳酸氢铵)按基肥:分蘖肥:孕穗肥=3:2:1施用。该试验利用冬闲田轮作绿肥(紫云英),水稻收获后把紫云英种子均匀撒播于各试验小区,播种量为30 kg/hm²,来年水稻插秧前收割绿肥地上部,各小区仅留根茬,水稻插秧前绿肥根茬用小型旋耕机翻压还田。该试验依据绿肥根茬还田与否及化肥用量不同,共设5个处理:100%化肥(即常规施肥,简称为100%CF);绿肥根茬还田(GM);100%化肥+绿肥根茬还田(100%CF+GM);90%化肥+绿肥根茬还田(90%CF+GM);80%化肥+绿肥根茬还田(80%CF+GM)。每个处理设4个重复,面积均为6.67 m²,小区间做田埂并用塑料膜隔开以防串水串肥,留0.25 m宽沟以便灌排及其它田间管理。

1.2 样品采集与分析

2012年9月水稻收获后,以挖剖面方式采集0~15 cm(耕层)原状土样用土盒带回实验室,沿土壤自然裂缝轻轻掰开至全部通过8 mm筛,自然风干待测。依据土壤团聚体湿筛法^[19]测定>2、0.25~2、0.05~0.25和<0.05 mm 4个粒级水稳性团聚体质量百分比含量,4次重复。团聚体平均重

量直径(MWD)计算方法如下:

$$MWD = \sum_{i=1}^n w_i x_i \quad (1)$$

其中, x_i 为团聚体平均直径, w_i 为对应粒级团聚体的质量百分数。团聚体内有机碳和全氮含量用碳氮元素分析仪测定。团聚体有机碳或全氮贡献率计算方法如下:

$$\text{团聚体有机碳或全氮贡献率}(\%) = \frac{\text{该粒级团聚体质量百分比} \times \text{该粒级团聚体有机碳或全氮含量}}{\text{土壤有机碳或全氮含量}} \times 100 \quad (2)$$

用SPSS 13.0进行数据的差异显著性和相关性分析。采用单因素(one-way ANOVA)-Duncan法进行处理间差异显著性分析($P=0.05$),采用Pearson法进行各变量之间的相关性分析。

2 结果与分析

2.1 不同处理下土壤团聚体分布及稳定性变化

图1a显示不同处理下各粒级水稳性团聚体质量百分比分布及团聚体稳定性变化情况。相同处理的不同粒级团聚体含量差别明显,但具有相同趋势,即各处理都是0.25~2 mm团聚体质量百分比最高(各处理平均值为45.8%),>2 mm团聚体次之(26.5%),0.05~0.25 mm团聚体较低(19.8%),<0.05 mm团聚体最低(7.9%),其中>0.25 mm大团聚体质量百分比累计占59.7%~79.8%。除0.25~2 mm团聚体外,其它3个粒级在处理间分布发生了明显变化:与100%CF相比,GM、100%CF+GM、90%CF+GM、80%CF+GM均显著提高了>2 mm团聚体质量百分比,不同程度降低了0.05~0.25 mm和<0.05 mm团聚体含量,4个绿肥根茬还田处理间无显著性差异($P>0.05$)。整体来看,绿肥根茬还田使<0.25 mm小团聚体向>0.25 mm大团聚体(主要是>2 mm大团聚体)转变,与100%CF相比,GM、100%CF+GM、90%CF+GM和80%CF+GM分别使>0.25 mm大团聚体提高20.7%、29.6%、31.8%和33.4%。

该研究用团聚体平均重量直径(MWD)衡量团聚体稳定性变化,由图1b看出,绿肥根茬还田能显著提高团聚体稳定性,与100%CF相比,GM、100%CF+GM、90%CF+GM、80%CF+GM 4个处理使MWD分别提高48.2%、53.1%、76.8%和68.5%,但4个处理之间无显著性差异。

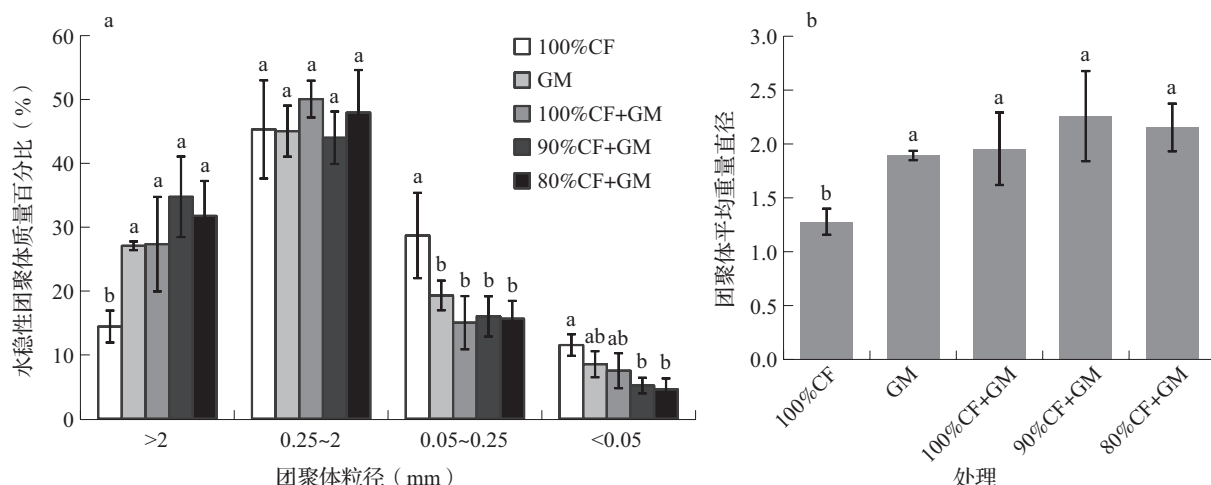


图1 不同处理下土壤团聚体分布及其稳定性

注: 不同小写字母表示处理间差异显著 ($P<0.05$)。下同。

2.2 不同处理下土壤团聚体有机碳和全氮分布规律

图2显示不同处理下各粒级团聚体有机碳和全氮含量分布情况。对于同一处理, 团聚体内有机碳和全氮含量均随团聚体粒径减小而降低, 即有机碳和全氮含量分布趋势为 (>2 mm) $>0.25 \sim 2$ mm $>0.05 \sim 0.25$ mm $>(<0.05$ mm)。其中, 有机碳在 >2 、 $0.25 \sim 2$ 、 $0.05 \sim 0.25$ 和 <0.05 mm 团聚体内的平均含量分别为 17.7、16.6、13.6 和 11.5 g/kg,

全氮平均含量分别为 1.58、1.45、1.21 和 1.03 g/kg。对于 >2 和 $0.05 \sim 0.25$ mm 团聚体, 有机碳和全氮含量在处理间均无显著差异 ($P>0.05$); 对于 $0.25 \sim 2$ mm 和 <0.05 mm 团聚体, 与 100%CF 相比, 绿肥根茬还田 4 个处理有机碳和全氮含量均有降低趋势, 且除 $0.25 \sim 2$ mm 团聚体有机碳含量的 90%CF+GM 和 <0.05 mm 团聚体全氮含量的 GM 处理外, 降低程度均达显著水平。

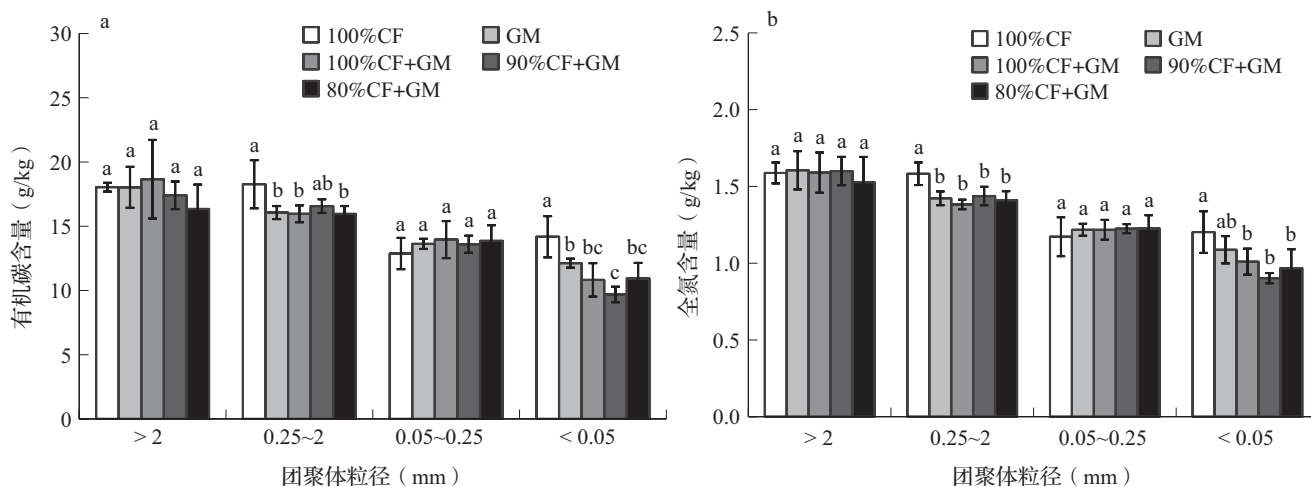


图2 不同处理下团聚体有机碳及全氮含量

图3显示各粒级团聚体对整土有机碳和全氮的贡献 (由于全氮和有机碳趋势一致且有有机碳显著正相关 $R^2=0.999$, 所以本文只讨论有机碳)。可以看出, $0.25 \sim 2$ mm 大团聚体是贡献最高的粒级, 对土壤有机碳贡献率为 45.4% ~ 50.6%, >2 、 $0.05 \sim 0.25$ 和 <0.05 mm 粒级贡献率分别是 16.0% ~ 37.6%、

13.1% ~ 23.3% 和 3.2% ~ 10.2%。与 100%CF 相比, 绿肥根茬还田 4 个处理均显著提高了 >2 mm 团聚体对土壤有机碳贡献率, 同时降低了 $0.05 \sim 0.25$ 和 <0.05 mm 团聚体对土壤有机碳贡献率, 说明绿肥根茬还田不仅促进大团聚体的形成, 也使有机碳随着微团聚体形成大团聚体从而被保存在大团聚体中。

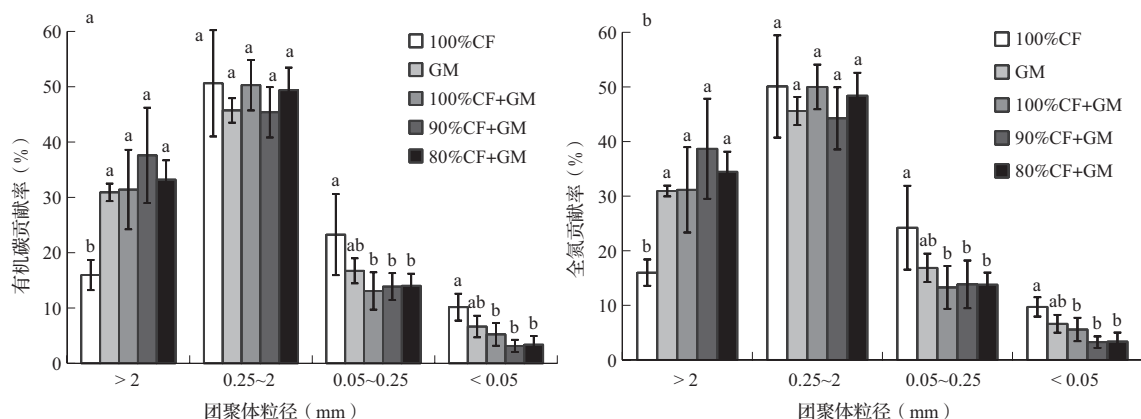


图3 不同处理下各团聚体对土壤有机碳及全氮的贡献率

由表1看出,对于同一粒级团聚体,碳氮比在处理间均无显著性差异;对于同一处理,碳氮比在不同粒级间也无显著性差异。

表1 不同处理下土壤团聚体碳氮比

处理	团聚体粒径 (mm)			
	>2	0.25 ~ 2	0.05 ~ 0.25	<0.05
100%CF	11.4 ± 0.4a	11.5 ± 0.2a	11.0 ± 0.3a	11.5 ± 0.8a
GM	11.2 ± 0.2a	11.3 ± 0.4a	11.2 ± 0.2a	11.2 ± 0.9a
100%CF+GM	11.7 ± 0.9a	11.6 ± 0.5a	11.4 ± 0.7a	10.7 ± 0.4a
90%CF+GM	10.9 ± 0.2a	11.5 ± 0.7a	11.1 ± 0.3a	10.7 ± 0.4a
80%CF+GM	10.9 ± 0.3a	11.3 ± 0.3a	11.3 ± 0.2a	11.3 ± 0.2a

注:不同小写字母表示处理间差异显著 ($P < 0.05$)。

2.3 不同处理下土壤团聚体各指标相关分析

不同处理团聚体各指标相关性如表2。可以看出, MWD与>2 mm团聚体质量百分比极显著正相

关(相关系数为0.991),与0.25~2 mm团聚体质量百分比相关不显著(相关系数为-0.194),与0.05~0.25、<0.05 mm团聚体质量百分比极显著负相关(相关系数分别为-0.803和-0.771),说明大团聚体越多土壤结构稳定性越高,而小团聚体多土壤结构稳定性越差,而绿肥根茬还田有利于大团聚体形成和团聚体稳定性提高。MWD与<0.05 mm团聚体有机碳含量极显著负相关,与其他粒级团聚体有机碳含量无显著相关性。MWD与各粒级团聚体有机碳贡献极显著相关(0.25~2 mm团聚体除外):其中与>2 mm团聚体有机碳贡献率极显著正相关,与0.05~0.25、<0.05 mm极显著负相关。团聚体质量百分比与该粒级团聚体有机碳含量相关不显著(<0.05 mm团聚体除外),与该粒级团聚体有机碳贡献率相关极显著。

表2 土壤团聚体各指标相关分析

		平均重量直径	团聚体质量百分比				团聚体有机碳含量				团聚体有机碳贡献			
			>2	0.25 ~ 2	0.05 ~ 0.25	<0.05	>2	0.25 ~ 2	0.05 ~ 0.25	<0.05	>2	0.25 ~ 2	0.05 ~ 0.25	<0.05
平均重量直径		1												
团聚体	>2	0.991**	1											
质量百	0.25 ~ 2	-0.194	-0.326	1										
分比	0.05 ~ 0.25	-0.803**	-0.724**	-0.370	1									
	<0.05	-0.771**	-0.711**	-0.210	0.683**	1								
团聚体	>2	-0.287	-0.336	0.439	-0.076	0.275	1							
有机碳	0.25 ~ 2	-0.254	-0.227	-0.140	0.373	0.140	-0.249	1						
含量	0.05 ~ 0.25	0.416	0.436	-0.270	-0.178	-0.364	-0.155	-0.120	1					
	<0.05	-0.602**	-0.591**	0.090	0.404	0.665**	0.146	0.250	-0.548*	1				
团聚体	>2	0.959**	0.953**	-0.200	-0.798**	-0.664**	-0.061	-0.410	0.390	-0.598**	1			
有机碳	0.25 ~ 2	-0.379	-0.485*	0.861**	-0.082	-0.093	0.136	0.308	-0.390	0.223	-0.490*	1		
贡献	0.05 ~ 0.25	-0.706**	-0.617**	-0.466*	0.974**	0.615**	-0.146	0.261	0.013	0.267	-0.697**	-0.220	1	
	<0.05	-0.745**	-0.687**	-0.210	0.665**	0.959**	0.183	0.121	-0.405	0.808**	-0.668**	-0.085	0.590**	1

注: * 和 ** 分别表示 0.05 水平显著相关和 0.01 水平极显著相关。团聚体粒径单位 mm。

3 讨论

3.1 不同处理下土壤团聚体分布及稳定性变化

水稳性团聚体含量和分布能衡量土壤结构稳定性和抗侵蚀能力,水稳性大团聚体含量常作为判断土壤结构稳定性和土壤质量好坏的重要指标之一。研究^[9, 20-21]发现 0.25 ~ 2 mm 团聚体在土壤中占绝对优势,这与该研究结果一致。也有研究发现 <0.25 mm 微团聚体占绝对优势^[22]或土壤中无占绝对优势的粒级^[23]。刘恩科等^[24]、樊红柱等^[25]、Six 等^[26]认为,长期不同施肥或耕作处理会使团聚体粒级(包括占绝对优势的粒级)分布发生改变。可见,团聚体粒级分布不仅和供试土壤基本性质关系密切,还随农业管理措施发生改变。绿肥根茬还田未使该研究占绝对优势的粒级发生转移,整体来看,却使 <0.25 mm 微团聚体向 >2 mm 大团聚体转变,原因可能是与 100%CF 相比,绿肥根茬还田的土壤会产生大量绿肥根系,这些根系通过对土壤颗粒的直接缠绕作用,促进微团聚体形成大团聚体^[6, 27-30]。种植绿肥的处理土体内根系量较大,这会提高根际微生物量,根际细菌分泌物和真菌菌丝的粘结作用,也利于大团聚体的形成和稳定^[31-32]。另外,在水稻土中,氧化物在土壤团聚和有机碳固持过程中的作用不容忽视,它甚至会成为团聚体形成的主要粘结剂^[33-34]。这也可能是土壤有机碳在处理间无显著差异,而 >2 mm 大团聚体含量却发生变化的原因之一。

3.2 不同处理下土壤团聚体有机碳和全氮分布规律

有机碳是土壤团聚体的重要组成部分,也是团聚体形成和保持稳定性的重要影响因素,Elliott^[28]认为微团聚体由含碳量高、不稳定的粘结剂(真菌菌丝、根系、微生物和植物源的多糖)粘结成大团聚体,故大团聚体(>2 和 0.25 ~ 2 mm)比微团聚体(0.05 ~ 0.25 mm)含有更多的有机碳^[27],这与该研究发现的有机碳含量随团聚体粒径增大而升高的现象相一致。该研究中,土壤有机碳含量在处理间无显著差异,团聚体有机碳含量却在 0.25 ~ 2 和 <0.05 mm 两个粒级产生显著差异,一方面可能和团聚体形成(图 1 显示,整体上 <0.25 mm 微团聚体向大团聚体转变)过程中有机碳随之发生转移有关,因为团聚体形成和有机碳固持是联系紧密且同时进行的复杂过程^[2-3, 6-7],也可能是绿肥根茬还

田短期内(3 年)虽未引起土壤有机碳含量发生变化,却可能引起有机碳类型发生改变,而湿筛法过程中绿肥根茬还田处理的 0.25 ~ 2 和 <0.05 mm 团聚体损失了部分可溶性碳。

由团聚体碳氮贡献率分布发现(图 3),>0.25 mm 大团聚体对该水稻土碳氮的固持和累积起主要作用,这与以往研究结果一致^[15, 35-36]。说明绿肥根茬还田不仅促进大团聚体的形成,而且随着微团聚体向大团聚体转移,有机碳和全氮也被大团聚体固持,即绿肥根茬还田不利于 <0.25 mm 微团聚体固持碳氮,却有利于 >0.25 mm 大团聚体固持碳氮。因此,长远来看,绿肥根茬还田处理将有利于土壤固持更多有机碳,因为大团聚体对有机碳具有物理保护作用^[7]。而 Lee 等^[37]发现韩国水稻土 <0.05 mm 团聚体对有机碳贡献最大(>70%),这可能和其试验田排水不畅长期处于淹水状态有关。因为已有研究发现,与干湿交替条件相比,给水稻土持续灌水能显著减少水稳性大团聚体含量^[38]。碳氮比可以反映土壤碳固持的有效性,常作为一个重要参考指标。该研究中碳氮比在不同处理间和不同团聚体粒级间均无显著性差异,可能和土壤本身性质及试验年限有很大关系。

3.3 不同处理下土壤团聚体各指标相关分析

团聚体稳定性常用 MWD 表示,MWD 越大表示团聚体团聚度越高,即稳定性越强^[39]。该研究中,随着微团聚体向大团聚体转变,绿肥根茬还田 4 个处理均显著提高了 MWD,而 MWD 与 >2 mm 团聚体质量百分比和 >2 mm 团聚体有机碳贡献率均呈极显著正相关。因此,团聚体稳定性提高,主要是因为绿肥根茬还田能增加 >2 mm 大团聚体含量和 >2 mm 团聚体有机碳贡献率。团聚体质量百分比与该粒级团聚体有机碳的贡献率均极显著相关,说明在研究团聚体形成、稳定性与有机碳固持关系时,需要进一步考虑团聚体有机碳贡献率,不能只考虑团聚体有机碳含量。因为土壤碳固持能力不仅和各粒级团聚体有机碳含量有关,还与该粒级团聚体在土壤中占比相关。

4 结论

经过 3 年短期定位试验发现,与 100%CF 相比,绿肥根茬还田 4 个处理有利于大团聚体形成和团聚体稳定性提高,随着微团聚体向大团聚体转移,有机碳和全氮也被大团聚体固持;相关分析表

明, >2 mm 大团聚体质量百分比及其有机碳贡献率是引起团聚体稳定性提高的主要原因, 团聚体质量百分比与该粒级团聚体有机碳的贡献率相关极显著。因此, 绿肥根茬还田有利于土壤结构稳定和碳氮积累, 短期内还能减施化肥, 是豫南地区冬闲田利用、培肥土壤及发展畜牧业的有效途径。

参考文献:

- [1] Blanco-Canqui H, Lal R. Mechanisms of carbon sequestration in soil aggregates [J]. *Critical Reviews in Plant Sciences*, 2004, 23: 481-504.
- [2] 刘中良, 宇万太. 土壤团聚体中有机碳研究进展 [J]. *中国生态农业学报*, 2011, 19 (2): 447-455.
- [3] 徐香茹, 汪景宽. 土壤团聚体与有机碳稳定机制的研究进展 [J]. *土壤通报*, 2017, 48 (6): 1523-1529.
- [4] King A W, Post W M, Wullschlegel S D. The potential response of terrestrial carbon storage to changes in climate and atmospheric CO₂ [J]. *Climatic Change*, 1997, 35: 199-227.
- [5] Trumbore S E. Potential responses of soil organic carbon to global environmental change [J]. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*, 1997, 94: 8284-8291.
- [6] Tisdall J M, Oades J M. Organic matter and water-stable aggregates in soils [J]. *Journal of Soil Science*, 1982, 62: 141-163.
- [7] 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 & Biochemistry*, 2000, 32: 2099-2103.
- [8] 刘春增, 刘小粉, 王守刚, 等. 种植绿肥不还田对水稻农艺性状、产量和经济效益的影响 [J]. *中国土壤与肥料*, 2014 (3): 68-71.
- [9] 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.
- [10] 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.
- [11] 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.
- [12] 官会林, 郭云周, 张云峰, 等. 绿肥轮作对植烟土壤酶活性与微生物量碳和有机碳的影响 [J]. *生态环境学报*, 2010, 19 (10): 2366-2371.
- [13] 赵秋, 高贤彪, 宁晓光, 等. 华北地区春玉米-冬绿肥轮作对碳、氮蓄积和土壤养分以及微生物的影响 [J]. *植物营养与肥料学报*, 2013, 19 (4): 1005-1011.
- [14] 刘佳, 张杰, 徐昌旭, 等. 二月兰不同翻压量对土壤肥力的影响 [J]. *干旱地区农业研究*, 2014, 32 (1): 123-127.
- [15] 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.
- [16] 郭晓彦, 宋晓华, 刘春增, 等. 绿肥翻压量和化肥用量对水稻生长、产量及经济效益的影响 [J]. *山地农业生物学报*, 2014, 33 (5): 7-12.
- [17] 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.
- [18] 赵顺才, 商占果, 侯雪坤, 等. 绿肥根茬培肥增产效应的研究 [J]. *北京农业大学学报*, 1990, 16 (增刊): 83-87.
- [19] Kemper W D, Rosenau R C. Aggregate stability and size distribution [M]. *Methods of soil analysis*. Wisconsin: Madison, 1986. 425-442.
- [20] 林洪羽, 周明华, 张博文, 等. 生物炭及秸秆长期施用对紫色土坡耕地土壤团聚体有机碳的影响 [J]. *中国生态农业学报*, 2020, 28 (1): 96-103.
- [21] 邸佳颖, 刘小粉, 杜章留, 等. 长期施肥对红壤性水稻土团聚体稳定性及固碳特征的影响 [J]. *中国生态农业学报*, 2014, 22 (10): 1129-1138.
- [22] 李建华, 李华, 邵春花, 等. 长期施肥对晋东南矿区复垦土壤团聚体稳定性及有机碳分布的影响 [J]. *华北农学报*, 2018, 33 (5): 188-194.
- [23] 王富华, 黄容, 高明, 等. 生物炭与秸秆配施对紫色土团聚体中有机碳含量的影响 [J]. *土壤学报*, 2019, 56 (4): 929-939.
- [24] 刘恩科, 赵秉强, 梅旭荣, 等. 不同施肥处理对土壤水稳定性团聚体及有机碳分布的影响 [J]. *生态学报*, 2010, 30 (4): 1035-1041.
- [25] 樊红柱, 秦鱼生, 陈庆瑞, 等. 长期施肥紫色水稻土团聚体稳定性及其固碳特征 [J]. *植物营养与肥料学报*, 2015, 21 (6): 1473-1480.
- [26] Six J, Paustian K, Elliott E T, et al. Soil structure and organic matter I. Distribution of aggregate-size classes and aggregate-associated carbon [J]. *Soil Science Society of America Journal*, 2000, 64: 681-689.
- [27] Oades J M. Soil organic matter and structural stability: mechanisms and implications for management [J]. *Plant Soil*, 1984, 76: 319-337.
- [28] 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.
- [29] Jastrow J D, Miller R M. Soil aggregate stabilization and carbon sequestration: Feedbacks through organomineral associations [R]. *Office of Scientific & Technical Information Technical Reports*, 1998. 207-223.
- [30] Jastrow J D, Miller R M, Lussenhop J. Contributions of interacting biological mechanisms to soil aggregate stabilization in restored prairie [J]. *Soil Biology & Biochemistry*, 1998, 30: 905-916.
- [31] Guggenberger G, Elliott E T, Frey S D, et al. Microbial

- contributions to the aggregation of a cultivated grassland soil amended with starch [J]. *Soil Biology & Biochemistry*, 1999, 31: 407–419.
- [32] Birgitte N, Leif P. Influence of arbuscular mycorrhizal fungion soil structure and aggregate stability of vertisol [J]. *Plant and Soil*, 2000, 218: 173–183.
- [33] Oades J M, Waters A G. Aggregate hierarchy in soils [J]. *Australian Journal of Soil Research*, 1991, 29: 815–828.
- [34] Six J, Feller C, Denef K, et al. Soil organic matter, biota and aggregation in temperate and tropical soils—effects of no-tillage [J]. *Agronomy*, 2002, 22: 755–775.
- [35] Maysoon M M, Charles W R. Tillage and manure effects on soil and aggregate-associated carbon and nitrogen [J]. *Soil Science Society of America Journal*, 2004, 68: 809–816.
- [36] Yang Z H, Singh B R, Hansen S. Aggregate associated carbon, nitrogen and sulfur and their ratios in long-term fertilized soils [J]. *Soil & Tillage Research*, 2007, 95: 161–171.
- [37] Lee S B, Lee C H, Jung K Y. Changes of soil organic carbon and its fractions in relation to soil physical properties in a long-term fertilized paddy [J]. *Soil & Tillage Research*, 2009, 104: 227–232.
- [38] Yang C M, Yang L Z, Ouyang Z. Organic carbon and its fractions in paddy soil as affected by different nutrient and water regimes [J]. *Geoderma*, 2005, 124: 133–142.
- [39] Nimmo J R, Perkins K S. Aggregates stability and size distribution methods of soil analysis: Part 4 physical methods [M]. Wisconsin, USA: Soil Science Society of America, Madison, Inc, 2002.

Soil aggregation and distributions of carbon and nitrogen as affected by chemical fertilizer applying rate and returning root stubble of green manure

LIU Xiao-fen¹, WANG Qing-tao¹, BAI Shuang-yu¹, LU Yan-qi¹, LIU Chun-zeng^{2*}, CAO Wei-dong³ (1. Hebei University of Engineering, Handan Hebei 056000; 2. Institute of Plant Nutrition and Resource Environment, Henan Academy of Agriculture Sciences, Zhengzhou Henan 450002; 3. Institute of Agricultural Resources and Regional Planning, Chinese Academy of Agricultural Sciences, Beijing 100081)

Abstract: In this study, a three-year experiment was conducted to investigate effects of returning root stubble of green manure and applying chemical fertilizer on soil aggregation and distribution of carbon and nitrogen. Five treatments were set up according to green manure rotation and chemical fertilizer applying rate: 100% chemical fertilizer alone (100%CF); only returning root stubble of green manure (GM); 100% chemical fertilizer plus green manure root stubble (100%CF+GM); 90% chemical fertilizer plus green manure root stubble (90%CF+GM); 80% chemical fertilizer plus green manure root stubble (80%CF+GM). Soil aggregates were separated by wet sieving, and the organic carbon and total nitrogen contents was determined by CN element. The results showed that: (1) 0.25 ~ 2 mm aggregates were dominant in the soil although no significant differences were seen among treatments ($P>0.05$). Compared with 100%CF, 0.05 ~ 0.25 and <0.05 mm aggregates were changed into >2 mm aggregates in the four treatments with green manure root stubble and aggregate stability was also increased, but there were no significant differences among the four treatments; (2) Organic carbon and total nitrogen content increased with the increase of aggregate size. The >0.25 mm aggregates contributed most to soil organic carbon and total nitrogen (the proportion of organic carbon and total nitrogen was 60.1% ~ 82.9% and 66.6% ~ 83.0% respectively), which trend was enhanced by returning green manure root stubble. This indicated that, with the formation of macroaggregates from microaggregates, organic carbon and total nitrogen were simultaneously sequestered within macroaggregates under the four treatments with returning green manure root stubble; (3) Correlation analysis showed that aggregate stability was extremely significantly related to >2 mm aggregate proportion and its organic carbon proportion, and the proportion of each aggregate fraction was extremely significantly positively related to its organic carbon proportion. To sum up, returning green manure root stubble was beneficial to soil structure stability and carbon and nitrogen accumulation and could reduce application rate of chemical fertilizer in a short period of time, which was the recommended way to utilize winter fallow field, improve soil fertility, and develop animal husbandry in the south of Henan province.

Key words: returning green manure root stubble; aggregates; mean weight diameter; organic carbon; total nitrogen