

## 农业废弃物还田对土壤团聚体及土壤 C 和 N 的影响

龙攀 高旺盛 隋鹏 严玲玲 陈源泉\*

(中国农业大学 农学与生物技术学院/循环农业研究中心,北京 100193)

**摘要** 为促进农业废弃物的循环利用,选用秸秆(CS)、猪粪(PM)、酒渣(WR)、沼渣(BR)和菌渣(MR)5种来源于不同系统的农业废弃物进行等碳量还田,外设单施无机肥(CF),不施肥(CK)以及裸地(FL)3个处理。测定了土壤水稳性团聚体、大团聚体包裹的微团聚体、土壤总有机碳(TOC)、全N以及团聚体结合态有机碳、N含量,以探讨农业有机废弃物还田对土壤团聚体结构的稳定性以及土壤C、N的影响。与无机肥处理相比,有机物料还田分别使土壤大团聚体(Ma:0.25~8 mm)、微团聚体(Mi:0.053~0.25 mm)以及大团聚体包裹的微团聚体(Mm:0.053~0.25 mm)含量平均增加34%、8%和34%,土壤团聚体平均重量直径(MWD)提高20%,土壤TOC含量平均增加61%,全N含量增加45%。其中以猪粪和酒渣最有利于团聚体以及土壤TOC、N含量的增加,沼渣效果最差。总体上有机物料还田促进了团聚体的形成和稳定,增加土壤TOC与N浓度,提高了团聚体对TOC和N的保护。

**关键词** 农业废弃物;土壤团聚体;有机碳;全N

中图分类号 S15

文章编号 1007-4333(2014)05-0107-12

文献标志码 A

## Effects of agricultural organic wastes incorporation on soil water-stable aggregates and C,N contents

LONG Pan, GAO Wang-sheng, SUI Peng, YAN Ling-ling, CHEN Yuan-quan\*

(College of Agronomy and Biotechnology/Circular Agriculture Research Center, China Agricultural University, Beijing 100193, China)

**Abstract** Recycling use of agricultural organic wastes resources becomes a big challenging task. In this study, five organic wastes including crop straw (CS), pig manure (PM), wine residue (WR), biogas residue (BR) and mushroom residue (MR) were applied in a field test. Mineral fertilizer (CF), none input (CK) and fallow (FL) were used as controls. Soil water-stable aggregates, microaggregate inside macroaggregates (Mm:0.053–0.25 mm), total organic C (TOC) and N were all measured. The results showed that organic wastes enhanced soil macroaggregates (Ma:0.25–8 mm) by 34%, microaggregates (Mi:0.053–0.25 mm) by 8%, Mm by 34, and the mean weight diameter (MWD) by 20% on average compared with CF. The TOC and N were improved by 61% and 45% as well. The PM and WR of the organic wastes had better but BR lowest impacts. As a whole, organic wastes' incorporation promoted soil aggregation and stabilization, and enhanced TOC and N contents.

**Key words** agricultural organic wastes; soil aggregates; TOC; total N

减少温室气体排放和增加碳汇是应对气候变化的首要途径<sup>[1]</sup>。研究表明少免耕、秸秆及其他有机物料还田等适当的农作措施可以增加农田土壤固碳,其中有机肥或其他物料还田可以增加土壤固碳量达50~150 kg/hm<sup>2</sup>[2-3]。中国是目前世界上农

业废弃物产出量最大的国家<sup>[4]</sup>,每年农作物秸秆总产量约为6.5亿t<sup>[5]</sup>,畜禽粪便产生量约为17.3亿t<sup>[6-7]</sup>,还有约0.457亿t食用菌菌渣<sup>[8]</sup>等有机废弃物,约合7亿t的标准煤<sup>[4-5]</sup>。然而目前这些废弃物并没有得到合理利用,据统计每年仅有15%造肥

收稿日期:2014-02-21

基金项目:国家科技支撑计划循环农业工程项目(2011BAD16B15,2012BAD14B03)

第一作者:龙攀,博士研究生,E-mail:longpan\_lp@126.com

通讯作者:陈源泉,副教授,主要从事循环农业、农田生态健康研究,E-mail:rardc@163.com

还田,剩余部分只有少量作为饲料和工业原料,综合利用率不到40%<sup>[9]</sup>。加强农业有机废弃物还田不仅能促进废弃物的资源化利用,还能促进土壤固碳,提高土壤质量,是循环农业发展的重要途径之一<sup>[10-11]</sup>。

土壤团聚体和土壤有机碳浓度是反映土壤类型、环境、植株类型以及土壤管理措施的综合指标<sup>[12-15]</sup>。前人<sup>[16-18]</sup>研究已证实团聚体的包裹大大降低外源有机质的分解速率,被认为是土壤碳固定的最重要机制<sup>[19]</sup>;另一方面,土壤有机质是团聚体形成的基础,物料加入土壤促进水稳性团聚体的增加<sup>[20-22]</sup>。Aoyama等<sup>[23]</sup>通过18年牛粪还田试验发现牛粪处理有利于土壤较大团聚体对C的保护作用,之后又采用<sup>13</sup>C标记葡萄糖培养试验证实了粪肥促进大团聚体的转化形成矿质结合态复合体<sup>[24]</sup>。然而也有研究认为物料品质并不影响TOC的稳定机制,不过随着物料品质的提高加速了物料分解以及物源C与团聚体的并合<sup>[25]</sup>。

许多研究认为有机质与微团聚体尤其是大团聚体中的微团聚体的并合是土壤有机质长期稳定的重要途径<sup>[18,26-27]</sup>。Six等<sup>[18]</sup>提出的团聚体模型中指出表现为有机质分解的大团聚体转化影响短期的养分循环以及土壤有机碳的长期稳定。国内外许多研究都认为无机养分主要是N素有利于土壤有机碳含

量的增加<sup>[2,28-31]</sup>。不同C/N物料施入后改变了土壤原来的N素水平从而影响团聚体的转化<sup>[32-33]</sup>。一般地,C/N低的物料加快大团聚体的转化,更容易释放出养分;对于C/N较高的物料,活性N含量相对低限制微生物的新陈代谢<sup>[21,34-36]</sup>。但加入外源N后可改变N源不足的状况,促进微生物活动加快有机质的分解<sup>[37]</sup>。因此土壤中的C和N是影响团聚体形成和稳定的关键因素,对土壤固碳起着重要作用。基于此,本研究通过测定土壤水稳性团聚体及团聚体结合C、N含量比较来源于不同系统的有机废弃物还田对土壤团聚体以及土壤TOC和N含量影响并分析不同粒径土壤颗粒对土壤C和N作用,以期为促进有机废弃物还田应用提供理论参考。

## 1 材料与方法

### 1.1 试验地点

试验地点位于河北省中国农业大学吴桥实验站(北纬37°41',东经116°37')。该地区年均降雨量562 mm,主要分布在6—8月份。年平均气温为12.9℃,全年积温( $\geq 0$ ℃)为4 826℃,无霜期201 d,年日照时数为2 724 h。土壤为冲积型盐化潮土,土壤质地为典型粉砂壤土(美国制),具体性质如表1,灌溉水电导率为0.1 S/m,pH8.25。

表1 试验地基础性质

Table 1 Soil properties of the experimental field

土层深度/cm Soil layers deapth	pH	EC/ (S/m)	容重/ (g/cm <sup>3</sup> ) Bulk density	有机碳/ (g/kg) Organiccarbon	机械组成/% Soil texture		
					砂粒 Sand >0.05 mm	粉粒 Silt 0.05~0.002 mm	粘粒 Clay <0.002 mm
0~10	8.2	0.091	1.41	4.5	24	60	16
>10~20	8.2	0.066	1.47	4	31	56	13
>20~30	8.3	0.034	1.57	7	24	66	10

### 1.2 试验设计与方法

试验选用5种来源于不同系统的有机物料配施无机肥进行还田,外加3个无物料还田的处理,共8个处理,分别为:1)麦(玉米)秸+无机肥(CS);2)沼渣+无机肥(BR);3)菌渣+无机肥(MR);4)酒渣+无机肥(WR);5)猪粪+无机肥(PM);6)单施无机肥(CF);7)不施加有机物料和无机肥(CK);8)裸地,不施加有机物料和无机肥也不种植作物(FL),

其中秸秆来自农田系统,沼渣来自能源系统,菌渣来自种植系统,酒渣来自农产品加工系统,猪粪来自畜牧系统。每个处理设置3次重复,随机区组排列。小区面积为4 m×6 m。试验于2010年6月开始种植作物,种植制度为夏玉米-冬小麦轮作。各物料处理配施与无机肥处理等量的N、P和K肥,施用标准为:150、26和124 kg/hm<sup>2</sup>,肥料品种对应为尿素、磷酸二铵和硫酸钾。有机物料等C量投入,按

照循环的理念投入的 C 量用上一季秸秆处理地上部分收获秸秆所含碳为标准进行还田,2010 年夏玉米-冬小麦与 2011 年夏玉米-冬小麦 4 个种植季还 C

量分别为 2 362、2 302、1 220 和 2 841 kg/hm<sup>2</sup>,物料品质见表 2。各季通过物料投入大田的 N 量见表 3。

表 2 还田物料品质

Table 2 Chemical quality parameters of the organic wastes

处理 Treatment	C/%	N/%	C/N	多酚/% Polyphenol	木质素/ % Lignin	木质素/ 全氮 Lignin/N	总溶解性 物质/% Soluble substance	半纤维素/ % Hemicellulose	灰分/% Ash	pH	含水量/% Moisture
PM	28	1.11	26 b	0.69	2.1	1.9 c	63	12.63	9.85	6.1	103
WR	43	3.26	13 c	0.65	3.7	1.1 c	51	30.10	1.36	4.9	12
CS	43	0.90	48 a	0.86	2.9	3.2 b	41	21.98	4.45	6.5	59
MR	24	1.74	14 c	0.70	8.7	5.0 a	72	4.15	4.00	8.4	32
BR	15	1.20	12 c	0.71	2.0	1.6 c	62	10.35	18.86	6.3	77

注:PM-猪粪;WR-酒渣;CS-秸秆;MR-菌渣;BR-沼渣。同一列数字后的不同小写字母代表在 P=0.05 水平上差异显著。下同。

Note:PM,Pig Manure;WR,Wine Residue;CS,Crop Straw;MR,Mushroom Residue;BR,Biogas Residue. Different lowercase letters in the same column indicate significant differences at P=0.05 between treatments. The same as follows.

表 3 各季通过物料还入大田的 N 素量

Table 3 N input from organic wastes in each season

处理 Treatment	2010 年				2011 年		合计 Total		
	玉米		小麦		玉米			小麦	
	Maize season	Wheat season	Maize season	Wheat season	Maize season	Wheat season			
PM	92.57	127.76	79.66	315.31	615.30				
BR	184.66	276.24	195.20	152.20	808.29				
WR	179.82	183.04	101.98	250.25	715.09				
MR	168.71	222.53	76.36	411.95	879.54				
CS	19.76	51.80	10.98	63.92	146.46				

### 1.3 研究方法

1)样品采集于 2012 年 6 月小麦成熟后采集土样。按“w”形分 0~10 和 >10~20 cm 进行 5 点取样,每小区同层土样混合为一个土样。

2)土壤水稳性团聚体。将土样从田间取回以后,用手沿土壤自然破碎面掰开,当含水量达到塑限时,过 8 mm 筛备用。水稳定性团聚体参照 Elliott<sup>[38]</sup>的方法,将 2、0.25 和 0.053 mm 各级套筛放在盛有去离子水的圆桶中,水面没过 2 mm 筛上沿。称取 2 份过 8 mm 风干土 50 g,土样放入置于水桶中的 2 mm 筛目表面,浸泡 5 min 后,上下振荡 2 min(机械式,振幅 3 cm,频率 30 次/min),保证振

荡全过程筛面在水面以下,收集留在筛面的土壤,再取下 2 mm 筛;用同样方法依次收集 0.25 和 0.053 mm 筛面土壤,60 °C 烘干称重,室温下保存备用。即依次分离出超大团聚体(LMa:2~8 mm),较小大团聚体(SMa:0.25~2 mm),微团聚体(Mi:0.053~0.25 mm)三级团聚体以及粉粒和粘粒(S+C:<0.053 mm)组分。利用各级稳定性团聚体质量分数换算平均重量直径(MWD)。

$$MWD = \sum_{i=1}^n \bar{x} \frac{W_i}{W_t} \quad (1)$$

式中: $\bar{x}$  代表第 i 级团聚体的平均粒径,  $W_i$  代表第 i 级团聚体的质量,  $W_t$  代表土样的质量, n 代表团聚

体级数。

3) 大团聚体内微团聚体的分离参照 Chivenge 等<sup>[21]</sup>的方法,在水稳性团聚体初步分级以后,将 LMa 与 SMa 按比例混合。取混合后的大团聚体 (Ma: 0.25~8 mm) 5~6 g 于室温下在 50 mL 去离子水中浸泡 20 min 后,置于 0.25 mm 的网筛上并加上 50 个玻璃珠(半径为 4 mm),在连续水流下于互动摇床上以 250 r/min 速度振荡 5 min,用 0.053 mm 的筛收集流下物质,并用蒸馏水冲洗在 60 °C 下烘干称重,收集于 0.053 mm 筛面上的物质即为大团聚体内的微团聚体 (Mm: 0.053~0.25 mm),收集的流过 0.053 mm 筛的物质为大团聚体内的粘粉粒 (Ms+c; <0.053 mm)。

4) 土壤 C、N 分析将收获后的土壤、水稳性团聚体分离的后各粒径土壤以及微团聚体分离后的土壤进行 C、N 分析。C 含量采用重铬酸钾外热法测定, N 含量采用凯氏定氮法测定。

5) 团聚体结合态 TOC、N 计算。土壤不同粒径结合态 TOC、N 及微团聚体结合态 TOC、N 含量计算按以下公式进行

$$TOC_{xi} = CC_i \times WP_i \quad (2)$$

$$N_{xi} = CN_i \times WP_i \quad (3)$$

式中:  $TOC_{xi}$  代表第  $i$  级团聚体所结合的 TOC 含量(全土), g/kg;  $CC_i$  代表第  $i$  级团聚体分离后的有机碳密度(团聚体土壤), g/kg;  $WP_i$  代表第  $i$  级团聚体的质量分数, %;  $N_{xi}$  是第  $i$  级团聚体所结合的 N 含量(全土), g/kg;  $CN_i$  代表第  $i$  级团聚体分离后的 N 密度(团聚体土壤), g/kg。

#### 1.4 数据分析

对结果用 Excel 进行整理和初步分析,用 SAS 8.2 进行方差分析,多重比较采用 Duncan 检验,显著水平  $P < 0.05$ 。相关分析采用 SAS 8.2 进行。

## 2 结果与分析

### 2.1 不同物料还田对团聚体分级比例和稳定性的影响

由表 4 所示,与无机肥相比,有机物料处理总体上提高了土壤团聚体的稳定性; 0~10 cm 和 >10~20 cm 土壤 MWD 值平均较无机肥分别高 31% 和 9%, 比不施肥分别高出 38% 和 18%, 而较裸地则分别要低 18% 和 6%。这表明有机物料还田对 0~

10 cm 土壤 MWD 的效果强于 >10~20 cm。5 种物料的 MWD 值总体表现为酒渣 > 秸秆 > 菌渣 > 猪粪 > 沼渣, 但仅酒渣与沼渣存在显著性差异 ( $P < 0.05$ )。

各团聚体的质量分数随着团聚体粒径的减小而加大。由于供试土壤为粉砂壤土, 土壤中粉粘粒含量占主要部分, 即物料还田土壤中的 S+C 仍是土壤的主要组成部分。相对于 Mi 和 S+C, 土壤的大团聚体(包括 LMa 和 SMa) 具有较大的变异系数, 表明大团聚体对处理措施的更为敏感。由表 4 可知, 有机物料处理 0~10 和 >10~20 cm 土壤的大团聚体含量平均较无机肥分别高 45% 和 23%, 较不施肥分别高 57% 和 41%。物料间, 酒渣处理的大团聚体含量最高, 平均较秸秆、猪粪、菌渣、沼渣处理高 37%、74%、76% 和 204%。有机物料处理同样促进了土壤 Mi 含量, 0~10 cm 层与 >10~20 cm 层分别比无机肥、不施肥以及裸地高 5%、7%、30% 和 11%、12%、8%。5 种物料的团聚体总量依次为酒渣 > 秸秆 > 猪粪 > 沼渣 > 菌渣。

有机物料促进了大团聚体内的微团聚体含量, 尤其是酒渣处理显著地增加了 Mm 含量(表 4)。总体上, 有机物料处理的 Mm 含量平均较无机肥高 34%, 比不施肥高 59%, 较裸地高 24%。物料的 Mm 含量变化趋势与大团聚体一致, 表明 Mm 含量由大团聚体含量所决定。

### 2.2 不同物料还田对土壤 TOC 及团聚体 TOC 含量的影响

物料还田提高了土壤 TOC 浓度(表 5), 0~10 cm 层土壤 TOC 浓度总体高于 >10~20 cm 层。与无机肥、不施肥和裸地相比, 0~10 cm 层有机物料处理的 TOC 平均浓度分别高出 76%、83% 和 29%, 其中酒渣和猪粪处理显著高于无机肥和不施肥; >10~20 cm 层则分别高出 47%、51% 和 18%, 但差异不显著。不同有机物料处理土壤 TOC 含量差异不显著, 总体表现为猪粪 > 酒渣 > 秸秆 > 菌渣 > 沼渣。土壤不同粒径结合态 TOC 含量具有随着粒径的减小而增加的趋势, 不同处理的大团聚体和 Mi 结合态 TOC 含量的变异系数远大于 S+C 结合态 TOC 变异系数表明处理措施主要影响大团聚体和 Mi, 对 S+C 结合态 TOC 影响不大。

表 4 有机物料还田对土壤团聚体 MWD 及各粒径团聚体及微团聚体分布的影响

Table 4 Effect of organic wastes incorporation on aggregates MWD, aggregate fractions distribution and microaggregate distribution within the macroaggregate

土层深度/cm Soil layers depth	处理 Treatment	全土分级 Dry soil whole soil fraction					大团聚体分级 Dry soil macroaggregate fractions	
		MWD	LMa	SMa	Mi	S+C	Mm	Ms+c
0~10	CS	0.30 ab	3.53 ab	7.07 b	30.82 ab	58.58 bc	3.94 ab	6.66 ab
	PM	0.28 abc	3.10 abc	7.12 b	27.46 bc	62.32 ab	3.93 abc	6.30 b
	WR	0.34 a	3.35 abc	10.64 a	32.89 a	53.12 c	5.72 a	8.27 a
	BR	0.16 c	1.44 c	3.86 c	28.62 ab	66.09 ab	1.57 bcd	3.72 c
	MR	0.23 abc	2.54 bc	5.07 bc	27.97 abc	64.42 ab	2.93 bcd	4.68 bc
	CF	0.20 bc	2.06bc c	4.51c	28.19 abc	65.24 ab	2.63 bcd	3.94 c
	CK	0.19 bc	1.99 bc	4.09 c	27.53 abc	66.39 a	2.21 bcd	3.88 c
	FL	0.32a	4.73 a	4.54 c	22.80 c	68.54a	3.64abcd	5.48bc
	CV	26.33	37.03	39.33	10.28	7.96	38.66	30.22
>10~20	CS	0.30 ab	3.24 ab	8.05 ab	29.31 ab	59.40 abc	3.68 b	7.61 ab
	PM	0.21 bc	2.55 bc	4.52 b	31.40 ab	61.54 ab	2.11 b	4.71 bc
	WR	0.41 a	4.78 a	11.24 a	32.45 ab	51.53 c	7.37 a	9.12 a
	BR	0.14 c	1.07 c	3.49 b	30.07 ab	65.37 ab	1.61 b	2.95 c
	MR	0.30 ab	3.82 ab	5.66 b	28.31 ab	62.21 ab	3.07 b	6.41 abc
	CF	0.25 bc	3.19 ab	4.68 b	27.32 b	64.81 ab	2.74 b	5.14 bc
	CK	0.23 bc	2.79 b	4.08 b	26.98 b	66.15 a	2.31 b	4.56 bc
	FL	0.29 b	6.80 a	8.17 b	28.01 ab	57.02 c	2.15 b	6.59 abc
	CV	29.84	48.00	42.84	6.70	8.08	58.44	33.07

注：表中 LMa、SMa、Mi、S+C 分别代表 2~8 mm 超大团聚体、0.25~2 mm 较小大团聚体、0.053~0.25 mm 微团聚体、<0.053 mm 粒径土壤粉粘粒；Mm 代表包裹在大团聚体内的微团聚体，为 0.053~0.25 mm 粒径部分，Ms+c 代表包裹在大团聚体内的粉粘粒，为 <0.053 mm 粒径部分。下同。

Note: LMa, large macroaggregate, 2~8mm; SMa, small macroaggregate, 0.25~2mm; Mi, microaggregate, 0.053~0.25 mm; S+C, silt and clay, <0.053 mm; Mm, microaggregates-within-macroaggregates, 0.053~0.25 mm; Ms+c, silt and clay-within-macroaggregates, <0.053 mm. The same as below.

有机物料还田促进了 Mm 结合态 TOC 含量的提高，比无机肥平均增加了 72%，比不施肥增加 131%，较裸地增加 30%（表 5）。各物料中猪粪的 Mm 结合态 TOC 含量最高，分别比酒渣、秸秆、菌渣和沼渣高 11%、75%、75% 和 144%；其中猪粪和酒渣显著高于其他物料处理 ( $P < 0.05$ )。

图 1 为土壤 TOC 在不同粒径土壤中的分配比例，如图所示有机物料处理促进了土壤 TOC 在团聚体中的聚集，降低了 S+C 结合态 TOC 所

占比例。与无机肥、不施肥及裸地相比，有机物料处理的 S+C 结合态 TOC 所占比例平均下降了 21%~22%，而表 5 已经表明各物料处理的 S+C 结合态 TOC 含量与无机肥和不施肥无显著差异，表明有机物料主要通过增加团聚体结合态 TOC 含量从而增加土壤 TOC 含量。各物料中以菌渣所含团聚体结合态 TOC 含量最高，其次为猪粪、沼渣以及酒渣，秸秆的团聚体结合态 TOC 量最低。

表5 有机物料还田对土壤 TOC 含量以及土壤各粒径结合态 TOC 含量的影响

Table 5 Effect of organic wastes incorporation on TOC and the soil fraction associated TOC content associated in soil fractions

土层深度/cm Soil layers depth	处理 Treatment	土壤 TOC Soil TOC	土壤不同粒径结合态 TOC 含量(全土)/(g/kg) Soil fraction associated TOC content				大团聚体内不同粒径结合态 TOC 含量(全土)/(g/kg) Macroaggregate fraction associated TOC content	
			LMa	SMa	Mi	S+C	Mm	Ms+c
0~10	CS	5.01 bc	0.24 bc	0.63 bc	1.17 bc	1.76 ab	0.35 b	0.33 cd
	PM	8.16 a	0.44 a	1.37 a	1.27 bc	1.89 ab	0.84 a	0.71 a
	WR	7.04 ab	0.24 bc	0.95 ab	1.56 abc	1.68 b	0.51 ab	0.55 ab
	BR	5.24 bc	0.22 bc	0.84 b	2.16 ab	1.78ab	0.26 b	0.32 cd
	MR	5.90 abc	0.21 bc	0.98 ab	2.46 a	1.83 ab	0.35 b	0.38 bcd
	CF	3.57 c	0.12 c	0.34 c	0.92 c	1.69 b	0.25 b	0.21 d
	CK	3.42 c	0.13 c	0.34 c	0.97 c	1.45 b	0.19 b	0.21 d
	FL	4.86 bc	0.32 ab	0.41 c	0.77 c	2.16 a	0.40 b	0.43 bc
	CV	29.96	42.90	50.27	43.29	11.36	52.28	43.38
>10~20	CS	5.57 a	0.19 abc	0.62 ab	1.03 a	1.76a	0.32 ab	0.41 a
	PM	5.04 a	0.25 abc	0.81 a	1.20 a	1.88a	0.33 ab	0.43 a
	WR	5.44 a	0.26 abc	0.73 a	1.18 a	1.43ab	0.54 a	0.48 a
	BR	4.07a	0.12 c	0.59 ab	1.15 a	1.48ab	0.22 b	0.20 a
	MR	4.40 a	0.28 ab	0.73 a	2.01 a	1.77a	0.32 ab	0.38 a
	CF	3.34 a	0.17 abc	0.32 b	1.15 a	1.63a	0.22 b	0.25 a
	CK	3.24 a	0.15 bc	0.31 b	0.87 a	1.47ab	0.16 b	0.22 a
	FL	4.17 a	0.30 a	0.28 b	0.83 a	1.12b	0.22 b	0.34 a
	CV	20.09	30.75	39.10	30.99	15.55	40.52	30.82

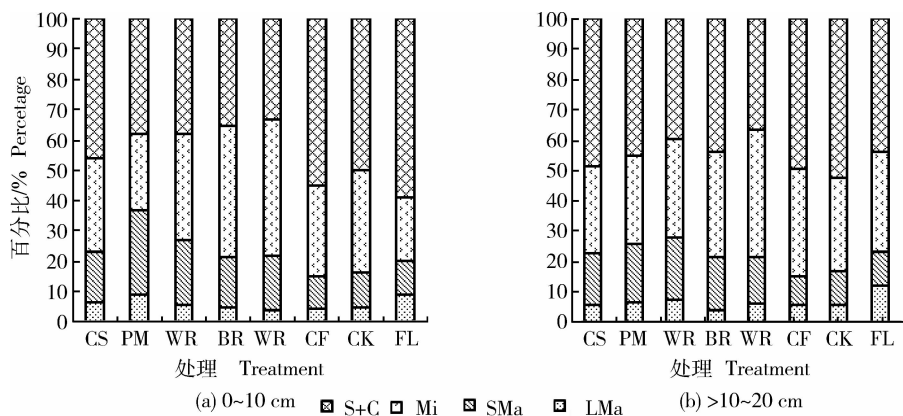


图1 土壤 TOC 在不同粒径土壤中分配比例

Fig. 1 Distribution of TOC in different aggregate fractions

### 2.3 不同物料还田对土壤全 N、团聚体结合态 N 含量的影响

表 6 为各处理土壤全 N 含量、不同粒径结合态 N 含量以及大团聚体内各粒径结合态 N 含量。有机物料处理均不同程度地促进了土壤全 N 含量的增加。平均来看 0~10 cm 层,有机物料还田使土壤全 N 含量比无机肥增加了 35%,比不施肥和裸地分别增加 48%和 35%;>10~20 cm 层使土壤全 N 含量比无机肥增加 55%,比不施肥和裸地高 28%。物料处理的全 N 含量随着物料 C/N 的增加而降低,5 种物料中酒渣最高,依次为酒渣>猪粪>菌渣>沼渣>秸秆,物料之间差异不显著。随着土壤粒径减小,团聚体结合态 N 含量呈增加趋势(表 5)。各处理 S+C 结合态 N 含量是土壤全 N 的主要组成部分,占土壤各粒径总 N 含量的 31%~67%以上;其次为土壤 Mi 结合态 N,占 22%~49%(图 2)。受处

理措施影响较大的部分为 LM<sub>a</sub> 结合态 N 以及 SM<sub>a</sub> 结合态 N。与无机肥相比,有机物料还田的团聚体结合态 N 平均增加了 42%,并比不施肥增加 38%,但较裸地低 38%,说明作物种植是土壤 N 消耗的主要途径。

M<sub>m</sub> 结合态 N 占大团聚体结合态 N 的 26%~57%(0~10 cm)和 14%~59%(>10~20 cm),亚表层(>10~20 cm)总体高于表层(0~10 cm),表明土壤表层 N 活性大于亚表层。有机物料总体上促进了 M<sub>n</sub> 结合态 N 含量增加,0~10 cm 层比无机肥高 81%,比不施肥高 118%,较裸地高 22%;>10~20 cm 层则分别高 62%,92%和 83%。可见有机物料较大程度地促进了 N 素在土壤的积累。其中,酒渣>猪粪>菌渣=秸秆>沼渣;酒渣显著高于菌渣、秸秆和沼渣( $P<0.05$ ),猪粪显著高于沼渣( $P<0.05$ )。

表 6 有机物料还田对土壤全 N、土壤不同粒径结合态 N 含量的影响

Table 6 Effect of organic wastes incorporation on soil total N and N content associated in soil fractions %

土层深度/cm Soil layers depth	处理 Treatment	土壤全 N Soil total N	土壤不同粒径结合态 N 含量(全土)/(g/kg) Soil fraction associated N content				大团聚体内不同粒径结合态 N 含量(全土)/(g/kg) Macroaggregate fraction associated N content	
			LM <sub>a</sub>	SM <sub>a</sub>	Mi	S+C	M <sub>m</sub>	Ms+C
0~10	CS	0.70 abc	0.037 bc	0.073 abc	0.183 a	0.350 a	0.042 bc	0.060 bc
	PM	0.81 a	0.040 b	0.117 a	0.130 a	0.430 a	0.089 a	0.102 a
	WR	0.86 a	0.030 bc	0.100 ab	0.193 a	0.375 a	0.064 ab	0.084 ab
	BR	0.73 ab	0.017 c	0.057 bc	0.227 a	0.207 a	0.028 c	0.043 c
	MR	0.76 ab	0.03 bc	0.107 a	0.147 a	0.390 a	0.039 bc	0.051 bc
	CF	0.57 bc	0.020 abc	0.043 c	0.140 a	0.213 a	0.029 bc	0.034 c
	CK	0.52 c	0.017 c	0.037 c	0.120 a	0.357 a	0.024 c	0.039 c
	FL	0.57 bc	0.073 a	0.093 ab	0.220 a	0.317 a	0.043 bc	0.049 bc
	CV	17.97	55.69	38.71	24.33	24.50	48.75	40.91
>10~20	CS	0.65 ab	0.030 ab	0.070 a	0.220 ab	0.367 a	0.035 b	0.071 ab
	PM	0.71 ab	0.033 ab	0.070 a	0.133 b	0.370 a	0.039 b	0.059 ab
	WR	0.75 a	0.030 ab	0.095 a	0.190 b	0.250 ab	0.074 a	0.076 a
	BR	0.64 ab	0.013 b	0.050 a	0.190 b	0.193 b	0.025 b	0.030 b
	MR	0.65 ab	0.030 ab	0.070 a	0.137 b	0.223 ab	0.038 b	0.058 ab
	CF	0.44 b	0.020 b	0.047 a	0.130 b	0.190 b	0.026 b	0.045 ab
	CK	0.53 ab	0.017 b	0.040 a	0.200 b	0.327 ab	0.022 b	0.041 ab
	FL	0.53 ab	0.057 a	0.113 a	0.420 a	0.270 ab	0.023 b	0.055 ab
	CV	16.94	47.10	35.73	46.59	26.73	48.42	28.15

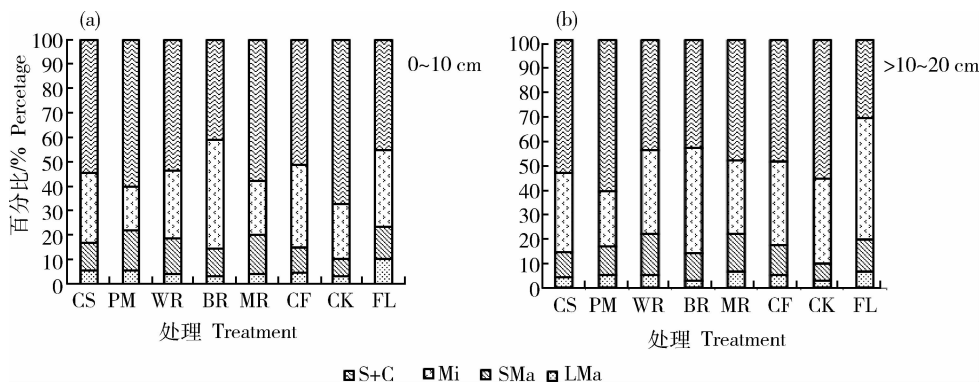


图 2 土壤全 N 在不同粒径土壤中的分配比例

Fig. 2 Distribution of total N in different aggregate fractions

2.4 物料品质对土壤以及团聚体特性的影响

为探讨投入物料的品质对土壤团聚体特性的影响,对物料各组成成分的积累投入量与土壤团聚体性质进行了相关分析。如表 7 所示,土壤结构受物料纤维素投入量影响较大。纤维素投入量显著促进 LMa 含量的增加,从而有利于 MWD 的提高;0~10 cm 纤维素的累积投入量与 MWD 呈显著正相关,但对 >10~20 cm 土壤 MWD 影响不显著。物料中可溶性物质投入量,N 投入量不利于 LMa 的形成,与 LMa 含量呈现显著负相关。对土壤碳库而

言,物料各品质参数与土壤 TOC 无直接相关关系,但纤维素投入量显著促进 LMa 结合态 TOC 含量,同时显著提高 Mm 结合态 TOC 含量。S+C 部分是土壤的主要组成部分,是受物料影响最为显著的部分,S+C 结合态 TOC 含量与半纤维素投入量、可溶性物质、物料 C 投入量以及多酚呈显著正相关关系。等 C 量物料投入条件下,物料各成分投入量对土壤氮库影响不大。N 投入量的增加不利于 LMa 结合态 N 含量的提高,与 >10~20 cm 层 LMa 结合态 N 含量呈显著负相关。

表 7 物料品质与土壤团聚体性状间的关系(相关系数)

Table 7 Correlation between organic wastes quality parameters and aggregate properties (r)

土层深度/cm Soil layers depth	土壤结构 Soil structure	累积投入量 Cumulative input							
		半纤维素 Hemicellulose	纤维素 Cellulose	木质素 Lignin	灰分 Ash	可溶性物质 Soluble substance	C	N	多酚 Polyphenol
0~10	MWD	0.106	0.663**	-0.198	-0.396	-0.432	0.406	-0.405	-0.275
	LMa	0.019	0.800***	-0.250	-0.450	-0.540*	0.384	-0.600*	-0.333
	SMa	0.334	0.348	-0.292	-0.464	-0.511	0.295	-0.212	-0.456
	Mi	0.148	-0.235	0.149	-0.013	0.048	0.094	0.357	-0.041
	S+C	-0.272	-0.426	0.183	0.467	0.498	-0.395	0.185	0.423
>10~20	MWD	0.086	0.415	-0.333	-0.394	-0.469	0.137	-0.479	-0.366
	LMa	-0.314	0.635*	-0.067	-0.613*	-0.565*	0.172	-0.540*	-0.449
	SMa	-0.038	0.233	-0.363	-0.603*	-0.720**	-0.071	-0.478	-0.670**
	Mi	0.130	-0.473	-0.002	0.006	0.070	-0.144	0.322	-0.080
	S+C	0.093	-0.155	0.252	0.652**	0.661**	0.049	0.350	0.667**



表 7(续)

土层深度/cm Soil layers depth	土壤碳库 Soil Carbanpool	累积投入量 Cumulative input							
		半纤维素 Hemicellulose	纤维素 Cellulose	木质素 Lignin	灰分 Ash	可溶性物质 Soluble substance	C	N	多酚 Polyphenol
0~10	TOC	0.005	-0.173	0.259	0.113	0.389	-0.022	0.315	0.228
	LMa	0.114	0.771***	-0.058	-0.139	-0.100	0.421	-0.426	0.075
	SMa	0.353	0.171	0.273	0.187	0.475	0.367	0.354	0.419
	Mi	0.154	-0.273	0.195	0.363	0.513	-0.008	0.413	0.413
	S+C	0.567*	0.138	0.255	0.661**	0.637*	0.666**	0.550*	0.728**
	Mm	0.627*	0.552*	-0.172	0.141	0.161	0.589*	-0.069	0.291
	Ms+c	0.342	0.258	-0.355	-0.127	-0.279	0.183	-0.222	-0.182
10~20	TOC	-0.289	-0.271	0.130	-0.270	-0.067	-0.259	0.034	-0.234
	LMa	-0.230	0.765***	0.165	-0.400	-0.206	0.380	-0.355	-0.092
	SMa	-0.143	0.292	0.117	-0.411	-0.100	-0.046	-0.200	-0.175
	Mi	0.196	-0.062	-0.040	0.036	0.167	0.001	0.154	0.091
	S+C	0.522*	0.220	0.283	0.474	0.577*	0.616*	0.489	0.618*
	Mm	0.439	0.548*	-0.107	-0.271	-0.235	0.638*	-0.054	-0.135
	Ms+c	-0.262	0.308	-0.286	-0.504	-0.544*	-0.246	-0.626*	-0.491

土层深度/cm Soil layers depth	土壤氮库 Soil nitragen library	累积投入量 Cumulative input							
		半纤维素 Hemicellulose	纤维素 Cellulose	木质素 Lignin	灰分 Ash	可溶性物质 Soluble substance	C	N	多酚 Polyphenol
0~10	全 N	-0.111	-0.424	-0.105	-0.291	-0.132	-0.452	0.045	-0.326
	LMa	0.254	0.474	0.003	0.174	0.142	0.379	-0.150	0.281
	SMa	0.232	0.059	0.097	0.349	0.346	0.255	0.174	0.385
	Mi	0.504	-0.275	-0.070	0.400	0.197	0.281	0.398	0.222
	S+C	-0.070	-0.127	0.241	0.123	0.281	-0.028	0.266	0.202
	Mm	0.646**	0.165	-0.256	0.288	0.146	0.397	0.085	0.244
	Ms+c	0.621*	0.286	-0.336	0.012	-0.133	0.454	-0.017	-0.024
10~20	全 N	-0.015	-0.423	-0.424	-0.471	-0.495	-0.506	-0.154	-0.646**
	LMa	-0.093	0.441	-0.207	-0.204	-0.226	0.026	-0.519*	-0.118
	SMa	0.158	0.109	-0.228	0.019	-0.051	-0.006	-0.263	-0.004
	Mi	0.056	-0.365	-0.226	0.074	-0.211	-0.183	-0.008	-0.200
	S+C	0.059	0.376	0.312	0.059	0.286	0.344	0.074	0.303
	Mm	0.389	-0.064	-0.253	-0.096	-0.238	0.195	0.080	-0.219
	Ms+c	0.203	0.336	-0.453	-0.328	-0.445	0.048	-0.478	-0.355

注：表中，“\*”代表在  $P < 0.05$  水平显著相关，“\*\*”代表在  $P < 0.01$  水平显著相关，“\*\*\*”代表在  $P < 0.001$  水平显著相关 ( $n=15$ )。下表同。

Note: “\*” significant correlation at  $P < 0.05$ , “\*\*” significant correlation at  $P < 0.01$ , “\*\*\*” significant correlation at  $P < 0.001$ . ( $n=15$ ). The same as below.

## 2.5 不同粒径团聚体对土壤 TOC 及全 N 的影响

为进一步分析不同粒径团聚体与土壤 C、N 含量的关系,选择了团聚体性状与土壤 TOC、N 浓度进行相关分析,结果见表 8。如表 8 所示,土壤 TOC 含量受 S+C 粒径土壤影响大,与 S+C 含量呈负相关关系,与 S+C 内的 TOC 密度呈极显著正相关,与 S+C 结合态 TOC 含量显著正相关;此外,与 SMa 结合态 TOC 含量极显著相关,与 LMa 结合态 TOC 含量显著相关。可见土壤 TOC 浓度主要受土壤粘粉粒(S+C)中有机碳的密度以及较小大团聚体(SMa)结合的 TOC 含量决定,该结果与李辉信等<sup>[39]</sup>的结果相似,这是因为土壤粘粉粒是试验所在地土壤的主要组成部分,其 TOC 浓度的增加更有

利于整土 TOC 浓度的提高;而大团聚体最容易受到处理措施的影响,尤其是较小大团聚体具有比超大团聚体(LMa)更高的质量分数和更大 TOC 密度,其对土壤 TOC 的贡献也更突出。土壤 LMa、SMa 和 Mi 含量对全 N 含量影响不显著,但与其存在负相关关系,这是由于土壤 N 含量越高越能促进微生物对有机质的分解,从而加速团聚体的降解<sup>[37]</sup>。土壤全 N 含量受 LMa 以及 SMa 中 N 密度影响显著,与 SMa 结合态 N 含量呈显著正相关。大团聚体是对处理措施最为敏感的部分,外界措施主要通过作用于大团聚体而产生影响,因此大团聚体尤其是较小大团聚体是影响土壤 N 含量主要因素。

表 8 团聚体分级后各粒径相关性状与土壤 TOC、全 N 含量的相关性分析(相关系数)

Table 8 Correlation between aggregate properties and TOC, and total N (*r*)

项目 Items	团聚体质量分数				团聚体内 TOC 密度				团聚体结合态 TOC 含量			
	Aggregate weight proportion				TOC concentration in aggregate				Aggregate associated TOC content			
	LMa	SMa	Mi	S+C	LMa	SMa	Mi	S+C	LMa	SMa	Mi	S+C
TOC	0.190	0.284	0.440	-0.409	0.089	0.187	0.177	0.712	0.405	0.611	0.239	0.455
	ns	ns	*	*	ns	ns	ns	***	*	***	ns	*
项目 Items	团聚体质量分数				团聚体内 TOC 密度				团聚体结合态 TOC 含量			
	Aggregate weight proportion				TOC concentration in aggregate				Aggregate associated TOC content			
	LMa	SMa	Mi	S+C	LMa	SMa	Mi	S+C	LMa	SMa	Mi	S+C
全 N	-0.332	-0.101	-0.019	0.145	0.447	0.469	0.146	-0.017	0.178	0.421	0.124	0.050
	ns	ns	ns	ns	*	**	ns	ns	ns	*	ns	ns

## 3 讨论

1) 本研究表明有机物料还田增加了土壤大团聚体含量,提高土壤团聚体的稳定性,说明有机物料还田能改良农田土壤。这是由于土壤有机质促进土壤团聚体的形成<sup>[39]</sup>。同时本研究发现无机肥处理的 MWD 值大于基础地力表明农田施用无机肥也对土壤改良也有一定作用,这是由于无机肥促进了作物的生长,增加了留在土壤中的残茬与根系量,增加了土壤有机质的来源。有机物料由于品质不同,对团聚体稳定性的提高幅度不尽一致。前人<sup>[21,34-35]</sup>研究认为 C/N 低的物料加快大团聚体的转化,而 C/N 较高的物料更能增加大团聚体的稳定性。在本研究中,物料 C/N 对团聚体的稳定性没有明显的影响,这是因为团聚体的形成是微生物、作物根系、物料作

用的结果<sup>[20,40]</sup>。在等 C 量投入的基础上,配施外源无机肥改变了物料带入的 C/N,削弱了物料本身 C/N 对团聚体形成的影响。在投入物料的组成成分中,纤维素和可溶性物质是影响土壤结构主要因素,这与 Puttasso 等<sup>[41]</sup>所得的团聚体稳定性受抗降解性比较强的木质素、多酚影响比较大的结论不一致。主要由于与其长期不动土试验相比,本研究每个作物季都进行了挠动,对原有的土壤结构进行破坏再添加新的物料,因而更易受到抗降解能力较弱的纤维素、可溶性物质的影响。土壤中的被大团聚体包裹的微团聚体是土壤稳定结构的重要组成部分<sup>[18]</sup>,本研究结果表明有机物料还田增加了大团聚体内微团聚体的含量,可见有机物料对维持土壤的长期稳定性也具有积极作用。

2) 有机物料还田是土壤有机质重要来源,进入

土壤后势必会造成土壤 TOC 含量增加<sup>[39]</sup>。本研究由于供试土壤的基础 TOC 含量比较低, 2 年有机物料还田对土壤总有机碳含量的提升作用比较明显。本研究中秸秆处理使土壤 TOC 含量增加 17.6%, 这与黄不凡<sup>[42]</sup>的 2 年麦秸还田 21% 的有机碳增幅相近, 并在曾木祥等<sup>[43]</sup>总结的华北农区秸秆还田下有机碳增幅 0.174 ~ 1.74 g/kg 内。从土壤 TOC 含量比较, 猪粪和酒渣效果优于其余物料, 沼渣效果最差; 但根据团聚体有机质稳定性粘粉粒结合的 > 微团聚体结合的 > 大团聚体内而微团聚体外 > 团聚体外游离的有机碳<sup>[44]</sup>来比较, 猪粪、菌渣和沼渣的土壤 TOC 稳定性高于秸秆、酒渣。

3) 尽管通过物料带入的总 N 量相差较大, 物料之间的土壤 N 库差异并不显著。前人<sup>[45]</sup>研究表明与 C/N 较低的物料相比, C/N 高的物料配施无机肥能降低 N 损失但不会影响 N 素的活性而减少作物对 N 的吸收。因而物料品质对保留在土壤中的 N 含量影响不显著。本研究中半纤维素含量与 Mm、Ms+c 结合态 N 含量显著正相关, 这主要由于物料的投入对大团聚体的影响最大, 因而有利于土壤大团聚体形成的成分都会间接对 Mm 以及 Ms+c 产生影响, 尤其是在较短时期内促进大团聚体形成的物质。

4) 试验地所在区域为华北平原, 粘粉粒是土壤组成的主要部分, 试验初始时仅有 30% 左右为团聚体。来自不同系统的有机废弃物还田均不同程度地增加了土壤团聚体含量, 同时团聚体内 TOC 及 N 的浓度普遍高于粘粉粒中的浓度, 可见有机废弃物还田能够促进土壤的固碳。另外, 随着国家对农业加工业、畜牧业、养殖业以及沼气工程的重视, 与农业相关的产业将进一步发展, 来源于农田系统外的有机废弃物量将更多。适当的有机废弃物还田措施将增加有机碳在土壤中的保留, 促进养分循环, 提高农田生产能力。

## 4 结 论

有机物料还田能提高土壤团聚体含量, 增加团聚体的稳定性, 有效提高土壤 TOC 和全 N 含量。5 种物料中, 酒渣、秸秆最有利于土壤团聚体形成和稳定; 酒渣、猪粪最能促进土壤 TOC 和全 N 的增加; 猪粪和菌渣对 TOC 在土壤稳定保存最有效果。土壤粘粉粒是决定土壤 TOC、全 N 含量的基础, 大团聚体容易受外界措施的作用是影响土壤 TOC、全 N 含量的关键部分。

## 参 考 文 献

- [1] IPCC. IPCC Fourth Assessment report: Climate change 2007, chapter 4[EB/OL]. [http://www.ipcc.ch/publications\\_and\\_data/ar4/syr/zh/main.html](http://www.ipcc.ch/publications_and_data/ar4/syr/zh/main.html)
- [2] 孟磊, 丁维新, 蔡祖聪, 等. 长期定量施肥对土壤有机碳储量和土壤呼吸影响[J]. 地球科学进展, 2005, 20(6): 687-692
- [3] Lal, R. Soil carbon sequestration impacts on global climate change and food security[J]. Science, 2004, 304: 1623-1627
- [4] 孙永明, 李国学, 张夫道, 等. 中国农业废弃物资源化现状与发展战略[J]. 农业工程学报, 2005, 21(8): 169-173
- [5] 孙振钧. 中国生物质产业及发展取向[J]. 农业工程学报, 2004, 20(5): 1-5
- [6] 李国学, 张福锁. 固体废物堆肥化与有机复混肥生产[M]. 北京: 化学工业出版社, 2000
- [7] 彭靖. 对我国农业废弃物资源化利用的思考[J]. 生态环境学报, 2009, 18(2): 794-798
- [8] 卫智涛, 周国英, 胡清秀. 食用菌菌渣利用研究[J]. 现状中国食用菌, 2010, 29(5): 3-6, 11
- [9] 刘贞先, 伊晓路, 孙立, 等. 中国生物质废弃物利用现状分析[J]. 环境科学与管理, 2007, 32(2): 104-106
- [10] 高旺盛, 陈源泉, 梁龙. 论发展循环农业的基本原理与技术体系[J]. 农业现代化研究, 2007, 28(6): 731-734
- [11] 高旺盛. 坚持走中国特色的循环农业科技创新之路[J]. 农业现代化研究, 2010, 31(2): 129-133
- [12] Martens D A, Frankenberger W T. Modification of infiltration rates in an organic-amended irrigated [J]. Agron J, 1992, 84: 707-717
- [13] Nyamangara J, Piha M I, Kirchmann H. Interactions of aerobically decomposed cattle manure and nitrogen fertilizer applied to soil[J]. Nutr Cycl Agroecosys, 1999, 54: 183-188
- [14] Martens D A. Management and crop residue influence soil aggregate stability [J]. J Environ Qual, 2000, 29: 723-727
- [15] Bronick C J, Lal R. Manuring and rotation effects on soil organic carbon concentration for different aggregate size fractions on two soils in northeastern Ohio, USA [J]. Soil TillRes, 2005, 81: 239-252
- [16] Oades J M. Soil organic matter and structural stability: Mechanisms and implications for management [J]. Plant Soil, 1984, 76: 319-337
- [17] Elliott E T, Coleman D C. Let the soil work for us [J]. Ecological Bulletins, 1988, 39: 23-32
- [18] Six J, Elliott E T, Paustian K. Soil macroaggregate turnover and microaggregate formation: A mechanism for C sequestration under no-tillage agriculture [J]. Soil Biol Biochem, 2000, 32: 2099-2103
- [19] 刘恩科, 赵秉强, 梅旭荣, 等. 不同施肥处理对土壤水稳性团聚体及有机碳分布的影响[J]. 生态学报, 2010, 30(4): 1035-1041
- [20] Gentile R, Vanlauwe B, Kavoo A, et al. Residue quality and N

- fertilizer do not influence aggregate stabilization of C and N in two tropical soils with contrasting texture [J]. *Nutr Cycl Agroecosyst*, 2010, 88: 121-131
- [21] Chivenge P, Vanlauwe B, Gentile R, et al. Organic resource quality influences short-term aggregate dynamics and soil organic carbon and nitrogen accumulation [J]. *Soil Biol Biochem.*, 2011, 43: 657-666
- [22] 李小刚, 崔志军, 王玲英. 施用秸秆对土壤有机碳组成和结构稳定性的影响[J]. *土壤学报*, 2002, 39(3): 421-428
- [23] Aoyama M, Angers D A, N'Dayegamiye A, et al. Protected organic matter in water-stable aggregates as affected by mineral fertilizer and manure applications [J]. *Can J Soil Sci.* 1999, 79: 419-425
- [24] Aoyama M, Angers D A, N'Dayegamiye A, et al. Metabolism of <sup>13</sup>C-labeled glucose in aggregates from soils with manure application [J]. *Soil Biology & Biochemistry*, 2000, 32: 295-300
- [25] Gentile R, Vanlauwe B, Six J. Litter quality impacts short- but not long-term soil carbon dynamics in soil aggregate fractions [J]. *Ecol Appl*, 2011, 21: 695-703
- [26] Angers D A, Recous S. Decomposition of wheat straw and rye residues as affected by particle size [J]. *Plant Soil*, 1997, 189: 197-203
- [27] Fonte S J, Quansah E Y P O G W, Vanlauwe B, et al. Fertilizer and residue quality effects on organic matter stabilization in soil aggregates [J]. *Soil Sci Soc Am J*, 2009, 73: 961-966
- [28] 陈安磊, 谢小立, 陈惟财, 等. 长期施肥对红壤稻田耕层土壤碳储量的影响[J]. *环境科学*, 2009, 30(5): 1267-1272
- [29] 马力, 杨林章, 肖和艾, 等. 施肥和秸秆还田对红壤水稻土有机碳分布变异及其矿化特性的影响[J]. *土壤*, 2011, 43(6): 883-890
- [30] Nadelhoffer K J, Emmett B A, Gundersen P, et al. Nitrogen deposition makes a minor contribution to carbon sequestration in temperate forests [J]. *Nature*, 1999, 398: 145-148
- [31] Christensen B T, Johnston A E. Soil organic matter and soil quality-lessons learned from long-term field experiments at Askov and Rothamsted. [C]// Gregorich E G, Carter M REds. *Soil Quality for Crop Production and Ecosystem Health*. Amsterdam: Elsevier, 1997: 399-430
- [32] Chivenge P, Vanlauwe B, Gentile R, et al. Organic and mineral input management to enhance crop productivity in central Kenya [J]. *Agron J*, 2009, 101: 1266-1275
- [33] Powlson D S, Bhogal A, Chambers B J, et al. The potential to increase soil carbon stocks through reduced tillage or organic material additions in England and Wales; A case study [J]. *Agr Ecosyst Environ*, 2012, 146: 23-33
- [34] Bossuyt H, Denef K, Six J, et al. Influence of microbial populations and residue quality on aggregate stability [J]. *Appl Soil Ecol*, 2001, 16: 195-208
- [35] Six J, Carpentier A, Kessel C, et al. Impact of elevated CO<sub>2</sub> on soil organic matter dynamics as related to changes in aggregate turnover and residue quality [J]. *Plant Soil*, 2001, 234: 27-36
- [36] Palm C A, Gachengo C N, Delve R J, et al. Organic inputs for soil fertility management in tropical agroecosystems: Application of an organic resource database [J]. *Agr Ecosyst Environ*, 2001, 83: 27-42
- [37] Vanlauwe B, Wendt J, Diels J. Combined application of organic matter and fertilizer [C]// Tian G, Ishida F, Keatinge J D H, eds. *Sustaining Soil Fertility in West Africa*. SSSA, American Society of Agronomy, Madison, WI, 2001: 247-279
- [38] Elliott E T. Aggregate structure and carbon, nitrogen, and phosphorus in native and cultivated soils [J]. *Soil Sci Soc Am J*, 1986, 50: 627-633
- [39] 李辉信, 袁颖红, 黄欠如, 等. 不同施肥处理对红壤水稻土团聚体有机碳分布的影响[J]. *土壤学报*, 2006, 43(3): 422-429
- [40] 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 Sci Soc Am J*, 2005, 69: 1078-1085
- [41] Puttaso A, Vityakon P, Rasche F, et al. Does organic residue quality influence carbon retention in a tropical sandy soil [J]. *Soil Sci Soc Am J*, 2013, 77: 1001-1011
- [42] 黄不凡. 绿肥、麦秸还田培养地力的研究 I 对土壤有机质和团聚体性状的影响[J]. *土壤学报*, 1984, 21(2): 113-122
- [43] 曾木祥, 王蓉芳, 彭世琪, 等. 我国主要农区秸秆还田试验总结 [J]. *土壤通报*, 2002, 33(5): 336-339
- [44] Carter M R. Soil quality for sustainable land management [J]. *Agronomy Journal*, 2002, 94: 38-47
- [45] Gentile R, Vanlauwe B, Kessel C, et al. Managing N availability and losses by combining fertilizer-N with different quality residues in Kenya [J]. *Agr Ecosyst Environ*, 2009, 131: 308-314

责任编辑: 王燕华