

# 添加水稻秸秆对不同类型土壤团聚体 分布和稳定性的影响

刘哲<sup>1,2</sup>, 韩霖昌<sup>1,2</sup>, 陈茜<sup>1,2</sup>, 余正洪<sup>3</sup>, 张卫华<sup>1,2</sup>, 高红贝<sup>1,2</sup>

(1. 陕西省土地工程建设集团有限责任公司, 西安 710075;

2. 国土资源部退化及未利用土地整治工程重点实验室, 西安 710075; 3. 中国科学院南京土壤研究所, 南京 210008)

**摘要:**以不同类型土壤(红壤、潮土、砂姜黑土)为研究对象,通过室内模拟试验,研究水稻秸秆添加对3种类型土壤水稳性团聚体分布及稳定性的影响。培养温度为28℃,培养时间为120 d。研究表明:未添加水稻秸秆的3种类型土壤(对照组),微团聚体( $<250\ \mu\text{m}$ )占主体, $>2\ 000\ \mu\text{m}$ 粒级水稳性团聚体含量最少。与对照相比,添加水稻秸秆后促使 $>2\ 000\ \mu\text{m}$ 粒级水稳性团聚体显著增加( $p<0.05$ ),大团聚体( $>250\ \mu\text{m}$ )占主体。红壤、潮土、砂姜黑土试验组 $>250\ \mu\text{m}$ 水稳性团聚体比对照组增加的比例分别为35.6%,41.1%,22.0%,潮土的增加比例最为明显。3种类型土壤水稳性团聚体的平均重量直径(MWD),几何平均直径(GMD)显著增加( $p<0.05$ ),分形维数( $D$ )值、土壤不稳定团粒指数( $E_{\text{LT}}$ )显著减少,土壤结构和抗侵蚀能力明显得到改善,潮土的稳定性指标变化最为明显,团聚体结构改善效果最好。3种类型土壤 $>0.25\ \text{mm}$ ( $R_{0.25}$ )水稳性团聚体含量与GMD,MWD间呈极显著正相关关系( $p<0.001$ )。

**关键词:**水稳性团聚体;土壤类型;团聚体稳定性;水稻秸秆

**中图分类号:**S152.4<sup>+</sup>81

**文献标识码:**A

**文章编号:**1005-3409(2017)06-0167-05

## Effects of Application of Rice Straw on Distribution and Stability of Aggregates in Different Soil Types

LIU Zhe<sup>1,2</sup>, HAN Jichang<sup>1,2</sup>, CHEN Qian<sup>1,2</sup>, YU Zhenghong<sup>3</sup>, ZHANG Weihua<sup>1,2</sup>, GAO Hongbei<sup>1,2</sup>

(1. Shaanxi Province Land Engineering Construction Group, Xi'an 710075, China;

2. Key Laboratory of Degraded and Unused Land Consolidation Engineering, Ministry of Land and Resources of China, Xi'an 710075, China; 3. Institute of Soil Science, Chinese Academy of Sciences, Nanjing 210008, China)

**Abstract:** An indoor incubation experiment of red soil, aquatic soil and mortar black soil under incubation at 28℃ for 120 days was conducted to study effects of application of rice straw on distribution and stability of water-stable aggregates in three soil types. The results showed that the contents of microaggregates( $<250\ \mu\text{m}$ ) in three soil types with no-application of rice straw were most and the contents of  $>2\ 000\ \mu\text{m}$  macroaggregates were the least, compared with the control,  $>2\ 000\ \mu\text{m}$  waterstable aggregates significantly increased under the application of rice straw ( $p<0.05$ ), while the macroaggregates ( $>250\ \mu\text{m}$ ) became the most, the macroaggregates ( $>250\ \mu\text{m}$ ) of red soil, aquatic soil and mortar black soil increased by 35.6%, 41.1% and 22.0%, respectively, compared with the control, the increasing proportion of aquatic soil was the most. At the same time, the mean weight diameter (MWD) and geometric mean diameter (GMD) of water-table aggregates significantly increased ( $p<0.05$ ), the value of fractal dimension ( $D$ ) and unstable aggregate index ( $E_{\text{LT}}$ ) were lower than the control, the structure and erosion resistance of three soil types were obviously improved, while the improvement effects of stability index and aggregate structure of the aquatic soil were the best. The macroaggregates ( $>250\ \mu\text{m}$ ) and GMD,MWD had the significant positive correlation ( $p<0.001$ ).

**Keywords:** water-stable aggregates; soil type; aggregate stability; rice straw.

收稿日期:2016-10-09

修回日期:2016-11-12

资助项目:国家科技支撑计划课题(2014BAL01B01);国土资源部公益性行业科研专项项目(2014111008-3);陕西省重点科技创新团队计划项目(2016KCT-23)

第一作者:刘哲(1987—),男,陕西宝鸡人,硕士,研究方向为土壤结构和土壤质量改良。E-mail:liuzhe168@126.com

通信作者:韩霖昌(1966—),男,陕西渭南人,研究员,博士,主要研究方向为土地工程及土地资源利用。E-mail:405009048@qq.com

土壤团聚体作为土壤的基本结构单元和重要组成部分,对土壤的许多理化性质具有重大影响,其形成、特性以及作用功能很复杂,既受土壤本身物质组成的影响,也受人为活动等因素的影响<sup>[1-3]</sup>。不同粒级的团聚体在营养元素的保持、供应及转化能力等方面发挥着不同的作用,土壤肥力水平的高低,不仅取决于大、小粒级团聚体自身的作用,而且与它们的组成比例也有关<sup>[4]</sup>。

土壤团聚体的稳定性是指团聚体抵抗外力作用或外部环境变化而保持其原有形态的能力,包括水稳定性、力学稳定性、化学稳定性和生物稳定性等<sup>[5]</sup>,主要是依靠有机的、无机的或有机无机复合的胶结物质,增加有机质能够有效地提高土壤的团聚能力,植物残体作为土壤有机物质的主要来源,施入土壤腐解以后对团聚体的形成产生一定的激发效应<sup>[6-7]</sup>。团聚体的数量和大小是决定土壤侵蚀、压实、板结等物理过程速度和幅度的关键指标,其稳定性也是反映土壤结构状况的重要指标之一,它不仅在调节土壤肥力、维持土地生产力方面具有重要作用,而且与土壤的抗蚀能力及环境质量有密切关系<sup>[8-10]</sup>。

国内外学者把土壤团聚体的水稳性作为评价土壤物理性质及土壤结构的重要指标,认为土壤的结构特性直接影响着土壤肥力及抗侵蚀性,因此提高土壤团聚体的稳定性以及团聚体的数量和质量,一直是农业可持续发展研究的重要方向<sup>[11-12]</sup>。以往研究秸秆添加对团聚体稳定性的影响多集中在一种类型土壤上,如侯晓娜等<sup>[13]</sup>研究了秸秆添加对砂姜黑土团聚体组成、稳定性的影响,结果显示秸秆添加显著增加了 $>2\ 000\ \mu\text{m}$ 团聚体含量,张鹏等<sup>[14]</sup>研究了秸秆还田对宁南半干旱地区土壤团聚体特征的影响,结果表明秸秆还田有利于提高土壤水稳性团聚体结构水平,增加土壤稳定性并改善土壤结构状况,关松等<sup>[15]</sup>研究了黑土添加玉米秸秆对团聚体组成和分布的影响,取得了一定成果,但是对比研究秸秆添加对不同类型土壤团聚体的组成及稳定性的差异性研究鲜有报道,难以区分秸秆添加对不同类型土壤团聚体数量及稳定性影响的差异。为此本研究以 3 种类型土壤为研究对象,通过室内培养对比试验,研究水稻秸秆添加对 3 种不同类型土壤水稳性团聚体形成、分布及稳定性的差异性影响,以期为培肥土壤,改善土壤结构,提高土壤抗侵蚀性提供理论依据。

## 1 材料与方法

### 1.1 试验区概况

红壤采样区位于中国科学院江西鹰潭红壤生态试

验站(东经  $116^{\circ}55'$ ,北纬  $28^{\circ}15'$ ),土壤为第四纪红黏土发育而成的红壤,母岩矿物类型主要以铁铝氧化物和 1:1 黏土矿物为主;潮土采样区位于河南封丘生态试验站(东经  $114^{\circ}24'$ ,北纬  $35^{\circ}00'$ ),土壤类型主要为黄河沉积物发育的潮土,矿物类型主要为碳酸钙含量比较高的 2:1 型黏土矿物;砂姜黑土采样区位于安徽省濉溪杨柳试验点(东经  $116^{\circ}77'$ ,北纬  $33^{\circ}62'$ ),矿物类型主要以蒙脱石为主的 2:1 型黏土矿物。

### 1.2 试验材料

于 2014 年 9 月采集试验站土壤,供试土样采集深度均为 0—30 cm,5 个样点混匀后四分法取样。采集的土壤除去粗的植物残体和大的砂砾等杂质,带回实验室于阴凉通风处自然风干,然后沿自然脆弱带轻轻掰开,使其能通过 2 mm 筛子,土壤的基本性质见表 1。本试验所用秸秆样品为温室栽培水稻秸秆,并采用脉冲标记法获取  $^{13}\text{C}$  标记秸秆,在播种 115 d 后,获取水稻地上部分,在  $60^{\circ}\text{C}$  烘干,粉碎过 0.25 mm 筛,使水稻秸秆搅拌均匀的分布于供试土壤中,其 SOC 含量为  $396.5\ \text{g/kg}$ 。

表 1 土壤基本理化性质

土壤类型	砂粒/ %	粉粒/ %	黏粒/ %	有机碳/ ( $\text{g}\cdot\text{kg}^{-1}$ )	土壤 pH 值
红壤	36	20	44	$9.86\pm 0.23$	$4.62\pm 0.01$
潮土	23	32	45	$5.38\pm 0.86$	$8.68\pm 0.07$
砂姜黑土	30	33	37	$10.45\pm 0.33$	$6.34\pm 0.02$

### 1.3 培养方法

本试验采用两种处理:对照组(不加秸秆)和试验组(加  $1\%\ ^{13}\text{C}$  秸秆),每个处理设置 3 个重复。将过 2 mm 筛的红壤 300 g 于 2 L 的塑料培养瓶中,加入  $3\ \text{g}\ ^{13}\text{C}$  标记水稻秸秆,充分混匀后,加入蒸馏水至土壤最大持水量的 70%,并在  $28^{\circ}\text{C}$  恒温培养箱中培养。同时做不加秸秆的对照试验。培养期间每天通气,并每周称重以保持土壤含水分。在 120 d 时取 3 个重复的各处理土壤,用以测定土壤团聚体稳定性(湿筛法)。

### 1.4 测定方法

土壤有机碳采用重铬酸钾外加热法;土壤 pH 值采用电位法(水土比 2.5:1);土壤黏粒和粉粒含量采用吸管法测定<sup>[16]</sup>;土壤团聚体的分布状况和稳定性采用湿筛法。采用 2 000,250,53  $\mu\text{m}$  的分样筛获得 $>2\ 000$ ,250~2 000,53~250 和 $<53\ \mu\text{m}$  的土壤团聚体。具体步骤为:称取 50 g 鲜土样置于 2 000,250  $\mu\text{m}$  分级套筛上,在去离子水中浸泡 5 分钟,然后采用自动筛分仪上下振动筛分,每次振动幅度为 3 cm,频率 30 次/min,上下震荡 5 min。然后将过 2 000,250  $\mu\text{m}$  的土壤悬液过 53  $\mu\text{m}$ ,将过 53  $\mu\text{m}$  的

土壤悬液采用离心法得到 $<53\text{ }\mu\text{m}$ 的土壤团聚体。筛分 $>2\text{ }000,250\sim2\text{ }000\text{ }\mu\text{m}$ 的土壤团聚体时,去掉水表面漂浮的植物残体等。将所获得的各级团聚体放入已称重的铝盒中,于 $60\text{ }^{\circ}\text{C}$ 烘干,然后称重,记为 $W_{uit}$ ,然后再加入 $10\text{ mol/L}$ 六偏磷酸钠溶液 $10\text{ ml}$ 并用玻璃棒搅拌分散,置于相应孔径筛子震荡,将留在筛子上的沙粒烘干并称重,记为 $W_{uis}$ ,再计算土壤团聚体质量分布。

1.5 计算方法

各粒级团聚体重量 $W_{ui}$ 由公式(1)计算获得:

$$W_{ui}=W_{uit}-W_{uis}$$
(1)

$W_i$ 为 $i$ 粒级团聚体重量所占的比例。

$$W_i=\frac{W_{ui}}{50}\times100\%$$
(2)

描述土壤团聚体分形特征可采用平均重量直径(mean weight diameter,MWD),几何平均直径(geometric mean diameter,GMD),土壤不稳定团粒指数( $E_{LT}$ )<sup>[17-18]</sup>,计算公式如下:

利用各粒级团聚体数据,计算大于 $0.25\text{ mm}$ 团聚体 $R_{0.25}$ ,MWD,GMD。

$$R_{0.25}=\frac{M_{r>0.25}}{M_T}=1-\frac{M_{r\leq0.25}}{M_T}$$
(3)

$$MWD=\frac{\sum_{i=1}^n(\bar{x}_i w_i)}{\sum_{i=1}^n w_i}$$
(4)

$$GMD=\exp\left[\frac{\sum_{i=1}^n w_i \ln \bar{x}_i}{\sum_{i=1}^n w_i}\right]$$
(5)

$$E_{LT}=\frac{M_T-R_{0.25}}{M_T}\times100\%$$
(6)

分形维数 $D$ 的计算采用杨培岭等<sup>[18]</sup>推导的公式

$$\frac{M(r<\bar{x}_i)}{M_T}=(\frac{\bar{x}_i}{x_{max}})^{3-D}$$
(7)

对公式(6)两边取对数,可得:

$$\lg\left[\frac{M(r<\bar{R}_i)}{M_T}\right]=(3-D)\lg(\frac{\bar{R}_i}{R_{max}})$$
(8)

利用公式(7)或公式(8),通过数据拟合,可方便的求得 $D$ 。其中, $\bar{x}_i$ 为某级团聚体平均直径, $M(r<\bar{x}_i)$ 为粒径小于 $\bar{x}_i$ 的团聚体的重量; $MT$ 为团聚体总重量; $x_{max}$ 为团聚体的最大粒径。

1.6 数据处理

采用 Microsoft Excel 2016 软件进行数据整理, SigmaPlot 10.0 软件进行作图, SPSS 22.0 软件对试验数据进行单因素方差分析,采用最小显著极差法(LSD法)进行多重比较,显著性水平 $p<0.05$ ,极显著水平 $p<0.01$ 。

2 结果与分析

2.1 水稻秸秆添加对不同类型土壤各粒级水稳性团聚体分布的影响

从表 2 的结果可以看出,3 种类型土壤试验组水稳性大团聚体( $>250\text{ }\mu\text{m}$ )含量都显著增加( $p<0.05$ ),水稳性微团聚体( $<250\text{ }\mu\text{m}$ )含量都显著减少,说明添加秸秆处理有促使水稳性微团聚体向大团聚体团聚的趋势。培养到 $120\text{ d}$ ,大团聚体的大小顺序为潮土 $>$ 砂姜黑土 $>$ 红壤。其中,红壤、潮土、砂姜黑土试验组 $>2\text{ }000\text{ }\mu\text{m}$ 水稳性团聚体比对照组增加的比例分别为 $113.5\%,595.8\%,298.0\%$ ,潮土的增加比例最为明显, $2\text{ }000\sim250\text{ }\mu\text{m}$ 水稳性团聚体增加的比例分别为 $15.6\%,1.5\%,16.3\%$ ,砂姜黑土的增加比例最为明显。

3 种不同类型土壤的优势粒级均为 $2\text{ }000\sim250\text{ }\mu\text{m}$ 。潮土与砂姜黑土的水稳性团聚体分布大小规律均是 $2\text{ }000\sim250\text{ }\mu\text{m}>$ 小于 $53\text{ }\mu\text{m}>250\sim53\text{ }\mu\text{m}>$ 大于 $2\text{ }000\text{ }\mu\text{m}$ ,红壤的水稳性团聚体分布规律为 $2\text{ }000\sim250\text{ }\mu\text{m}>250\sim53\text{ }\mu\text{m}>$ 小于 $53\text{ }\mu\text{m}>$ 大于 $2\text{ }000\text{ }\mu\text{m}$ ,3 种类型土壤有个共同的规律是 $2\text{ }000\sim250\text{ }\mu\text{m}$ 粒级水稳性含量均是最高,在各粒级团聚体中占主导地位。红壤、潮土、砂姜黑土试验组 $>250\text{ }\mu\text{m}$ 水稳性团聚体比对照组增加的比例分别为 $35.6\%,41.1\%,22.0\%$ ,潮土的增加比例最为明显。

表 2 不同培养时期水稳性团聚体的组成

土壤类型	处理	不同粒级团聚体的百分含量/%				$R_{0.25}$
		$>2000\text{ }\mu\text{m}$	$2000\sim250\text{ }\mu\text{m}$	$250\sim53\text{ }\mu\text{m}$	$<53\text{ }\mu\text{m}$	
红壤	对照组	8.28±1.67cC	32.11±2.05eA	30.90±1.42aAB	28.71±1.31aB	40.4±0.7e
	试验组	17.68±1.6bC	37.11±2.89dA	23.81±1.15bB	21.40±0.46bB	54.8±1.5c
潮土	对照组	3.33±1.49eD	46.55±2.18cA	22.53±1.33bC	27.60±2.58aB	49.9±2.1d
	试验组	23.17±1.98aB	47.25±0.76bcA	12.26±0.94dD	17.32±1.02cC	70.4±1.9a
砂浆黑土	对照组	1.01±0.10eD	50.94±1.09bA	21.77±2.58bC	26.29±1.95aB	51.9±1.2cd
	试验组	4.02±1.18dC	59.26±3.00aA	16.75±1.03cB	19.97±1.64bcB	63.3±2.6b

注:小写字母同一粒级不同处理间差异达到显著;大写字母表示同一处理不同粒级差异达到显著( $p<0.05$ )

2.2 水稻秸秆添加对不同类型土壤水稳性团聚体平均重量直径(MWD),几何平均直径(GMD),分形维数(D),土壤不稳定团粒指数( $E_{LT}$ )的影响

从表 3 可以看出,水稻秸秆添加后 3 种类型土壤试验组水稳性团聚体的平均重量直径(MWD),几何平均直径(GMD)显著增加,分形维数(D),土壤不稳定团粒指数( $E_{LT}$ )显著减小。培养到 120 d 时,潮土试验组的 MWD,GMD 分别比对照组增加了 59.4%,90.3%,

$D,E_{LT}$  值分别减小 8.1%、40.7%,在 3 种不同类型土壤中潮土变化最为明显。由于土壤团聚体的 MWD,GMD, $D,E_{LT}$  是反映土壤团粒结构粒径几何形状的参数,土壤团聚体的 MWD,GMD 值越高, $D,E_{LT}$  越小,表明土壤越具有良好的结构,稳定性越好<sup>[18-21]</sup>,所以结果表明随着水稻秸秆的加入,3 种类型土壤的团聚程度和稳定性明显增强,土壤结构得到一定程度的改善,潮土的改善效果最为明显。

表 3 水稻秸秆添加对团聚体稳定性的影响

土壤类型	处理	MWD/mm	GMD/mm	D	ELT/%
红壤	对照组	0.59±0.01d	0.26±0.01e	2.91±0.02b	59.6±0.1a
	试验组	0.82±0.01b	0.40±0.01c	2.80±0.02c	45.2±1.5c
潮土	对照组	0.64±0.03c	0.31±0.02d	2.96±0.02a	50.1±2.1b
	试验组	1.02±0.04a	0.59±0.03a	2.72±0.03d	29.6±1.9e
砂浆黑土	对照组	0.64±0.02c	0.33±0.01d	2.98±0.01a	48.1±1.2bc
	试验组	0.78±0.03b	0.45±0.03b	2.95±0.01a	36.7±2.6d

注:同一列中小写字母表示差异达到显著( $p<0.05$ )。

2.3 土壤大团聚体含量  $R_{0.25}$  与团聚体稳定性之间的相关分析

由图 1 可以看出,土壤 $>0.25$  mm( $R_{0.25}$ )水稳性团聚体含量与 GMD,MWD 间呈极显著正相关关系(GMD, $R^2=0.9293$ , $p<0.0001$ ;MWD, $R^2=0.8204$ , $p<0.0001$ ),说

明土壤 $>0.25$  mm 水稳性团聚体含量越高,土壤团聚体的 GMD,MWD 值越大,土壤团聚体的水稳性越强,土壤结构越稳定。同时说明添加水稻秸秆,3 种不同类型土壤都能显著增加大团聚体含量及其水稳性,是改善土壤理化性质和提高土壤抗蚀性的有效途径。

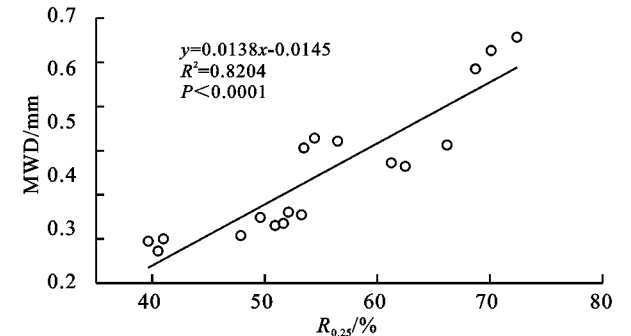
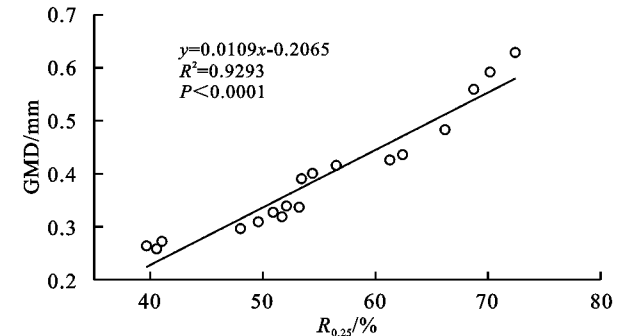


图 1  $>0.25$  mm 水稳性团聚体所占比例与团聚体稳定性之间的关系

3 讨论

3.1 水稻秸秆添加对不同类型土壤水稳性团聚体形成及分布的影响

本文的研究结果表明了水稻秸秆添加对 3 种不同类型土壤团聚体的形成和分布均产生了明显的影响。水稻秸秆作为一种新的外源碳源,增加了土壤有机物料的投入,在室内模拟培养试验下,碳量增加提高了微生物活性,促进微生物菌丝的生长,而且有机物料含有多糖、蛋白质、木质素,通过土壤微生物和酶进行腐解,在产生的真菌菌丝体生长和其他微生物产生胞外多糖的分解活动下,其转化形成的腐殖质在团聚体形成过程中作为重要的胶结物质,促使土壤颗粒与矿物质结合在一起,对团聚体的形成产生一定的

激发效应,促进微团聚体进而胶结成大团聚体<sup>[22-24]</sup>。本试验结果也表明 3 种类型土壤添加水稻秸秆后, $>2000\text{ }\mu\text{m}$ 和  $2000\sim250\text{ }\mu\text{m}$  水稳性大团聚体含量均显著增加, $250\sim53\text{ }\mu\text{m}$  和  $<53\text{ }\mu\text{m}$  水稳性团聚体含量均显著减少( $p<0.05$ )。这与顾鑫等、关松等的研究结果相似<sup>[6,15]</sup>,顾鑫和关松分别研究了室内模拟情况下添加玉米秸秆对棕壤团聚体和黑土团聚体组成分布的影响,结果表明添加玉米秸秆不但显著增加大团聚体含量,还使微团聚体含量降低。但 3 种类型土壤团聚体的变化程度还是有差异的,红壤、潮土、砂浆黑土试验组 $>250\text{ }\mu\text{m}$  水稳性团聚体比对照组增加的比例分别为 35.6%,41.1%,22.0%,潮土增加比例最为明显。表现为为土壤初始有机碳含量越低,大团聚体的增加比例越大。分析原因可能是对于矿质

类型土壤,土壤初始有机碳含量越低,黏粒含量越高,外源新碳就分配的越多,由于黏土矿物具有较强的表面吸附能力及更易吸附降解性较差的疏水性有机碳,而且黏土矿物通常占黏粒的绝大部分。因此,不难理解黏粒含量通常与土壤有机碳含量表现出正相关关系,根据团聚体的形成与稳定机制,土壤有机碳是团聚体形成的重要影响因素,分配的外源有机碳越多,促进了团聚体的团聚与水稳性团聚体的稳定,新团聚体含量及大小增加幅度就越明显,由于潮土的初始有机碳含量最低,黏粒含量最高,所以导致潮土的大团聚体增加效果最为明显<sup>[25-28]</sup>。

### 3.2 水稻秸秆添加对不同类型土壤水稳性团聚体稳定性及相关性的影响

土壤团聚体的平均质量直径(MWD),平均几何直径(GMD), $R_{0.25}$ ,分形维数( $D$ ),不稳定团粒指数( $E_{LT}$ )可以较好反映土壤团聚体的大小分布变换状况、通透性及抗侵蚀性,大团聚体的百分含量越高,MWD,GMD值越大, $D$ , $E_{LT}$ 值越小,说明团聚体的平均粒径团聚程度越高,土壤越具有良好的结构与稳定性,抗蚀能力越强<sup>[18-21]</sup>。安婉丽等研究表明,秸秆还田显著增加了晚稻田土壤水稳性大团聚体稳定性,MWD,GMD, $R_{0.25}$ 值显著增加, $D$ 值显著减少<sup>[12]</sup>,侯晓娜等研究显示,秸秆添加显著增加了砂姜黑土水稳性团聚体 MWD,GMD, $R_{0.25}$ 值,显著减少  $D$  值<sup>[13]</sup>,本试验结果也表明 3 种类型土壤试验组的 MWD,GMD, $R_{0.25}$ 值都显著大于对照组, $D$ , $E_{LT}$ 值显著小于对照组,而且 MWD,GMD 与  $R_{0.25}$ 呈极显著正相关关系( $p<0.001$ ),MWD,GMD 与  $R_{0.25}$ 值越大, $D$ , $E_{LT}$ 值越小,表明 MWD,GMD, $R_{0.25}$ , $D$ 和  $E_{LT}$ 均可以用来表征土壤团聚体稳定性,且其在表征团聚体稳定性的过程中具有一致性。说明添加水稻秸秆,改变了 3 种类型水稳性团聚体的分布状况,显著提高了土壤水稳性团聚体稳定性和抗侵蚀能力,改善了土壤结构性状,而潮土的相关稳定性指标变化最为明显,与大团聚体的变化一致,潮土团聚体结构稳定性改善效果最好。

## 4 结论

(1) 未添加水稻秸秆的 3 种类型土壤,微团聚体占主体, $>2\ 000\ \mu\text{m}$  粒级水稳性团聚体含量最少,团聚体的平均重量直径(MWD),几何平均直径(GMD)、 $R_{0.25}$ 相对比较小, $D$ , $E_{LT}$ 值比较大,团聚体的团聚能力和抗侵蚀能力比较弱。

(2) 室内培养条件下,3 种类型土壤添加水稻秸秆后,加速了 $>2\ 000\ \mu\text{m}$ 粒级水稳性团聚体的团聚,使得大团聚体占主体,显著提高了 3 种类型土壤水稳

性团聚体的 MWD,GMD, $R_{0.25}$ ,降低了  $D$ , $E_{LT}$ 值,土壤结构和抗侵蚀能力明显得到改善。潮土的大团聚体及团聚体相关稳定性指标变化最为明显,团聚体数量、大小及稳定性改善效果最好。

(3) 3 种类型土壤 $>0.25\ \text{mm}(R_{0.25})$ 水稳性团聚体含量与 GMD,MWD 间呈极显著正相关关系( $p<0.001$ )。

### 参考文献:

- [1] 杜立宇,李天来,梁成华,等.长期不同施肥处理对设施土壤团聚体组成及其稳定性的影响[J].水土保持通报,2012,32(2):38-42.
- [2] 李辉信,袁颖红,黄欠如,等.长期施肥对红壤性水稻土团聚体活性有机碳的影响[J].土壤学报,2008,45(2):259-266.
- [3] 申思雨,刘哲,吕贻忠.不同种植方式对温室土壤微形态的影响[J].土壤,2016,48(2):355-360.
- [4] 陈恩凤,周礼恺,武冠云.微团聚体的保肥供肥性能及其组成比例在评判土壤肥力中的作用[J].土壤学报,1994,31(1):18-28.
- [5] 王清奎,汪思龙.土壤团聚体形成与稳定机制及影响因素[J].土壤通报,2005,36(3):415-421.
- [6] 顾鑫,安婷婷,李双异,等. $\delta^{13}\text{C}$ 研究秸秆添加对棕壤团聚体有机碳的影响[J].水土保持学报,2014,28(2):243-247,312.
- [7] Küstermann B, Kainz M, Hülsbergen K J. Modeling carbon cycles and estimation of greenhouse gas emissions from organic and conventional farming systems [J]. Renewable Agriculture and Food Systems, 2008, 23(1):38-52.
- [8] 石辉.转移矩阵法评价土壤团聚体的稳定性[J].水土保持通报,2006,26(3):91-95.
- [9] 李阳兵,谢德体.不同土地利用方式对岩溶山地土壤团粒结构的影响[J].水土保持学报,2001,15(4):122-125.
- [10] 王晓娟,贾志宽,梁连友,等.旱地施有机肥对土壤有机质和水稳性团聚体的影响[J].应用生态学报,2012,23(1):159-165.
- [11] 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 Biology and Biochemistry, 2011,43(3):657-666.
- [12] 安婉丽,高灯州,潘婷,等.水稻秸秆还田对福州平原稻田土壤水稳性团聚体分布及稳定性影响[J].环境科学学报,2016,36(5):1833-1840.
- [13] 侯晓娜,李慧,朱刘兵,等.生物炭与秸秆添加对砂姜黑土团聚体组成和有机碳分布的影响[J].中国农业科学,2015(4):705-712.
- [14] 张鹏,贾志宽,王维,等.秸秆还田对宁南半干旱地区土壤团聚体特征的影响[J].中国农业科学,2012,45(8):1513-1520.

- [16] Wang W F, Dong Z B, Wang T, et al. The equilibrium gravel coverage of the deflated gobi above the Mogao Grottoes of Dunhuang, China[J]. *Environmental geology*, 2006, 50(7): 1077-1083.
- [17] Dong Z B, Qu J J, Liu X P, et al. Experimental investigation of drag coefficients of gobi surfaces[J]. *Science in China Series D: Earth Sciences*, 2002, 45(7): 609-615.
- [18] Fryrear D W. Soil cover and wind erosion[J]. *Transactions of the ASAE; American Society of Agricultural Engineers(USA)*, 1985, 28(28): 781-784.
- [19] 谭立海, 张伟民, 屈建军, 等. 不同砾石覆盖度戈壁床面风蚀速率定量模拟[J]. *中国沙漠*, 2016, 36(3): 581-588.
- [20] 王训明, 郎丽丽, 花婷, 等. 戈壁砾石覆盖度与风蚀强度关系试验研究[J]. *中国沙漠*, 2013, 33(2): 313-319.
- [21] 富宝锋, 赵耀林, 何艺峰, 等. 砾石覆盖沙床防风蚀效果风洞试验[J]. *水土保持学报*, 2014, 28(2): 91-94.
- [22] 王志强, 富宝锋, 何艺峰, 等. 砾石覆盖对土壤风蚀防护效率的风洞模拟研究[J]. *干旱区资源与环境*, 2014, 28(9): 90-93.
- [23] Brown S, Nickling W G, Gillies J A. A wind tunnel examination of shear stress partitioning for an assortment of surface roughness distributions[J]. *Journal of Geophysical Research: Earth Surface* (2003—2012), 2008, 113(F2): 154-162.
- [24] Li X Y. Gravel-sand mulch for soil and water conservation in the semiarid region of northwest China[J]. *Catena*, 2003, 52(2): 105-127.
- [25] 朱震达, 吴正. 中国沙漠概论[M]. 北京: 科学出版社, 1980.
- [26] 吴正. 中国沙漠及其治理[M]. 北京: 科学出版社, 2009.
- [27] Greeley R, Iversen J D. Wind as a geological process [M]. Cambridge: Cambridge University Press, 1985.
- [28] Wiggs G F S, Livingstone I, Thomas D S G, et al. Airflow and roughness characteristics over partially vegetated linear dunes in the southwest Kalahari Desert [J]. *Earth Surface Processes and Landforms*, 1996, 21(1): 19-34.
- [29] Wang W F, Dong Z B, Wang T, et al. The equilibrium gravel coverage of the deflated gobi above the Mogao Grottoes of Dunhuang, China[J]. *Environmental Geology*, 2006, 50(7): 1077-1083.
- [30] 张伟民, 谭立海, 张克存, 等. 不同砾石覆盖度床面蚀积过程的野外风洞试验研究[J]. *地理科学*, 2012, 32(11): 1370-1376.
- [31] Mehuys R G, Stolzy L H, Letey J, et al. Temperature distributions under stones submitted to a diurnal heat wave[J]. *Soil Science*, 1975, 120(120): 437-441.
- [32] 李小雁. 干旱半干旱过渡带雨水集流试验与微型生态集雨模式[D]. 北京: 中国科学院研究生院, 2000.



(上接第 171 页)

- [15] 关松, 窦森, 胡永哲, 等. 添加玉米秸秆对黑土团聚体碳氮分布的影响[J]. *水土保持学报*, 2010, 24(4): 187-191.
- [16] 鲍士旦. 土壤农化分析[M]. 北京: 中国农业出版社, 2008.
- [17] 周虎, 吕贻忠, 杨志臣, 等. 保护性耕作对华北平原土壤团聚体特征的影响[J]. *中国农业科学*, 2007(9): 1973-1979.
- [18] 尚杰, 耿增超, 赵军, 等. 生物炭对土壤水热特性及团聚体稳定性的影响[J]. *应用生态学报*, 2015, 26(7): 1969-1976.
- [19] 杨培岭, 罗远培, 石元春. 用粒径的重量分布表征的土壤分形特征[J]. *科学通报*, 1993(20): 1896-1899.
- [20] 张世熔, 邓良基, 周倩, 等. 耕层土壤颗粒表面的分形维数及其与主要土壤特性的关系[J]. *土壤学报*, 2002, 39(2): 221-226.
- [21] 安艳, 姬强, 赵世翔, 等. 生物炭对果园土壤团聚体分布及保水性的影响[J]. *环境科学*, 2016, 37(1): 293-300.
- [22] Jastrow J D. Soil aggregate formation and the accrual of particulate and mineral-associated organic matter[J]. *Soil Biology & Biochemistry*, 1996, 28(4/5): 665-676.
- [23] 蔡立群, 齐鹏, 张仁陟. 保护性耕作对麦—豆轮作条件下土壤团聚体组成及有机碳含量的影响[J]. *水土保持学报*, 2008, 22(2): 141-145.
- [24] Sodhi G P S, Beri V, Benbi D K. Soil aggregation and distribution of carbon and nitrogen in different fractions under long-term application of compost in rice—wheat system[J]. *Soil and Tillage Research*, 2009, 103(2): 412-418.
- [25] 吕元春, 薛丽佳, 尹云锋, 等. 外源新碳在不同类型土壤团聚体中的分配规律[J]. *土壤学报*, 2013, 50(3): 534-539.
- [26] 窦森, 李凯, 关松. 土壤团聚体中有机质研究进展[J]. *土壤学报*, 2011, 48(2): 412-418.
- [27] Six J, Feller C, Denef K, et al. Soil organic matter, biota and aggregation in temperate and tropical soils—Effects of no-tillage[J]. *Agronomie*, 2002, 22(7/8): 755-775.
- [28] 刘满强, 胡锋, 陈小云. 土壤有机碳稳定机制研究进展[J]. *生态学报*, 2007, 26(6): 2642-2650.