

陈亮, 王军强, 李彦荣, 等. 耕作措施对民勤绿洲区农田土壤团聚体组成及其碳稳定性的影响 [J]. 福建农业学报, 2021, 36 (7): 826-835.

CHEN L, WANG J Q, LI Y R, et al. Effects of Tillage on Aggregates and Organic Carbon Stability of Soil at Minqin Oasis [J]. *Fujian Journal of Agricultural Sciences*, 2021, 36 (7): 826-835.

## 耕作措施对民勤绿洲区农田土壤团聚体组成及其碳稳定性的影响

陈亮<sup>1,2</sup>, 王军强<sup>3</sup>, 李彦荣<sup>1,2</sup>, 栾倩倩<sup>1,2</sup>, 王翠丽<sup>1,2</sup>, 王振龙<sup>1,2</sup>, 赵旭<sup>1,2\*</sup>

(1. 兰州大学西部生态安全省部共建协同创新中心, 甘肃 兰州 730000; 2. 甘肃省农业工程技术研究院, 甘肃 武威 733006; 3. 西华师范大学, 四川 南充 637000)

**摘要:**【目的】探讨不同耕作措施对民勤绿洲区农田土壤的团聚体组成及有机碳稳定性的影响, 以为开展民勤绿洲区农田土壤抗蚀性研究、促进绿洲区农田土壤资源的可持续利用提供理论依据。【方法】依托民勤绿洲区的长期定位试验, 以自然撂荒地作为对照 (CK), 研究了免耕 (Tn)、少耕 (Tm)、深松 (Ts) 和秋翻 (Tf) 4 种耕作措施对土壤团聚体组成及有机碳稳定性的影响。【结果】(1) 土壤团聚体方面, 4 种耕作措施均显著提高了土壤大团聚体 (>0.25 mm) 的含量, 其中 Tm 处理的土壤大团聚体含量最高, 在 0~20 cm 土层较 Tn、Ts、Tf 和 CK 显著增加了 9.39%、11.38%、6.09% 和 35.41%, 在 20~40 cm 土层较 Tn 和 CK 显著增加了 13.74% 和 38.65%。同时, Tm、Ts 和 Tf 处理也显著提高了 0~20 cm 和 20~40 cm 土层土壤团聚体的平均重量直径 (MWD) 和几何平均直径 (GMD)。(2) 土壤有机碳稳定性方面, 4 种耕作措施均显著提高了各土层不同粒级团聚体的有机碳含量和碳累积矿化量。其中 Tn 处理的有机碳含量最高, 在 0~20 cm 和 20~40 cm 土层分别较 Ts、Tf、CK 显著增加了 18.58%、39.53%、58.40% 和 40.08%、22.84%、60.93%, 且随着粒级的减小和土壤深度的加深而减少。另外, 除 <0.25 mm 粒级团聚体外, Tn 处理的有机碳累积矿化量也显著高于 CK。同时, 4 种耕作措施显著降低了微团聚体 (<0.25 mm) 的有机碳贡献率, Tn、Tm、Ts 和 Tf 处理较 CK 显著降低了 0~20 cm 土层微团聚体 (<0.25 mm) 的有机碳贡献率 32.89%、49.37%、26.61%、38.88%。【结论】耕作措施可以促进耕层土壤团聚体的形成, 增加土壤团聚体的稳定性。其中, 免耕和少耕能够减少机械的破坏作用, 提高各土层及表层土壤大团聚体的有机碳含量, 免耕更利于有机碳的固定, 少耕更利于土壤团聚体的结构稳定性。综合分析, 免耕和少耕可作为民勤绿洲区农田最适宜的土壤耕作措施。

**关键词:** 耕作; 绿洲农田; 团聚体; 有机碳稳定性

中图分类号: S 345; S 158.3

文献标志码: A

文章编号: 1008-0384 (2021) 07-0826-10

## Effects of Tillage on Aggregates and Organic Carbon Stability of Soil at Minqin Oasis

CHEN Liang<sup>1,2</sup>, WANG Junqiang<sup>3</sup>, LI Yanrong<sup>1,2</sup>, LUAN Qianqian<sup>1,2</sup>, WANG Cuili<sup>1,2</sup>, WANG Zhenlong<sup>1,2</sup>, ZHAO Xu<sup>1,2\*</sup>

(1. Collaborative Innovation Center for Western Ecological Safety, Lanzhou University, Lanzhou, Gansu 730000, China;

2. Gansu Provincial Institute of Agricultural Engineering and Technology, Wuwei, Gansu 733006, China;

3. China West Normal University, Nanchong, Sichuan 637000, China)

**Abstract:** 【Objective】Aggregate distribution and organic carbon stability of farmland soil at Minqin Oasis under different methods of tillage were studied for improvements on the soil erosion eradication and agriculture sustainability in the area.

【Methods】Taking advantage of the ongoing fixed position monitoring program at Minqin Oasis and utilizing a virgin land in

收稿日期: 2021-02-23 初稿; 2021-06-30 修改稿

作者简介: 陈亮 (1989-), 男, 甘肃武威人, 农学硕士, 助理研究员, 主要从事土壤养分管理和设施土壤改良技术研究 (E-mail: chenliang144358@163.com)

\* 通信作者: 赵旭 (1985-), 男, 甘肃白银人, 理学博士, 副研究员, 主要从事农田生态和微生物生理生化研究 (E-mail: zhaoxu512@163.com)

基金项目: 甘肃省省级引导科技创新发展专项资金项目 (项目号 2019ZX-06), 兰州大学中央高校基本科研业务费专项资金项目 (项目号 lzujbky-2021-kb12), 国家自然科学基金项目 (41867013, 31560170)

the area as control (CK), 4 tilling methods including no-tilling (Tn), less-tilling (Tm), deep-loosening (Ts), and autumn turning-over (Tf) were performed to determine their effects on the aggregate composition and organic carbon stability of the soil.

**【Results】** (1) In terms of soil aggregates, the tested tillage significantly increased the proportion of aggregates containing particles larger than 0.25 mm in the soil. Among them, Tm yielded 9.39% higher proportion than Tn, 11.38% higher than Ts, 6.09% higher than Tf, and 35.41 higher than CK in 0-20 cm soil, and 13.74% higher than Tn and 38.65% higher than CK in 20-40 layer. At the same time, Tm, Ts, and Tf significantly increased the mean weight diameter (MWD) and geometric mean diameter (GMD). (2) In terms of soil organic carbon stability, all 4 tilling methods significantly increased the content and cumulative mineralization of organic carbon in aggregates of different sizes in the soil layers. However, Tn resulted in greatest organic carbon content among them. It significantly increased carbon content over Ts, Tf, and CK by 18.58%, 39.53%, and 58.40%, respectively, in the soil at a depth of 0-20 cm, and 40.08%, 22.84%, and 60.93%, respectively, in the 20-40 cm layer. And the content decreased with reducing particle size and increasing depth of soil. In addition to agglomeration smaller than 0.25 mm, the cumulative mineralization of organic carbon treated by Tn was significantly higher than CK. Meanwhile, the tillage significantly reduced the organic carbon contribution proportion in soil by microaggregates smaller than 0.25 mm, as Tn, Tm, Ts, and Tf significantly reduced it by 32.89 %, 49.37 %, 26.61 %, and 38.88 %, respectively, over CK in 0-20 cm layer of the soil. **【Conclusion】** Tillage promoted the formation and stability of aggregates and also improved the carbon stability in soil. The less-tilling Tm and the no-tilling Tn minimized mechanical damage to the soil while increased the organic carbon content of large aggregates in surface and tilled soil. Tn was especially conducive to the carbon fixation, and Tm to the stability of soil. Thus, those two methods were recommended for farming in the region.

**Key words:** Tillage; oasis farmland; soil aggregates; organic carbon stability

## 0 引言

**【研究意义】**土壤是人类赖以生存的自然资源和人类与生物共栖的基地，土壤团聚体的形成及稳定性是土壤结构研究的核心内容，在很大程度上反映了土壤结构的机械稳定性和抗蚀性<sup>[1-3]</sup>。耕作措施<sup>[4]</sup>、秸秆还田<sup>[5]</sup>、施肥制度<sup>[6]</sup>等土壤管理措施均能够影响土壤团聚体的组成及其稳定性。因此，研究不同耕作措施对土壤团聚体组成及其稳定性的影响对于评价土壤生态效益及可持续利用具有重要意义。

**【前人研究进展】**土壤团聚体通常被划分为大团聚体 (>0.25 mm) 和微团聚体 (<0.25 mm)<sup>[7]</sup>，不同粒级团聚体形成的稳定机制及其在土壤结构改善和有机碳固定中的作用不同<sup>[8]</sup>。一般认为，>0.25 mm 的团聚体（即土壤团粒结构体）是土壤中最好的结构体，可反映土壤结构的优劣，其含量高低与土壤稳定性呈正相关<sup>[9]</sup>。在农业生态系统中，耕作通常通过直接破坏土壤大团聚体结构和间接改变生物和化学因素来影响土壤团聚体使土壤团聚体稳定性降低<sup>[10-11]</sup>，与常规耕作相比，免耕土壤中>0.25 mm 大团聚体的团聚性较高，稳定性较高，对土壤有机碳有很强的保护作用<sup>[12]</sup>，少耕能够提高土壤大团聚体稳定性从而达到促使有机碳稳定的目的，合理的耕作条件下土壤有机碳积累的主要原因是大团聚体的物理保护作用得到了保障，团聚体稳定性得以提高<sup>[13-14]</sup>。但也有研究结果表明在土壤有机质含量相

对较高的水平下，耕作能促进较大粒径团聚体形成，减少较小粒径团聚体的含量<sup>[15]</sup>。**【本研究切入点】**目前关于耕作措施对土壤团聚体分布及其与有机碳稳定性关系的研究结果还不尽一致。**【拟解决的关键问题】**为此，本研究以优化土壤耕作措施为突破口，在民勤绿洲长期定位试验点开展土壤团聚体组成及其与有机碳稳定性研究，以期为当地合理选择耕作措施，增强民勤绿洲区农田土壤抗蚀性、促进绿洲区农田土壤资源的可持续利用提供参考。

## 1 材料与方 法

### 1.1 试验区概况

试验区建于2015年，位于民勤绿洲区的苏武乡（103°07'00.16"E，38°37'10"N）泉水村，占地面积13340 m<sup>2</sup>。试验区属于典型的温带干旱荒漠气候区，平均海拔1400 m，冬冷夏热，昼夜温差大，年均温度7.8℃，最大昼夜温差25.2℃；光热资源丰富，年均无霜期162 d，年均日照时数2799.40 h；该区降水稀少，年均降水量113.2 mm，蒸发量高达2644 mm，降水主要集中在7~9月。耕作土壤为本地区开垦种植早、熟化程度高的灌淤土，厚度可达30~60 cm，耕层质地轻，土性热，保肥、保水性差。

### 1.2 试验设计

试验于2020年4月开展，该试验区自2015年开始设置为免耕（Tn）、少耕（Tm）、深松（Ts）和秋翻（Tf）4种耕作措施连续定位观测点，以周边自然

撂荒地作为对照 (CK), 每处理设置 3 个重复。4 种耕作措施分别为: (1) 免耕: 收获后不留茬, 对土地不做耕翻, 直至试验结束才更换地膜; (2) 少耕: 收获后不留茬, 到二茬播种前不搅动土壤, 播种前 1 周左右进行旋耕整地 7.5~10 cm, 覆膜播种; (3) 深松: 秋收后利用深松铲对耕地耕松 30 cm, 对土壤只松不翻, 春季旋耕整地 7.5~10 cm, 覆膜播

种; (4) 秋翻: 秋收后利用铧式犁耕翻土地, 翻动土层深度大约为 20 cm, 春季旋耕整地 7.5~10 cm, 覆膜播种。撂荒地 (CK): 试验全程不对土壤进行扰动, 不进行灌水施肥, 为自然风蚀土壤。土壤类型为灌淤土, 土壤肥力较低, 0~20 cm 土层基本理化性质见表 1。

表 1 试验土壤基本理化性质  
Table 1 Basic physicochemical properties of sampled soils

耕作措施 Tillage measures	pH	EC/ms·cm <sup>-1</sup>	有机质 Organic matter/ (g·kg <sup>-1</sup> )	全氮 Total nitrogen/ (g·kg <sup>-1</sup> )	有效磷 Available phosphorus/ (mg·kg <sup>-1</sup> )	速效钾 Rapidly available potassium/ (mg·kg <sup>-1</sup> )
免耕 No-tillage	7.99	0.37	10.66	0.44	1.19	169.50
少耕 Less-tillage	8.20	0.34	10.02	0.36	1.12	168.30
深松 Deep loosening	8.21	0.31	8.99	0.34	1.08	163.20
秋翻 Autumn turning	8.64	0.28	7.64	0.33	1.03	162.80
撂荒地 (CK) Abandoned land	8.30	0.77	6.73	0.31	0.89	146.60

试验种植作物为玉米, 于每年 4 月 20 日左右播种, 株行距为 20 cm×30 cm, 种植密度为 7.2×10<sup>4</sup> 株·hm<sup>-2</sup>, 除耕作措施不同外, 其他施肥、灌水等田间管理均相同。试验地底肥种类为尿素、磷酸二氢铵、过磷酸钙、硫酸钾, 施用量各处理统一为每年施用 N 180 kg·hm<sup>-2</sup>、P<sub>2</sub>O<sub>5</sub> 95 kg·hm<sup>-2</sup>、K<sub>2</sub>O 45 kg·hm<sup>-2</sup>, 尿素 20% 作为底肥施用, 剩余用作追肥, 分别在拔节期至抽穗期追施 20%, 抽穗期至开花期追施 10%, 灌浆期追施 50%。

### 1.3 测定项目与方法

1.3.1 土壤样品采集 土壤样品于 2020 年 6 月 5 日采集, 在各小区采用五点取样法分别采集 0~20 cm 和 20~40 cm 两个深度的土样, 将每个小区随机选取的 5 个采样点土样充分混匀成一个混合样, 轻轻用手揉碎大土块, 田间现场过 5 mm 孔径土壤筛, 过筛后剔除土壤中肉眼可见的动、植物残体和砂砾。采集的土壤样品一分为二, 一部分迅速冷冻处理后带回实验室置于 4 °C 冰箱中保存, 用于土壤团聚体分级和有机碳矿化量的测定, 另一部分直接带回室内进行自然风干, 用于团聚体指标的测定。

1.3.2 团聚体分级及培养 团聚体分级参考 Bach 和 Hofmockel (2014) [16] 的干筛法, 并稍做修改。具体操作步骤如下: 将过 5 mm 筛的土壤样品 (<5 mm) 置于 4 °C 冰箱中进行冷干处理, 当土壤水分达到 60~70 g·kg<sup>-1</sup> 时, 进行筛分处理。筛分装置由三种规格 (筛孔直径分别为 0.25 mm、1 mm 和 2 mm) 的土壤筛垂直套装组成, 顶部筛为 2 mm, 中部筛为 1 mm,

底部筛为 0.25 mm。筛分前固定好套筛, 垂直上下振荡 5 cm 高度, 振荡频率为 1 次·s<sup>-1</sup>, 振荡时长为 1 min, 筛分出 >2 mm、1~2 mm、0.25~1 mm 和 <0.25 mm 四级团聚体。

分别称取 >2 mm、1~2 mm、0.25~1 mm 和 <0.25 mm 四种不同粒径团聚体土壤样品各 5 g 装入 50 ml 硬质塑料杯中, 采用称重法调整土壤含水量至 60%, 置于 1000 ml 塑料培养盒中。同时放入盛有 10 ml 0.5 mol·L<sup>-1</sup> NaOH 溶液的硬质塑料杯和盛有 10 ml 蒸馏水的塑料杯, 所有小塑料杯底部用双面胶粘贴固定, 1000 ml 塑料培养盒顶盖边缘使用封口膜密封。将培养盒置于 25 °C 恒温培养箱中避光培养 14 d 收集 CO<sub>2</sub>。每个粒径团聚体设置 3 次重复, 并设空白对照。

1.3.3 测定指标及计算方法 采用干筛法 [16] 测定 >2 mm、1~2 mm、0.25~1 mm 和 <0.25 mm 四种不同粒径土壤团聚体含量。利用各粒径团聚体含量数据, 计算土壤各粒径团聚体质量百分数 ( $V_i$ ) [17]、>0.25 mm 团聚体含量 ( $R_{0.25}$ ) [18]、土壤团聚体平均重量直径 ( $MWD$ ) [18]、几何平均直径 ( $GWD$ ) [19]、团聚体分形维数 ( $D$ )。具体计算公式为:

$$V_i = \frac{w_i}{w_t} \times 100\% \quad (1)$$

$$MWD = \frac{\sum_{i=1}^n (\bar{R}_i w_i)}{\sum_{i=1}^n w_i} \quad (2)$$

$$GMD = \exp \left( \frac{\sum_{i=1}^n w_i \ln \bar{R}_i}{\sum_{i=1}^n w_i} \right) \quad (3)$$

$$D = 3 - \log \left( \frac{\bar{x}_i}{x_{\max}} \right) \left[ \frac{M(r < \bar{x}_i)}{M_T} \right] \quad (4)$$

公式(1-3)中,  $\bar{R}_i$ 是某级别团聚体平均直径(mm);  $w_i$ 是该级别团聚体干质量(g);  $w_i$ 为各粒径团聚体干质量总和(g)。团聚体分形维数( $D$ )的计算采用杨培岭<sup>[20]</sup>和赵鹏等<sup>[17]</sup>的计算公式推导即可求得。公式(4)中 $\bar{x}_i$ 为某级团聚体平均直径(mm);  $M(r < \bar{x}_i)$ 为粒径小于 $x_i$ 的团聚体的质量(g);  $M_T$ 为团聚体总质量(g);  $x_{\max}$ 为团聚体的最大粒径(mm)。

土壤有机碳采用重铬酸钾法<sup>[21]</sup>测定,并计算土壤团聚体有机碳在土壤中的贡献率<sup>[22]</sup>,团聚体有机碳贡献率(%)=[该级团聚体有机碳含量×该级团聚体含量]/各层土壤有机碳含量]×100%。

土壤有机碳累积矿化量采用0.5 mol·L<sup>-1</sup>NaOH碱液吸收法培养、盐酸滴定法<sup>[23-24]</sup>测定。14 d培养结束后逐个打开培养盒取出碱液杯,用去离子水反复少量冲洗碱液到三角瓶中,依次加入过量的1.0 mol·L<sup>-1</sup>BaCl<sub>2</sub>溶液、2滴0.5%的酚酞指示剂,再用浓度为0.1 mol·L<sup>-1</sup>的HCl溶液滴定,溶液由红色变为白色即为滴定终点,记下所消耗的盐酸量,通过HCl消耗量计算CO<sub>2</sub>释放量(以每千克干土释放CO<sub>2</sub>-C的克数计)。

#### 1.4 数据处理与分析

试验数据采用SPSS 19.0数据处理系统进行差异显著性分析(Duncan新复极差法 $p < 0.05$ ),利用

MicrosoftOffice Excel 2007和Origin 8.0版软件进行数据记录和作图。

## 2 结果与分析

### 2.1 耕作措施对土壤团聚体分布及其稳定性的影响

2.1.1 耕作措施对土壤大团聚体(>0.25 mm)分布的影响 由表2可知,各耕作措施均显著提高了0~20 cm与20~40 cm土层R>0.25 mm团聚体的含量。0~20 cm土层,Tm处理R>0.25 mm团聚体含量达到最大值,且显著高于其他各处理,依次表现为Tm>Tf>Tn>Ts>CK,分别较Tn、Ts、Tf处理和CK显著增加了9.39%、11.38%、6.09%和35.41%,Tn、Ts、Tf处理较CK显著增加了23.79%、21.57%、27.64%;20~40 cm土层,Tm较Tn处理和CK显著增加了13.74%、38.65%,Tn、Ts、Tf处理较CK显著增加了21.90%、35.34%和38.57%,依次表现为Tm>Tf>Ts>Tn>CK,Tm、Ts、Tf各处理间差异不显著。

2.1.2 耕作措施对土壤团聚体稳定性的影响 除Tn处理外,其余各耕作措施均显著提高了0~20 cm与20~40 cm土层土壤团聚体平均重量直径(MWD)(图1-A)。0~20 cm土层,Tm处理的MWD值达到最大值,分别较Tn处理和CK显著增加了15.34%、30.97%,Ts、Tf处理较CK显著增加了20.65%、18.71%,依次表现为Tm>Ts>Tf>Tn>CK,Tm、Ts和Tf处理间差异不显著,Tn与CK间差异不显著;20~40 cm土层,Ts处理的MWD值达到最大值,显

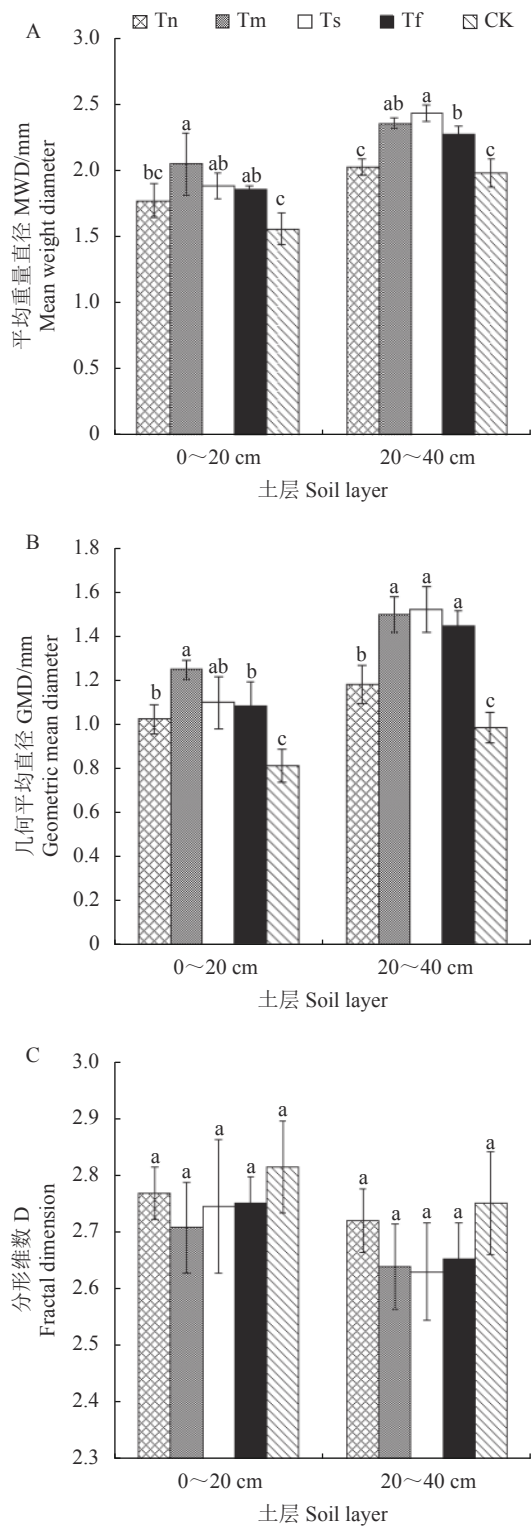
表2 不同耕作措施下农田土壤团聚体分布

Table 2 Effects of tillage on distribution of soil aggregates

土层/cm Soil layer	处理 Treatment	土壤团聚体粒径 Soil aggregate particle size/%				R <sub>0.25</sub>
		>2 mm	1~2 mm	0.25~1 mm	<0.25 mm	
0~20	Tn	21.25±1.67 c	13.20±1.33 a	35.33±2.35 a	30.22±1.55 b	69.78±1.64 bc
	Tm	26.58±0.75 a	14.55±0.84 a	35.20±1.53 a	23.67±2.42 c	76.33±1.82 a
	Ts	24.30±1.24 ab	13.05±0.61 a	31.19±1.24 b	31.47±2.06 b	68.53±1.09 c
	Tf	22.80±2.07 bc	13.88±0.87 a	35.27±1.71 a	28.05±2.16 b	71.95±0.65 b
	CK	18.60±0.92 d	13.62±0.79 a	24.15±1.96 c	43.63±1.58 a	56.37±0.38 d
20~40	Tn	26.56±1.22 c	15.19±0.98 a	30.73±1.65 b	27.53±3.00 b	72.47±1.41 b
	Tm	32.66±0.06 b	15.81±1.12 a	33.97±1.53 a	17.57±1.67 c	82.43±1.30 a
	Ts	34.85±0.77 a	16.36±1.25 a	29.25±2.55 b	19.54±2.77 c	80.46±1.25 a
	Tf	30.78±0.23 b	15.62±0.55 a	35.98±1.28 a	17.62±1.64 c	82.38±0.56 a
	CK	28.32±1.94 c	13.25±1.08 b	17.88±0.85 c	40.55±2.14 a	59.45±0.62 c

注:表中小写字母表示不同处理在 $p < 0.05$ (Duncan新复极差法)水平下差异显著。

Note: Data with different letters indicate significant differences among treatments at  $p < 0.05$ .



注：图中小写字母表示不同处理在  $p < 0.05$  (Duncan 新复极差法) 水平下差异显著，以下图同。

Note: Data with different letters indicate significant differences among treatments at  $p < 0.05$ . Same for following figures.

图1 不同耕作措施下农田土壤团聚体的稳定性

Fig. 1 Effects of tillage on stability of soil aggregates

著高于 Tn、Tf 处理和 CK 19.90%、6.64% 和 22.96%，Tm、Tf 处理显著高于 Tn 和 CK 15.92%、12.44% 和

18.88%、15.31%，依次表现为  $Ts > Tm > Tf > Tn > CK$ ，Tm 和 Ts 处理间差异不显著，Tn 处理和 CK 间差异不显著，Tm 和 Tf 处理间差异不显著。

各耕作措施均显著提高了 0~20 cm 与 20~40 cm 土层土壤团聚体几何平均直径 (GMD) (图 1-B)。0~20 cm 土层，Tm 处理的 GMD 值达到最大值，分别较 Tn、Tf 处理和 CK 显著增加了 22.55%、15.74%、54.32%，但与 Ts 处理间无显著差异，Tn、Ts、Tf 处理较 CK 显著增加了 25.93%、35.80%、33.33%，依次表现为  $Tm > Ts > Tf > Tn > CK$ ，Tn、Ts、Tf 处理间差异不显著；20~40 cm 土层，Ts 处理的 GMD 值达到最大值，显著高于 Tn 处理和 CK 28.81%、53.54%，Tm、Ts、Tf 处理显著高于 Tn 处理和 CK 27.12%、22.03% 和 51.52%、45.45%，Tn 处理较 CK 显著增加了 19.19%，依次表现为  $Ts > Tm > Tf > Tn > CK$ ，Tm、Ts、Tf 处理间差异不显著。不同土层深度下，各耕作措施对土壤团聚体的分形维数 (D 值) 影响无差异 (图 1-C)。

## 2.2 耕作措施对土壤团聚体有机碳稳定性的影响

### 2.2.1 土壤团聚体有机碳分布

不同土层深度下各粒级团聚体的有机碳含量均表现为 Tn、Tm 处理显著高于 CK (图 2)。0~20 cm 土层，除 Tf 处理外，其余各耕作措施土壤有机碳含量均显著高于 CK ( $p < 0.05$ )，Tn 处理显著高于 Ts、Tf 处理和 CK 18.58%、39.53% 和 58.40%，Tm 处理显著高于 Tf 和 CK 31.15% 和 48.89%，Ts 处理显著高于 CK 33.58%，依次表现为  $Tn > Tm > Ts > Tf > CK$ ，Tn 和 Tm 处理间差异不显著，Tm 和 Ts 处理间差异不显著；20~40 cm 土层，除 Ts 处理外，其余各耕作措施土壤有机碳含量均显著高于 CK，Tn 处理显著高于 Ts、Tf 处理和 CK 40.08%、22.84% 和 60.93%，Tm 处理显著高于 Ts 和 CK 31.58% 和 51.16%，Tf 处理显著高于 CK 31.01%，依次表现为  $Tn > Tm > Tf > Ts > CK$ ，Tn 和 Tm 处理间差异不显著，Ts 和 Tf 处理间差异不显著。各耕作措施均可提高农田 0~20 cm 和 20~40 cm 土层各粒级团聚体中的有机碳含量，以 Tn 和 Tm 处理的土壤团聚体有机碳含量较高。在各土层中，有机碳含量在各粒级团聚体中大小依次为 ( $> 2 \text{ mm}$ )  $>$  ( $1 \sim 2 \text{ mm}$ )  $>$  ( $0.25 \sim 1 \text{ mm}$ )  $>$  ( $< 0.25 \text{ mm}$ )，0~20 cm 土层各粒级团聚体有机碳含量高于 20~40 cm 土层。

### 2.2.2 土壤团聚体有机碳累积矿化量

各耕作措施均显著提高了农田 0~20 cm 和 20~40 cm 土层土壤的有机碳累积矿化量，同时增加了各粒级团聚体中的有机碳累积矿化量 (图 3)。0~20 cm 土层，Ts 处理的土壤有机碳累积矿化量达到最大值，较 Tf、Tm、Tn 处理和 CK 显著增加了 37.50%、77.25%、79.81%

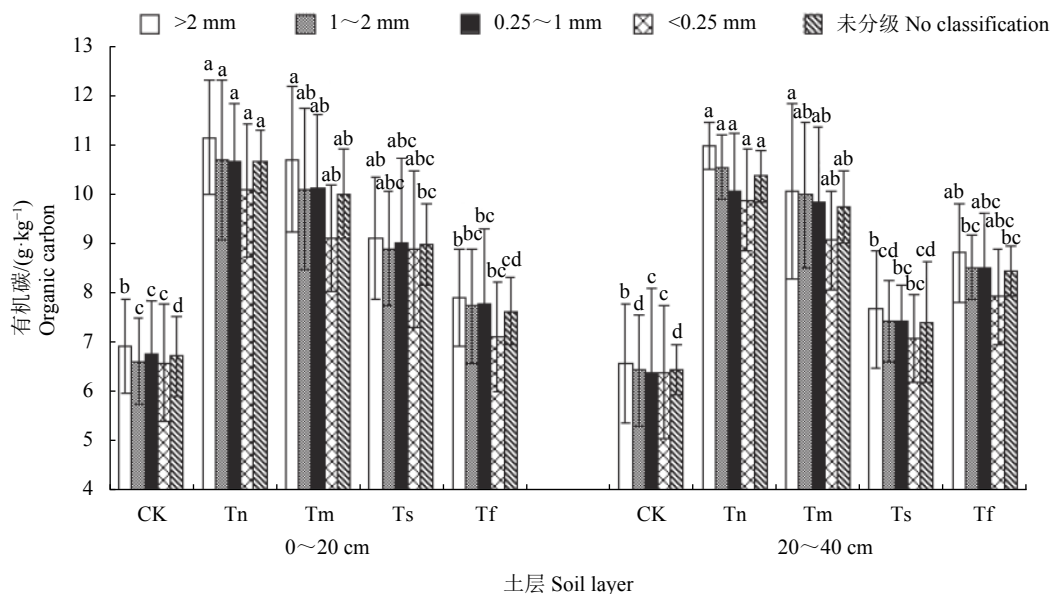


图 2 不同耕作措施下农田土壤团聚体有机碳分布

Fig. 2 Effects of tillage on organic carbon distribution in soil aggregates

和 138.22%，Tf 处理较 Tm、Tn 处理和 CK 显著增加了 28.91%、30.77% 和 73.25%，依次表现为 Ts>Tf>Tm>Tn>CK，Tn 与 Tm 处理间差异不显著；20~40 cm 土层，Tf 处理的土壤有机碳累积矿化量达到最大值，较 Ts、Tm、Tn 处理和 CK 显著增加了 9.40%、19.26%、29.33% 和 91.45%，Ts 处理较 Tm、Tn 处理和 CK 显著增加了 9.02%、18.22% 和 75.00%，依次表现为 Tf>Ts>Tm>Tn>CK，Tn 与 Tm 处理间差异不显著；各粒级团聚体中 Ts 和 Tf 处理有机碳累积矿化量显著高于其他处理，在各粒级团聚体中大小依次为 (<0.25 mm) > (0.25~1 mm) > (1~2 mm) > (>2 mm)，

分别在 >2 mm、1~2 mm、0.25~1 mm、<0.25 级团聚体条件下，Ts 处理较 CK 显著提高了 133.33%、152.52%、178.57%、109.72%，Tf 处理较 CK 显著提高了 144.12%、82.01%、80.71%、33.60%；20~40 cm 土层，各粒级团聚体中有机碳累积矿化量以 Ts 和 Tf 处理较大，且显著高于 CK（除 Ts 处理下的 <0.25 mm 粒级团聚体），分别在 >2 mm、1~2 mm、0.25~1 mm、<0.25 mm 各粒级团聚体条件下，Tf 处理较 CK 显著提高了 122.22%、171.67%、133.33%、23.26%，除 <0.25 mm 粒级团聚体外，Tn、Tm 和 Ts 处理均显著高于 CK。

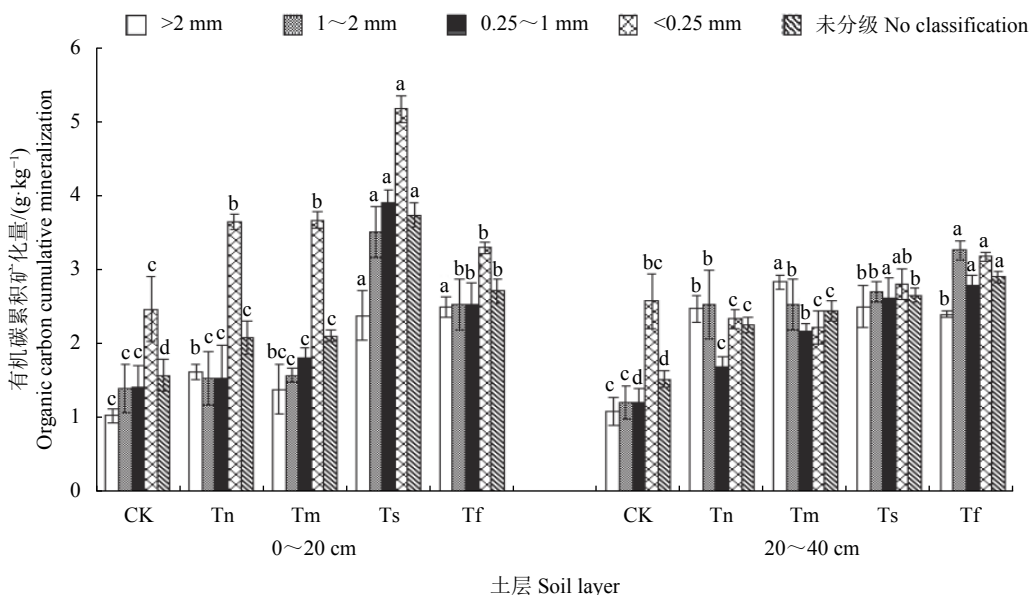


图 3 不同耕作措施下农田土壤团聚体有机碳累积矿化量

Fig. 3 Effects of tillage on cumulative mineralization of organic carbon in soil aggregates

2.2.3 土壤有机碳贡献率 各耕作措施显著降低了微团聚体 ( $<0.25$  mm) 的有机碳贡献率 (图 4)。0~20 cm 土层, Tn、Tm、Ts 和 Tf 处理较 CK 显著降低了微团聚体有机碳贡献率 32.89%、49.37%、26.61%、38.88%, Tm 处理  $>2$  mm 和 0.25~1 mm 粒级的有机碳贡献率显著高于 CK 49.27% 和 46.03%,  $<0.25$  mm

粒级显著低于 Ts 处理和 CK 31.01%、49.37%, 1~2 mm 粒级的有机碳贡献率无显著差异; 20~40 cm 土层, 各耕作措施 0.25~1 mm 粒级的有机碳贡献率显著高于 CK, Ts 处理  $>2$  mm 粒级的有机碳贡献率显著高于 Tn 处理 27.57%, 1~2 mm 各处理间无显著差异。

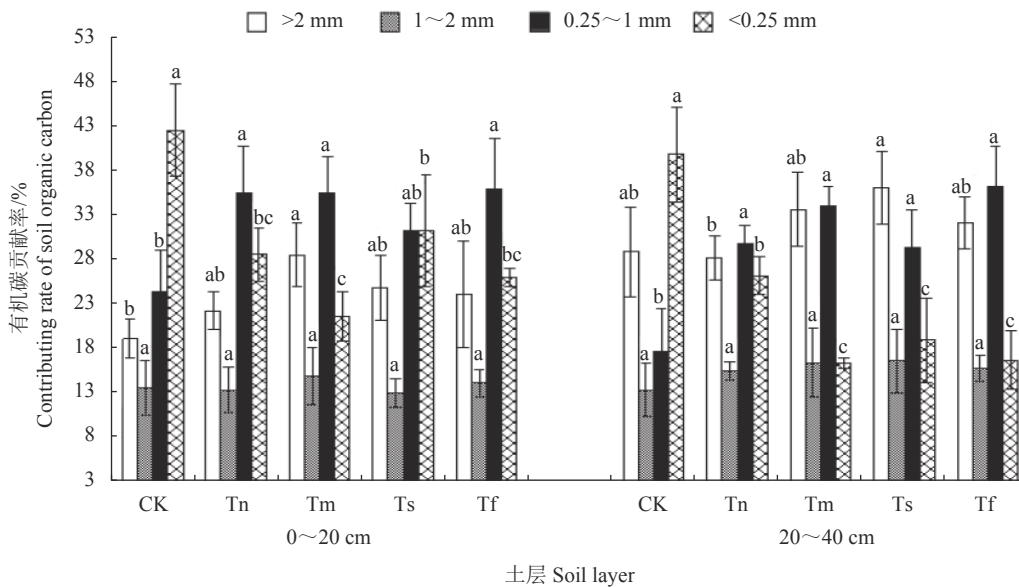


图 4 不同耕作措施条件下农田不同深度土壤团聚体有机碳贡献率

Fig. 4 Effects of tillage on organic carbon contribution rate of aggregates in soil layers

### 3 讨论

耕作可以通过对土壤的扰动影响土壤结构和微生态环境, 从而调控土壤的养分利用率, 最终对作物产量构成影响, 合理的耕作措施是保证作物获得高产的基本保证<sup>[25]</sup>。前人研究认为, 大于 0.25 mm 的团聚体 ( $R > 0.25$  mm) 是土壤中最的团粒结构, 被广泛认为是影响土壤团聚体稳定性的主要因素<sup>[26]</sup>;  $>0.25$  mm 团聚体含量与土壤团聚体稳定性呈正相关<sup>[9]</sup>。本试验结果表明, 试验区土壤主要以 0.25~1 mm 粒级团聚体为主, 4 种耕作措施均显著提高了土壤大团聚体 ( $>0.25$  mm) 的含量, 促进了土壤团聚体的形成, 增加了土壤的稳定性, 其中 Tm 处理的土壤大团聚体含量最高 (表 2), 这与范如芹等<sup>[8]</sup>在东北黑土地上的研究结果一致。这说明一方面试验区处在干旱荒漠区, 植被稀少, 地表裸露, 地上部植物有机碳源输入困难, 致使自然撂荒地土壤有机碳含量减少, 胶结作用下降, 不利于土壤大团聚体形成<sup>[27]</sup>; 另一方面传统耕作频繁的翻耕处理致使土壤有机质快速矿化, 减少了稳定性胶结剂的产生, 不利于大团聚体的形成, 而适度的翻耕处理则有利

于大团聚体的形成<sup>[8]</sup>。平均重量直径 (MWD)、几何平均直径 (GMD) 作为土壤团聚体稳定性指标, 其值越大, 团聚体稳定性越好<sup>[28]</sup>。高建华等<sup>[4]</sup>认为免耕可提高水稳性团聚体平均重量直径, 且平均重量直径随土层的增加而增加, 以免耕结合秸秆覆盖提升水稳性团聚体平均重量直径的效果最好; 与高建华等<sup>[4]</sup>不同的是, 本试验中 Tm、Ts 和 Tf 处理显著提升了各土层土壤团聚体的 MWD 和 GMD, 但 Tn 处理仅显著提高了各土层团聚体的 GMD, 而对各土层团聚体的 MWD 无显著影响。其中可能的原因是 5~8 年是短期耕作和长期耕作的转折点, 民勤绿洲区农田土壤特征对 5 年的短期耕作措施响应存在滞后效应, 由于短期的耕作措施处理, 使得土壤的某些特征特性未显现。

土壤团聚体与土壤有机碳的固定和分解关系密切。土壤有机碳作为土壤团聚体的主要胶结剂<sup>[29]</sup>, 影响土壤团聚体的数量和大小分布; 耕作方式通过改变土壤有机碳含量、分布和微生物活动生境, 从而影响土壤有机质的分解转化和团聚体的变化<sup>[30]</sup>; 大多数研究发现免少耕、秸秆还田等保护性耕作模式土壤有机碳含量显著高于传统耕作, 且主要集中

分布在0~10 cm土层<sup>[31-33]</sup>。殷文等<sup>[34]</sup>对河西武威绿洲农田土壤的研究发现,土壤各级别团聚体中的有机碳随着团聚体直径的减少和土层深度的加深而减少;郭菊花等<sup>[35]</sup>对红壤性水稻土的研究指出,土壤有机碳主要分配在250~2000 μm的大团聚体上。本试验也发现耕作提高了农田0~20 cm和20~40 cm土层各粒级团聚体中的有机碳含量,且有机碳主要分布在大团聚体上,尤以Tn和Tm处理的土壤团聚体有机碳含量较高,各粒级团聚体有机碳含量随着土层深度加深而减少,这说明有机碳含量高的组分主要依靠有机胶结物质,这不仅与耕作有关,还与大团聚体的物理保护机制相关。长期的耕作和连续多年的作物种植,作物枯枝败叶和根系残留在土壤表层集聚,有机碳富集在土壤表层,有机碳作为最主要的胶结物质,促使微团聚体更好地胶结形成大团聚体;而作为对照的自然撂荒地,由于试验区处在干旱荒漠区,受水资源和气候条件限制,植物群落稀疏,种群单一,植物覆盖度低,不能有效地积累凋落物来增加植物残体的输入,加上地表大面积裸露加速了有机碳的降解,有机碳含量持续下降,其胶结作用明显降低;因此在本试验中不同粒级土壤团聚体有机碳含量表现为大团聚体( $R > 0.25$  mm)高于微团聚体( $R < 0.25$  mm),各土层表现为表层(0~20 cm)土壤高于深层(20~40 cm)土壤。本研究还发现针对土壤扰动影响较大的两种耕作措施Ts和Tf,Tf处理使土壤各粒级团聚体中的有机碳含量高于Ts处理,但差异不显著( $p < 0.05$ ),这主要是由于Tf处理对土壤的扰动程度大于Ts处理,导致表层秸秆等有机物能够翻到深土层,使得深层土壤有机碳含量有所增加。

土壤有机碳的矿化受土壤颗粒组成、土壤温度、湿度、pH值、施肥措施、土地类型和质地等因素的影响,不同组分有机碳的土壤物理、化学、生物和非生物等性质差异会导致土壤有机碳含量发生改变,甚至不同组分间会出现显著性差异,从而对不同组分土壤有机碳的累积矿化量产生不同程度的影响<sup>[36]</sup>。本研究结果表明,与自然撂荒地(对照)相比,4种耕作措施均提高了各土层各粒级团聚体的有机碳累积矿化量,其中Ts和Tf处理含量较高,在0~20 cm土层,Ts和Tf处理使土壤团聚体有机碳矿化累积量显著增加,且随着团聚体粒级的减小而增加。一方面说明免耕使土壤耕层受到较少的物理扰动,土壤结构保持良好,减缓了土壤有机质矿化,而深松、翻耕等耕作措施改善了土壤通气能力,促进了有机质分解与矿化<sup>[37-38]</sup>;另一方面Ts和

Tf处理的土壤微团聚体含量较高,大团聚体含量较低。而微团聚体中的有机碳不稳定,易矿化分解,不利于有机碳的储存固定,大团聚体的有机碳较稳定,不易分解,利于固定。这与魏亚伟和刘晶等<sup>[36,39]</sup>的研究结果类似,但与Elliott等<sup>[40]</sup>的研究结果不一致。Elliott等<sup>[40]</sup>研究发现土壤大团聚体中的有机碳更为年轻化,因而比微团聚体中的有机碳更易矿化;相反微团聚体中的有机碳比大团聚体中的有机碳老化程度更严重,不易被矿化<sup>[41]</sup>。总之,有机碳累积矿化量在各级别土壤团聚体中的差异化表现,可能与各粒级土壤团聚体中的有机碳含量、微生物以及土壤母质、地上植被和生态环境的差异紧密相关。

## 4 结论

综上所述,耕作可促进耕层土壤团聚体的形成,增加土壤团聚体的稳定性。其中,免耕和少耕能够减少机械的破坏作用,提高各土层及表层土壤大团聚体的有机碳含量,免耕更利于有机碳的固定,少耕更利于土壤团聚体的结构稳定性。综合分析,免耕和少耕可作为民勤绿洲区农田最适宜的土壤耕作措施。

## 参考文献:

- [1] BRONICK C J, LAL R. Soil structure and management: A review [J]. *Geoderma*, 2005, 124 (1/2): 3-22.
- [2] 王丽,李军,李娟,等. 轮耕与施肥对渭北旱作玉米田土壤团聚体和有机碳含量的影响 [J]. *应用生态学报*, 2014, 25 (3): 759-768.  
WANG L, LI J, LI J, et al. Effects of tillage rotation and fertilization on soil aggregates and organic carbon content in corn field in Weibei Highland [J]. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2014, 25 (3): 759-768. (in Chinese)
- [3] Lal, R., Shukla, M. K. Principles of Soil Physics[M]. *Marcel Dekker Inc., New York*, 2004.
- [4] 高建华,张承中. 不同保护性耕作措施对黄土高原旱作农田土壤物理结构的影响 [J]. *干旱地区农业研究*, 2010, 28 (4): 192-196.  
GAO J H, ZHANG C Z. The effects of different conservation tillage on soil physical structures of dry farmland in the Loess Plateau [J]. *Agricultural Research in the Arid Areas*, 2010, 28 (4): 192-196. (in Chinese)
- [5] 张翰林,郑宪清,何七勇,等. 不同秸秆还田年限对稻麦轮作土壤团聚体和有机碳的影响 [J]. *水土保持学报*, 2016, 30 (4): 216-220.  
ZHANG H L, ZHENG X Q, HE Q Y, et al. Effect of years of straw returning on soil aggregates and organic carbon in rice-wheat rotation systems [J]. *Journal of Soil and Water Conservation*, 2016, 30 (4): 216-220. (in Chinese)
- [6] 陈晓芬,李忠佩,刘明,等. 不同施肥处理对红壤水稻土团聚体有机碳、氮分布和微生物生物量的影响 [J]. *中国农业科学*, 2013,



- 46 (5): 950-960.
- CHEN X F, LI Z P, LIU M, et al. Effects of different fertilizations on organic carbon and nitrogen contents in water-stable aggregates and microbial biomass content in paddy soil of subtropical China [J]. *Scientia Agricultura Sinica*, 2013, 46 (5): 950-960. (in Chinese)
- [7] BOSSUYT H, SIX J, HENDRIX P F. Protection of soil carbon by microaggregates within earthworm casts [J]. *Soil Biology and Biochemistry*, 2005, 37 (2): 251-258.
- [8] 范如芹, 梁爱珍, 杨学明, 等. 耕作方式对黑土团聚体含量及特征的影响 [J]. *中国农业科学*, 2010, 43 (18): 3767-3775.
- FAN R Q, LIANG A Z, YANG X M, et al. Effects of tillage on soil aggregates in black soils in northeast China [J]. *Scientia Agricultura Sinica*, 2010, 43 (18): 3767-3775. (in Chinese)
- [9] SIX J, ELLIOTT E T, PAUSTIAN K. Soil structure and soil organic matter II. A normalized stability index and the effect of mineralogy [J]. *Soil Science Society of America Journal*, 2000, 64 (3): 1042-1049.
- [10] 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 (2): 681-689.
- [11] SPOHN M, GIANI L. Impacts of land use change on soil aggregation and aggregate stabilizing compounds as dependent on time [J]. *Soil Biology and Biochemistry*, 2011, 43 (5): 1081-1088.
- [12] BEARE M H, HENDRIX P F, COLEMAN D C. Water-stable aggregates and organic matter fractions in conventional- and no-tillage soils [J]. *Soil Science Society of America Journal*, 1994, 58 (3): 777-786.
- [13] 李忠佩, 吴大付. 红壤水稻土有机碳库的平衡值确定及固碳潜力分析 [J]. *土壤学报*, 2006, 43 (1): 46-52.
- LI Z P, WU D F. Organic C content at steady state and potential of C sequestration of paddy soils in subtropical China [J]. *Acta Pedologica Sinica*, 2006, 43 (1): 46-52. (in Chinese)
- [14] HAYNES R. Labile organic matter as an indicator of organic matter quality in arable and pastoral soils in New Zealand [J]. *Soil Biology and Biochemistry*, 2000, 32 (2): 211-219.
- [15] 周萍, 宋国菡, 潘根兴, 等. 南方三种典型水稻土长期试验下有机碳积累机制研究 I. 团聚体物理保护作用 [J]. *土壤学报*, 2008, 45 (6): 1063-1071.
- ZHOU P, SONG G H, PAN G X, et al. Soc accumulation in three major types of paddy soils under long-term agro-ecosystem experiments from South China I. physical protection in soil micro-aggregates [J]. *Acta Pedologica Sinica*, 2008, 45 (6): 1063-1071. (in Chinese)
- [16] BACH E M, HOFMOCKEL K S. Soil aggregate isolation method affects measures of intra-aggregate extracellular enzyme activity [J]. *Soil Biology and Biochemistry*, 2014, 69: 54-62.
- [17] 赵鹏, 史东梅, 赵培, 等. 紫色土坡耕地土壤团聚体分形维数与有机碳关系 [J]. *农业工程学报*, 2013, 29 (22): 137-144.
- ZHAO P, SHI D M, ZHAO P, et al. Relation of soil aggregate fractal dimension and organic carbon in purple-soil slope farmland [J]. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering*, 2013, 29 (22): 137-144. (in Chinese)
- [18] VAN BAVEL C H M. Mean weight-diameter of soil aggregates as a statistical index of aggregation [J]. *Soil Science Society of America Journal*, 1950, 14 (C): 20-23.
- [19] 何淑勤, 郑子成, 宫渊波. 不同退耕模式下土壤水稳性团聚体及其有机碳分布特征 [J]. *水土保持学报*, 2011, 25 (5): 229-233.
- HE S Q, ZHENG Z C, GONG Y B. Distribution characteristics and soil organic carbon of soil water-stable aggregates with different de-farming patterns [J]. *Journal of Soil and Water Conservation*, 2011, 25 (5): 229-233. (in Chinese)
- [20] 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, 38 (20): 1896-1899.
- YANG P L, LUO Y P, SHI Y C. Soil fractal characteristics characterized by particle size weight distribution [J]. *Chinese Science Bulletin*, 1993, 38 (20): 1896-1899. (in Chinese)
- [21] 鲍士旦. 土壤农化分析[M]. 第三版. 北京: 中国农业出版社, 2000: 30-49.
- [22] 邱莉萍, 张兴昌, 张晋爱. 黄土高原长期培肥土壤团聚体中养分和酶的分布 [J]. *生态学报*, 2006, 26 (2): 364-372.
- QIU L P, ZHANG X C, ZHANG J A. Distribution of nutrients and enzymes in Loess Plateau soil aggregates after long-term fertilization [J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2006, 26 (2): 364-372. (in Chinese)
- [23] 李顺姬, 邱莉萍, 张兴昌. 黄土高原土壤有机碳矿化及其与土壤理化性质的关系 [J]. *生态学报*, 2010, 30 (5): 1217-1226.
- LI S J, QIU L P, ZHANG X C. Mineralization of soil organic carbon and its relations with soil physical and chemical properties on the Loess Plateau [J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2010, 30 (5): 1217-1226. (in Chinese)
- [24] 吴萌, 李忠佩, 冯有智, 等. 长期施肥处理下不同类型水稻土有机碳矿化的动态差异 [J]. *中国农业科学*, 2016, 49 (9): 1705-1714.
- WU M, LI Z P, FENG Y Z, et al. Dynamic differences of organic carbon mineralization in different types of paddy soil under long-term located fertilization [J]. *Scientia Agricultura Sinica*, 2016, 49 (9): 1705-1714. (in Chinese)
- [25] 赵红香, 迟淑筠, 宁堂原, 等. 科学耕作与留茬改良小麦-玉米两熟农田土壤物理性状及增产效果 [J]. *农业工程学报*, 2013, 29 (9): 113-122.
- ZHAO H X, CHI S Y, NING T Y, et al. Covering farming pattern to improve soil physical properties and crop yield in wheat-maize cropping system [J]. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering*, 2013, 29 (9): 113-122. (in Chinese)
- [26] 刘晓利, 何园球, 李成亮, 等. 不同利用方式和肥力红壤中水稳性团聚体分布及物理性质特征 [J]. *土壤学报*, 2008, 45 (3): 459-465.
- LIU X L, HE Y Q, LI C L, et al. Distribution and physical properties of soil water-stable aggregates in red soils different in land use and soil fertility [J]. *Acta Pedologica Sinica*, 2008, 45 (3): 459-465. (in Chinese)
- [27] 侯贤清, 贾志宽, 韩清芳, 等. 不同轮耕模式对旱地土壤结构及入渗蓄水特性的影响 [J]. *农业工程学报*, 2012, 28 (5): 85-94.
- HOU X Q, JIA Z K, HAN Q F, et al. Effects of different rotational tillage patterns on soil structure, infiltration and water storage characteristics in dryland [J]. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering*, 2012, 28 (5): 85-94. (in Chinese)

- [28] 王军强, 刘立超, 杨义荣, 等. 民勤绿洲区撂荒农耕地土壤有机碳变化特征及影响因素 [J]. 土壤, 2015, 47 (5): 932-939.  
WANG J Q, LIU L C, YANG Y R, et al. Changes and influencing factors of soil organic carbon in abandoned cropland of Minqin oasis region [J]. *Soils*, 2015, 47 (5): 932-939. (in Chinese)
- [29] 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.  
LIU Z L, YU W T. Review of researches on soil aggregate and soil organic carbon [J]. *Chinese Journal of Eco-Agriculture*, 2011, 19 (2): 447-455. (in Chinese)
- [30] 刘红梅, 李睿颖, 高晶晶, 等. 保护性耕作对土壤团聚体及微生物学特性的影响研究进展 [J]. 生态环境学报, 2020, 29 (6): 1277-1284.  
LIU H M, LI R Y, GAO J J, et al. Research progress on the effects of conservation tillage on soil aggregates and microbiological characteristics [J]. *Ecology and Environmental Sciences*, 2020, 29 (6): 1277-1284. (in Chinese)
- [31] SOMBRERO A, DE BENITO A. Carbon accumulation in soil. Ten-year study of conservation tillage and crop rotation in a semi-arid area of Castile-Leon, Spain [J]. *Soil and Tillage Research*, 2010, 107 (2): 64-70.
- [32] SYSWERDA S P, CORBIN A T, MOKMA D L, et al. Agricultural management and soil carbon storage in surface vs. deep layers [J]. *Soil Science Society of America Journal*, 2011, 75 (1): 92-101.
- [33] 李景, 吴会军, 武雪萍, 等. 长期保护性耕作提高土壤大团聚体含量及团聚体有机碳的作用 [J]. 植物营养与肥料学报, 2015, 21 (2): 378-386.  
LI J, WU H J, WU X P, et al. Impact of long-term conservation tillage on soil aggregate formation and aggregate organic carbon contents [J]. *Journal of Plant Nutrition and Fertilizer*, 2015, 21 (2): 378-386. (in Chinese)
- [34] 殷文, 郭瑶, 陈桂平, 等. 绿洲农田土壤团聚体组成及有机碳和全氮分布对秸秆还田方式的响应 [J]. 干旱地区农业研究, 2019, 37 (3): 139-148.  
YIN W, GUO Y, CHEN G P, et al. Response of composition of soil aggregates and distribution of organic carbon and total nitrogen to straw returning in an oasis area [J]. *Agricultural Research in the Arid Areas*, 2019, 37 (3): 139-148. (in Chinese)
- [35] 郭菊花, 陈小云, 刘满强, 等. 不同施肥处理对红壤性水稻土团聚体的分布及有机碳、氮含量的影响 [J]. 土壤, 2007, 39 (5): 787-793.  
GUO J H, CHEN X Y, LIU M Q, et al. Effects of fertilizer management practice on distribution of aggregates and content of organic carbon and nitrogen in red paddy soil [J]. *Soils*, 2007, 39 (5): 787-793. (in Chinese)
- [36] 刘晶, 田耀武, 张巧明. 豫西黄土丘陵区不同土地利用方式土壤团聚体有机碳含量及其矿化特征 [J]. 水土保持学报, 2016, 30 (3): 255-261.  
LIU J, TIAN Y W, ZHANG Q M. Characteristics of soil organic carbon content and mineralization in soil aggregates under different land use patterns on the loess hilly area of western Henan [J]. *Journal of Soil and Water Conservation*, 2016, 30 (3): 255-261. (in Chinese)
- [37] 崔孝强, 阮震, 刘丹, 等. 耕作方式对稻-油轮作系统土壤理化性质及重金属有效性的影响 [J]. 水土保持学报, 2012, 26 (5): 73-77.  
CUI X Q, RUAN Z, LIU D, et al. Effects of tillage methods on physicochemical properties and heavy metal availability of soils in rice-rape rotation systems [J]. *Journal of Soil and Water Conservation*, 2012, 26 (5): 73-77. (in Chinese)
- [38] 王昌全, 代天飞, 李冰, 等. 稻麦轮作下水稻土重金属形态特征及其生物有效性 [J]. 生态学报, 2007, 27 (3): 889-897.  
WANG C Q, DAI T F, LI B, et al. The speciation and bioavailability of heavy metals in paddy soils under the rice-wheat cultivation rotation [J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2007, 27 (3): 889-897. (in Chinese)
- [39] 魏亚伟, 苏以荣, 陈香碧, 等. 人为干扰对喀斯特土壤团聚体及其有机碳稳定性的影响 [J]. 应用生态学报, 2011, 22 (4): 971-978.  
WEI Y W, SU Y R, CHEN X B, et al. Effects of human disturbance on soil aggregates content and their organic C stability in Karst regions [J]. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2011, 22 (4): 971-978. (in Chinese)
- [40] ELLIOTT E T, CAMBARDELLA C A. Physical separation of soil organic matter [J]. *Agriculture, Ecosystems & Environment*, 1991, 34 (1-4): 407-419.
- [41] PUGET P, CHENU C, BALESSENT J. Dynamics of soil organic matter associated with particle-size fractions of water-stable aggregates [J]. *European Journal of Soil Science*, 2010, 51 (4): 595-605.

(责任编辑: 于洪杰)