

# 黄土高原旱地保护性耕作农田土壤团聚体特性变化研究

赵如浪<sup>1</sup> 冯佰利<sup>1\*</sup> 蒋树怀<sup>1</sup> 张小东<sup>1</sup> 屈洋<sup>1</sup> 蔡晓青<sup>2</sup> 朱瑞祥<sup>3</sup>

(1. 西北农林科技大学 农学院, 陕西 杨凌 712100; 2. 陕西省黄陵县农机局, 陕西 黄陵 727300;  
3. 西北农林科技大学 机械与电子工程学院, 陕西 杨凌 712100)

**摘要** 以春玉米品种沈玉 17 为材料, 设置保护性耕作(NT)、传统耕作+秸秆还田(TS)和传统耕作(CT)3 种耕作方式, 通过多年定位试验, 研究黄土高原旱地保护性耕作农田土壤有机质及团聚体特性的变化。结果表明, NT 与 TS 和 CT 相比能显著提高土壤有机质含量。干筛法分析结果表明, 0~30 cm 深度, NT 处理粒径 > 0.25 mm 的大团聚体含量、平均重量直径(mean weight diameter, MWD)均显著高于 TS 和 CT 处理。湿筛法分析结果表明, 水稳性团聚体 MWD 在 0~10 cm 深度为 NT>TS>CT, 处理间差异显著( $P<0.05$ ); 0~20 cm 深度, NT 处理土壤团聚体破坏率均低于 CT 处理。保护性耕作能促进土壤团聚体的形成, 提高团聚体的稳定性, 而传统耕作则由于人为扰乱土层结构, 降低了土壤团聚体数量和稳定性。

**关键词** 黄土高原; 保护性耕作; 有机质; 团聚体; 平均重量直径

**中图分类号** S 152.4

**文章编号** 1007-4333(2011)04-0074-06

**文献标志码** A

## Effects of conservation tillage on soil aggregates in dry land of loess plateau

ZHAO Ru-lang<sup>1</sup>, FENG Bai-li<sup>1\*</sup>, JIANG Shu-huai<sup>1</sup>, ZHANG Xiao-dong<sup>1</sup>,  
QU Yang<sup>1</sup>, CAI Xiao-qing<sup>2</sup>, ZHU Rui-xiang<sup>3</sup>

(1. College of Agronomy, Northwest A & F University, Yangling 712100, China;

2. Agricultural Mechanism Bureau, Huangling 727300, China;

3. College of Mechanical and Electronic Engineering, Northwest A & F University, Yangling 712100, China)

**Abstract** The paper studied the effects of conservation tillage on the soil aggregate and organic carbon by years on Loess Plateau. The spring maize cultivars Shenyu17 were used in the test under three farming modes of No tillage (NT), conventional tillage + Straw returning (TS) and conventional tillage (CT). To study the effects, soil organic matter content was measured, and the aggregates composition, size distribution were examined by dry and wet sieving methods. The results showed that, NT significantly increased soil organic matter content compared with TS and CT. Dry sieving results showed that NT was higher in macro-aggregate content ( $R>0.25$ ) and mean weight diameter (MWD) than other treatments at 0 - 30 cm. Wet sieving results showed that the MWD of water-stable aggregates showed the trend: NT>TS>CT at 0 - 10 cm, Their differences reached the significant level of  $P<0.05$  among the three tillage treatments. At 0 ~ 20cm, Destruction rate of aggregate under NT was higher than CT. NT increased the aggregation and the stability of soil aggregates, while due to intense disturbance, the aggregation and stability were decreased under CT.

**Key words** loess plateau ; conservation tillage; organic carbon; soil aggregate; MWD

收稿日期: 2010-10-20

基金项目: 农业部先正达农业科教及农村发展项目; 公益性行业(农业)科研专项经费资助(200903007)

第一作者: 赵如浪, 硕士研究生, E-mail: langzi9620@126.com

通讯作者: 冯佰利, 教授, 主要从事作物高产生态生理技术、植物资源可持续利用及小杂粮育种和栽培研究,

E-mail: 7012766@163.com

黄土高原是我国北方重要的旱作农区,同时也是我国水土流失最为严重的地区。传统耕作方式对耕层土壤翻动次数过多,致使耕地质量下降、生产成本增加,并导致水土流失加剧、生态环境进一步恶化。而保护性耕作是以减少对土壤的扰动和增加秸秆覆盖为主要特点的耕作方式,能够改善土壤结构,增加土壤的持水性、抗蚀性和通透性。因此,通过改变耕作模式增强旱地农田土壤对外界不良环境侵蚀影响的抵抗力是改变农田生态环境,降低农业生产导致的水土流失,提高旱地农业生产力和水分利用效率的有效方式<sup>[1]</sup>。

土壤团聚体是衡量土壤肥力的指标之一。有良好团粒结构的土壤在作物生长期能很好的调节植物对水分、养分、空气和温度的需要,从而促进作物获得高产<sup>[2]</sup>。土壤有机质是土壤质量的核心,不仅能为作物提供所需的各种营养元素,同时对土壤结构的形成和改善土壤结构的物理性状有决定性作用。近年来,国内外有关于土壤团粒结构的研究结果表明<sup>[3-5]</sup>:土壤有机质在土壤结构的形成过程中起关键作用,土壤团粒结构能够影响土壤水热状况;土壤团聚体结构的稳定性对土壤肥力、质量和土壤的可持续利用具有重要影响。不同质地土壤利用方式下土壤质量高低不仅受大、小团聚体自身作用的影响,而且与团聚体组成比例相关。这些研究主要集中于不同质地土壤利用方式对土壤团粒结构的影响,而对于不同耕作方式下黄土高原旱地土壤有机质含量变化,以及土壤团粒结构组成与分布的研究未见详细报道。为此,本研究经过长期定位试验,在配套农机具和植保防治措施相结合的基础上,设置3种生产中易于实施推广的耕作模式,测定了0~100 cm深度土壤有机质含量,运用干筛法和湿筛法分析测定0~40 cm土壤团聚体组成与分布状况,旨在研究黄土高原春玉米区不同耕作处理对土壤有机质含量及团聚体特性的影响,为黄土高原春玉米保护性耕作技术体系的建立推广以及选择合理的耕作方式提供理论依据。

## 1 材料与方法

### 1.1 试验区概况

试验地点位于黄土高原中部高原沟壑区陕西省黄陵县桥山镇。试区海拔约1 km,属温带半湿润偏

旱气候,年均气温9.3℃,无霜期170 d,年均降水量614 mm,且主要集中在05—09月份,农业用水主要依靠自然降水,属典型雨养农业地区。该区地形地貌、气候条件、生产水平和经济条件,在黄土高原中、南部具有典型代表性;土壤类型为黄绵土,土层深厚,质地均匀;耕层土壤有机质含量平均值为8.17 g/kg,土壤容重平均值为1.23 g/cm<sup>3</sup>。

试验于2006—2009年连续进行,共设3种耕作处理:

1)保护性耕作(NT)。碎秆浅旋秸秆全程覆盖,前茬玉米收获时留秸秆→秸秆(切)碎浅耙(旋)镇压→免耕施肥播种→除草、防病虫。设3个重复,小区面积8 100 m<sup>2</sup>(180 m×45 m),秸秆还田量约10<sup>4</sup> kg/hm<sup>2</sup>。

2)传统耕作+秸秆还田(TS)。前茬玉米收获时留秸秆→秸秆(切)碎浅耙(旋)镇压→铧式犁翻耕→浅耕施肥整地→露地条播→除草、防病虫。设3个重复,小区面积为8 100 m<sup>2</sup>(180 m×45 m),秸秆还田量约10<sup>4</sup> kg/hm<sup>2</sup>。

3)传统耕作(CT)。前茬玉米收获后清除秸秆→铧式犁翻耕→旋耕镇压→浅耕施肥整地→露地条播→除草、防病虫。设3个重复,小区面积为8 100 m<sup>2</sup>(180 m×45 m)。

供试春玉米品种为沈玉17,于04月20日前后播种,播量45 kg/hm<sup>2</sup>;播种时基施尿素225 kg/hm<sup>2</sup>和磷酸二铵225 kg/hm<sup>2</sup>。4~6叶期间定苗,小喇叭口期结合中耕追施尿素225 kg/hm<sup>2</sup>。

## 1.2 测定项目及方法

### 1.2.1 土壤有机质

2009年,即保护性耕作第4年,于春玉米收获后用土钻在0~100 cm土层取样,每20 cm取1次。每处理采用S型取样法采集土样,剔除石块、植物残根等杂物,混合后四分法留1 kg左右,装袋带回实验室,风干研磨过1 mm筛,供测定用。土壤有机质采用重铬酸钾外加热法进行测定<sup>[6]</sup>。

### 1.2.2 土壤团聚体

2009年于春玉米收获后,按S型5点取土法在0~10、10~20、20~30和30~40 cm 4个土层采集原状土样,自然风干后除去粗根及小石块,并将大土块按自然纹理分成为1 cm<sup>3</sup>左右的小块土。

土壤团聚体的分布状况和稳定性采用干筛法和

湿筛法<sup>[7]</sup>。将取回的土样风干用标准筛分级(依次为5 mm、2~5 mm和<2 mm 3级),各粒级分别称量,计算各粒级的质量分数,将各粒级按土样百分比值调样200 g,同样调制8份,4份做干筛法用,4份做湿筛法用。干筛法:取1份分好的土样置于套筛(孔径依次为5、2、1、0.5和0.25 mm)顶部,在震荡仪上以280 r/min震荡2 min,称量测定各孔径筛子上土样质量。湿筛法:取一份分称好的土样置于1 L塑料杯中,加水至900 mL浸泡10 min,将其移至超声波分散仪上分散30 min,然后将分散好的土样连水一起置于水桶中的套筛(孔径依次为5、2、1、0.5和0.25 mm)顶部,将套筛在水中慢慢提起然后迅速放下,如此上下重复50下(每次重复受力均匀),将各级孔径筛子上土样置于铝盒烘干称量。

### 1.3 数据处理

团聚体稳定性用平均重量直径(Mean-weight Diameter, MWD)表示<sup>[8]</sup>:

$$MWD = \frac{\sum_{i=1}^n (\bar{X}_i W_i)}{\sum_{i=1}^n W_i}$$

式中: $\bar{X}_i$ 为某级团聚体的平均直径,mm; $W_i$ 为对应于 $X_i$ 的团聚体质量分数。团聚体破坏率为<sup>[9]</sup>:

$$\text{团聚体破坏率} = \frac{R_j - R_s}{R_j} \times 100\%$$

式中: $R_j$ 和 $R_s$ 分别表示粒径>0.25 mm土壤机械稳定性团聚体和水稳定性团聚体的质量分数,%。

采用Microsoft Excel、DPS7.05统计软件进行数据处理和分析。

## 2 结果与分析

### 2.1 保护性耕作对土壤有机质含量的影响

不同耕作方式下土壤有机质质量分数变化见图1。各处理不同土层土壤有机质质量分数自上而下呈下降趋势。0~20、20~40、40~60 cm 4层土壤有机质质量分数变化顺序均表现为:NT>TS>CT,与TS和CT处理相比,NT处理均能显著增加土壤有机质质量分数,其中,0~20 cm,NT处理土壤有机质质量分数最高达13.9;0~20和40~60 cm土层TS处理与CT处理差异不显著,20~40 cm分析结果显示3个处理间差异均达显著水平( $P<0.05$ )。这是因为秸秆还田为土壤有机质增加

提供了“源”,而土壤免耕则为秸秆腐解提供了优良的环境,增加了土壤腐殖质。相反,深翻耕措施增加了对土壤的扰动,致使大量 $CO_2$ 逸出土壤,pH增加。说明经过4年的保护性耕作,农田土壤有机质质量分数显著增加。

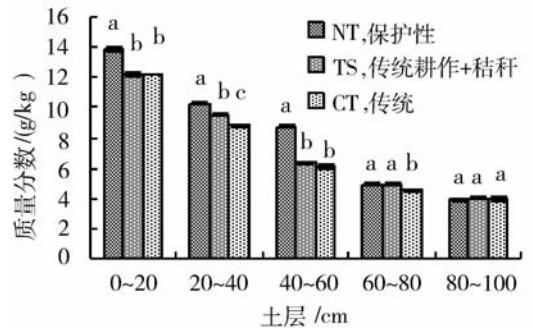


图1 不同耕作方式土壤有机质质量分数的变化

Fig. 1 Content of soil organic matter under different farming treatments

### 2.2 保护性耕作对土壤机械稳定性团聚体组成的影响

土壤团聚体是衡量土壤肥力的指标之一。土壤中粒径>0.25 mm的团聚体称为土壤团粒结构体,是土壤中最好的结构体,其含量与土壤肥力状况呈正相关<sup>[10]</sup>。不同耕作方式下0~40 cm土壤深度,粒径>0.25 mm机械稳定性团聚体质量分数为77.17%~104.61%(表1)。0~10 cm土层,粒径>0.25 mm机械稳定性团聚体质量分数变化顺序为:NT>CT>TS,NT处理与TS和CT处理相比差异达 $P<0.05$ 显著水平,且较CT增加14.05%。10~20 cm和20~30 cm土层,粒径>0.25 mm机械稳定性团聚体质量分数变化顺序均为:NT>CT>TS;数据分析结果显示3个处理间存在显著差异,NT和CT处理较CT分别增加13.32%和9.88%。30~40 cm土层,粒径>0.25 mm机械稳定性团聚体质量分数变化顺序为:CT>NT>TS,NT与TS差异达( $P<0.05$ )显著水平。0~40 cm土壤深度,粒径>5 mm土壤团聚体质量分数变化顺序为:NT>TS>CT,且3个处理间差异显著。表明免耕+秸秆还田能显著提高0~30 cm土壤深度大团聚体质量分数,土壤团粒结构好,而传统耕作则由于人为的扰动含量较低。

表1 不同耕作方式下土壤机械稳定性团聚体组成及其质量分数

Table 1 Composition and size distribution of soil mechanical aggregates under different farming treatments %

土层/cm	处理	团聚体粒径/mm					
		>5	2~5	1~2	0.5~1	0.25~0.5	>0.25
0~10	NT	44.75 a	16.58 a	12.41 b	14.42 b	5.24 b	93.41 a
	TS	33.62 b	13.65 b	12.77 b	14.11 b	7.62 a	81.77 b
	CT	31.24 c	12.45 c	13.87 a	16.65 a	7.70 a	81.90 b
10~20	NT	71.01 a	9.71 a	6.48 c	5.80 c	2.05 c	95.06 a
	TS	59.77 b	7.69 b	12.77 a	8.22 b	3.72 b	92.17 b
	CT	46.27 c	8.22 b	10.75 b	13.18 a	5.45 a	83.88 c
20~30	NT	64.69 a	15.57 a	8.33 b	10.40 c	5.61 a	104.61 a
	TS	46.26 b	11.38 b	8.12 b	11.00 b	5.71 a	82.47 b
	CT	39.55 c	11.31 b	9.77 a	11.69 a	4.86 b	77.17 c
30~40	NT	58.59 a	10.29 b	10.77 a	7.46 c	4.70 b	91.81 a
	TS	52.02 b	12.38 a	7.44 b	8.48 b	4.25 c	84.58 b
	CT	49.28 c	12.45 a	10.19 a	13.67 a	6.30 a	91.89 a

注：同列不同小写字母表示不同处理间差异显著( $P<0.05$ )。下表同。

**2.3 保护性耕作对土壤水稳性团聚体组成的影响**  
土壤水稳性团聚体质量分数高低能够更好地反映土壤结构保持和供应养分能力的强弱,因而比非

水稳性团聚体更为重要<sup>[11]</sup>。由表2可见,粒径>0.25 mm水稳性团聚体质量分数为2.93%,远小于机械稳定性团聚体的104.61%,说明维持土壤团粒

表2 不同耕作方式下土壤水稳性团聚体组成及其质量分数

Table 2 Composition and size distribution of soil water-stable aggregates under different farming treatments %

土层/cm	处理	团聚体粒径/mm				
		2~5	1~2	0.5~1	0.25~0.5	>0.25
0~10	NT	0.48 a	0.44 a	1.11 a	0.89 b	2.93 a
	TS	0.31 ab	0.33 ab	0.90 b	0.91 b	2.46 b
	CT	0.15 b	0.22 b	0.55 c	1.13 a	2.05 c
10~20	NT	0.23 a	0.26 a	0.74 a	0.80 a	2.03 a
	TS	0.21 b	0.22 b	0.53 b	0.41 b	1.36 c
	CT	0.21 b	0.23 ab	0.62 b	0.75 a	1.81 b
20~30	NT	0.26 a	0.18 a	0.29 a	1.24 a	1.90 a
	TS	0.18 b	0.16 b	0.29 a	1.21 a	1.92 a
	CT	0.08 c	0.18 a	0.30 a	1.18 a	1.74 b
30~40	NT	0.13 b	0.14 ab	0.52 b	1.50 a	2.29 b
	TS	0.28 a	0.13 b	0.70 a	0.87 b	1.97 c
	CT	0.07 c	0.16 a	0.79 a	1.63 a	2.65 a

结构特性大部分为非水稳性团聚体。不同耕作方式下,0~10 cm 土层,粒径>0.25 mm 水稳性团聚体质量分数表现为:NT>TS>CT,NT 处理较 TS 和 CT 处理分别增加 42.93%和 20.00%,处理间差异显著;NT 处理下,粒径 2~5 mm 水稳性团聚体质量分数均大于 TS 和 CT 处理,且 NT 与 CT 差异显著。10~20 cm 土层,粒径>0.25 mm 水稳性团聚体质量分数的变化顺序为:NT>CT>TS,3 个处理间差异显著,TS 和 CT 较 NT 处理分别减少 33.00%和 10.84%;NT 处理下,粒径 2~5 mm 水稳性团聚体质量分数均大于 TS 和 CT 处理,且 NT 与 TS 和 CT 差异显著。20~30 cm 土层,粒径>0.25 mm 水稳性团聚体质量分数,TS 处理最高,NT 和 TS 与 CT 处理差异达( $P<0.05$ )显著水平,NT 和 TS 处理较 CT 分别增加 9.20%和 10.34%;粒径 2~5 mm 水稳性团聚体质量分数 NT 处理较 TS 和 CT 高,处理间差异显著。30~40 cm 土层,粒径>0.25 mm 水稳性团聚体质量分数 CT 处理较 NT 和 TS 高,处理间差异显著。

以上分析表明,0~30 cm 土层,免耕+秸秆还田对粒径>0.25 mm 土壤水稳性团聚体的形成具有促进作用,而对 30~40 cm 以下土层的土壤水稳性团聚体影响较小。

## 2.4 保护性耕作对土壤团聚体稳定参数的影响

### 2.4.1 土壤平均重量直径

土壤平均重量直径(MWD)是反映土壤团聚体大小分布状况的常用指标,通常用 MWD 值反应土壤团聚体的稳定性<sup>[12]</sup>。不同耕作方式下土壤团聚体的 MWD 值见表 3。干筛法不同耕作处理下土壤机械稳定性团聚体的 MWD 值在 0~10、10~20、20~30 和 30~40 cm 土层,均表现为:NT>TS>CT,NT 处理与 CT 处理间差异达( $P<0.05$ )显著水平,与 CT 处理相比,NT 处理下各土层土壤机械稳定性团聚体的 MWD 值分别增加了 31.25%、38.51%、51.06%和 11.15%。其中,0~10、10~20 和 20~30 cm 土层,3 个耕作处理间差异均达( $P<0.05$ )显著水平,湿筛法不同耕作处理水稳性团聚体的 MWD 值 MWD 在 0~10 cm 土层,表现为:NT>TS>CT,与 CT 处理相比,NT 处理增加了 46.34%,且处理间差异显著;10~20、20~30 和 30~40 cm 土层,均为 TS>NT>CT,TS 与 CT 处理间差异显著,与 CT 处理相比,TS 处理分别增加了 18%、36.23%和 61.9%,表明免耕和秸秆还田能

显著提高土壤团聚体的 MWD 值。

表 3 不同耕作方式下土壤团聚体稳定性参数  
Table 3 Stability parameter of soil aggregates under different farming treatments

土层/cm	处理	MWD/mm <sup>①</sup>		破坏率/ %
		机械 团聚体	水稳性 团聚体	
0~10	NT	3.36 a	1.20 a	96.87 c
	TS	2.69 b	1.06 a	96.99 b
	CT	2.56 c	0.82 b	97.50 a
10~20	NT	4.28 a	1.01 b	97.86 b
	TS	3.75 b	1.18 a	98.53 a
	CT	3.09 c	1.00 b	97.85 b
20~30	NT	4.26 a	0.83 b	98.82 a
	TS	3.14 b	0.94 a	98.54 b
	CT	2.82 c	0.69 c	98.47 c
30~40	NT	3.76 a	0.70 b	97.51 b
	TS	3.43 b	1.02 a	97.68 a
	CT	3.41 b	0.63 b	97.12 c

注:① MWD (Mean-weight Diameter),土壤平均重量直径。

### 2.4.2 土壤破坏率

0~10 cm 土层,不同耕作处理土壤团聚体破坏率表现为:CT>TS>NT,CT 处理破坏率最高达 97.50%,3 个处理间差异显著( $P<0.05$ );10~20 cm 土层,3 个处理破坏率大小顺序为:CT>NT>TS,TS 处理最高,达 98.53%,TS 处理与 NT 处理间差异显著(表 3)。说明免耕和秸秆还田有利于减少农田耕层土壤团聚体的破坏率,而传统耕作则由于对土壤的扰动大,增加了土壤团聚体的破坏率,土壤结构稳定性差。耕作方式对耕层以下各土层土壤的干扰较少,故对土壤的结构稳定性影响小。

## 3 讨论

相关研究结果表明,土壤团聚体稳定性取决于土壤特性,特别是作为团聚体主要胶结剂的土壤有机质含量<sup>[13-15]</sup>。许淑青等的研究结果表明<sup>[16-17]</sup>,免耕有利于提高土壤表层有机质含量。本研究结果表明,免耕和秸秆还田在玉米收获后能显著提高土壤有机质含量,且随土层深度的增加而递减。有研究表明<sup>[18-19]</sup>,常规耕作使团聚体稳定性降低,机械稳定

性团聚体和水稳性团聚体均比耕作前有不同程度的下降,其中大直径团聚体的下降最为明显。许淑青等<sup>[16,20-22]</sup>研究表明,土壤团聚体的稳定性与MWD值和破坏率密切相关,团聚体的平均粒径团聚度就越高,破坏率越小,稳定性越强。本研究用粒径 $>0.25\text{ mm}$ 团聚体质量分数、MWD和破坏率作为评价土壤团聚体特性的参数,通过干筛法和湿筛法对土壤团聚体组成和分布进行研究,发现保护性耕作处理下 $0\sim 30\text{ cm}$ 土壤深度团聚体的组成和分布显著优于传统耕作处理。由于干筛法反映的是原状土壤中非水稳性团水体和水稳性团聚体的总体状况;而湿筛法反映的是水稳性团聚体的特征,所以干筛法和湿筛法的分析结果不尽相同,湿筛法能更准确地反应不同耕作方式对土壤结构特性的影响。

## 4 结 论

与传统耕作相比,免耕和秸秆还田对土壤有机质含量和土壤团聚体特性均有明显影响,均能提高土壤有机质含量,其中,免耕+秸秆还田处理效果最优;干筛法和湿筛法研究结果显示:免耕+秸秆还田处理下, $0\sim 10$ 、 $10\sim 20$ 和 $20\sim 30\text{ cm}$ 土层,粒径 $>0.25\text{ mm}$ 与粒径 $>2\text{ mm}$ 的机械稳定性团聚体和水稳性团聚体的质量分数最高,免耕+秸秆还田处理与传统耕作+秸秆还田处理和传统耕作处理间差异显著( $P<0.05$ )。免耕+秸秆还田能显著提高土壤团聚体MWD值,有利于减少农田耕层土壤团聚体的破坏率,提高土壤团聚体的稳定性,对改良土壤的团聚结构有积极作用。

## 参 考 文 献

- [1] 李静锐,饶良懿,余新晓.黄土高原水保耕作措施的生态服务功能价值[J].水土保持应用技术,2007(3):12-14
- [2] 林大义.土壤学实验指导[M].北京:中国林业出版社,2004:70-72
- [3] 章明奎,何振立,陈国潮,等.利用方式对红壤水稳性团聚体形成的影响[J].土壤学报,1997,34(4):359-366
- [4] 史弈,陈欣,沈善敏.土壤团聚体的稳定机制及人类活动的影响[J].应用生态学报,2002,13(11):1491-1494
- [5] Puget P,Chenu C,Balesdent J. Dynamics of soil organic matter associated with particle-size fractions of water-stable aggregates [J]. European Journal of Soil Science, 2000, 51: 595-605
- [6] 鲍士旦.土壤农化分析[M].3版.北京:中国农业出版社,2005
- [7] 中国科学院南京土壤研究所土壤物理研究所.土壤物理性质测定法[M].北京:科学出版社,1978:83-85
- [8] 袁德玲,张玉龙,唐首锋,等.不同灌溉方式对保护地土壤水稳性团聚体的影响[J].水土保持学报,2009,23(3):125-134
- [9] 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):459-464
- [10] 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, 64:1042-1049
- [11] 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
- [12] 严波,贾志宽,韩清芳,等.不同耕作方式对宁南旱地土壤团聚体的影响[J].干旱地区农业研究,28(3):58-61
- [13] 彭新华,张斌,赵其国.红壤侵蚀裸地植被恢复及土壤有机碳对团聚体稳定性的影响[J].生态学报,2003,23:2176-2183
- [14] Tisdall J M, Oades J M. Organic matter and water stable aggregates in soils [J]. Journal of Soil Science, 1982, 33:141-163
- [15] Puget P,Chenu C,Balesdent J. Dynamics of soil organic matter associated with particle-size fractions of water-stable aggregates[J]. European Journal of Soil Science, 2000, 51: 595-605
- [16] 许淑青,张仁陟,董博,等.耕作方式对耕层土壤结构性能及有机碳含量的影响[J].中国生态农业学报,2009,17(2):206-208
- [17] 王新建,张仁陟,毕冬梅,等.保护性耕作对土壤有机碳组分的影响[J].水土保持学报,2009,23(2):115-121
- [18] 严洁,邓良基,黄剑.保护性耕作对土壤理化性质和作物产量的影响[J].中国农机化,2005(2):31-34
- [19] 刘广深,许中坚,徐东梅.酸沉降对土壤团聚体及土壤可蚀性影响[J].水土保持通报,2001,21(4):70-74
- [20] 王哲峰,高波,李小刚.利用方式对干旱草原土壤碳水化合物含量及团聚体稳定性的影响[J].甘肃农业大学学报,2006,41(3):91-95
- [21] 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,2007,40(9):1973-1979
- [22] 杨如萍,郭贤仕,吕军峰,等.不同耕作和种植模式对土壤团聚体分布及稳定性的影响[J].水土保持学报,2010,24(1):252-256

(责任编辑:刘迎春)