

doi:10.6041/j.issn.1000-1298.2017.09.022

长期免耕对不同土层土壤结构与有机碳分布的影响

杨永辉^{1,2} 武继承^{1,2} 丁晋利³ 张洁梅^{1,2} 潘晓莹^{1,2} 何方^{1,2}

(1. 河南省农业科学院植物营养与资源环境研究所, 郑州 450002; 2. 农业部作物高效用水原阳科学观测站, 原阳 453514;
3. 郑州师范学院地理与旅游学院, 郑州 450044)

摘要: 为探明长期翻耕与免耕条件下不同土层深度土壤结构稳定性及其有机碳分布特征,在长期定位试验中分层(0~10 cm、10~20 cm、…、90~100 cm)采集免耕和常规耕作处理下混合土样和原状土样进行土壤结构与有机碳的测定,结果表明:①随着土层的加深,0.5~2.0 mm和大于2.0 mm粒级团聚体含量表现为逐渐降低的趋势,而其他粒级团聚体含量呈增加趋势。免耕更利于提高大粒级团聚体(>0.5 mm)的含量,且土壤结构的稳定性显著提高,其作用深度在50 cm以上。②随着土层的加深,土壤总有机碳和活性有机碳均表现为先增加后降低再趋于稳定的趋势。免耕处理在0~80 cm土层的土壤总有机碳和活性有机碳均高于常规耕作处理。③随着土层的加深,不同粒级团聚体总有机碳含量呈降低趋势,大粒级团聚体中含有较高的有机碳。免耕更利于0~40 cm土层不同粒级团聚体总有机碳含量的提高。随着土壤团聚体粒级的降低,土壤活性有机碳含量呈降低趋势。与常规耕作相比,除0.053~0.250 mm粒级团聚体外,免耕提高了0~20 cm土层各粒级团聚体中活性有机碳含量。④随着土层的加深,各粒级团聚体中有机碳对土壤总有机碳的贡献率表现为先降低后增加再降低的趋势。不同粒级团聚体中,大于2.0 mm和小于0.053 mm粒级团聚体有机碳贡献率在0~100 cm土层均低于其他粒级团聚体。在0~20 cm、30~40 cm和90~100 cm土层,免耕处理各粒级团聚体有机碳累积贡献率均高于常规耕作。

关键词: 常规耕作; 免耕; 土壤结构; 土壤有机碳; 有机碳贡献率

中图分类号: S152.4; S156 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-1298(2017)09-0173-10

Effects of Long-term No-tillage on Soil Structure and Organic Carbon Distribution in Different Soil Layers

YANG Yonghui^{1,2} WU Jicheng^{1,2} DING Jinli³ ZHANG Jiemei^{1,2} PAN Xiaoying^{1,2} HE Fang^{1,2}

(1. Institute of Plant Nutrition and Resource Environment, Henan Academy of Agricultural Sciences, Zhengzhou 450002, China
2. Yuanyang Experimental Station of Crop Water Use, Ministry of Agriculture, Yuanyang 453514, China
3. College of Geography and Tourism, Zhengzhou Normal University, Zhengzhou 450044, China)

Abstract: In order to investigate the stability of soil structure and the distribution characteristics of organic carbon in different soil depths (0~10 cm, 10~20 cm, ..., 90~100 cm) under long-term conventional tillage and no-tillage conditions, mixed soil samples and undisturbed soil samples collected from no-tillage and conventional tillage treatments were designed to measure soil structure and soil organic carbon content. The results indicated that with the increase of soil depth, the contents of aggregates with diameter of 0.5~2.0 mm and greater than 2.0 mm were gradually decreased, while other particle agglomerates were increased. No-tillage treatment could improve the large aggregates (greater than 0.5 mm) content, and significantly improve the stability of soil structure, the effect of depth was more than 60 cm. With the increase of soil depth, soil organic carbon and active organic carbon content were increased firstly and then decreased, and then trended to be stable. Soil carbon and active organic carbon of no-tillage treatment in 0~80 cm soil layer were higher than that of conventional tillage. With the increase of soil depth, soil aggregates organic carbon content was decreased, while organic carbon content of large aggregates was higher than other size aggregates. No-tillage was more conducive to increase soil organic carbon content of different size aggregates under 0~40 cm soil depth. With the decrease of soil

收稿日期: 2017-05-03 修回日期: 2017-07-05
基金项目: 国家自然科学基金项目(U1404404)、国家重点研发计划项目(2017YFD0301102)和河南省农业科学院优秀青年科技基金项目(2016YQ12)
作者简介: 杨永辉(1978—),男,副研究员,博士,主要从事土壤物理与节水农业研究,E-mail: yangyongh@mails.gucas.ac.cn

aggregates, soil active organic carbon content was decreased. Compared with conventional tillage, except 0.053 ~ 0.250 mm size aggregate, no-tillage increased active organic carbon content in 0 ~ 20 cm soil layer of various aggregates. With the increase of soil depth, the contribution rate of organic carbon to soil total organic carbon in different size fractions showed the trend of decreasing first, then increasing and then decreasing. In different aggregates, contribution rate of organic carbon of aggregates with diameter greater than 2.0 mm and less than 0.053 mm in the 0 ~ 100 cm soil layer was lower than those of other size aggregates. In 0 ~ 20 cm, 30 ~ 40 cm and 90 ~ 100 cm soil layers, accumulation contribution rate of different aggregates organic carbon of no-tillage treatment was higher than that of conventional tillage.

Key words: conventional tillage; no-tillage; soil structure; soil organic carbon; contribution rate of organic carbon

引言

土壤团聚状况与有机碳含量可作为评价土壤肥力的综合指标之一^[1],其维持着土壤的生态功能^[2]。土壤团聚体作为土壤结构的基本单元,是土壤中各种养分的储存库,为土壤中微生物提供了生存环境^[3]。

不同的耕作方式对土壤团聚体组成及有机碳的分布影响各异^[4-5],而土壤有机碳与团聚体关系密切^[6],土壤有机碳对土壤团聚体数量及大小分布等产生重要影响^[7],土壤有机碳含量的提高有助于土壤结构形成,增强土壤结构的稳定性^[8-9],稳定的团聚体对有机碳的物理保护可使土壤有机碳减缓或免受矿化分解^[10-11]。一旦有机碳含量降低,团聚体的稳定性就会下降^[12],二者相互影响。频繁的翻耕使土壤结构遭到破坏,土壤有机碳含量下降^[13],而免耕等保护性耕作因减少土壤扰动,降低了土壤有机碳的分解,能显著提高耕层大团聚体的数量及其稳定性^[14],从而促进土壤有机碳的积累^[15-16]和土壤固碳量的增加^[17]。有关保护性耕作条件下土壤团聚体组成与有机碳含量的变化研究已很多。但以往研究多偏重于免耕与常规耕作轮耕、免耕与深松轮耕或免耕结合秸秆覆盖等,且多偏重于耕层以上土层,研究对象多为土壤总有机碳,而对于土壤及不同粒级团聚体中的活性有机碳分布特征,长期耕作与长期持续免耕措施对 0 ~ 100 cm 土层土壤团粒结构、土壤有机碳与活性有机碳、不同粒级团聚体中有机碳与活性有机碳的分布特征及作用深度如何尚不清楚,需要深入研究以确定长期耕作与持续免耕对土壤结构及其有机碳组分和影响因素的作用程度。

本文拟通过研究豫西褐土区常规耕作与持续 8 a 免耕措施对不同土壤团聚体含量及其分布,土壤团聚体中有机碳组分含量与分布,及其对土壤总有机碳的贡献率及土壤结构稳定性特征的影响,为阐明长期常规耕作与免耕对土壤剖面结构及有机碳组

分的影响及其作用机理提供科学依据。

1 材料与方法

1.1 研究区概况

试验在河南省禹州试验基地(113°03' ~ 113°39'E, 33°59' ~ 34°24'N,海拔 116.1 m)进行,该地多年平均降水量 674.9 mm,其中 60% 以上降水集中在夏季;土壤类型为褐土,耕层有机质含量 12.30 g/kg、全氮含量 0.80 g/kg、水解氮含量 47.82 mg/kg、速效磷含量 6.66 mg/kg、速效钾含量 114.80 mg/kg。研究区为小麦-玉米轮作区。土壤机械组成为:砂粒(0.02 ~ 2 mm)占 59.1%,粉粒(0.002 ~ 0.02 mm)占 22.5%,黏粒(0 ~ 0.002 mm)占 18.4%。

1.2 试验设计

长期定位试验于 2006 年 10 月中旬小麦播种时开始,耕作措施在每年小麦播种时实施,玉米均为免耕播种。于 2014 年 10 月 12 日在长期定位试验中选取常规耕作(CK,耕作深度 15 cm)和免耕(MG,小麦、玉米播种时均免耕)2 个处理进行研究。即分别从定位试验每个处理的 3 个重复小区中间位置分层采集 0 ~ 10 cm、10 ~ 20 cm、…、90 ~ 100 cm 原状土(测定团粒结构及团聚体中的有机碳含量)及混合土壤样品(测定土壤有机碳含量),带回室内进行分析。开始定位试验时采用 S 点法在样地采集 0 ~ 100 cm 土层混合土壤样进行土壤总有机碳分析。

1.3 数据处理与分析

1.3.1 团聚体分析方法

水稳性团聚体采用湿筛法,称取风干土样 100 g,将其放置在孔径 2、0.25、0.053 mm 组成的自动振荡套筛的最上层,在室温条件下用蒸馏水浸润 5 min 后,以 30 次/min 的速度和 3 cm 上下振幅振荡 5 min。筛分结束后,将每层筛上的团聚体冲洗到烧杯中,获得大于 2 mm、0.5 ~ 2.0 mm、0.25 ~ 0.50 mm 和 0.053 ~ 0.250 mm 的水稳性团聚体,0 ~ 0.053 mm 团聚体在桶内沉降 48 h,弃去上清液后转移至烧杯中。将烧杯中的团聚体在 60℃ 下干燥称

量。

团聚体对有机碳的贡献率和某粒级团聚体含量为

$$A_{CC} = \frac{C_{aggregate} A_{content}}{C_{soil}} \times 100\% \tag{1}$$

$$A_{content} = \frac{A_{quality}}{S_{quality}} \times 100\% \tag{2}$$

式中 A_{CC} ——团聚体对有机碳的贡献率
 $C_{aggregate}$ ——某粒级团聚体中有机碳含量
 $A_{content}$ ——某粒级团聚体含量
 C_{soil} ——土壤中总有机碳含量
 $A_{quality}$ ——某粒级团聚体质量
 $S_{quality}$ ——土壤样品总质量

1.3.2 团聚体平均质量直径和几何平均直径

(1) 团聚体平均质量直径 (MMD) [18]

$$M_{MD} = \frac{\sum_{i=1}^n \bar{x}_i}{\sum_{i=1}^n w_i} \tag{3}$$

式中 $\bar{x}_i$ ——各级团聚体平均直径
 w_i ——各级团聚体占团聚体总质量比例

(2) 团聚体几何平均直径 (GMD) [19]

$$G_{MD} = \exp \left(\frac{\sum_{i=1}^n w_i \ln \bar{x}_i}{\sum_{i=1}^n w_i} \right) \tag{4}$$

1.3.3 分形维数

根据杨培岭等 [20] 提出的土壤颗粒组成分形特征模型

$$\frac{W(r > \bar{d}_i)}{W_0} = 1 - \left(\frac{\bar{d}_i}{\bar{d}_{max}} \right)^{3-D} \tag{5}$$

式中 $W(r > \bar{d}_i)$ ——大于 $\bar{d}_i$ 的累计土粒质量
 W_0 ——土壤各粒级质量总和
 $\bar{d}_i$ ——两筛分粒级 d_i 与 d_{i+1} 间粒径平均值
 $\bar{d}_{max}$ ——最大粒级土粒平均直径
 D ——土壤颗粒分形维数

取对数后对 $\lg \frac{\bar{d}_i}{\bar{d}_{max}}$ 与 $\lg \frac{W(r < \bar{d}_i)}{W_0}$ 进行回归分析, 可求出土壤颗粒的分形维数 D 的值。

1.3.4 土壤总有机碳和活性有机碳测定

土壤总有机碳测定采用重铬酸钾外加热法 [21], 活性有机碳测定采用高锰酸钾氧化法 [22]。

1.4 数据统计方法

各样地各指标值均为 3 次重复的算术平均值。分析所得的数据应用统计学及相关的数理统计软件 (SPSS) 进行处理。

2 结果与分析

2.1 不同耕作方式对土壤团粒结构分布的影响

常规耕作与免耕处理 0 ~ 100 cm 土层不同粒级土壤团聚体含量如图 1 所示。从图 1 中可知, 随着土层的加深, 0.5 ~ 2.0 mm 和大于 2.0 mm 粒级团聚体含量表现为逐渐降低的趋势, 而其他粒级团聚体含量相反。不同粒级团聚体中, 在 0 ~ 30 cm 土层, 0.5 ~ 2.0 mm 粒级团聚体含量较其他粒级高, 其次为 0.053 ~ 0.250 mm、0.25 ~ 0.50 mm 及小于 0.053 mm 粒级, 大于 2.0 mm 粒级团聚体含量最低, 特别是在 30 cm 以下土层。免耕处理大于 2.0 mm 粒级团聚体含量明显大于常规耕作处理, 特别是在 40 cm 以上土层; 免耕处理 0.5 ~ 2.0 mm 粒级团聚体含量明显大于常规耕作处理, 特别是在 50 cm 以上土层。在 50 cm 以下土层, 仍以免耕处理 0.25 ~ 0.50 mm 粒级团聚体含量较常规耕作处理高, 而 0.053 ~ 0.250 mm 粒级团聚体含量以常规耕作高于免耕处理。结果表明, 免耕更利于提高大粒级团聚体的含量, 其作用深度在 50 cm 土层以上。

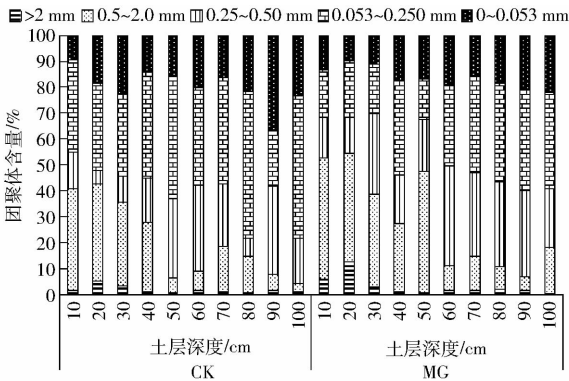


图 1 不同粒级土壤团聚体分布特征

Fig.1 Distribution characteristics of different sizes aggregates

2.2 不同耕作方式对土壤总有机碳的影响

试验前、常规耕作与免耕处理 0 ~ 100 cm 土层土壤总有机碳分布特征如图 2 所示。从图 2 可知, 随着土层的加深, 土壤总有机碳表现为 0 ~ 50 cm 土层间的土壤总有机碳下降幅度较大, 而 50 cm 以下土层土壤总有机碳趋于稳定, 介于 3.0 ~ 4.5 g/kg 之间。在定位试验前, 0 ~ 100 cm 土层有机碳含量均低于定位试验实施后。经过不同耕作措施实施后, 土壤不同土层总有机碳含量均有一定的提高, 而在 70 cm 土层以下常规耕作处理土壤总有机碳在定位试验前后几乎未发生变化。常规耕作条件下, 表层土壤总有机碳含量最高, 为 9.57 g/kg; 免耕条件下, 10 ~ 20 cm 土层的总有机碳含量最高, 为 12.9 g/kg。在 0 ~ 80 cm 土层, 免耕处理的土壤总有机碳均高于

常规耕作处理,提高了 16.3 ~ 39.6 个百分点。

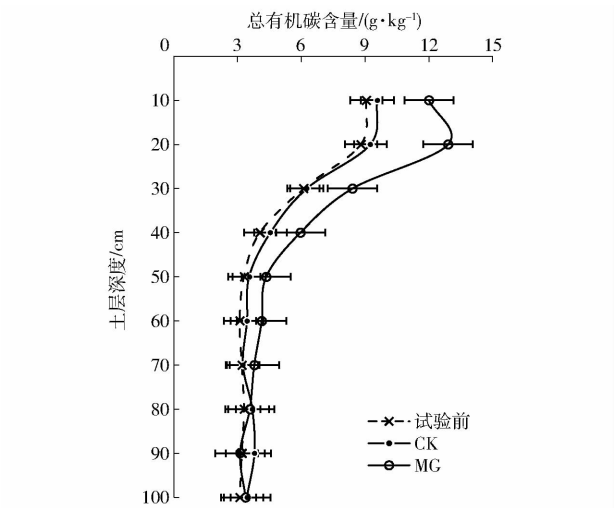


图 2 土壤总有机碳分布特征

Fig.2 Distribution characteristics of soil total organic carbon

2.3 不同耕作方式对土壤活性有机碳的影响

常规耕作与免耕处理 0 ~ 100 cm 土层土壤活性有机碳分布特征如图 3 所示。从图 3 中可知,随着土层的加深,土壤活性有机碳含量表现为先增加再降低而后趋于稳定的趋势,其中以 10 ~ 20 cm 土层的土壤活性有机碳含量明显高于其他土层,为 1.74 g/kg。40 cm 以上土层土壤活性有机碳变化较大,说明该层次土层更易受到外界的影响。在 0 ~ 80 cm 土层,免耕处理的土壤活性有机碳含量高于常规耕作处理,特别是 30 cm 以上土层。

综上,长期免耕不仅提高了不同土层土壤总有机碳含量,且其活性有机碳也相应提高,其作用深度为 0 ~ 80 cm,说明免耕在提高土壤总有机碳的同时,其活性组分也相应提高,从而有利于土壤养分的转化,促进作物吸收。

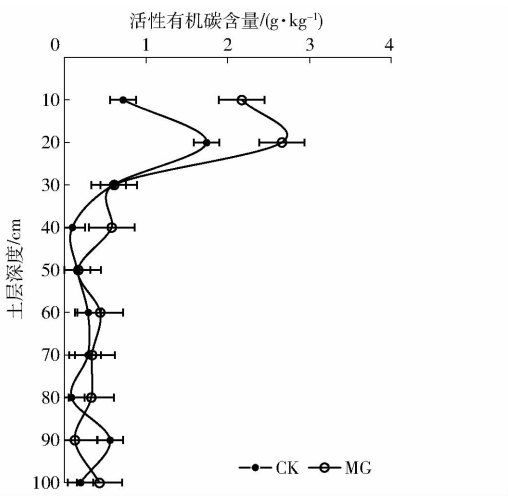


图 3 土壤活性有机碳分布特征

Fig.3 Distribution characteristics of soil active organic carbon

2.4 不同耕作方式对不同粒级团聚体有机碳的影响

2.4.1 不同耕作方式对不同粒级团聚体总有机碳的影响

不同耕作方式 0 ~ 100 cm 土层不同粒级团聚体总有机碳含量如表 1 所示,由表 1 可知,随着土层深度的加深,不同粒级团聚体总有机碳含量呈降低趋势。在 0 ~ 40 cm 土层,各粒级团聚体总有机碳含量从大到小依次为:大于 2 mm、0.5 ~ 2.0 mm、0.25 ~ 0.50 mm、0 ~ 0.053 mm、0.053 ~ 0.250 mm,且各粒级中均以免耕处理高于常规耕作处理。而在 50 ~ 100 cm 土层,各粒级团聚体总有机碳含量仍以大于 2 mm 粒级最高,其次为 0.5 ~ 2.0 mm 粒级团聚体,其他粒级较低,各粒级中均以常规耕作较高。结果表明,大粒级团聚体中含有较高的有机碳,免耕更利于 0 ~ 40 cm 土层不同粒级团聚体总有机碳含量的提高。

表 1 常规耕作与免耕 0 ~ 100 cm 土层不同粒级团聚体总有机碳含量

Tab.1 Distribution characteristics of total organic carbon of different sizes aggregates of conventional tillage and no-tillage treatments in 0 ~ 100 cm soil layers											g/kg
土层深度/ cm	> 2 mm		0.5 ~ 2.0 mm		0.25 ~ 0.50 mm		0.053 ~ 0.250 mm		0 ~ 0.053 mm		
	CK	MG	CK	MG	CK	MG	CK	MG	CK	MG	
10	11.3 ^{aB}	14.3 ^{aA}	9.5 ^{aB}	12.1 ^{aA}	8.0 ^{aB}	10.2 ^{bA}	6.7 ^{aB}	8.0 ^{aA}	7.2 ^{aB}	9.6 ^{aA}	
20	10.1 ^{bB}	12.8 ^{bA}	8.3 ^{bB}	12.7 ^{aA}	7.1 ^{bB}	11.8 ^{aA}	5.3 ^{bB}	8.1 ^{aA}	7.6 ^{aB}	10.1 ^{aA}	
30	6.3 ^{dB}	7.2 ^{cA}	5.3 ^{cB}	6.2 ^{bA}	4.2 ^{cdB}	5.0 ^{cA}	3.9 ^{cA}	4.3 ^{bA}	4.0 ^{bA}	4.4 ^{bcA}	
40	4.2 ^{eB}	8.5 ^{cA}	3.5 ^{eB}	7.1 ^{bA}	4.3 ^{cdB}	5.1 ^{cA}	3.8 ^{cA}	4.1 ^{bcA}	4.3 ^{bB}	5.1 ^{bA}	
50	7.8 ^{cA}	4.9 ^{fB}	5.8 ^{cA}	4.3 ^{cB}	5.0 ^{cA}	4.4 ^{cdA}	3.3 ^{cdA}	3.3 ^{cA}	3.9 ^{bA}	3.5 ^{cdA}	
60	6.9 ^{cA}	6.2 ^{dA}	4.9 ^{cdA}	3.7 ^{eB}	3.7 ^{deA}	3.8 ^{dA}	2.7 ^{deA}	3.2 ^{cdA}	3.9 ^{bA}	2.9 ^{deB}	
70	5.9 ^{dA}	5.7 ^{eA}	3.9 ^{deA}	3.1 ^{cdA}	2.5 ^{fA}	2.9 ^{efA}	2.2 ^{eA}	2.3 ^{eA}	3.9 ^{bA}	2.6 ^{eB}	
80	6.0 ^{dA}	3.0 ^{hB}	4.0 ^{dA}	3.3 ^{cdA}	3.7 ^{deA}	2.2 ^{fgB}	2.4 ^{eA}	2.0 ^{efA}	2.8 ^{cA}	2.5 ^{eA}	
90	3.1 ^{fA}	3.4 ^{ghA}	4.5 ^{dA}	2.7 ^{dB}	2.3 ^{fA}	1.5 ^{gA}	2.2 ^{eA}	1.6 ^{fA}	2.6 ^{cA}	2.1 ^{eA}	
100	2.9 ^{gB}	4.2 ^{fgA}	3.2 ^{eA}	3.2 ^{cdA}	2.8 ^{efA}	3.5 ^{dA}	2.3 ^{fA}	2.8 ^{deA}	2.4 ^{cA}	3.8 ^{cB}	

注:同列不同小写字母代表在 $P < 0.05$ 水平上显著,同行相同粒级团聚体中不同大写字母代表在 $P < 0.05$ 水平上显著,下同。

2.4.2 不同耕作方式对不同粒级团聚体活性有机碳的影响

不同耕作方式 0 ~ 100 cm 土层各粒级团聚体活性有机碳含量如表 2 所示。从表 2 中可知,随着土层的加深,不同粒级土壤团聚体活性有机碳含量表现为先降低后逐渐增加的趋势。随着土壤团聚体粒级的降低,土壤活性有机碳含量呈降低趋势。在各粒级土壤团聚体中,除 0 ~ 30 cm 和 90 ~ 100 cm 土层中大于 2.0 mm 粒级团聚体,0 ~ 20 cm 土层和 70 ~ 80 cm 土层中 0.5 ~ 2.0 mm 粒级团聚体,10 ~ 40 cm 土层中 0.25 ~ 0.50 mm 粒级团聚体,20 ~

40 cm 土层中 0.053 ~ 0.250 mm 粒级团聚体,0 ~ 50 cm 土层中小于 0.053 mm 粒级团聚体外,其他土层及粒级团聚体活性有机碳含量均以常规耕作处理高于免耕处理。在 20 cm 以下土层大于 2 mm 粒级团聚体活性有机碳含量均高于其他粒级团聚体;小于 2 mm 土壤团聚体活性有机碳主要集中于 0 ~ 30 cm 和 60 ~ 100 cm 土层。与常规耕作相比,除 0.053 ~ 0.250 mm 粒级团聚体外,免耕利于提高 10 ~ 20 cm 土层各粒级团聚体中活性有机碳含量,而其他土层各粒级土壤团聚体活性有机碳含量表现规律并不一致。

表 2 常规耕作与免耕 0 ~ 100 cm 土层不同粒级团聚体活性有机碳含量

Tab.2 Distribution characteristics of active organic carbon of different sizes aggregates of conventional tillage and no-tillage treatments in 0 ~ 100 cm soil layers											g/kg
土层深度/ cm	> 2 mm		0.5 ~ 2.0 mm		0.25 ~ 0.50 mm		0.053 ~ 0.250 mm		0 ~ 0.053 mm		
	CK	MG	CK	MG	CK	MG	CK	MG	CK	MG	
10	4.13 ^{aB}	4.38 ^{aA}	2.09 ^{cA}	2.08 ^{aA}	2.34 ^{cA}	2.06 ^{bA}	3.03 ^{aA}	1.34 ^{bB}	2.13 ^{aB}	2.72 ^{aA}	
20	3.11 ^{bB}	4.66 ^{aA}	2.15 ^{cB}	2.38 ^{aA}	3.25 ^{bB}	4.46 ^{aA}	2.49 ^{bA}	2.07 ^{aB}	1.93 ^{aB}	2.81 ^{aA}	
30	2.95 ^{bB}	3.61 ^{bA}	1.63 ^{dA}	1.09 ^{cB}	1.10 ^{dA}	1.09 ^{cA}	1.06 ^{eA}	1.21 ^{bA}	0.63 ^{cB}	0.81 ^{bA}	
40	2.22 ^{cA}	1.02 ^{eB}	1.50 ^{dA}	1.46 ^{bA}	0.57 ^{fB}	0.97 ^{cA}	0.53 ^{gB}	0.68 ^{cA}	0.64 ^{cB}	0.90 ^{bA}	
50	2.74 ^{bA}	0.63 ^{fB}	3.50 ^{bA}	0.93 ^{cB}	4.21 ^{aA}	0.92 ^{cB}	0.80 ^{gA}	0.69 ^{cA}	0.59 ^{cB}	0.76 ^{bA}	
60	2.56 ^{bcA}	0.49 ^{fB}	0.47 ^{eA}	0.28 ^{eB}	2.61 ^{cA}	0.02 ^{gB}	1.15 ^{fA}	0.44 ^{dB}	0.35 ^{dA}	0.19 ^{eB}	
70	2.39 ^{cA}	1.60 ^{fB}	1.56 ^{dA}	0.43 ^{dB}	1.01 ^{dA}	0.40 ^{dB}	1.49 ^{deA}	0.16 ^{fB}	0.11 ^{eA}	0.20 ^{eA}	
80	4.45 ^{aA}	2.72 ^{cB}	0.15 ^{fB}	0.34 ^{deA}	0.52 ^{fA}	0.14 ^{fB}	1.24 ^{eA}	0.31 ^{eB}	1.30 ^{bA}	0.56 ^{cB}	
90	1.31 ^{eB}	1.83 ^{dA}	4.15 ^{aA}	0.33 ^{deB}	1.13 ^{dA}	0.23 ^{eB}	1.69 ^{cdA}	0.43 ^{deB}	1.25 ^{bA}	0.33 ^{dB}	
100	1.88 ^{dA}	1.95 ^{dA}	2.30 ^{cA}	0.41 ^{dB}	0.71 ^{eA}	0.37 ^{dB}	1.37 ^{efA}	0.37 ^{eB}	1.21 ^{bA}	0.28 ^{deB}	

2.5 各级团聚体对有机碳的贡献率分析

不同土层不同粒级团聚体中有机碳含量对土壤总有机碳贡献率如图 4 所示,随着土层的加深,各粒级团聚体中有机碳含量对土壤总有机碳的贡献率表现为先降后增再降然后增加的趋势。不同粒级团聚体中,在 0 ~ 100 cm 土层,大于 2.0 mm 粒级团聚体有机碳贡献率均最低,常规耕作处理为 0.8% ~ 5.4%,免耕处理为 0.4% ~ 12.5%。常规耕作处理 0.5 ~ 2.0 mm 粒级团聚体有机碳贡献率在 0 ~ 30 cm 土层较其他粒级团聚体高;而免耕处理该粒级团聚体有机碳贡献率在 0 ~ 50 cm 土层均高于其他粒级团聚体。不同粒级团聚体的有机碳累积贡献率以常规耕作处理 40 ~ 50 cm 土层较大,其次为免耕 90 ~ 100 cm 土层。在 0 ~ 50 cm 土层,免耕处理 0.5 ~ 2.0 mm 粒级团聚体有机碳贡献率较常规耕作高。在 0.25 ~ 0.5 mm 粒级土壤团聚体中,除 40 ~ 50 cm 土层外,其他土层均以免耕处理的有机碳贡献率最大。在 0.053 ~ 0.250 mm 粒级团聚体中,除 80 ~ 90 cm 土层外,其他土层均以常规处理的有机碳贡献率最高。在小于 0.053 mm 粒级团聚体中,除 90 ~ 100 cm 土层外,其他土层均以常规处理的有机碳贡

献率最高。结果表明,常规耕作条件下,在 0 ~ 30 cm 土层以 0.5 ~ 2.0 mm 粒级团聚体有机碳贡献率最大,在 40 ~ 60 cm 土层以 0.25 ~ 0.50 mm 粒级团聚体有机碳贡献率最大;免耕条件下,在 0 ~ 50 cm 土层以 0.5 ~ 2.0 mm 粒级团聚体有机碳贡献率最大,在 50 ~ 80 cm 土层以 0.25 ~ 0.50 mm 粒级团聚体有机碳贡献率最大。在 0 ~ 20 cm、30 ~ 40 cm 及 90 ~ 100 cm 土层,各粒级团聚体有机碳累积贡献率均以免耕处理高。

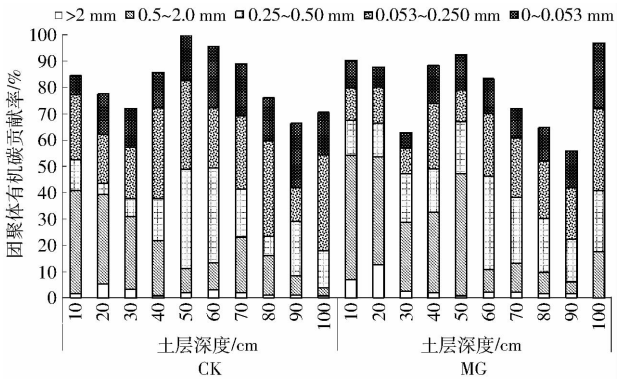


图 4 不同粒级团聚体有机碳贡献率

Fig.4 Contribution rate of organic carbon in different size aggregates

2.6 不同耕作方式对土壤结构稳定性影响

大于 0.25 mm 水稳性团聚体含量、平均质量直径、几何平均直径及分形维数均能反映土壤结构的稳定性。常规耕作与免耕对不同土壤结构稳定性指标的影响如表 3 所示,从中可知,随着土层的加深,常规耕作大于 0.25 mm 水稳性团聚体含量、平均质量直径、几何平均直径均表现为逐渐降低的趋势,而分形维数表现为逐渐增大的趋势。结果表明,常年翻耕的土壤随着土层的加深,土壤结构稳定性逐渐降低。而免耕处理随着土层的加深,大于 0.25 mm

水稳性团聚体含量、平均质量直径、几何平均直径均表现为先增加(20~30 cm),再降低(30~40 cm),再增加(40~50 cm),然后逐渐降低的趋势(50~100 cm),而分形维数则相反。与常规耕作相比,免耕有效提高了 0~100 cm 土层大于 0.25 mm 水稳性团聚体的含量,且提高了 0~60 cm 土层的平均质量直径和几何平均直径,降低了 0~30 cm 和 60~100 cm 土层土壤团聚体分形维数。说明不同土壤结构稳定性指标间存在一定差异,综合各评价指标,免耕较常规耕作提高了土壤结构的稳定性,其作用深度在 50 cm 以上。

表 3 常规耕作与免耕对不同土壤结构稳定性指标的影响
Tab.3 Effects of conventional tillage and no-tillage on soil structure stability indexes

土层深度/ cm	大于 0.25 mm 水稳性团聚体含量/%		平均质量直径/mm		几何平均直径/mm		分形维数	
	CK	MG	CK	MG	CK	MG	CK	MG
10	54.91 ^{aB}	68.31 ^{aA}	0.63 ^{aB}	0.80 ^{aA}	0.37 ^{aB}	0.48 ^{abA}	2.35 ^{dA}	2.25 ^{dB}
20	48.02 ^{bB}	68.33 ^{aA}	0.65 ^{aB}	0.86 ^{aA}	0.33 ^{abB}	0.52 ^{aA}	2.56 ^{bA}	2.39 ^{cB}
30	45.52 ^{cB}	69.84 ^{aA}	0.57 ^{aA}	0.66 ^{cA}	0.28 ^{bB}	0.41 ^{bA}	2.61 ^{bA}	2.39 ^{cB}
40	44.61 ^{cA}	46.22 ^{cA}	0.49 ^{bA}	0.49 ^{dA}	0.27 ^{bA}	0.27 ^{cA}	2.46 ^{cA}	2.51 ^{bA}
50	36.82 ^B	67.41 ^{aA}	0.28 ^{cdB}	0.71 ^{bA}	0.19 ^{cB}	0.42 ^{bA}	2.49 ^{cA}	2.50 ^{bA}
60	42.13 ^{dB}	49.74 ^{bA}	0.31 ^{cA}	0.35 ^{efA}	0.20 ^{cA}	0.22 ^{cA}	2.55 ^{bA}	2.54 ^{abA}
70	42.73 ^{dB}	46.93 ^{cA}	0.40 ^{bA}	0.38 ^{cA}	0.24 ^{bcA}	0.23 ^{cA}	2.50 ^{bcA}	2.49 ^{bA}
80	21.74 ^{eB}	43.72 ^{dA}	0.31 ^{cA}	0.34 ^{efA}	0.18 ^{cA}	0.21 ^{cA}	2.58 ^{bA}	2.42 ^{bcB}
90	41.71 ^{dA}	40.03 ^{cA}	0.29 ^{cdA}	0.29 ^{fA}	0.17 ^{cA}	0.19 ^{cA}	2.71 ^{aA}	2.57 ^{aB}
100	21.73 ^{eB}	40.74 ^{cA}	0.22 ^{dB}	0.38 ^{cA}	0.15 ^{cA}	0.22 ^{cA}	2.60 ^{bA}	2.58 ^{aA}

2.7 土壤结构稳定性指标与不同粒级团聚体及有机碳组分相关性分析

平均质量直径(Mean weight diameter, WMD)、几何平均直径(Geometric mean diameter, GMD)及分形维数(Fractal dimension, *D*)均能够反映土壤的结构稳定性,其与不同粒级土壤团聚体含量、全土总有机碳含量、活性有机碳含量及不同粒级团聚体总有机碳含量和活性有机碳含量之间存在一定的相关

性,如表 4 所示。从表 4 中可知,WMD 与大于 2 mm、0.5~2.0 mm 团聚体含量及全土总有机碳含量、活性有机碳含量、不同粒级土壤团聚体总有机碳含量、0.053~0.25 mm 土壤团聚体活性有机碳含量呈极显著正相关($P<0.01$),与 0.25~0.5 mm、0.053~0.250 mm 和 0~0.053 mm 团聚体含量呈极显著负相关($P>0.01$)。GMD 与 WMD 和不同粒级团聚体含量及有机碳组分等相关性基本一致。*D* 与 WMD、GMD 等指标相反。

表 4 土壤结构稳定性指标与不同粒级团聚体及有机碳组分相关性分析
Tab.4 Correlation analysis among soil structure stability index and different particle sizeaggregates and organic carbon fractions

指标	团聚体含量						全土总 全土活性		不同粒级团聚体总有机碳含量					不同粒级团聚体活性有机碳含量				
	>2 mm	0.5~	0.25~	0.053~	0~	>0.25 mm	有机碳 含量	有机碳 含量	>2 mm	0.5~	0.25~	0.053~	0~	>2 mm	0.5~	0.25~	0.053~	0~
		2.0 mm	0.5 mm	0.25 mm	0.053 mm					2.0 mm	0.5 mm	0.25 mm	0.053 mm		2.0 mm	0.5 mm	0.25 mm	0.053 mm
WMD	0.70**	0.97**	-0.50*	-0.70**	-0.62**	0.86**	0.88**	0.76**	0.75**	0.80**	0.83**	0.86**	0.83**	0.46*	0.14	0.43	0.43*	0.67**
GMD	0.71**	0.93**	-0.39	-0.72**	-0.67**	0.90**	0.88**	0.75**	0.75**	0.80**	0.84**	0.86**	0.82**	0.47*	0.13	0.45*	0.40	0.67**
<i>D</i>	-0.42	-0.59**	0.12	0.33	0.87**	-0.66**	-0.66**	-0.48*	-0.67**	-0.63**	-0.66**	-0.69**	-0.65**	-0.53*	0.05	-0.29	-0.17	-0.47**

注:*表示 $P<0.05$, **表示 $P<0.01$ 。

3 讨论

3.1 长期免耕对土体土壤团粒结构及稳定性的影响

长期不同耕作处理会对表层乃至更深层次土壤结构及其有机碳产生重要影响,且随着年限的增加,

其影响深度更为深远。李景等^[23]研究表明,免耕显著提高了 0~20 cm 土层大于 2.0 mm 团聚体含量,降低了 0.053~0.250 mm 团聚体含量。张先凤等^[24]也研究表明,长期免耕可使 0~10 cm 土层粗大团聚体和 10~20 cm 土层细大团聚体含量显著提

高。而对于更深土层而言,本研究发现,随着土层的加深,大于0.5 mm粒级的团聚体含量表现为逐渐降低的趋势,而其他粒级团聚体含量则呈增加趋势。免耕更利于提高大于0.5 mm粒级团聚体的含量,且在50 cm以上土层更为显著。相关研究表明^[1,25],大于0.25 mm大团聚体含量越多,土壤结构越稳定,但其忽略了其它粒级的信息。VAN^[18]和MAZURAK^[19]分别用平均质量直径与几何平均直径对团聚体进行描述,其能够准确反映不同粒级土壤团聚体的状态及土壤结构稳定性。平均质量直径与几何平均直径越大,土壤结构越稳定。几何分形维数也是评价各项土壤质量指标的重要工具,团聚体分形维数越小,土壤结构越稳定^[26-27]。本研究发现,长期免耕显著提高了大于0.25 mm大团聚体含量、平均质量直径及几何平均直径,降低了分形维数,土壤结构稳定性得到了提高,其作用深度在50 cm土层以上。而高建华等^[28]研究结论与之并不一致,这可能与耕作年限或土壤类型有关,需要进一步研究。

3.2 长期免耕对土体土壤有机碳的影响

土壤有机碳是土壤肥力的重要物质基础,也是土壤质量的核心^[29]。频繁的翻耕土地加剧了土壤有机碳的分解,土壤质量下降^[3]。而保护性耕作因减少了土地的翻耕强度,从而降低土壤有机碳的分解,促进土壤有机碳含量的提高。国内外研究表明,免耕条件下仅能提高0~10 cm土层土壤的有机碳^[3,15,30]。梁爱珍等^[31]研究表明,免耕5 a后才能明显提高0~30 cm土层有机碳的含量。李景等^[23]研究发现,经过13 a免耕覆盖后,0~10 cm土层土壤有机碳逐渐提高。但对于更深土层而言,本研究发现,长期免耕(8 a)有效地提高了80 cm以上土层的土壤总有机碳和活性有机碳含量,从而有利于改善土体土壤结构,促进水分与养分的传输,提高了土壤供给作物水分与养分的能力。这与张国盛等^[32]和JACINTHE等^[33]研究结果一致。但也有研究显示,短期免耕^[34]或长期免耕^[35]会增加土壤容重,影响作物对养分和水分的吸收,这可能与土壤类型有关。

土壤团聚体对土壤固碳和土壤肥力的发挥作用显著^[36-37]。长期免耕会对不同土层不同粒级土壤团聚体中的有机碳产生一定的影响。本研究结果表明,随着土层深度的加深,不同粒级团聚体有机碳含量呈降低趋势。不同粒级团聚体中,大粒级团聚体中含有较高的有机碳,这与黄丹丹等^[38]研究结果相反,而与张先凤等^[24]研究结果一致,可能是因为大团聚体由微团聚体形成,微团聚体的比表面积大,吸

附了更多的有机碳,而大团聚体内部微团聚体中有有机碳与微生物相隔绝,从而减缓了有机碳的分解,因此大团聚体中含有较高的有机碳^[39]。本研究发现,与常规耕作相比,免耕更利于提高0~40 cm土层不同粒级团聚体有机碳含量。长期耕作改变了土壤有机碳的分布和微生物的生活环境,加快了团聚体中有机碳的分解,导致土壤团聚体中有机碳含量降低^[40-42]。而免耕使得土壤结构趋于稳定^[43-44],利于降低微生物的活动,减缓了土壤有机碳的分解速率,土壤固碳能力增强^[45]。此外,不同耕作方式对不同粒级土壤团聚体活性有机碳也产生深远影响。本研究发现,土壤团聚体中活性有机碳存在上(0~40 cm)、下(80~100 cm)土层高,中间(40~80 cm)土层低的现象,这可能是因为上层根系及土壤生物活动频繁,根系和土壤生物分泌物及其残体中的活性成分相对较多所致;而下层土壤由于淋溶作用,活性有机碳组分容易随水分进入下层土壤。此外,更多的活性有机碳集中于大粒级团聚体中,这是因为大团聚体形成过程中包裹并物理保护了更多活性有机碳所致。

3.3 长期免耕对土体土壤团聚体中有机碳贡献率

土壤中近90%的有机碳位于团聚体内^[46],团聚体中有机碳的含量及其质量决定了各级团聚体对土壤有机碳积累的相对贡献^[47]。表层土壤总有机碳增加的贡献主要来源于细大团聚体^[41]。而对于更深土层而言,本研究发现,随着土层的加深,大团聚体中的有机碳贡献率逐渐降低。与常规耕作相比,免耕更利于提高表层、犁底层及底层土壤团聚体有机碳的贡献率。主要是因为免耕可促进作物根系生物量的提高,降低土壤呼吸强度,并提高土壤团聚体的数量,从而有利于有机碳在土壤中的固持^[48]。

4 结论

(1)长期常规耕作的土壤随着土层的加深,大于0.25 mm的水稳性团聚体含量降低、平均质量直径和几何平均直径变小,土壤结构稳定性逐渐降低。而免耕处理有效提高了0~100 cm土层大于0.25 mm水稳性团聚体的含量,且0~60 cm土层的团聚体平均质量直径和几何平均直径均显著提高,且降低了0~30 cm和60~100 cm土层土壤的分形维数,提高了土壤结构的稳定性。

(2)随着土层的加深,常年常规耕作导致土壤总有机碳趋于降低,而免耕处理则表现为先增加再降低的趋势,且以10~20 cm土层的有机碳含量最高。与常规耕作相比,免耕处理明显提高了0~80 cm

土层的土壤总有机碳含量。作为土壤有机碳中活跃成分——土壤活性有机碳,随着土层的加深,均表现为先增后降而趋于稳定的趋势,以10~20 cm土层土壤活性有机碳含量最高。免耕处理明显提高了0~80 cm土层的土壤活性有机碳含量。与常规耕作相比,除0.053~0.250 mm粒级团聚体外,免耕更利于提高10~20 cm土层中各粒级团聚体中活性有机碳含量。

(3)在不同层次土壤中,大于2.0 mm粒级团聚体有机碳贡献率均最低,其次为小于0.053 mm粒级团聚体,中间粒级团聚体中有机碳贡献率较大。在常规耕作条件下,在0~30 cm土层以0.5~2.0 mm

粒级团聚体有机碳贡献率最大,而免耕处理中该粒级团聚体有机碳贡献率的作用深度为0~50 cm;常规耕作处理在40~60 cm土层以0.25~0.50 mm粒级团聚体有机碳贡献率最大,免耕处理该粒级团聚体有机碳贡献率的作用深度为50~80 cm土层。在0~20 cm,30~40 cm及90~100 cm土层,各粒级团聚体有机碳累积贡献率均以免耕处理高。

(4)合理的长期保护性耕作措施能够提高土壤剖面中的有机碳含量,提高土壤团聚体的稳定性,促进水肥的储存与转换,从而有利于提高土壤的生产能力,促进作物的生长。与常规耕作相比,免耕更利于有机碳的提升和土壤结构的改善。

参 考 文 献

- 1 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.
- 2 王彩霞,刘帅,王勇,等. 不同保护性耕作方式对微团聚体有机碳氧化稳定性的影响[J]. 西北农林科技大学学报:自然科学版,2010,38(5):149–155.
WANG Caixia, LIU Shuai, WANG Yong, et al. Effect of different conservational tillage modes on the oxidation stability of soil organic carbon in soil micro-aggregates[J]. Journal of Northwest A&F University: Natural Science Edition, 2010, 38(5): 149–155. (in Chinese)
- 3 SIX J, BOSSUYT H, DEGRYZE S, et al. A history of research on the link between (micro) aggregates, soil biota, and soil organic matter dynamics[J]. Soil and Tillage Research, 2004, 79(1):7–31.
- 4 GALE W J, CAMBARDELLA C A. Carbon dynamics of surface residue and root-derived organic matter under simulated no-till[J]. Soil Science Society of America Journal, 2000, 64(1): 190–195.
- 5 唐晓红,邵景安,高明,等. 保护性耕作对紫色水稻土团聚体组成和有机碳储量的影响[J]. 应用生态学报,2007,18(5): 1027–1032.
TANG Xiaohong, SHAO Jing'an, GAO Ming, et al. Effects of conservational tillage on aggregate composition and organic carbon storage in purple paddy soil[J]. Chinese Journal of Applied Ecology, 2007, 18(5):1027–1032. (in Chinese)
- 6 CHRISTENSEN B T. Carbon in primary and secondary organ mineral complexes[M]//CATER M R, STEWART A B. Structure and organic matter storage in agricultural soils. Boca Raton, Florida: CRC Press, Inc., 1996: 97–165.
- 7 EYNARD A, SCHUMACHER T E, LINDSTROM M J, et al. Effects of agricultural management systems on soil organic carbon in aggregates of U stolls and U sterts[J]. Soil and Tillage Resarch, 2005, 81(2): 253–263.
- 8 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.
WANG Xiaojuan, JIA Zhikuan, LIANG Lianyou, et al. Effects of organic manure application on dry land soil organic matter and water stable aggregates[J]. Chinese Journal of Applied Ecology, 2012, 23(1): 159–165. (in Chinese)
- 9 刘中粮,宇万太. 土壤团聚体中有机质研究进展[J]. 中国生态农业学报,2011,19(2):447–455.
LIU Zhongliang, YU Wantai. Review of researches on soil aggregate and soil organic carbon[J]. Chinese Journal of Eco-Agriculture, 2011, 19(2): 447–455. (in Chinese)
- 10 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 and Biochemistry, 2000, 32(14): 2099–2103.
- 11 LAL R, KIMBLE J M. Conservation tillage for carbon sequestration[J]. Nutrient Cycling in Agroecosystems, 1997, 49: 243–253.
- 12 李阳兵,谢德体,魏朝富,等. 利用方式对岩溶山地土壤团粒结构的影响研究[J]. 长江流域资源与环境,2002,11(5): 451–455.
LI Yangbing, XIE Deti, WEI Zhaofu, et al. A study of features of water-stable soil aggregate structure under different land use in karst mountains[J]. Resources and Environment in the Yangtze Basin, 2002, 11(5): 451–455. (in Chinese)
- 13 LÓPEZ G R, MADEJÓN E, MURILLO J M, et al. Short and long-term distribution with depth of soil organic carbon and nutrients under traditional and conservation tillage in a Mediterranean environment (Southwest Spain) [J]. Soil Use and Management, 2011, 27(2): 177–185.
- 14 田慎重,王瑜,李娜,等. 耕作方式和秸秆还田对华北地区农田土壤水稳性团聚体分布及稳定性的影响[J]. 生态学报, 2013,33(22):7116–7124.
TIAN Shenzhong, WANG Yu, LI Na, et al. Effects of different tillage and straw systems on soil water-stable aggregate distribution and stability in the North China Plain[J]. Acta Ecologica Sinica, 2013, 33(22): 7116–7124. (in Chinese)
- 15 姜学兵,李运生,欧阳竹,等. 免耕对土壤团聚体特征以及有机碳储量的影响[J]. 中国生态农业学报,2012,20(3): 270–278.
JIANG Xuebing, LI Yunsheng, OU Yangzhu, et al. Effect of no-tillage on soil aggregate and organic carbon storage[J]. Chinese

- Journal of Eco-Agriculture, 2012, 20(3): 270–278. (in Chinese)
- 16 CHEN H Q, HOU R X, GONG Y S, et al. Effects of 11 years of conservation tillage on soil organic matter fractions in wheat monoculture in Loess Plateau of China[J]. Soil and Tillage Research, 2009, 106(1): 85–94.
- 17 DALAL R C, CHAN K Y. Soil organic matter in rainfed cropping systems of the Australian cereal belt[J]. Soil Research, 2001, 39(3): 435–464.
- 18 VAN B C. Mean weight diameter of soil aggregates as a statistical index of aggregation [J]. Soil Science Society of America Journal, 1949, 14: 20–23.
- 19 MAZURAK A P. Effect of gaseous phase on water-stable synthetic aggregates [J]. Soil Science, 1950, 69: 135–148.
- 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 Peiling, LUO Yuanpei, SHI Yuanchun. Fractal characteristics of soil using particle size distribution[J]. Chinese Science Bulletin, 1993, 38(20): 1896–1899. (in Chinese)
- 21 林心雄, 文启孝, 徐宁. 广州地区土壤中植物残体的分解速率[J]. 土壤学报, 1985, 22(1): 47–55.
- LIN Xinxiong, WEN Qixiao, XU Ning. Study on decomposition of plant residues in soils of Guangzhou[J]. Acta Pedologica Sinica, 1985, 22(1): 47–55. (in Chinese)
- 22 BLAIR G J, LEFROY R D B, LISLE L. Soil carbon fractions based on their degree of oxidation, and the development of a carbon management index for agricultural systems[J]. Australian Journal of Agricultural Research, 1995, 46(7): 1459–1466.
- 23 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 Jing, WU Huijun, WU Xueping, 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)
- 24 张先凤, 朱安宁, 张佳宝, 等. 耕作管理对潮土团聚体形成及有机碳累积的长期效应[J]. 中国农业科学, 2015, 48(23): 639–648.
- ZHANG Xianfeng, ZHU Anning, ZHANG Jiabao, et al. The long-term effect research of various tillage managements on the soil aggregates and organic carbon in fluvo-aquic soil[J]. Scientia Agricultura Sinica, 2015, 48(23): 639–648. (in Chinese)
- 25 常旭虹, 赵广才, 杨丽珍, 等. 农牧交错区保护性耕作对土壤含水量和温度的影响[J]. 土壤, 2006, 38(3): 328–332.
- CHANG Xuhong, ZHAO Guangcai, YANG Lizhen, et al. Effect of conservation tillage on soil moisture and temperature in the farmingpasture zone[J]. Soil, 2006, 38(3): 328–332. (in Chinese)
- 26 GIMENEZ D, PERFECT E, RAWLS W J, et al. Fractal models for predicting soil hydraulic properties; a review [J]. Engineering Geology, 1997, 48(3–4): 161–183.
- 27 BAVEYE P, PARLANGE J Y, STEWART B A. Fractals in soil science[M]//Advances in Soil Science, Boca Raton, FL: CRC Press, 1998: 377–389.
- 28 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 Jianhua, ZHANG Chengzhong. 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)
- 29 BRONICK C, LAL R. Soil structure and management: a review[J]. Geoderma, 2005, 124(1–2): 3–22.
- 30 FRANZLUEBBERS A. Soil organic matter stratification ratio as an indicator of soil quality[J]. Soil and Tillage Research, 2002, 66(2): 95–106.
- 31 梁爱珍, 杨学明, 张晓平, 等. 免耕对东北黑土水稳性团聚体中有机碳分配的短期效应[J]. 中国农业科学, 2009, 42(8): 2801–2808.
- LIANG Aizhen, YANG Xueming, ZHANG Xiaoping, et al. Short-term impacts of no tillage on soil organic carbon associated with water-stable aggregates in black soil of northeast China[J]. Scientia Agricultura Sinica, 2009, 42(8): 2801–2808. (in Chinese)
- 32 张国盛, CHAN K Y, LI G D, 等. 长期保护性耕种方式对农田表层土壤性质的影响[J]. 生态学报, 2008, 28(6): 2722–2728.
- ZHANG Guosheng, CHAN K Y, LI G D, et al. Long-term effects of tillage systems and rotation on selected soil properties in cropping zone of Southern NSW, Australia[J]. Acta Ecologica Sinica, 2008, 28(6): 2722–2728. (in Chinese)
- 33 JACINTHE P A, LAL R, KIMBLE J M. Carbon dioxide evolution in run-off from simulated rainfall on long-term no-till and plowed soils in southwestern Ohio [J]. Soil & Tillage Research, 2002, 66(1): 23–33.
- 34 王宪良, 王庆杰, 李洪文, 等. 免耕条件下轮胎压实对土壤物理特性和作物根系的影响[J/OL]. 农业机械学报, 2017, 48(6): 168–175. http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx?file_no=20170622&flag=1. DOI:10.6041/j.issn.1000-1298.2017.06.022.
- WANG Xianliang, WANG Qingjie, LI Hongwen, et al. Effect of tyre induced soil compaction on soil properties and crop root growth under no-tillage system[J/OL]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2017, 48(6): 168–175. (in Chinese)
- 35 邹桂霞. 美国关于免耕和轮作周期对侵蚀影响的研究[J]. 水土保持科技情报, 2002(4): 7–8.
- ZOU Guixia. Research about erosion effect of no tillage and rotation cycle in America[J]. Science and Technology Information of Soil and Water Conservation, 2002(4): 7–8. (in Chinese)
- 36 周虎, 吕贻忠, 李保国. 土壤结构量化研究进展[J]. 土壤学报, 2009, 46(3): 501–506.
- ZHOU Hu, LÜ Yizhong, LI Baoguo. Advancement in the study on quantification of soil structure[J]. Acta Pedologica Sinica,

- 2009, 46(3): 501 – 506. (in Chinese)
- 37 MADARI B, MACHADO P L O A, TORRES E, et al. No tillage and crop rotation effects on soil aggregation and organic carbon in a Rhodic Ferralsol from southern Brazil[J]. Soil and Tillage Research, 2005, 80:185 – 200.
- 38 黄丹丹,刘淑霞,张晓平,等. 保护性耕作下土壤团聚体组成及其有机碳分布特征[J]. 农业环境科学学报,2012,31(8): 106 – 111.
HUANG Dandan, LIU Shuxia, ZHANG Xiaoping, et al. Constitute and organic carbon distribution of soil aggregates under conservation tillage[J]. Journal of Agro-Environment Science, 2012, 31(8): 106 – 111. (in Chinese)
- 39 王勇,姬强,刘帅,等. 耕作措施对土壤水稳性团聚体及有机碳分布的影响[J]. 农业环境科学学报,2012,31(7):1365 – 1373.
WANG Yong, JI Qiang, LIU Shuai, et al. Effects of tillage practices on water-stable aggregate-associated organic C in soils[J]. Journal of Agro-Environment Science, 2012, 31(7): 1365 – 1373. (in Chinese)
- 40 CASTRO F C, LOURENÇO A, GUIMARÃES M F, et al. Aggregate stability under different soil management systems in a red latosol in the state of Parana, Brazil[J]. Soil and Tillage Research, 2002, 65(1): 45 – 51.
- 41 CAMBARDELLA C A, ELLIOTT E T. Carbon and nitrogen distribution in aggregates from cultivated and native grassland soils [J]. Soil Science Society of America Journal, 1993, 57(4): 1071 – 1076.
- 42 TISDALL J M, OADES J M. Organic matter and water-stable aggregates in soils[J]. Journal of Soil Science, 1982, 33(2): 141 – 163.
- 43 HE J, LI H, RASAILY R G, et al. Soil properties and crop yields after 11 years of no tillage farming in wheat-maize cropping system in North China Plain[J]. Soil and Tillage Research, 2011, 113(1):48 – 54.
- 44 BEN M S, ERROUISSI F, BEN H M, et al. Comparative effects of conventional and no-tillage management on some soil properties under Mediterranean semi-arid conditions in northwestern Tunisia[J]. Soil and Tillage Research, 2010, 106(2): 247 – 253.
- 45 DALAL R C, CHAN K Y. Soil organic matter in rainfed cropping systems of the Australian cereal belt[J]. Soil Research, 2001, 39(3): 435 – 464.
- 46 JASTROW J D. Soil aggregate formation and the accrual of particulate and mineral-associated organic matter[J]. Soil Biology and Biochemistry, 1996, 28(4): 665 – 676.
- 47 孙汉印,姬强,王勇,等. 不同秸秆还田模式下水稳性团聚体有机碳的分布及其氧化稳定性研究[J]. 农业环境科学学报, 2012,31(2): 369 – 376.
SUN Hanyin, JI Qiang, WANG Yong, et al. The distribution of water-stable aggregate-associated organic carbon and its oxidation stability under different straw returning modes[J]. Journal of Agro-Environment Science, 2012, 31(2): 369 – 376. (in Chinese)
- 48 张四海,曹志平,张国,等. 保护性耕作对农田土壤有机碳库的影响[J]. 生态环境学报,2012,21(2):199 – 205.
ZHANG Sihai, CAO Zhiping, ZHANG Guo, et al. Effects of conservation tillage on soil organic carbon pool [J]. Ecology and Environmental Sciences,2012, 21(2): 199 – 205. (in Chinese)

欢迎订阅 2018 年《中国农业科学》

《中国农业科学》是由农业部主管、中国农业科学院与中国农学会共同主办的综合性学术期刊,是中文核心期刊、中国科技核心期刊、中国精品科技期刊、CSCD Q1 区期刊、中国权威学术期刊 A + 期刊、中国最具国际影响力学术期刊,是了解中国农业相关领域科研进展的首选期刊。《中国农业科学》以研究论文、综述、简报等形式报道农牧业基础科学和应用基础科学最新成果。设有作物遗传育种·种质资源·分子遗传学;耕作栽培·生理生化·农业信息技术;植物保护;土壤肥料·节水灌溉·农业生态环境;园艺;食品科学与工程;畜牧·兽医·资源昆虫等栏目。读者对象为国内外农业科研院(所)、大专院校的科研、教学与管理人员。

《中国农业科学》大 16 开,每月 1、16 日出版,国内外公开发行人。每期 208 页,定价 49.50 元,全年定价 1188.00 元。国内统一连续出版物号:CN11 – 1328/S,国际标准连续出版物号:ISSN 0578 – 1752,邮发代号:2 – 138,国外代号:BM43。

《中国农业科学》全国各地邮局均可订阅,也可直接向编辑部订购。

邮编:100081 地址:北京中关村南大街 12 号《中国农业科学》编辑部

电话:010 – 82109808,82106281 传真:010 – 82106247

网址:www.ChinaAgriSci.com E-mail:zgnykx@caas.cn