

免耕对土壤团聚体特征以及有机碳储量的影响*

姜学兵^{1,2} 李运生^{1**} 欧阳竹¹ 侯瑞星^{1,2} 李发东¹

(1. 中国科学院地理科学与资源研究所 中国科学院生态系统网络观测与模拟重点实验室 中国科学院禹城综合试验站 北京 100101; 2. 中国科学院研究生院 北京 100049)

摘要 以实施7年的中国科学院禹城综合试验站冬小麦-夏玉米轮作免耕长期定位试验场为对象,研究免耕条件下土壤水稳性团聚体和有机碳储量的变化,为进一步评价免耕措施对黄淮海平原土壤结构和质量的影响提供科学依据。设置免耕(NT)、免耕秸秆不还田(NTRR)、常规耕作(CT)3种处理,分析土壤表层(0~20 cm)及深层(20~60 cm)水稳性团聚体分布特征、土壤有机碳以及团聚体有机碳的变化和相互关系。研究表明:由于减少了对土壤的破坏以及增加了秸秆还田和有机肥的施用,与常规耕作相比,NT和NTRR可提高表层土壤有机碳含量和储量、水稳性团聚体平均重量直径(MWD)和几何平均直径(GMD),以及大团聚体有机碳的含量和储量。其中,秸秆覆盖比施用有机肥对表层土壤有机碳储量和0.25~2 mm团聚体有机碳储量的提高具有更显著的作用。与表层不同,深层土壤有机碳和大团聚体有机碳的含量和储量表现为NT<NTRR<CT,说明与CT相比,NT和NTRR不利于深层土壤有机碳的积累,与秸秆覆盖相比,施用有机肥对深层有机碳的积累更有利。从整个剖面(0~60 cm)来看,NT和NTRR处理土壤总有机碳储量低于CT。各处理土壤总有机碳与0.25~2 mm水稳性团聚体有机碳关系最为密切,说明该粒级团聚体有机碳能够指示土壤总有机碳的变化。

关键词 免耕 秸秆覆盖 施有机肥 土壤有机碳 水稳性团聚体 有机碳储量

中图分类号: S316 **文献标识码:** A **文章编号:** 1671-3990(2012)03-0270-09

Effect of no-tillage on soil aggregate and organic carbon storage

JIANG Xue-Bing^{1,2}, LI Yun-Sheng¹, OUYANG Zhu¹, HOU Rui-Xing^{1,2}, LI Fa-Dong¹

(1. Institute of Geographical Sciences and Natural Resources Research, Chinese Academy of Sciences; Key Laboratory of Ecosystem Network Observation and Modeling, Chinese Academy of Sciences; Yucheng Comprehensive Experiment Station of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100101, China; 2. Graduate University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China)

Abstract No-tillage (NT) is an increasingly agronomic practice in China. Tillage practices deeply affect soil quality and organic carbon (SOC) accumulation. The effect of NT, as a form of conservation tillage, on soil organic carbon storage had remained highly contentious. To shed further view on the effect of NT on soil structure and quality in the Huang-Huai-Hai Plain (HP), a long-term no-tillage experimental site for the main crop rotation — winter wheat (*Triticum aestivum* L.) and summer maize (*Zea Mays* L.) — was investigated. The experimental site belongs to the Yucheng Comprehensive Experimental Station (YCES) of Chinese Academy of Sciences (CAS) and has been used in studying the changes in soil aggregates and organic carbon storage under different tillage systems for 7 years now. NT, no-tillage with removed residue and organic fertilization (NTRR) and conventional tillage (CT) treatments were set up in the study. The impact of the three tillage systems on total soil organic carbon content and storage, water-stable aggregate stability, water-stable aggregate SOC content and storage, and relationship between total SOC content and water-stable aggregate SOC content were analyzed. Compared with CT, SOC content and storage, and water-stable aggregate mean weight diameter (MWD) and geometric mean diameter (GMD) along with macro-aggregate organic carbon content and storage in the 0~20 cm soil layer significantly increased in NT and NTRR treatments. This was possibly due to reduced soil disturbances and residue mulch and organic fertilizer applications. No tillage plots with residue mulch stored more SOC and macro-aggregate organic carbon than those with applied organic fertilizer. For the treatments, the order of the content of SOC and macro-aggregate organic carbon in the

* 国家科技支撑计划项目(2009BADA3B05-7)、中国科学院知识创新工程重要方向项目(KSCX2-EW-B-1)和中国科学院战略性先导科技专项“应对气候变化的碳收支认证及相关问题”(XDA05050502)资助

** 通讯作者: 李运生(1962—), 男, 副研究员, 研究方向为农业生态。E-mail: liys@igsnr.ac.cn

姜学兵(1986—), 男, 硕士研究生, 主要从事农田生态系统碳收支方面的研究。E-mail: xuebing929@163.com

收稿日期: 2011-06-30 接受日期: 2011-09-02

20~60 cm soil depth was NT < NTRR < CT. In comparison with NT and NTRR, CT limited deep-soil organic carbon accumulation. Compared with straw mulch, the application of organic fertilizer enhanced deep-soil organic carbon accumulation under no tillage. On the average, SOC storage in NT and NTRR was lower than in CT in the 0~60 cm soil depth. There was a significant positive correlation between SOC and 0.25~2 mm aggregate organic carbon, indicating that the 0.25~2 mm soil macro-aggregates could be used as a proxy for changes in SOC. In conclusion therefore, no-tillage significantly improved the distribution and stability of surface soil water-stable aggregates. While no-tillage significantly increased the storage of surface total SOC in the 0.25~2 mm soil aggregates, reduced it in deep soil layers. Compared with organic manure, straw mulch promoted the accumulation of SOC in surface soils and reduces it in deep soils under no tillage practice.

Key words No-tillage, Straw mulching, Organic fertilization, Soil organic carbon, Water-stable aggregate, Organic carbon storage (Received Jun. 30, 2011; accepted Sep. 2, 2011)

土壤有机碳(SOC)是土壤的重要组成部分,在土壤肥力、农业可持续发展等方面起到重要作用^[1-2]。土壤团聚体是土壤结构组成的基本单元^[3],其数量、大小以及排列方式能够影响土壤孔隙状况,改善土壤物理结构;同时团聚体能够贮存土壤养分,其稳定的结构能够保肥保水,为微生物提供场所^[4]。土壤有机碳与土壤团聚体关系密切,土壤有机碳的保持被认为是减少土壤侵蚀、维护土壤结构、改善土壤团粒状况的重要策略^[3,5],同时土壤团聚体能够有效储存有机物质,土壤有机碳随着团聚体的变化而改变^[6]。Elliott^[7]认为大团聚体是由微团聚体通过有机物质连结而形成,有机碳含量较高。Tisdall等^[8]研究发现,腐殖根和菌丝等有机物质的存在不但使得大团聚体中有机碳含量高于微团聚体,且对大团聚体的稳定性也具有重要作用。

不同耕作措施能够影响土壤有机碳的含量和积累^[3],近年来中外学者研究结果显示,免耕能够提高土壤固碳量^[9-10],但也有研究表明免耕没有增加土壤有机碳含量^[11-13]。Dolan等^[12]研究表明,免耕能够提高土壤表层有机碳含量 30%,而深层土壤有机碳含量却低于常规耕作。不同耕作措施对团聚体的影响也很显著,免耕秸秆覆盖能够降低微生物活性和有机物的分解速率,促进大团聚体的稳定^[14],与常规耕作相比,免耕能够显著增加大团聚体的含量而减少微团聚体的含量^[15]。Mikha等^[3]发现,免耕能够增加团聚体中总碳和总氮含量,梁爱珍等^[11]和

Chen等^[9]研究表明免耕能够提高大团聚体中有机碳含量。

近年来,由于不合理土地管理,以及农业活动加剧,耕作强度加大等等,导致土壤质量下降以及土壤有机碳流失^[16]。免耕可以有效减少地表径流和水土流失,增加土壤肥力、调节土壤水分和温度、减少环境污染以及降低生产成本^[17-18]。而免耕能否增加土壤有机碳储量一直以来是学者们研究的重点方向,为此,本文探讨了不同耕作措施对土壤团聚体分布特征和团聚体有机碳的影响,分析了土壤有机碳与团聚体有机碳之间的相关关系,为进一步评价和推广免耕措施提供理论依据。

1 材料与方法

1.1 试验地基本情况

试验在中国科学院禹城综合试验站“中美合作冬小麦-夏玉米轮作免耕试验场”的长期定位试验田进行。试验站位于山东省禹城市(116°36'E, 36°57'N),海拔高度 20 m,属暖温带半湿润季风气候,年平均温度 13.1 °C,年降雨量 575 mm,雨季主要集中于 7—9 月,地下水资源丰富,地下水位一般在 1.5~4.0 m,试验区农田耕层土壤以盐化潮土为主。试验区设置免耕(NT)、免耕秸秆不还田(NTRR)、常规耕作(CT)3种处理,不同土层及耕作方式下 pH 和容重如表 1 所示。

1.2 试验处理

试验始于 2003 年,种植制度为冬小麦-夏玉米

表 1 不同耕作处理土壤的 pH 和容重
Table 1 Soil pH and buck density at each depth under different tillage treatments

土层深度 Soil depth (cm)	NT		NTRR		CT	
	pH	容重 Buck density (g·cm ⁻³)	pH	容重 Buck density (g·cm ⁻³)	pH	容重 Buck density (g·cm ⁻³)
0~5	7.82b	1.28a	7.99b	1.27a	8.35a	1.30a
5~10	7.99b	1.52a	8.12ab	1.44b	8.33a	1.43b
10~20	8.17a	1.56a	8.38a	1.45b	8.41a	1.54a
20~40	8.53a	1.48a	8.59a	1.41b	8.54a	1.48a
40~60	8.71a	1.44a	8.84a	1.43a	8.56a	1.46a

NT: 免耕 No tillage; NTRR: 免耕秸秆不还田、施有机肥 No tillage with straw removing and organic fertilization; CT: 常规耕作 Conventional tillage. 表中不同小写字母表示 0.05 水平差异显著性 Different small letters indicate significant difference at the 0.05 level; 下同 The same below. pH 与容重数据测定于 2010 年 6 月 pH and buck density were measured in June 2010.

轮作, 设置 3 种处理, 分别为: 免耕(NT, 秸秆还田, 还田量约 $10\ 000\ \text{kg}\cdot\text{hm}^{-2}$)、免耕秸秆不还田(NTRR)和常规耕作(CT, 秸秆不还田)。分别在小麦播种前和玉米播种前进行施肥, 一年中各处理施用肥料的总氮量一致, 均为 $492\ \text{kg}(\text{N})\cdot\text{hm}^{-2}$ 。在小麦季, NT 施用尿素 $124.5\ \text{kg}(\text{N})\cdot\text{hm}^{-2}$ +复合肥 $112.5\ \text{kg}(\text{N})\cdot\text{hm}^{-2}$ +秸秆 $6\ 000\ \text{kg}\cdot\text{hm}^{-2}$ (含氮量约 0.8%), NTRR 施用尿素 $124.5\ \text{kg}(\text{N})\cdot\text{hm}^{-2}$ +复合肥 $112.5\ \text{kg}(\text{N})\cdot\text{hm}^{-2}$ +有机肥 $4\ 000\ \text{kg}\cdot\text{hm}^{-2}$ (含氮量约 2%), CT 施用尿素 $172.5\ \text{kg}(\text{N})\cdot\text{hm}^{-2}$ +复合肥 $112.5\ \text{kg}(\text{N})\cdot\text{hm}^{-2}$; 玉米季, NT 施用尿素 $175\ \text{kg}(\text{N})\cdot\text{hm}^{-2}$ +秸秆 $4\ 000\ \text{kg}\cdot\text{hm}^{-2}$, NTRR 施用尿素 $175\ \text{kg}(\text{N})\cdot\text{hm}^{-2}$, CT 施用尿素 $207\ \text{kg}(\text{N})\cdot\text{hm}^{-2}$ 。每个处理设置 3 个重复, 共 9 个小区, 小区面积为 $300\ \text{m}^2(7.5\ \text{m}\times 40\ \text{m})$, 各小区沿灌排水渠方向平行排列。

1.3 样品采集和测定分析

1.3.1 样品采集与前期处理

试验于 2010 年 6 月冬小麦收获前分别采集 0~5 cm、5~10 cm、10~20 cm、20~40 cm 和 40~60 cm 5 个层次的土样, 每小区取 5 次重复, 将同一深度的 5 个重复混合成 1 个样品后过 8 mm 筛, 在实验室内风干, 用镊子去除肉眼可见的有机残体。

1.3.2 测定方法

土壤容重采用环刀法测定, pH 采用 pH 计测定, 全氮采用凯氏定氮法测定。

土壤水稳性团聚体采用湿筛法测定^[19]: 称取 60 g 风干土样放置于团聚体分析仪套筛顶部(套筛孔径自上而下依次为 2 mm、0.25 mm 和 0.05 mm), 沿桶壁缓慢加入去离子水至水没过土样, 浸泡、润湿 5 min, 竖直震荡 2 min, 上下移动 50 次, 振幅为 3 cm。收集各级筛层团聚体并分别转移至铝盒中, $60\ ^\circ\text{C}$ 烘干 48 h 至恒重, 计算团聚体的质量分数。将 $>0.25\ \text{mm}$ 的团聚体称为大团聚体, $<0.25\ \text{mm}$ 的团聚体称为微团聚体。由于试验地砂粒含量很低, 所以没有对水稳性团聚体进行去砂粒的校正。

土壤有机碳和团聚体有机碳采用 TOC 仪测定 (Vario TOC, Elementar, Germany)。具体方法为: 分别称取 2 g 土壤样品和团聚体样品, 加入 $0.5\ \text{mol}\cdot\text{L}^{-1}$ 盐酸 20 mL, 使其充分去除样品中的碳酸钙, 离心、烘干, 将样品磨碎后过 100 目筛, 用 TOC 仪测定样品有机碳含量。其中, 团聚体有机碳含量 [$\text{g}(\text{C})\cdot\text{kg}^{-1}$ (全土)] 为各级团聚体有机碳浓度 [$\text{g}(\text{C})\cdot\text{kg}^{-1}$ (团聚体)] 与该级团聚体所占百分比的乘积。

1.4 数据处理

团聚体稳定性采用平均重量直径(mean weight

diameter, MWD)和几何平均直径(geometric mean diameter, GMD)表示:

$$MWD = \sum_{i=1}^n (X_i \cdot W_i) \quad (1)$$

$$GMD = \exp \left[\sum_{i=1}^n (W_i \cdot \ln(X_i)) \right] \quad (2)$$

式中, X_i 为第 i 个筛子上团聚体的平均直径, W_i 为第 i 个筛子上团聚体重量百分比。其中, $>2\ \text{mm}$ 筛上的团聚体平均直径采用 $3.5\ \text{mm}$, 这是因为在湿筛情况下 $>5\ \text{mm}$ 的团聚体含量很少^[20]。

有机碳储量采用等质量土壤有机碳储量计算方法^[21]:

$$M_{\text{SOC}} = M_{\text{soil}} \cdot C_c \cdot 0.001 \quad (3)$$

$$M'_{\text{SOC}} = M_{\text{soil}} \cdot C'_c \cdot 0.001 \quad (4)$$

$$M_{\text{soil}} = \rho_b \cdot T \cdot 0.01 \cdot 10\ 000 \quad (5)$$

式中, M_{SOC} 为土壤有机碳储量 ($\text{Mg}\cdot\text{hm}^{-2}$), M'_{SOC} 为水稳性团聚体有机碳储量 ($\text{Mg}\cdot\text{hm}^{-2}$), $1\ \text{Mg}=10^3\ \text{kg}$; M_{soil} 为单位面积土壤质量 ($\text{Mg}\cdot\text{hm}^{-2}$); C_c 为土壤有机碳含量 ($\text{g}\cdot\text{kg}^{-1}$), C'_c 为水稳性团聚体有机碳含量 [$\text{g}\cdot\text{kg}^{-1}$ (全土)]; ρ_b 为土壤容重 ($\text{g}\cdot\text{cm}^{-3}$); T 为土壤深度 (cm); 以不同耕作处理下土壤质量最大的那个值作为该土层统一的土壤质量。

采用 Excel 进行数据整理, 采用 SPSS 16.0 软件进行单因素方差分析, 用 LSD 方法对不同处理之间进行多重比较, 经过 t 检验 ($P<0.05$)。采用 SigmaPlot 10.0 软件进行绘图。

2 结果与分析

2.1 不同耕作方式对土壤有机碳、全氮的影响

由表 2 与表 3 可见, 不同耕作方式对不同土层土壤有机碳与全氮的含量及储量和 C/N 均有显著影响。0~5 cm 土层土壤有机碳(soil organic carbon, SOC)含量及储量大小顺序为 $\text{NT}>\text{NTRR}>\text{CT}$, 且差异均达显著水平 ($P<0.05$); 全氮含量及储量为 $\text{NT}>\text{NTRR}>\text{CT}$, NT 显著高于 CT, 而 NTRR 与 NT、CT 无明显差异。5~10 cm 土层, SOC 含量及储量 NT 显著高于 NTRR 和 CT, 而 NTRR 和 CT 差异不显著; 全氮含量及储量 NT 最高, NTRR 最小, 其中 NT 与 NTRR 的差异达显著水平。10~20 cm 土层, 3 种处理 SOC 含量及储量无明显差别。20~40 cm 和 40~60 cm 土层, SOC、全氮含量及储量均表现为 $\text{NT}<\text{NTRR}<\text{CT}$, 在 20~40 cm 中, SOC 含量和储量 NT 显著低于 NTRR 和 CT, 而 NTRR 和 CT 差别不明显; 3 种处理全氮含量以及储量差异均达显著水平。在 40~60 cm 土层中, SOC、全氮含量及储量 CT 分别与 NT、NTRR 有明显差别, 而 NT 和 NTRR 基本一致。

将整个剖面(0~60 cm)分成 2 个层次来看(表 3), 0~20 cm SOC 储量、全氮储量 NT 均显著高于 NTRR 和 CT, 而 NTRR 和 CT 没有表现出显著性差异。其中, SOC 储量 NT 分别比 NTRR 和 CT 高 25.78%、27.94%, 全氮储量 NT 较 NTRR 和 CT 分别高 21.4%、13.2%, 说明与常规耕作相比, 免耕秸秆覆盖显著提高了土壤表层 SOC 和全氮储量。20~60 cm, SOC 储量、全氮储量均表现为 NT<NTRR<CT, 且 3 种处理均达显著性差异水平, 与 CT 相比, SOC 储量 NT、NTRR 分别低 32%、18.7%, 全氮储量 NT、NTRR 则分别低 44%、26.3%; 与常规耕作相比, 免耕和免耕秸秆不还田不利于深层土壤有机碳、氮的积累, 而施用有机肥(NTRR) 较秸秆覆盖(NT)对深层有机

碳、氮的积累更有利。从整个土壤剖面(0~60 cm)来看, SOC 储量表现为 CT>NT>NTRR, CT 显著高于其他 2 种处理, 而 NT 和 NTRR 十分相近, NT、NTRR 较 CT 分别低 8.4%、10.7%, 说明在 0~60 cm 土层免耕总固碳量小于常规耕作。全氮储量同样 CT 最高, NT 与 NTRR 差别不明显。

2.2 不同耕作方式对土壤水稳性团聚体稳定性的影响

由图 1 可知, 0~5 cm、5~10 cm 土层不同耕作方式的团聚体平均重量直径(MWD)值表现为: NTRR>NT>CT, 几何平均直径(GMD)值表现出同样的变化特征, NT 和 NTRR 显著高于 CT(0~5 cm 土层 GMD 值除外), 而 NT 与 NTRR 差别均不显著。10~20 cm

表 2 不同耕作方式土壤有机碳(SOC)、全氮(TN)含量
Table 2 Soil organic carbon (SOC) and total N (TN) contents under different tillage treatments

土层深度 Soil depth (cm)	项目 Item	NT	NTRR	CT
0~5	SOC (g·kg ⁻¹)	13.78±0.78a	10.72±0.62b	8.13±0.49c
	TN (g·kg ⁻¹)	1.39±0.00a	1.27±0.01ab	1.13±0.15b
	C/N	9.93±0.56a	8.44±0.57ab	7.31±1.34b
5~10	SOC (g·kg ⁻¹)	10.83±0.06a	7.75±0.96b	7.76±0.40b
	TN (g·kg ⁻¹)	1.14±0.04a	0.97±0.09b	1.00±0.10ab
	C/N	9.49±0.37a	8.00±0.30b	7.82±1.10b
10~20	SOC (g·kg ⁻¹)	7.12±0.45a	6.18±0.80a	7.01±0.73a
	TN (g·kg ⁻¹)	1.01±0.06a	0.77±0.10b	0.94±0.01ab
	C/N	7.20±0.18a	8.02±0.04a	7.49±0.84a
20~40	SOC (g·kg ⁻¹)	4.74±0.36b	5.74±0.14a	6.14±0.04a
	TN (g·kg ⁻¹)	0.54±0.05c	0.74±0.05b	0.94±0.01a
	C/N	9.72±0.01a	7.74±0.35b	6.55±0.12c
40~60	SOC (g·kg ⁻¹)	3.15±0.07b	3.68±0.03b	5.46±0.53a
	TN (g·kg ⁻¹)	0.40±0.04b	0.49±0.03b	0.73±0.06a
	C/N	7.96±0.60a	7.56±0.43a	7.52±1.15a

表 3 不同耕作方式土壤有机碳(SOC)、全氮(TN)储量
Table 3 Storage of soil organic carbon (SOC) and total N (TN) under different tillage treatments Mg·hm⁻²

土层深度 Soil depth (cm)	项目 Item	NT	NTRR	CT
0~5	SOC	8.95±0.51a	6.97±0.40b	5.28±0.32c
	TN	0.90±0.00a	0.83±0.01ab	0.73±0.10b
5~10	SOC	8.24±0.05a	5.90±0.73b	5.90±0.30b
	TN	0.87±0.03a	0.74±0.07b	0.76±0.08ab
10~20	SOC	11.11±0.69a	9.64±1.24a	10.94±1.14a
	TN	1.58±0.10a	1.20±0.16b	1.46±0.02a
20~40	SOC	13.99±1.08b	16.96±0.41a	18.18±0.12a
	TN	1.59±0.15c	2.20±0.15b	2.77±0.04a
40~60	SOC	9.19±0.20b	10.74±0.09b	15.91±1.56a
	TN	1.16±0.11c	1.42±0.07b	2.13±0.19a
0~20	SOC	28.30±0.64a	22.50±1.41b	22.12±1.76b
	TN	3.35±0.07a	2.76±0.23b	2.96±0.20b
20~60	SOC	23.18±0.87c	27.70±0.50b	34.09±1.44a
	TN	2.75±0.04c	3.62±0.13b	4.91±0.15a
0~60	SOC	51.48±0.90b	50.20±1.88b	56.21±0.32a
	TN	6.11±0.10b	6.39±0.27b	7.87±0.05a

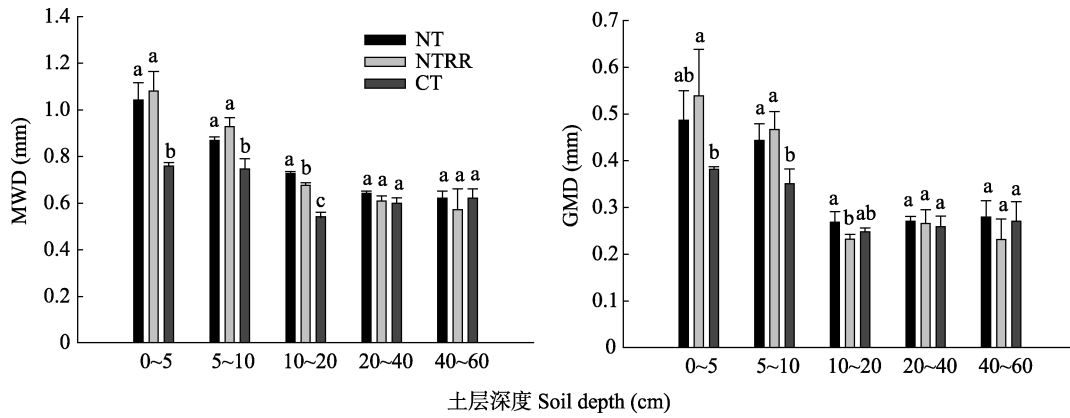


图 1 不同耕作方式下土壤团聚体平均重量直径(MWD)和几何平均直径(GMD)

Fig. 1 Mean weight diameter (MWD) and geometric mean diameter (GMD) of soil aggregates under different tillage treatments

土层不同耕作方式的 MWD 值表现为: NT>NTRR>CT, 且差异均显著, GMD 值 NT 最大, NTRR 最小, 且二者差异达显著水平。20~40 cm、40~60 cm 土层不同耕作方式的 MWD 值和 GMD 值无明显差别。这说明不同耕作方式对土壤表层团聚体大小分布状况具有显著影响, 与常规耕作相比, 免耕和免耕秸秆不还田处理对土壤水稳性团聚体的分布和稳定性具有促进作用。随着土层的加深, 不同处理对土壤团聚体的影响基本无差别。

2.3 不同耕作方式对土壤水稳性团聚体有机碳浓度和含量的影响

不同耕作方式下土壤水稳性团聚体有机碳浓度 [$\text{g}(\text{C})\cdot\text{kg}^{-1}$ (团聚体)]的变化如图 2 所示。由图 2A 和图 2B 可以看出, 不同耕作方式对不同土层 0.25~2 mm、0.05~0.25 mm 粒级水稳性团聚体有机碳浓度有显著影响 ($P<0.05$)。0~5 cm、5~10 cm 土层团聚体有机碳浓度表现为 NT>NTRR>CT, NT 显著高于 NTRR 和 CT, 0~5 cm 土层 NTRR 与 CT 之间差异也达显著水平。10~20 cm 土层团聚体有机碳浓度在 3 种处理之间差别不明显。各处理团聚体有机碳浓度随土层的加深逐渐减少。至 20~40 cm, NT 团聚体有机碳浓度减幅最大, CT 减幅最小, 在该土层 NT 团聚体有机碳浓度最低, 与 NTRR 处理之间差异达显著水平; 在 0.25~2 mm 粒级中, NT 与 CT 处理间差异达显著水平。40~60 cm 土层团聚体有机碳浓度表现为 CT 最高, 3 种处理差异均显著; 在 0.25~2 mm 粒级中 NTRR 最低, 在 0.05~0.25 mm 粒级中 NT 为最低。 <0.05 mm 粒级团聚体有机碳浓度变化如图 2C 所示, 在 0~5 cm、5~10 cm 土层 NT 最高, 而在 10~20 cm、20~40 cm、40~60 cm 土层 NT 均为最低。表明土壤表层团聚体有机碳浓度表现为 NT 明显高于其他 2 种处理, 而在深层(40~60 cm 土层)CT 则高于 NT 和 NTRR 处理; 各土层团聚体有机碳浓度随团聚体粒径的减小而降低。

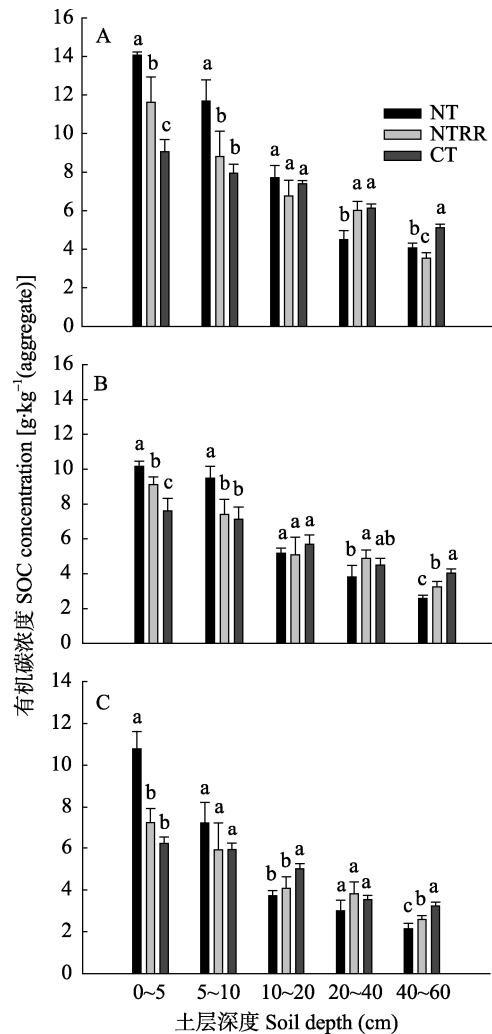


图 2 不同耕作方式下 0.25~2 mm (A)、0.05~0.25 mm (B)、<0.05 mm (C) 土壤水稳性团聚体有机碳浓度

Fig. 2 Concentration of soil organic carbon (SOC) in 0.25~2 mm (A), 0.05~0.25 mm (B) and <0.05 mm (C) water-stable aggregates at each soil depth under different tillage treatments

不同耕作方式下土壤水稳性团聚体有机碳含量 [$\text{g}(\text{C})\cdot\text{kg}^{-1}$ (全土)]的变化如图 3 所示。由图 3A 可知, 在 0~5 cm、5~10 cm 土层, 0.25~2 mm 粒级团聚体有机碳含量表现为 NT>NTRR>CT, 且均达显著差异水

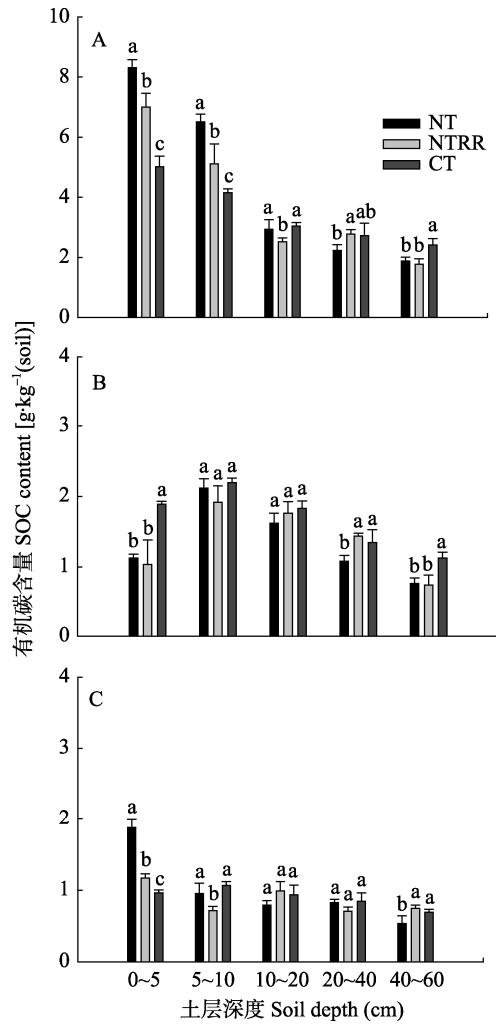


图3 不同耕作方式下0.25~2 mm (A)、0.05~0.25 mm (B)、<0.05 mm (C)土壤水稳性团聚体有机碳含量

Fig. 3 Content of soil organic carbon (SOC) in 0.25~2 mm (A), 0.05~0.25 mm (B) and <0.05 mm (C) water-stable aggregates at each soil depth under different tillage treatments

平($P<0.05$)。在 10~20 cm 土层 NTRR 处理团聚体有机碳含量最少, 与 NT 和 CT 差异均显著。在 20~40 cm 土层 NT 处理最少, 与 NTRR 处理差异显著, 而 NTRR 与 CT 无明显差异。在 40~60 cm 土层 CT 处

理显著高于 NT 和 NTRR, 而 NT 与 NTRR 含量相近。随土层的加深, 土壤水稳性团聚体有机碳含量呈减小趋势, NT 减幅最大, CT 减幅最小。各土层 0.05~0.25 mm 粒级团聚体有机碳含量(图 3B)和<0.05 mm 粒级团聚体有机碳含量(图 3C)均显著低于大团聚体(0.25~2 mm)。图 3 说明土壤有机碳多集中于大团聚体中, NT 处理能够显著提高大团聚体有机碳含量, 而常规耕作更有利于深层大团聚体有机碳的积累。

2.4 不同耕作方式对土壤水稳性团聚体有机碳储量的影响

由表 4 可以看出, 3 种处理各粒级团聚体有机碳储量均随团聚体粒径的降低而降低。在 0~20 cm 土层, 3 种处理水稳性大团聚体(0.25~2 mm)有机碳储量差异显著($P<0.05$), NT 和 NTRR 较 CT 分别高 33.8%和 10.8%; CT 处理的 0.05~0.25 mm 粒级团聚体有机碳储量显著高于 NT 和 NTRR; NT 处理<0.05 mm 粒级团聚体有机碳储量略高于 CT 和 NTRR, 三者差异不明显。在 20~60 cm 土层, 3 种处理水稳性大团聚体和微团聚体有机碳储量均表现为: NT<NTRR<CT, 其中 NT 和 NTRR 处理水稳性大团聚体有机碳储量分别较 CT 低 20.0%和 11.4%, NTRR 比 NT 高 10.7%。这说明与 CT 相比, NT 和 NTRR 能够提高表层水稳性大团聚体有机碳储量, 而降低深层大团聚体有机碳储量。

从整个剖面(0~60 cm 土层)上看, 3 种处理水稳性大团聚体有机碳储量表现为: NT>CT>NTRR, NT 较 NTRR 和 CT 分别高 4.9%、2.9%, 而水稳性微团聚体有机碳储量均表现为 CT 最高, 且在 0.05~0.25 mm 粒级团聚体中, 与 NT 和 NTRR 之间差异显著。0~60 cm 土层 NT、NTRR、CT 处理 0.25~2 mm 粒级水稳性团聚体有机碳储量所占土壤总有机碳储量的比例分别为 52.6%、51.3%、46.7%, 说明与常规耕作相比, 免耕处理下土壤有机碳在水稳性大团聚体中的储量略高。

表 4 不同耕作方式下土壤水稳性团聚体有机碳储量

Table 4 Storage of soil organic carbon (SOC) in different size water-stable aggregates under different tillage treatments

土层深度 Soil depth (cm)	粒级 Aggregate size (mm)	团聚体有机碳储量 Storage of soil organic carbon in water-stable aggregates		
		NT	NTRR	CT
0~20	0.25~2	14.93±0.42a	12.37±0.14b	11.16±0.35c
	0.05~0.25	4.87±0.31b	4.88±0.66b	5.76±0.12a
	<0.05	3.18±0.20a	2.85±0.22a	2.90±0.21a
20~60	0.25~2	12.07±0.40b	13.36±0.74b	15.08±1.87a
	0.05~0.25	5.43±0.24c	6.41±0.44b	7.27±0.41a
	<0.05	4.01±0.31b	4.26±0.10ab	4.51±0.23a
0~60	0.25~2	27.00±0.03a	25.74±0.88a	26.24±1.56a
	0.05~0.25	10.30±0.44b	11.29±0.87b	13.02±0.52a
	<0.05	7.20±0.12a	7.12±0.17a	7.42±0.40a

2.5 土壤总有机碳和团聚体有机碳相关关系的变化

表 5 列出了各土层土壤总有机碳含量与团聚体有机碳含量 $[g(C)\cdot kg^{-1}(全土)]$ 之间的相关分析结果。可以看出,各土层土壤总有机碳与 0.25~2 mm 团聚体有机碳含量之间均存在显著的正相关($P<0.05$),且在表层和底层(0~5 cm、5~10 cm、40~60 cm)达极

显著水平($P<0.01$)。在 0~5 cm 土层,土壤总有机碳还与<0.05 mm 团聚体有机碳含量存在极显著的正相关,而与 0.05~0.25 mm 粒级团聚体则存在一定的负相关。在 20~40 cm、40~60 cm 土层中,土壤总有机碳与 0.05~0.25 mm 粒级团聚体有机碳含量之间也存在显著的正相关。

表 5 不同土层土壤总有机碳与团聚体有机碳的相关关系
Table 5 Correlations between total soil organic carbon (SOC) and water-stable aggregate SOC at each depth

土层深度 Soil depth (cm)	0.25~2 mm 团聚体有机碳 SOC in 0.25~2 mm aggregate	0.05~0.25 mm 团聚体有机碳 SOC in 0.05~0.25 mm aggregate	<0.05 mm 团聚体有机碳 SOC in <0.05 mm aggregate
0~5	0.982**	-0.650	0.965**
5~10	0.913**	0.362	0.238
10~20	0.760*	0.481	0.231
20~40	0.719*	0.785*	-0.470
40~60	0.874**	0.905**	0.438

*和**分别表示相关性在 0.05 和 0.01 水平上达到显著 * and ** indicate significant correlation at 0.05 and 0.01 levels, respectively.

3 讨论

3.1 土壤总有机碳、全氮含量和储量

本研究结果表明,免耕实施 7 年后对团聚体特性和土壤有机碳产生了显著影响。在土壤表层(0~20 cm)上看,与常规耕作(CT)和免耕秸秆不还田(NTRR)方式相比,免耕(NT)能够显著提高土壤表层土壤有机碳和全氮的含量和储量,具有明显的固碳效应。这可能由于免耕处理下秸秆的分解增加了表层土壤有机物质,此外,秸秆导致土壤有机物与微生物相隔离,降低了有机物的分解速率;同时,秸秆覆盖降低表层土壤温度,减少土壤水分散失,秸秆也能减小土壤表层风速,进而降低了土壤水热交换,使土壤通透性降低,这些条件能够显著提高土壤微生物活性,致使更多不稳定碳得以固定^[22]。McCarty 等^[23]和 Dolan 等^[12]的研究也得出相同结果。然而,在 20 cm 土层以下,CT 比 NT 和 NTRR 储存更多的有机碳和氮。从整个剖面上(0~60 cm)来看,CT 处理的固碳量高于 NT 和 NTRR。有研究表明,土地经过耕作处理将没有收获的秸秆翻到地下,以此能够促进土壤深层根系的生长^[12]。Allmaras 等^[24]研究显示,埋深的秸秆和根系的分解,能够显著提高土壤有机碳的积累。本试验地各处理冬小麦播种时均为玉米留茬,常规耕作经过旋耕处理将玉米茬翻入土壤中,一方面促进根系的生长,另一方面玉米茬本身的分解也能够提高土壤有机碳含量,因此与免耕处理相比常规耕作在 20 cm 土层以下能够提高土壤有机碳含量,并且使表层的不足也得以补充。

3.2 土壤水稳性团聚体含量及稳定性

团聚体是土壤结构的物质基础^[25],良好的土壤结构不仅要有团聚体分布,还要保证团聚体具备一

定的稳定性,尤其是团聚体的水稳性。平均重量直径(MWD)和几何平均直径(GMD)均为反映土壤团聚体分布状况和稳定性的常用指标,2 个指标值越大,表明团聚体稳定性越好^[26]。NT 和 NTRR 处理可提高表层水稳性大团聚体 MWD 和 GMD,主要原因是免耕减少了对土壤的扰动,而大团聚体的稳定性较差^[7],耕作很容易造成大团聚体的破裂。同时秸秆覆盖和施用有机肥可促进微生物菌丝的生长,有机物质经微生物分解后可产生有机酸,以及合成土壤腐殖质等有机胶结物质,进而增加大团聚体含量^[27]。从施肥方式来讲,本研究结果表明,NTRR 处理施用部分有机肥来代替秸秆,提高了土壤水稳性大团聚体含量。与刘恩科和安婷婷等^[28-29]研究一致。

3.3 土壤水稳性团聚体有机碳含量及储量

本研究结果显示,NT 和 NTRR 处理能够显著提高表层土壤水稳性大团聚体有机碳含量和储量,而在 20 cm 土层以下,大团聚体有机碳含量明显减小。表层的变化趋势与水稳性团聚体 MWD 和 GMD 相一致,免耕增加表层大团聚体有机碳的特性可能由于减少了耕作对土壤的破坏以及秸秆覆盖促进了大团聚体的形成,减少了土壤大团聚体有机碳的分解速率^[30]。而常规耕作土壤经过机械翻动,一方面使得土壤中的残渣和有机物质快速分解,减少了大团聚体形成的原料(有机胶结物质),不利于大团聚体的形成与稳定;另一方面,翻动也会直接导致团聚体的破坏,使团聚体中的有机物质分解加速,从而降低了土壤有机碳的储量。表层土壤大部分有机碳存储于 0.25~2 mm 水稳性团聚体中,其中,0~5 cm 土层大团聚体中有机碳含量占土壤总有机碳的

60%~65%, 说明团聚体对有机碳的物理保护主要通过大团聚体来实现。Gijssman^[31]研究也表明, 土壤碳的含量随着团聚体粒径的降低而降低。而在深层, 通过上述分析得出常规耕作的根系较为发达, 根系能够大幅增加土壤微生物数量和种类^[32], 使得更多的碳得以固定并存在于大团聚体中, 同时根系的分解以及根系分泌物也能够增加大团聚体有机碳的含量。

在 0.05~0.25 mm 粒级水稳性团聚体中, 不同耕作处理下团聚体有机碳含量表现出不同的分布特征, 尤其在 0~5 cm 土层, 与 0.25~2 mm 粒级团聚体有机碳表现出相反的变化趋势, 即常规耕作团聚体有机碳含量要显著高于免耕。大团聚体是由土壤胶结剂将微团聚体之间相互连结而形成, 常规耕作造成的土壤扰动破坏了微团聚体之间的连结物质, 使得大团聚体分散, 更多的微团聚体被释放出来, 微团聚体数量的增加也提高了相应的有机碳含量^[11,16]。

本试验结果表明, 秸秆覆盖比施用有机肥对表层土壤有机碳储量和 0.25~2 mm 团聚体有机碳储量的提高具有更显著的作用。有研究表明, 大量的施用有机肥对土壤固碳潜力的提高具有重要作用^[33]。本试验中有机肥施用量较少, 可能对表层土壤质量的改善具有一定限制作用; 与秸秆覆盖相比, 施用有机肥对深层有机碳的积累更有利, 可能由于施用有机肥更利于作物根系的生长, 进而促进深层土壤有机碳的固持。

3.4 土壤总有机碳与水稳性团聚体有机碳之间的相关关系

由本文上述分析得出, 各土层 0.25~2 mm 粒级团聚体中有机碳含量高于其他粒级, 即各处理土壤有机碳在大团聚体中的分布较多, 故土壤总有机碳与大团聚体应有较好的相关性。相关分析结果表明, 土壤总有机碳与大团聚体有机碳之间的相关性更为显著, 该结果验证了上述分析。

4 结论

本文通过对实施 7 年后 3 种耕作方式下土壤团聚体特征和土壤有机碳的比较研究, 获得如下结论:

(1) 免耕能够显著提高表层土壤水稳性团聚体的分布和稳定性, 其中, 施用有机肥和秸秆还田对团聚体稳定性的影响基本一致。

(2) 与常规耕作处理相比, 免耕处理和免耕秸秆不还田处理能够显著增加表层(0~20 cm)土壤总有机碳和大团聚体有机碳的含量和储量, 但降低了深层(20~60 cm)土壤总有机碳和大团聚体有机碳的含量和储量, 说明与常规耕作相比, 免耕和免耕秸秆不还田有利于表层土壤有机碳的积累, 而不利于深层

土壤有机碳的积累。从整个剖面上看, 免耕处理大团聚体有机碳储量略有提高, 而土壤总有机碳储量略有降低。

(3) 与施用有机肥相比, 秸秆覆盖处理能够促进表层土壤有机碳的积累而降低深层土壤有机碳的储量。

(4) 土壤总有机碳主要分布于大团聚体中, 且总有机碳与大团聚体有机碳关系最为密切, 说明该粒级团聚体有机碳能够指示土壤总有机碳的变化。

参考文献

- [1] 胡宁, 姜翼来, 梁雷. 保护性耕作对土壤有机碳、氮储量的影响[J]. 生态环境学报, 2010, 19(1): 223-226
- [2] 黄昌勇. 土壤学[M]. 北京: 中国农业出版社, 2000
- [3] Mikha M M, Rice C W. Tillage and manure effects on soil and aggregate-associated carbon and nitrogen[J]. Soil Science Society of America Journal, 2004, 68(3): 809-816
- [4] 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
- [5] Bronick C, Lal R. Soil structure and management: A review[J]. Geoderma, 2005, 124(1/2): 3-22
- [6] Deneff K, Six J, Bossuyt H, et al. Influence of dry-wet cycles on the interrelationship between aggregate, particulate organic matter, and microbial community dynamics[J]. Soil Biology and Biochemistry, 2001, 33(12/13): 1599-1611
- [7] Elliott E T. Aggregate structure and carbon, nitrogen, and phosphorus in native and cultivated soils[J]. Soil Science Society of America Journal, 1986, 50(3): 627-633
- [8] Tisdall J M, Oades J M. The effect of crop rotation on aggregation in a red-brown earth[J]. Australian Journal of Soil Research, 1980, 18(4): 423-433
- [9] 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
- [10] Lal R, Kimble J M. Conservation tillage for carbon sequestration[J]. Nutrient Cycling in Agroecosystems, 1997, 49(1): 243-253
- [11] 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
- [12] Dolan M S, Clapp C E, Allmaras R R, et al. Soil organic carbon and nitrogen in a Minnesota soil as related to tillage, residue and nitrogen management[J]. Soil and Tillage Research, 2006, 89(2): 221-231
- [13] Yang X M, Drury C F, Reynolds W D, et al. Impacts of long-term and recently imposed tillage practices on the vertical distribution of soil organic carbon[J]. Soil and Tillage Research, 2008, 100(1/2): 120-124

- [14] 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
- [15] 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
- [16] Six J, Elliott E T, Paustian K, et al. Aggregation and soil organic matter accumulation in cultivated and native grassland soils[J]. *Soil Science Society of America Journal*, 1998, 62(5): 1367–1377
- [17] 于爱忠, 黄高宝, 冯福学. 不同耕作措施对冬小麦农田土壤水分和温度的影响[J]. *干旱地区农业研究*, 2009, 27(1): 84–88
- [18] 高焕文, 李问盈, 李洪文. 中国特色保护性耕作技术[J]. *农业工程学报*, 2003, 19(3): 1–4
- [19] 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
- [20] Su Y Z, Liu W J, Yang R, et al. Changes in soil aggregate, carbon, and nitrogen storages following the conversion of cropland to alfalfa forage land in the marginal oasis of Northwest China[J]. *Environmental Management*, 2009, 43(6): 1061–1070
- [21] 梁爱珍, 张晓平, 杨学明, 等. 耕作方式对耕层黑土有机碳库储量的短期影响[J]. *中国农业科学*, 2006, 39(6): 1287–1293
- [22] 王燕, 王小彬, 刘爽, 等. 保护性耕作及其对土壤有机碳的影响[J]. *中国生态农业学报*, 2008, 16(3): 766–771
- [23] McCarty G W, Lyssenko N N, Start J L. Short-term changes in soil carbon and nitrogen pools during tillage management transition[J]. *Soil Science Society of America Journal*, 1998, 62(6): 1564–1571
- [24] Allmaras R R, Linden D R, Clapp C E. Corn-residue transformations into root and soil carbon as related to nitrogen, tillage, and stover management[J]. *Soil Science Society of America Journal*, 2004, 68(4): 1366–1375
- [25] 文倩, 关欣. 土壤团聚体形成的研究进展[J]. *干旱区研究*, 2004, 21(4): 434–438
- [26] Nimmo J, Perkins K. Aggregate stability and size distribution[M]// *Methods of soil analysis, Part4-Physical Methods*. USA, Wisconsin, Madison: Soil Science Society of America, 2002: 317–327
- [27] 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
- [28] 刘恩科, 赵秉强, 梅旭荣, 等. 不同施肥处理对土壤水稳定性团聚体及有机碳分布的影响[J]. *生态学报*, 2010, 30(4): 1035–1041
- [29] 安婷婷, 汪景宽, 李双异, 等. 施用有机肥对黑土团聚体有机碳的影响[J]. *应用生态学报*, 2008, 19(2): 369–373
- [30] 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(1/2): 185–200
- [31] Gijsman A J. Soil aggregate stability and soil organic matter fractions under agropastoral systems established in native savanna[J]. *Australian Journal of Soil Research*, 1996, 34(6): 891–907
- [32] 林雁冰, 薛泉宏, 颜霞. 覆盖模式及小麦根系对土壤微生物区系的影响[J]. *中国生态农业学报*, 2008, 16(6): 1389–1393
- [33] 郭胜利, 吴金水, 党廷辉. 轮作和施肥对半干旱区作物地上部生物量与土壤有机碳的影响[J]. *中国农业科学*, 2008, 41(3): 744–751