



# 长期不同植被覆盖对黑土团聚体内有机碳组分的影响

李娜 张一鹤 韩晓增\* 尤孟阳 郝翔翔

中国科学院东北地理与农业生态研究所, 哈尔滨 150081

**摘要** 为探究黑土团聚体内土壤有机碳(SOC)的“分馏”特征, 揭示不同植被覆盖下土壤团聚体的固碳机制, 该文以中国科学院海伦农业生态系统国家野外综合研究站内不同植被覆盖(草地、农田和裸地)长期定位实验的土样为研究对象, 利用团聚体湿筛分组、有机碳物理和化学分组相结合的方法, 研究了黑土团聚体及其内部的碳密度和腐殖质组分的碳分配特征。研究发现, 黑土经过不同植被覆盖31年后, 长期草地覆盖使土壤表层SOC、全氮(TN)含量显著增加, 农田和无植被覆盖的裸地SOC含量减少, 且在裸地显著降低。3种处理中, 2–0.25 mm (含2 mm, 下同)粒级团聚体均为优粒级。土壤团聚体的稳定性顺序为草地>农田>裸地。草地覆盖使土壤大团聚体的比例和有机碳库增加, 微团聚体和粉黏粒所占比例和碳库均减少, 说明草地覆盖促进了土壤大团聚体形成, 土壤固碳能力显著增强。而农田和裸地因外源碳投入少, 有机碳含量均是微团聚体>大团聚体>粉黏粒, SOC主要分布在微团聚体中。不同植被覆盖处理对土壤团聚体内密度组分和腐殖质各组分碳的富集“分馏”作用很明显, 与农田和裸地相比, 长期草地植被覆盖处理>2 mm和2–0.25 mm粒级团聚体中轻组碳含量富集的较多, 2–0.25 mm粒级团聚体中富里酸、胡敏酸和胡敏素的碳富集均最高, 而农田和裸地促进了微团聚体内腐殖质碳的富集。草地覆盖显著增加了大团聚体内活性有机碳组分, 来源于植物的碳首先进入到大粒径的团聚体中, 使土壤团聚结构显著改善, 农田和无植被覆盖的裸地土壤中轻组碳含量显著降低, 团聚体内有机碳以重组碳和胡敏素为主, 稳定化程度更高。

**关键词** 植被覆盖; 水稳性团聚体; 土壤有机碳; 密度组分; 腐殖酸

李娜, 张一鹤, 韩晓增, 尤孟阳, 郝翔翔 (2019). 长期不同植被覆盖对黑土团聚体内有机碳组分的影响. 植物生态学报, 43, 624–634. DOI: 10.17521/cjpe.2019.0028

## Effects of long-term vegetation cover changes on the organic carbon fractions in soil aggregates of mollisols

LI Na, ZHANG Yi-He, HAN Xiao-Zeng\*, YOU Meng-Yang, and HAO Xiang-Xiang

Northeast Institute of Geography and Agroecology, Chinese Academy of Sciences, Harbin 150081, China

### Abstract

**Aims** Soil aggregate is the main habitat for decomposition and transformation of soil organic carbon (SOC) and is important to regulate SOC sequestration. The mechanisms of the stability of SOC fractions may vary among different aggregate sizes. The aims of this study were to explore the characteristics of SOC “fractionation” in soil aggregates, and to reveal the mechanisms of carbon (C) sequestration in soil aggregates of mollisols after 31-year changes in vegetation cover.

**Methods** A long-term field experiment with different vegetation cover (grassland, farmland and bareland) was established in National Observation Station of Hailun Agro-ecosystem System. Soil aggregate fractionation, the density and humus fractionation within different aggregate sizes were further carried out.

**Important findings** The results showed that after 31 years of land cover change, the surface SOC and total nitrogen (TN) contents in grassland with higher C inputs increased significantly with time, while the SOC and TN contents decreased significantly in bareland, but with no statistical significance in farmland. The 2–0.25 mm (include 2 mm, the same below) aggregates was the excellent fraction for SOC sequestration under all three land cover. The stability of soil aggregate was in the order of: grassland > farmland > bareland. The mass proportion of

收稿日期Received: 2019-01-30 接受日期Accepted: 2019-06-25

基金项目: 国家重点研发计划(2016YFD0300802-01)、中国科学院前沿科学重点计划项目(QYZDB-SSW-SYS022)和中国科学院青年创新促进会项目(2016211)。Supported by the National Key R&D Program of China (2016YFD0300802-01), the Key Research Program of Frontier Sciences, Chinese Academy of Sciences (QYZDB-SSW-SYS022), and the Youth Innovation Promotion Association of Chinese Academy of Sciences (2016211).

\* 通信作者Corresponding author (xzhan@iga.ac.cn)

soil aggregate and its associated content were highest in grassland, while the proportion of microaggregate and its carbon allocation rate were lowest in grassland. However, due to the lower C inputs in farmland and bareland, the distribution of aggregates was in the order of microaggregate > macroaggregate > silt-clay fraction under these two types of land cover, and organic carbon (OC) content was highest in microaggregates. Different vegetation cover changed the C “fractionation” of density and humus fractions in aggregates. Compared with farmland and bareland soils, OC contents in light fractions in >2 mm and 2–0.25 mm aggregates were higher in grassland, and the OC contents in furic acid, humic acid and humin were highest in 2–0.25 mm aggregates in grassland, while the humus OC accumulated in microaggregates in farmland and bareland. Our results indicated that the plant-derived C entered macroaggregates first, and long-term grass cover enhanced free and light C fractions in macroaggregate, which consequently improved the stability of soil aggregates and enhanced the “fractionation” effects of large aggregates on the humus fractions. Our results revealed the characteristics of carbon sequestration in soil aggregates under different vegetation cover.

**Key words** vegetation cover; water-stable aggregates; soil organic carbon; density fraction; humus

Li N, Zhang YH, Han XZ, You MY, Hao XX (2019). Effects of long-term vegetation cover changes on the organic carbon fractions in soil aggregates of mollisols. *Chinese Journal of Plant Ecology*, 43, 624–634. DOI: 10.17521/cjpe.2019.0028

土壤团聚体是土壤结构的基本单元, 是土壤的重要组成部分, 具有保证和协调土壤水肥气热、影响土壤微生物活性、维持和稳定土壤适宜三相等作用(李娜等, 2013)。近年来, 土壤团聚体的固碳机制一直是全球碳源汇研究的热点。土壤有机碳(SOC)是土壤团聚结构的重要构成物质, 经微生物的分解转化, 被分解成密度、大小和稳定性不同的组分(Six *et al.*, 2012), 这些组分在胶结物质胶结、矿物吸附和电性吸附等作用下形成不同粒级大小的团聚体(Chenu & Stotzky, 2002), 导致不同粒径大小的团聚体中, 有机碳的数量和稳定程度不尽相同。团聚体内有机碳的生物、物理和化学结合方式是有机碳固定及保护机制研究的重要内容(Six *et al.*, 1998, 2012; Chenu & Stotzky, 2002)。土壤团聚体对有机碳物理保护过程已进行了较多研究(Six *et al.*, 2000, 2004; Lugato *et al.*, 2010), 但对于各粒级团聚体内有机碳的碳固存机制尚无定论。有学者认为, 较大粒级团聚体内的有机碳大部分为半腐解态植物残体或松散结合态有机碳和多糖类物质(Beare *et al.*, 1994), 而微团聚体内的有机碳主要来源于微生物代谢产物等较难分解的、腐殖化程度较高的有机物(Chaney & Swift, 1986)。外源物质进入土壤后, 需经一系列的生物化学分解转化过程, 才能转变为土壤有机碳, 土壤团聚体为这一系列过程提供了合适的“场所”, 进而引起有机碳组分在不同粒径团聚体中的“分馏”, 即有机碳被重新分配。分馏所形成的不同活性和密度组分的有机碳只有在合适的“场所”或者与矿质相结合, 形成稳定性有机碳, 才能被长时间保存下来

(Bossuyt *et al.*, 2001; 李凯等, 2010)。所以土壤团聚体是土壤固碳的核心。但是, 到目前为止, 关于团聚体的固碳机制还未完全清楚, 团聚体的形成对有机碳的“分馏”特征如何? 特别是团聚体内部有机碳密度组分和化学组分分异方面的研究还相对缺乏。

土壤团聚体与有机碳密不可分, 二者互相制约、互相促进, 这种耦合作用受到不同土地利用方式和植被类型的影响。不同土地利用方式和植被类型通过影响新输入的有机物以及原有土壤有机质的矿化损失导致土壤有机碳发生变化, 进而改变土壤团聚结构, 同时, 团聚结构演变影响土壤有机碳的微生物化学分解过程, 驱动土壤团聚体内有机碳的再分配和稳定化。室内培养实验通过控制不同的实验条件来研究团聚体对有机碳的保护和碳固存机制, 但相比自然条件下土壤团聚体和有机碳的耦合机制的研究会失真, 影响对二者之间作用机制的正确判读, 长期的田间定位实验为二者耦合作用机制的研究提供了非常理想的实验平台和材料, 能更加真实地解读土壤团聚结构调控有机质组分的分异特征。为此, 本文依托中国科学院海伦农业生态系统国家野外综合研究站内的长期定位实验, 对连续31年不同植被覆盖条件下黑土团聚体内不同有机碳组分进行研究, 分析黑土团聚体稳定性及团聚体内物理和化学组分有机碳的再分配特征, 团聚体对有机碳的“分馏”作用如何调控? 其对不同植被覆盖方式的响应如何? 研究结果将为优化黑土管理措施, 提高土壤生产力, 减缓温室效应, 解析黑土团聚体固碳机制, 实现黑土地的可持续利用提供科学依据。

## 1 材料和方法

### 1.1 采样地点和实验设计

实验地位于海伦农业生态系统国家野外综合研究站(47.43° N, 126.63° E)内, 该站位于我国东北黑土区腹地, 属温带大陆性季风气候, 冬季低温干燥, 夏季温度较高且多雨, 雨热同季。年平均气温1.5 °C, 年降水量500–600 mm, 生长季120天左右。土壤类型为黄土状母质发育的典型黑土(土壤发生分类), 土壤质地为粉黏壤质, 黏粒含量40%以上(郝翔翔等, 2014)。

实验选取的不同植被覆盖定位试验始于1985年, 实验点起始土壤一致, 演化为3种不同植被覆盖方式: (1)草地植被覆盖(GL): 1985年退耕休闲至今, 无任何人工干扰, 植被自然生长, 目前已恢复为黑土自然状态下的典型草原化草甸植被, 面积为1 120 m<sup>2</sup>, 据估算, 每年地上和地下根的干生物量约为4–9 t·hm<sup>-2</sup>和12–43 t·hm<sup>-2</sup> (未发表数据); (2)农田耕地(CL): 即农田作物覆盖方式, 不施用任何肥料, 种植作物为小麦-玉米-大豆轮作(2016年种植大豆), 一年一熟制, 作物生长季进行3次中耕, 深度20 cm, 秋季收获后作物地上部分全部移除, 仅作物根茬和生长季作物根系分泌物还田, 面积为1 050 m<sup>2</sup>; (3)裸地无植被覆盖(BL): 每年在植物生长期, 不定期将杂草铲除, 模拟无植被覆盖下黑土演化过程, 面积为1 120 m<sup>2</sup>。

### 1.2 土壤样品的采集和制备

实验初始点土壤样品采集于1985年5月, 草地、农田和裸地的实验样品于2016年10月作物收获后采集。采用四分法将每个实验处理划分为4个小区, 在每个小区内按S形5点取样后混合为一个重复样, 4次重复。自实验开始, 草地和裸地处理无任何人为扰动, 取表层(0–10 cm)土壤, 因农田每年都将0–20 cm的耕层土壤进行翻耕混匀, 0–20 cm土壤范围内的土样视为均匀混合, 采样深度为0–20 cm。采样前先将土壤表面植被和枯草小心移除, 露出土壤。在采集和运输过程中尽量减少对土样的扰动, 避免破坏团聚结构。所采土样带回实验室风干, 捡除植物残体及粗有机体, 分成两部分。一部分用手沿自然破碎面掰开, 过8 mm筛, 用于团聚体分级。另一部分土壤风干后分别过2 mm和0.25 mm土样筛, 测定SOC的密度组分、腐殖质组分和元素含量。

### 1.3 测定项目及方法

#### 1.3.1 水稳性团聚体筛分

(1) 水稳性团聚体的筛分根据Six等(1998)和Puget等(1998)的方法进行了修改。具体方法如下: 100 g风干土缓慢湿润5 min, 再浸入蒸馏水中糊化5 min, 然后转移到筛组(2 mm, 0.25 mm)上, 振幅3.0 cm, 32 r·min<sup>-1</sup>, 湿筛10 min, 分别得到>2 mm和2–0.25 mm (含2 mm, 下同)的大团聚体。筛下物<0.25 mm团聚体再过0.053 mm筛, 分离得到微团聚体(0.25–0.053 mm含0.25 mm, 下同)和粉黏粒(≤0.053 mm)。所有团聚体组分分别转移到50 mL小烧杯中, 50 °C烘干至恒质量。研磨、过筛备用。该筛分步骤重复几次, 获得足够质量的不同粒级团聚体, 以保证团聚体内密度组分和腐殖质组分的分组要求。

#### (2) 平均重量直径(MWD)的计算

平均重量直径采用以下公式计算:

$$MWD = \sum W_i \times M_i \quad (1)$$

式中,  $W_i$ 为第*i*个粒级团聚体的平均直径,  $M_i$ 为第*i*个筛上团聚体的百分比。

#### 1.3.2 土壤团聚体的密度分组

土壤团聚体密度分组采用改进的Golchin等(1994)方法, 将土壤有机质分为游离态轻组、闭蓄态轻组和重组。具体如下: 1)称10.0 g团聚体置于已称质量的50 mL离心管中, 加50 mL密度1.8 g·cm<sup>-3</sup>的NaI溶液, 轻轻摇动后室温静置过夜。次日3 500 r·min<sup>-1</sup>离心15 min, 过滤, 滤液回收再用, 再向离心管中加50 mL NaI溶液, 摇动、离心、过滤, 重复2次。留在滤膜上的物质用0.01 mol·L<sup>-1</sup> CaCl<sub>2</sub>溶液和蒸馏水洗涤, 然后转移至50 mL烧杯中, 静置24 h后, 蒸干, 称质量, 该组分为游离态轻组(fLF)( $d < 1.8 \text{ g} \cdot \text{cm}^{-3}$ )。2)离心管内沉淀加50 mL NaI溶液, 摇动后, 超声分散15 min (KQ5200DE数控超声清洗器, 40 Hz, 100 W)。离心、过滤步骤同上, 并重复2次。滤膜上的物质经洗涤后转移至烧杯中, 烘干, 称质量, 这一组分为闭蓄态轻组(oLF)。3)离心管内沉淀加50 mL蒸馏水振荡20 min, 离心20 min, 管内沉淀用95%乙醇反复洗涤至无色, 烘干, 称质量, 这一组分为重组(HF)( $d > 1.8 \text{ g} \cdot \text{cm}^{-3}$ )。

#### 1.3.3 土壤及团聚体的腐殖质分组

腐殖质分组采用修改后的腐殖质组成分法(窦森, 2010), 将土壤及团聚体中的腐殖质分为富里酸

(FA)、胡敏酸(HA)和胡敏素(HU) 3个组分。具体方法如下,称取土壤或团聚体5 g于离心管中,加入 $0.1 \text{ mol} \cdot \text{L}^{-1}$  NaOH和 $\text{Na}_4\text{P}_2\text{O}_7$ 混合液,在 $(70 \pm 2)^\circ\text{C}$ 恒温振荡提取1 h,离心得到可提取物质,离心管中的溶液转移后用 $0.5 \text{ mol} \cdot \text{L}^{-1}$   $\text{H}_2\text{SO}_4$ 调节pH为1.0–1.5,溶液即为富里酸溶液,沉淀即为胡敏酸。离心管中的酸碱难溶性物质为胡敏素,用蒸馏水反复清洗、离心,直至上清液达到中性为止,50 $^\circ\text{C}$ 烘干,备用。

### 1.3.4 全土和不同碳组分中有机碳含量的测定

富里酸和胡敏酸碳含量采用重铬酸钾氧化法测定,胡敏素、全土及不同密度组分中有机碳和全氮含量,采用元素分析仪(Vario EL III, Elementar, Hanau, Germany)测定。

### 1.4 数据分析

因起始点土样数量有限,未做团聚体内密度组分和腐殖质组分的分组,在比较分析中,将农田处理土壤视为“对照”。应用SPSS 19.0软件对数据进行单因素方差分析、相关性分析,运用Duncan (SSR)方法分析处理间的差异显著性( $p < 0.05$ ),图表用Origin 8.0绘制。

## 2 结果和讨论

### 2.1 长期植被覆盖下土壤总有机碳和全氮变化

与1985年土壤相比,经过31年不同植被覆盖措施后,3种处理表层土壤SOC和TN含量变化显著( $p < 0.05$ )(图1),草地土壤表层SOC含量增加最显著,为37.1%,农田和裸地处理SOC含量不同程度降低,分别为12.7%和22.9%。SOC的动态平衡取决于进入

土壤中的外源物质的分解转化和矿化损失的输出。黑土经草地植被覆盖处理31年后,已逐渐演替成生态系统较稳定的地上植物群落结构和地下土壤生态系统,草地生物量较多,每年都有大量地上凋落物、植物根系和根系分泌物进入土壤,经过微生物的分解转化,形成不同阶段的稳定土壤有机物质保存于土壤中, SOC和TN含量显著提高(图1)。对于无植被覆盖的裸地,地表几乎无植被覆盖,只有很少的植物种子和残余根茬留在土壤中,向土壤输入的有机物质质量远小于草地, SOC的矿化量大于固存量, SOC含量比草地低 $20.4 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$ ,比1985年初始土样降低了22.9%。对于农田,因在耕作和种植过程中,土壤扰动增加,同时作物根系也向土壤中输送部分外源有机物质,但由于地上作物全部移除,有机物质输入量小于分解转化量, SOC含量降低12.7%,其下降程度低于裸地。土壤TN含量变化与SOC含量变化相似。1985年土壤TN含量为 $3.00 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$ ,经过草地植被覆盖31年后, TN含量增加了33.7%,农田和裸地中TN含量分别减少了30.3%和16.7%,且变化显著( $p < 0.05$ )。由此可见,植被覆盖与碳和氮的供应能力密切相关。外源有机质的投入量是影响SOC和TN含量变化的主要因子,本研究结果与前人研究结果(李海波等, 2008; Zhu *et al.*, 2017)一致。

### 2.2 不同植被覆盖方式下土壤团聚体粒径分布及有机碳含量

#### 2.2.1 土壤团聚体的粒径分布

31年不同植被覆盖方式对土壤水稳性团聚体分布的影响很大(图2A)。与1985年土样的团聚体相比,草地>2 mm和2–0.25 mm粒级水稳性团聚体分别增

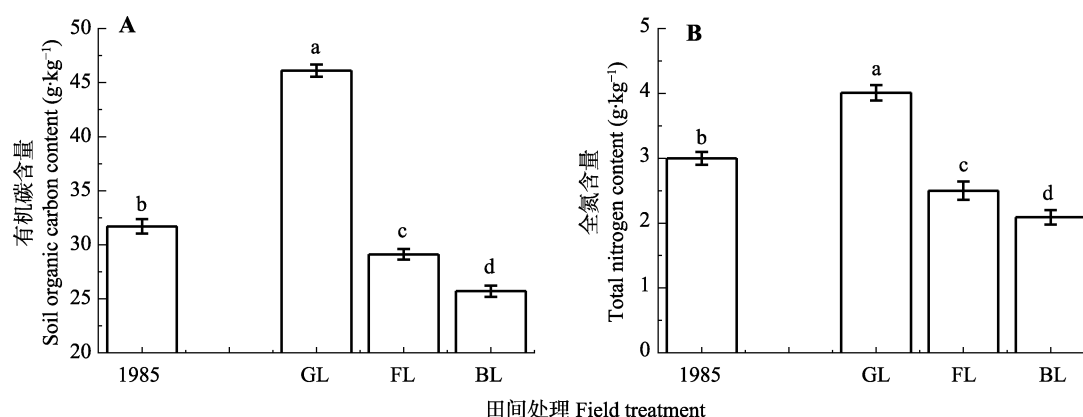


图1 初始土壤和不同植被覆盖下表层土壤总有机碳和全氮含量(平均值 $\pm$ 标准偏差)。不同小写字母表示处理间差异显著( $p < 0.05$ )。BL, 裸地; FL, 农田; GL, 草地。

Fig. 1 Contents of soil organic carbon and total nitrogen in initial soil and soils under different vegetation covers (mean  $\pm$  SD). Different lowercase letters above the bar differ at 0.05 levels among different vegetation covers. BL, bareland; FL, farmland; GL, grassland.

加了335.4%和19.7%, 0.25–0.053 mm和 $\leq 0.053$  mm的分别降低了23.2%和30.6%; 农田 $>2$  mm和2–0.25 mm粒级水稳性团聚体分别增加了2.3%和38.4%, 0.25–0.053 mm和 $\leq 0.053$  mm粒级水稳性团聚体分别降低了24.7%和11.8%; 裸地 $>2$  mm和2–0.25 mm粒级水稳性团聚体分别减少了87.4%和58.2%, 0.25–0.053 mm和 $\leq 0.053$  mm粒级水稳性团聚体分别增加了43.0%和21.5%。这说明经过31年不同植被类型的覆盖, 草地覆盖方式显著促进了土壤大团聚体的形成, 微团聚体显著减少( $p < 0.05$ ); 而农田不施肥处理中2–0.25 mm和0.25–0.053 mm团聚体变化显著( $p < 0.05$ ), 其他2个粒径团聚体变化不显著( $p > 0.05$ ); 裸地无植被覆盖, 土壤大团聚体破碎, 微团聚体显著增加( $p < 0.05$ )。土壤团聚体的MWD值越大表示土壤的团聚度越高, 团聚体稳定性越好, 土壤抗侵蚀能力也越高。如图2B所示, 与1985年供试前土壤MWD (0.58)相比, 经过不同植被覆盖31年后, 草地土壤团聚体MWD显著增加, 增加了107.0%, 农田和裸地土壤MWD分别减少了20.4%和56.7%, 农田处理统计检验不显著( $p > 0.05$ )。

本文结果与前人的研究中利用湿筛法对耕作土壤和草地土壤团聚体的稳定性研究结果一致, 都是草地土壤团聚体稳定性高于耕作土壤和裸地土壤(Eynard *et al.*, 2004; Stumpf *et al.*, 2016; Zhu *et al.*, 2017; 苑亚茹等, 2018)。首先, 由于草地没有人为干扰, 且植物根系发达, 根系释放的胶结物质对土壤颗粒进行盘绕和联结, 促进小团聚体胶结成大团聚体, 土壤团聚体的稳定性显著提高; 在农田处理中, 表层耕作使土壤易受水分环境的影响, 限制了某些

微生物活性, 使土壤团聚体受到干扰, 造成土壤大团聚体整体含量减少, 微团聚体含量增加, 团聚体稳定性降低; 裸地处理由于没有植被根系的作用, 土壤生物化学过程减弱, 水稳性大团聚体没有显著增加。其次, 外源物质的输入对土壤团聚结构的稳定具有重要作用。外源有机物质进入土壤后, 经过土壤生物和微生物分解转化, 形成不同降解程度的分解产物参与土壤的团聚化过程, 影响团聚体分布的稳定性(李娜等, 2013)。在草地覆盖方式下, 每年都有大量的地上植物凋落物和根系死亡后的外源有机物分解后直接进入土壤, 参与土壤团聚化过程, 大团聚体显著增加, 稳定性增强, 而农田处理中仅有少量的作物根茬还田, 裸地处理无任何外源物质输入, 这两种处理的外源输入物质少, 土壤团聚化程度变化不显著或显著降低。该研究结果可证明土壤团聚化过程受到外源有机物输入的影响(Bronick & Lal, 2005; 王甜等, 2017)。最后, 农田耕作处理由于每年的翻耕和种植会破坏土壤大团聚体, 使团聚体的稳定性降低。长期无植被覆盖的裸地因无任何人为扰动且无任何来源有机物输入, 土壤物理性质如孔隙度变小、容重增加, 对微生物活性不利, 土壤胶结物质减少, 团聚体稳定性较低, 表现为大团聚体( $>0.25$  mm)比例下降与微团聚体(0.25–0.053 mm)和粉黏粒( $\leq 0.053$  mm)比例增加。

### 2.2.2 土壤团聚体中有机碳含量

不同植被覆盖显著影响有机碳在不同粒径团聚体中的分布(图3)。与1985年初始土样相比, 不同植被覆盖31年后, 草地土壤 $>0.25$  mm的大团聚体中SOC含量极显著增加,  $>2$  mm和2–0.25 mm水稳性团

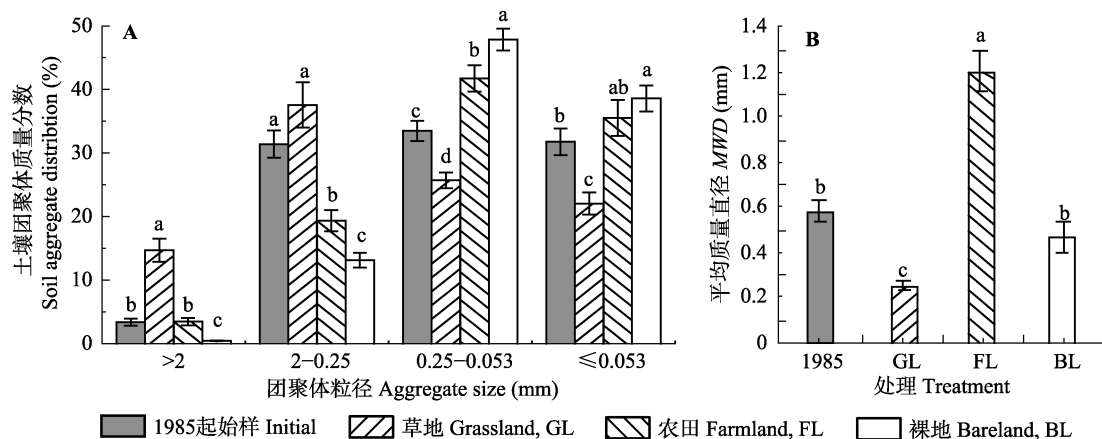


图2 不同植被覆盖下土壤团聚体粒径分布及平均质量直径(平均值 $\pm$ 标准偏差)。不同小写字母表示处理间差异显著( $p < 0.05$ )。  
Fig. 2 Distribution of soil aggregates and mean weight diameter (MWD) of aggregates under different vegetation covers (mean  $\pm$  SD). Different lowercase letters above the bar differ at 0.05 levels among different vegetation covers.

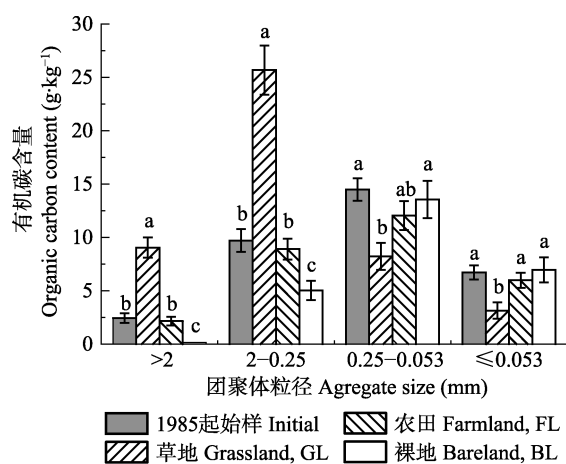


图3 不同植被覆盖下土壤团聚体中有机碳含量(平均值±标准偏差)。不同小写字母表示处理间差异显著( $p < 0.05$ )。

Fig. 3 Contents of organic carbon in soil aggregates fractions under different vegetation covers (mean  $\pm$  SD). Different lowercase letters above the bar differ at 0.05 levels among different vegetation covers.

聚体SOC含量分别增加了269.7%和164.5%, 0.25–0.053mm和 $\leq 0.053$  mm粒级水稳性团聚体SOC含量分别降低了43.1%和58.5%。除裸地 $\leq 0.053$  mm粒级的SOC略增加外, 农田和裸地处理中其余粒径团聚体中SOC含量均减少。其中农田 $>2$  mm、2–0.25 mm、0.25–0.053 mm和 $\leq 0.053$  mm粒级水稳性团聚体SOC含量分别降低了11.5%、8.3%、16.8%和10.9%; 裸地 $>2$  mm、2–0.25 mm、0.25–0.053 mm和 $\leq 0.053$  mm粒级水稳性团聚体SOC含量分别降低93.5%、48.2%和6.4%, 而 $\leq 0.053$  mm粒级水稳性团聚体SOC含量则增加了3.6%。本研究结果与John等(2005)报道的森林-草地-农田转变下SOC含量变化一致, 对于SOC含量分布而言, 土地利用方式/植被覆盖改变主要影响土壤大团聚体中SOC的损失, 与大团聚体相比, 土壤微团聚体受耕作和种植的影响较小。本研究中, 农田土壤微团聚体和粉黏粒中SOC含量相对高于草地, 表明因土壤耕作和种植造成破坏, 微小团聚体形成, 大团聚体内SOC逐渐转移到微小团聚体中, 使微团聚体和粉黏粒中SOC含量相对增加。裸地土壤由于无任何外源有机物输入, 土壤生物化学过程比其他两个生态系统弱, 土壤大团聚体损失极快, 团聚体对SOC的保护能力降低。草地土壤团聚体的SOC含量显著高于其他两种处理, 主要是由于草地表层土壤中植物根系发达, 枯枝落叶较多, 且无人扰动, 发达的植物根系的菌丝缠绕和微生物及根系分泌物的胶结作用, 使更多的微团聚

体和粉黏粒形成更大粒径的大团聚体(李海波等, 2008), 使微团聚体和粉黏粒中SOC含量相对降低, 加上外源输入物质质量较大, 土壤大团聚体, 特别是在2–0.25 mm粒径的大团聚体中SOC含量极显著增加( $p < 0.001$ ), 是土壤碳固存的主要场所。

### 2.3 不同植被覆盖下土壤团聚体内有机碳的密度分组

SOC的物理组分是对外界环境改变较敏感的指标。不同植被覆盖方式下土壤团聚体中轻组和重组有机碳含量如图4所示, 轻组有机碳含量占土壤总有机碳的比例远小于重组碳。草地、农田和裸地的土壤游离态轻组有机碳(fLFC)含量按以下顺序递减: 大团聚体( $>0.25$  mm)、微团聚体(0.25–0.053 mm)、粉黏粒( $\leq 0.053$  mm), 且4个粒径团聚体中有机碳含量均是草地显著高于农田, 裸地最低( $p < 0.05$ )(图4A)。游离态轻组碳与输入土壤的有机物密切相关, 一般表现为正相关关系。草地植被覆盖丰富, 每年归还到土壤中的有机物较多, 此外草地植物根系发达, 根系分泌物作为一种活性碳源, 可显著提高团聚体内fLFC含量, 其内的fLFC含量比农田和裸地高。与微团聚体相比, 草地大团聚体内轻组有机碳含量较高, 这与团聚体形成理论一致, 认为大团聚体中活性有机碳较多, 有利于土壤团聚结构形成(Tisdall & Oades, 1982; Oades, 1984)。农田和裸地因土壤扰动频繁和缺少植物残体输入导致fLFC含量较低, 对土壤侵蚀比较敏感。与fLFC含量相比, 闭蓄态轻组碳(oLFC)含量更少, 均在 $0.2 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$ 以下(图4B), 草地土壤团聚体中oLFC含量顺序为: 2–0.25 mm ( $>2$  mm)  $> 0.25-0.053$  mm ( $\leq 0.053$  mm)。农田和裸地都是0.25–0.053 mm团聚体中oLFC含量最高, 其次是2–0.25 mm,  $\leq 0.053$  mm,  $>2$  mm粒径最低。重组有机碳是SOC的重要组成部分, 它的变化对农田土壤碳库乃至大气 $\text{CO}_2$ 浓度都有重要影响, 两者呈现显著正相关关系。土壤团聚体内重组有机碳(HFC)在SOC中所占比例最多(图4C), 占每个粒级中全碳含量的84.6%–98.9%。其中, 草地不同粒径团聚体中HFC含量顺序为: 2–0.25 mm ( $22.53 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$ )  $> (>2 \text{ mm})(7.65 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}) > (0.25-0.053 \text{ mm})(7.31 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}) > (\leq 0.053 \text{ mm})(2.99 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1})$ 。草地土壤中 $>0.25$  mm的大团聚体质量分数达50%以上, 是SOC的主要组成部分。农田和裸地HFC含量在0.25–0.053 mm粒级微团聚体中最高,



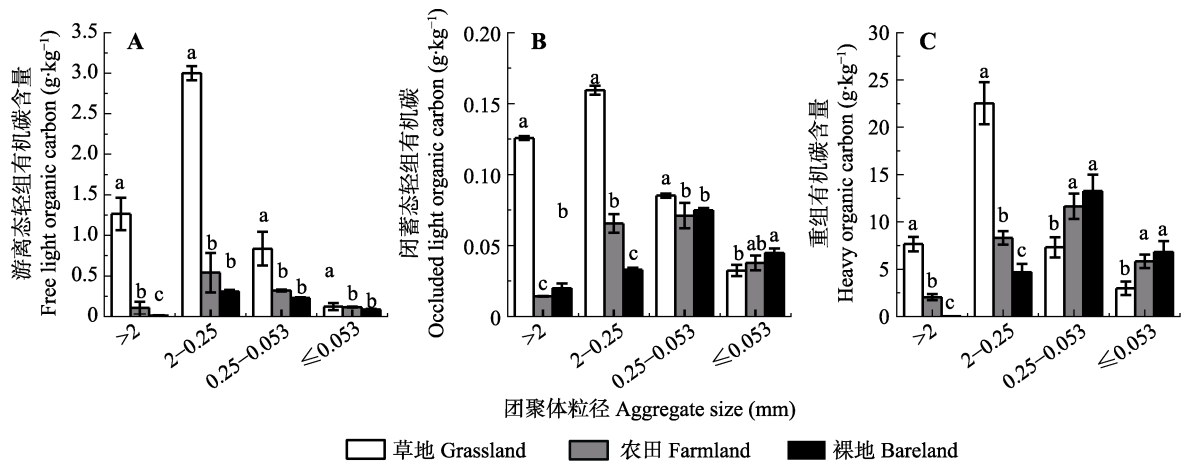


图4 不同植被覆盖下土壤团聚体内密度组分有机碳含量(平均值±标准偏差)。不同小写字母表示处理间差异显著( $p < 0.05$ )。  
Fig. 4 Organic carbon contents in different density fractions of aggregates under different vegetation covers (mean  $\pm$  SD). Different lowercase letters above the bar differ at 0.05 levels among different vegetation covers.

>2 mm粒径中最低。说明团聚体对不同密度组分碳的保护作用有差别,其对SOC组分的再分配在不同植被覆盖方式下也相应改变。

## 2.4 不同植被覆盖下土壤腐殖质组分碳含量变化

### 2.4.1 全土土壤腐殖质组分碳含量

3种植被覆盖方式下全土腐殖质中HU中有机碳含量最高,占土壤全碳的77.0%–74.1%,其次为HA,占土壤全碳的15.5%–17.3%,最少的为FA,仅为土壤全碳的7.5%–9.7% (图5),本研究结果与以往对黑土层腐殖质中有机碳含量的研究结果(Bossuyt *et al.*,

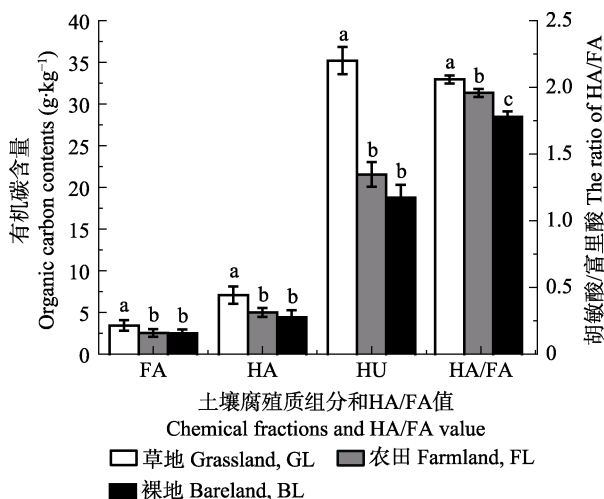


图5 不同植被覆盖下表层全土腐殖质组分的碳含量和腐殖化指标(平均值±标准偏差)。FA, 富里酸; HA, 胡敏酸; HU, 胡敏素。不同小写字母表示处理间差异显著( $p < 0.05$ )。

Fig. 5 Contents of organic carbon in humic substances and humification index in bulk soil under different vegetation covers (mean  $\pm$  SD). FA, fulvic acid; HA, humic acid; HU, humin. Different lowercase letters above the bar differ at 0.05 levels among different vegetation covers.

2001; Han *et al.*, 2006; 郝翔翔等, 2010; 李凯等, 2010; 郝翔翔, 2017)一致。说明大部分有机碳都储存于结构较稳定的HU组分中,对于黑土碳储量具有重要意义。输入土壤中的不同数量和质量的有机残体,被土壤微生物不断分解、利用和转化后,不仅形成新的SOC组分,还会对土壤原有机质组分的分解速率产生影响,从而改变土壤腐殖质的数量及组成(Pérez *et al.*, 2004; Lal, 2008; 窦森, 2010)。经过不同植被覆盖31年后土壤腐殖质碳含量发生变化,草地土壤腐殖质碳含量最高,农田土壤次之,裸地土壤最低,草地与农田和裸地2个处理统计检验差异显著( $p < 0.05$ )(图5)。农田表层土壤FA和HA含量显著低于草地,一方面是由于耕作措施导致,另一方面是由于农田处理土壤植物残体的归还数量明显低于草地。土壤FA主要来源于植物残体(Seddaiu *et al.*, 2013),草地生态系统中地上和地下生物量丰富,为土壤FA的形成提供了大量来源,因此草地FA含量和HA/FA比例显著高于农田和裸地,但FA占土壤总有机碳的比例明显低于农田和裸地,说明有大量凋落物覆盖的草地表层,有利于FA的形成,同时由于微生物的活性较高,促进了FA向HA和HU的转化。而裸地表层土壤缺少植物残体的输入,形成土壤腐殖质的原料来源受限,但并未导致裸地表层FA的形成显著受阻,FA含量略低于农田,但无显著差异( $p > 0.05$ ),本研究结果符合土壤腐殖质形成的“木质素学说”。窦森(2010)指出向腐殖化程度较高的土壤输入新鲜有机物料,会明显提高土壤FA的数量和比例。Spaccini等(2000, 2006)用 $^{13}\text{C}$ 标记土壤及土壤

与2个HA组分的混合物,表明活性有机化合物可被腐殖化有机质有效保护,微生物矿化作用被实质性削弱,且有效的土壤管理措施可提高SOC的生物稳定性。

土壤腐殖质组成(HA/FA)可反映腐殖质在不同土壤条件下的腐殖化程度和分子复杂程度。本研究中,3种不同植被覆盖方式下全土HA/FA比值为草地>农田>裸地,变化范围为1.78–2.06,符合窦森(2010)总结的黑土HA/FA比值范围1.5–2.5。土壤腐殖质形成的重要假说“多酚学说”认为,进入土壤中的植物组织首先在微生物作用下形成FA,FA进一步缩合形成HA和HU(李学垣,2001;窦森,2010),但从3种植被覆盖方式的数据发现,草地、农田和裸地土壤微生物数量及对碳源的利用强度逐渐降低(数据未发表)。FA分子结构相对简单,易于形成,微生物为维持基本代谢活动,土壤中HA的合成需要微生物消耗大量的能量缩合而成,草地土壤中微生物活性高,FA向HA的转化相对容易,HA/FA比值最高,HU最多;而裸地土壤的外源碳投入很少,微生物数量少、活性低,FA向HA和HU的转化相对困难,HA/FA比值最低(郝翔翔等,2010;李凯等,2010)。

#### 2.4.2 土壤团聚体中腐殖质组分碳含量

与全土中腐殖质组分碳含量变化一致,不同植被覆盖下同一粒径团聚体中腐殖质组分碳含量均表现为HU>HA>FA(图6)。农田和裸地土壤团聚体中FA有机碳含量在不同粒径团聚体中按以下顺序递减:0.25–0.053 mm>(≤0.053 mm)>2–0.25 mm

>(>2 mm)。不同植被覆盖方式下,>0.25 mm大团聚体中FA有机碳含量表现为草地>农田>裸地,处理间差异显著( $p < 0.05$ );0.25–0.053 mm微团聚体中,FA有机碳含量在裸地中显著高于农田( $p < 0.05$ ),草地最低;农田和裸地土壤≤0.053 mm的粉黏粒中FA的有机碳含量显著高于草地( $p < 0.05$ )(图6A)。本研究结果与梁尧等(2012)的结果一致,黑土施入新鲜外源有机物,有利于表层土壤大粒级团聚体中FA的积累。团聚体内HA有机碳含量在>2 mm和2–0.25 mm粒级团聚体内是草地>农田>裸地,在0.25–0.053 mm和≤0.053 mm粒级是裸地>农田>草地,3种植被覆盖处理间差异显著( $p < 0.05$ )。

不同团聚体粒级和植被覆盖处理间团聚体中HU的有机碳含量显著高于FA和HA的有机碳含量,占团聚体全碳的44.1%–85.0%(图6C)。不同的植被覆盖处理土壤间,腐殖质在各粒级团聚体中的分布是有差异的,腐殖质各组分含量随着团聚体粒级不同呈现较规律性变化,团聚体的“分馏作用”较为明显。3种植被覆盖方式中,草地土壤的3种腐殖质组分碳含量在>2 mm和2–0.25 mm的大团聚体中富集非常明显,而在0.25–0.053 mm微团聚体和≤0.053 mm粉黏粒中,FA和HA碳含量显著减低( $p < 0.05$ ),HU碳含量减少不显著。裸地土壤腐殖质组分与草地的变化完全相反,在>2 mm和2–0.25 mm的大团聚体中减少非常明显,仅占全土有机碳的14.3%–21.35%,在0.25–0.053 mm微团聚体和≤0.053 mm粉黏粒中,FA和HA碳含量增加,HA碳含量在这2个

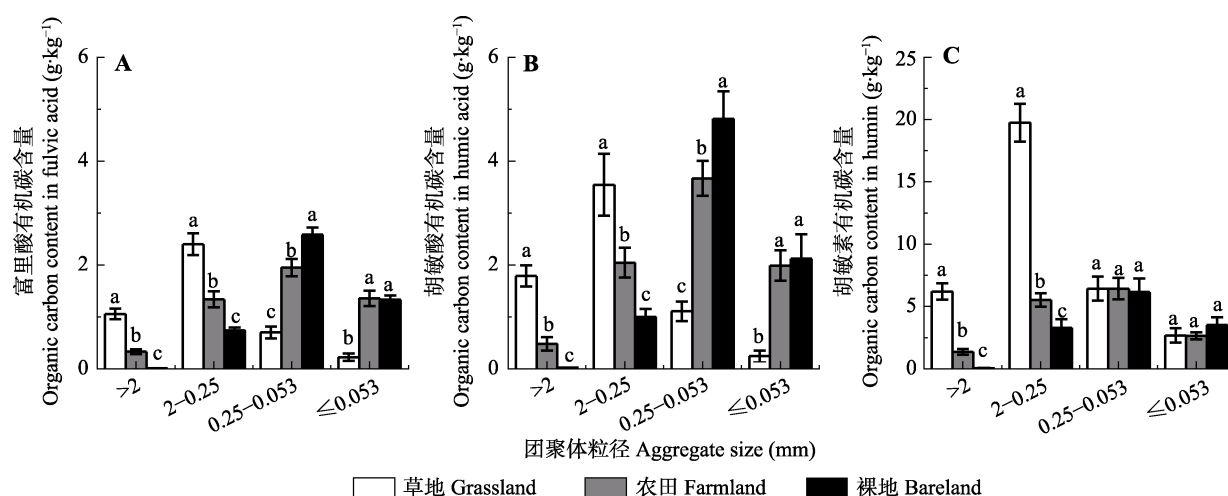


图6 不同植被覆盖下表层土壤团聚体内腐殖质组分碳含量(平均值±标准偏差)。不同小写字母表示处理间差异显著( $p < 0.05$ )。  
Fig. 6 Contents of organic carbon in soil aggregates under different vegetation covers (mean ± SD). Different lowercase letters above the bar differ at 0.05 levels among different vegetation covers.



粒级中显著高于草地和农田( $p < 0.05$ ), HU碳含量变化不明显。这说明外源碳投入高的草地覆盖方式更有利于土壤腐殖质形成, 并以HU有机碳含量增加为主。相比草地和农田, 裸地土壤的腐殖质含量最低, 可能是因为裸地的土壤表层植被被人工移除, 土壤缺乏新鲜有机质的输入, 土壤微生物须分解土壤中原有的有机质以获取所需的能量和氮, 从而加快了土壤有机质(包括腐殖质)的分解速度, 进而导致土壤腐殖质含量比草地和农田还低(郝翔翔等, 2010)。本研究结果与李凯等(2010)研究的长期不同施肥条件下土壤团聚体中腐殖质组分结果有差别, 长期不同施肥处理可能会改变土壤的团聚结构和微生物学性质, 而本实验无任何化学肥料添加, 这可能是导致数据差异的原因; 另外, 李凯等(2010)认为团聚体内腐殖质组分分异不明显是由于“房子”与“砖”的关系所导致, 团聚体是盖好的大小不同的“房子”, 微团聚体、土壤颗粒、矿物颗粒、有机质、有机无机复合体是不同规格的“砖”。不同粒级团聚体中, 各类“砖”之间存在不同的数量组合, 事实是否如此, 需在今后的研究中进一步证实。

### 3 结论

1) 典型农田黑土经过不同植被覆盖31年后, 表层土壤SOC和TN含量均表现为碳投入量大的草地显著增加, 外源碳投入低的农田和无碳投入的裸地土壤SOC和TN含量减少, 且裸地降低显著, 说明外源碳投入数量是影响土壤有机碳固存的主要因素。

2) 土壤团聚体的分布随着粒级的减小呈现先增加后下降的趋势, 2–0.25 mm粒级团聚体为优粒级。团聚体的稳定性在处理间表现为草地>农田>裸地。各粒级团聚体中SOC含量在处理间差异明显, 长期草地覆盖显著促进了土壤大团聚体的形成, 土壤固碳作用增强。而农田和裸地土壤有机碳含量分布均是微团聚体>大团聚体>粉黏粒。

3) 不同植被覆盖方式下土壤各粒级团聚体中密度组分碳均以重组碳含量最高, 游离态和闭蓄态轻组碳含量变化不一致。随着团聚体粒径降低, 3个处理土壤团聚体中各密度组分碳均为先升高后降低, 草地土壤>0.25 mm粒级中轻组碳富集最多, 说明草地覆盖可显著提高大团聚体内活性有机碳组分, 土壤固碳能力显著提高。农田和裸地土壤大团聚体向微团聚体和粉黏粒转化, 其内的轻组碳含量显著降

低, 重组碳增加, 土壤有机质更趋于稳定化。

4) 各粒级团聚体中腐殖质组分碳以胡敏素碳最高。不同植被覆盖方式下不同粒级团聚体对腐殖质各组分碳的富集“分馏”作用均表现为随粒级的减小先升高后降低。长期草地覆盖使大团聚体对腐殖质各组分的“分馏”作用增强, 2–0.25 mm粒级团聚体中FA、HA和HU的碳含量均最高。而农田和裸地处理促进了微团聚体内腐殖物质碳的富集。

**致谢** 感谢中国科学院东北地理与农业生态研究所优秀青年人才项目(DLSYQ15003)资助。

### 参考文献

- Beare MH, Hendrix PF, Cabrera ML, Coleman DC (1994). Aggregate-protected and unprotected organic matter pools in conventional- and no-tillage soils. *Soil Science Society of America Journal*, 58, 787–795.
- Bossuyt H, Denef K, Six J, Frey SD, Merckx R, Paustian K (2001). Influence of microbial populations and residue quality on aggregate stability. *Applied Soil Ecology*, 16, 195–208.
- Bronick CJ, Lal R (2005). Soil structure and management: A review. *Geoderma*, 124, 3–22.
- Chaney K, Swift RS (1986). Studies on aggregate stability. II. The effect of humic substances on the stability of reformed soil aggregates. *Journal of Soil Science*, 37, 337–343.
- Chenu C, Stotzky G (2002). Interactions between microorganisms and soil particles: An overview. In: *Interactions between Soil Particles and Microorganisms: Impact on Terrestrial Ecosystem*. John Wiley & Sons, Chichester, UK. 3–40.
- Dou S (2010). *Soil Organic Matter*. Science Press, Beijing. [窦森 (2010). 土壤有机质. 科学出版社, 北京.]
- Eynard A, Schumacher TE, Lindstrom MJ, Malo DD (2004). Aggregate sizes and stability in cultivated South Dakota prairie ustolls and usterts. *Soil Science Society of America Journal*, 68, 1360–1365.
- Golchin A, Oades JM, Skjemstad JO, Clarke P (1994). Soil structure and carbon cycling. *Australian Journal of Soil Research*, 32, 1043–1068.
- Han XZ, Wang SY, Veneman PLM, Xing BS (2006). Change of organic carbon content and its fractions in black soil under long-term application of chemical fertilizers and recycled organic manure. *Communications in Soil Science and Plant Analysis*, 37, 1127–1137.
- Hao XX (2017). *Change Characteristic of Soil Organic Matter in Mollisol Profile Under Different Ecosystems*. PhD dissertation, University of Chinese Academy of Sciences

- (Northeast Institute of Geography and Agro-ecology, Chinese Academy of Sciences), Changchun. [郝翔翔 (2017). 不同生态系统下黑土剖面有机质变化特征. 博士学位论文, 中国科学院大学(中国科学院东北地理与农业生态研究所), 长春.]
- Hao XX, Dou S, An FH, Li MM (2010). Humus composition and structural characteristics of humic acid in soil aggregates under different utilization of land. *Journal of Soil and Water Conservation*, 24(5), 248–252. [郝翔翔, 窦森, 安丰华, 李明敏 (2010). 不同利用方式下土壤团聚体腐殖质组成及胡敏酸结构特征. 水土保持学报, 24(5), 248–252.]
- Hao XX, Dou S, Han XZ, Li MM, An FH (2014). Structure of humic acid in soil aggregates under different ecosystems in typical black soil region of northeast China. *Acta Pedologica Sinica*, 51, 824–833. [郝翔翔, 窦森, 韩晓增, 李明敏, 安丰华 (2014). 典型黑土区不同生态系统下土壤团聚体中胡敏酸的结构特征. 土壤学报, 51, 824–833.]
- John B, Yamashita T, Ludwig B, Flessa H (2005). Storage of organic carbon in aggregate and density fractions of silty soils under different types of land use. *Geoderma*, 128, 63–79.
- Lal R (2008). Carbon sequestration. *Philosophical Transactions of the Royal Society B: Biological Sciences*, 363, 815–830.
- Li HB, Han XZ, Xu YL, Hou XY (2008). Aggregate stability of rhizosphere soil as affected by land management in black soil. *Journal of Soil and Water Conservation*, 22(3), 110–115. [李海波, 韩晓增, 许艳丽, 侯雪莹 (2008). 不同管理方式对黑土农田根据土壤团聚体稳定性的影响. 水土保持学报, 22(3), 110–115.]
- Li K, Dou S, Han XZ, Chen H, Zhou GY (2010). Effects of long-term fertilization on composition of humic substances in black soil aggregates. *Acta Pedologica Sinica*, 47, 579–583. [李凯, 窦森, 韩晓增, 陈辉, 周桂玉 (2010). 长期施肥对黑土团聚体中腐殖物质组成的影响. 土壤学报, 47, 579–583.]
- Li N, Han XZ, You MY, Xu YZ (2013). Research review on soil aggregates and microbes. *Ecology and Environmental Sciences*, 22, 1625–1632. [李娜, 韩晓增, 尤孟阳, 许玉芝 (2013). 土壤团聚体与微生物相互作用研究. 生态环境学报, 22, 1625–1632.]
- Li XY (2001). *Soil Chemistry*. Higher Education Press, Beijing. [李学垣 (2001). 土壤化学. 高等教育出版社, 北京.]
- Liang Y, Han XZ, Ding XL (2012). Review of soil organic matter fractions and structure of black soil in northeast China. *Soils*, 44, 888–897. [梁尧, 韩晓增, 丁雪丽 (2012). 东北黑土有机质组分与结构的研究进展. 土壤, 44, 888–897.]
- Lugato E, Simonetti G, Morari F, Nardi S, Berti A, Giardini L (2010). Distribution of organic and humic carbon in wet-sieved aggregates of different soils under long-term fertilization experiment. *Geoderma*, 157(3–4), 80–85.
- Oades JM (1984). Soil organic matter and structural stability: Mechanisms and implications for management. *Plant and Soil*, 76, 319–337.
- Pérez MG, Martin-Neto L, Saab SC, Novotny EH, Milori DMBP, Bagnato VS, Colnago LA, Melo WJ, Knicker H (2004). Characterization of humic acids from a Brazilian Oxisol under different tillage systems by EPR,  $^{13}\text{C}$  NMR, FTIR and fluorescence spectroscopy. *Geoderma*, 118(3–4), 181–190.
- Puget P, Angers DA, Chenu C (1998). Nature of carbohydrates associated with water-stable aggregates of two cultivated soils. *Soil Biology & Biochemistry*, 31, 55–63.
- Seddaiu G, Porcu G, Ledda L, Roggero PP, Agnelli A, Corti G (2013). Soil organic matter content and composition as influenced by soil management in a semi-arid Mediterranean agro-silvo-pastoral system. *Agriculture, Ecosystems & Environment*, 167, 1–11.
- Six J, Bossuyt H, Degryze S, Denef K (2004). A history of research on the link between (micro) aggregates, soil biota, and soil organic matter dynamics. *Soil & Tillage Research*, 79, 7–31.
- Six J, Elliott ET, Paustian K, Doran JW (1998). Aggregation and soil organic matter accumulation in cultivated and native grassland soils. *Soil Science Society of America Journal*, 62, 1367–1377.
- Six J, Elliott ET, Paustian K (2000). Soil macroaggregate turnover and microaggregate formation: A mechanism for C sequestration under no-tillage agriculture. *Soil Biology & Biochemistry*, 32, 2099–2103.
- Six J, Gregorich EG, Kögel-Knabner I (2012). Commentary on the impact of Tisdall & Oades (1982). *European Journal of Soil Science*, 63, 1–21.
- Spaccini R, Mbagwu JSC, Conte P, Piccolo A (2006). Changes of humic substances characteristics from forested to cultivated soils in Ethiopia. *Geoderma*, 132(1–2), 9–19.
- Spaccini R, Piccolo A, Haberhauer GF, Gerzabek MH (2000). Transformation of organic matter from maize residues into labile and humic fractions of three European soils as revealed by  $^{13}\text{C}$  distribution and CPMAS-NMR Spectra. *European Journal of Soil Science*, 51, 583–594.
- Stumpf L, Pauletto EA, Pinto LFS (2016). Soil aggregation and root growth of perennial grasses in a constructed clay minesoil. *Soil & Tillage Research*, 161, 71–78.
- Tisdall JM, Oades JM (1982). Organic matter and water-stable aggregates in soils. *Journal of Soil Science*, 33, 141–163.

- Wang T, Xu S, Zhao MY, Li H, Kou D, Fang JY, Hu HF (2017). Allocation of mass and stability of soil aggregate in different types of Nei Mongol grasslands. *Chinese Journal of Plant Ecology*, 41, 1168–1176. [王甜, 徐姗, 赵梦颖, 李贺, 寇丹, 方精云, 胡会峰 (2017). 内蒙古不同类型草原土壤团聚体含量的分配及其稳定性. 植物生态学报, 41, 1168–1176.]
- Yuan YR, Li N, Zou WX, You MY, Han XZ, Ma DL (2018). Distribution characteristics of organic carbon in aggregates of soils of three ecosystems in typical Mollisols of Northeast China. *Acta Ecologica Sinica*, 38, 6025–6032. [苑亚茹, 李娜, 邹文秀, 尤孟阳, 韩晓增, 马大龙 (2018). 典型黑土区不同生态系统土壤团聚体有机碳分布特征. 生态学报, 38, 6025–6032.]
- Zhu GY, Shangguan ZP, Deng L (2017). Soil aggregate stability and aggregate-associated carbon and nitrogen in natural restoration grassland and Chinese red pine plantation on the Loess Plateau. *Catena*, 149, 253–260.
- 特邀编委: 黄 玫 责任编辑: 李 敏 实习编辑: 赵 航