

常规与有机农田土壤团聚体组成及碳氮储量研究

王开勇^{1,2}, 郭岩彬¹, 孟凡乔¹, 陈竹¹, 焦子伟¹, 吴文良¹

(1. 中国农业大学 资环学院, 北京 100193; 2. 石河子大学 农学院, 新疆 石河子 832003)

摘要: 长期施用化肥或连作农田管理模式导致土壤质量退化及碳氮损失加剧。以常规农作大豆和转换后的有机农作大豆田土壤为研究对象, 利用土壤物理分组技术, 分析了土壤团聚体组成及碳氮储量变化。结果表明, 常规农作大豆田转换为有机农作大豆田后, <0.053 mm 粉粒加黏粒比重显著降低, $0.053 \sim 0.25$ mm 较小团聚体显著增加, 土壤稳定性增大, 土壤及团聚体中有机碳和全氮含量都显著增加。有机农作大豆田土壤包被于较小的大团聚体 ($0.25 \sim 2$ mm) 中的 <0.053 mm 细颗粒有机质百分比显著降低, $0.053 \sim 2$ mm 粗颗粒有机质显著增加。有机农作大豆田土壤及团聚体中碳氮储量都显著高于常规农作大豆田, 土壤碳汇和氮汇效应增大。有机农作大豆田土壤稳定性增加, 团聚体中碳氮含量显著增加, 土壤碳汇效应增强, 有机农作方式可能比常规农作方式更有利于土壤碳氮资源持续利用。

关键词: 有机农田; 土壤团聚体; 碳氮储量

文献标识码: A

文章编号: 1000-288X(2013)05-0180-05

中图分类号: S151.9

Soil Aggregate Composition and Carbon and Nitrogen Storage in Conventional and Organic Farmlands

WANG Kai-yong^{1,2}, GUO Yan-bin¹, MENG Fan-qiao¹, CHEN Zhu¹, JIAO Zi-wei¹, WU Wen-liang¹

(1. College of Resources and Environmental Sciences, China Agricultural University,

Beijing 100026, China; 2. Agricultural College, Shihezi University, Shihezi, Xinjiang 832003, China)

Abstract: Long-term mineral fertilizer input or crop monoculture management can result in soil quality degradation and soil carbon and nitrogen depletion. This study focused on soil physical properties during the conversion from conventional farming to organic farming of soybean field. Soil aggregate composition and carbon and nitrogen storage were analyzed by using soil physical aggregate isolation method. Results showed that <0.053 mm aggregate fraction and soil organic carbon content of <0.053 mm aggregate in microaggregates-occluded water-stable macroaggregates decreased, while $0.053 \sim 0.25$ mm aggregate fraction and soil organic carbon content of $0.053 \sim 2$ mm in microaggregates-occluded water-stable macroaggregates increased significantly after the conversion from conventional soybean field to organic soybean field. Higher aggregate stability and carbon and nitrogen storage were detected in organic farming system. Organic farming is better than conventional farming ecosystems in conserving soil fertility and system stability.

Keywords: organic farming; soil aggregates; carbon and nitrogen storage

农业管理模式对土壤碳氮资源的变化产生深刻影响。管理措施不当, 不仅会加剧土壤碳氮损失, 而且土壤质量退化后恢复困难。团聚体是土壤最基本的物质和功能单元, 是土壤碳、氮等养分稳定和保护的载体, 其结构和组成对土壤物理化学过程具有重要意义^[1]。土壤团聚体的物理保护可减缓土壤有机质的分解, 大团聚体的转换速率与土壤有机碳库密切相

关^[2]。Jastrow 等^[3]研究表明土壤碳氮稳定性和数量变化与土壤有机质、动植物、初级团聚体形成等密切相关。土壤团聚体粒径和稳定性变化可以指示土壤质量变化, 是土壤管理综合作用的结果。目前, 有关有机农作土壤的研究多注重土壤化学质量指标, 而有关土壤团聚体及碳氮储量的研究报道较少。本研究选择伊犁河谷巩乃斯河流域长期种植作物大豆农田

收稿日期: 2012-09-23

修回日期: 2012-11-28

资助项目: 国家自然科学基金项目“气候变化情境下典型土地利用方式的土壤固碳潜力研究”(31261140367), “华北高产量田温室气体排放与氮氧化菌响应机理研究”(31170489); 国家科技支撑计划项目“种养结合生态循环农业: 防控农业面源污染”(2012BAD15B01-3); 国际科技合作专项“干旱区土壤盐渍化生态修复配套技术的合作研究”(2011DFA93140)

作者简介: 王开勇(1978—), 男(汉族), 山东省单县人, 博士, 副教授, 主要从事土壤环境与生态安全研究。E-mail: wky20@163.com。

通信作者: 吴文良(1961—), 男(汉族), 山东省昌邑人, 博士, 教授, 博士生导师, 主要从事生态农业研究。E-mail: wwlc@yaho.com.cn。

生产区,利用土壤物理分组技术,研究土壤团聚体及碳氮对农业管理措施的响应。通过比较常规农作方式转换为有机农作方式后土壤团聚体稳定性及碳氮储量的变化,揭示农作方式对土壤碳汇效应的影响,为区域土壤碳氮资源持续利用提供依据。

1 材料与方法

1.1 试验地概况

田间试验地位于新疆维吾尔自治区伊犁自治州新源县别斯托克乡7大队,其地理坐标为 $43^{\circ}27'N$, $83^{\circ}17'E$,海拔高度900 m,面积 3.5 hm^2 。伊犁河流域支流巩乃斯河流域下游平原区属北温带大陆性半干旱气候,四季明显,冬暖夏凉,年均气温 8.1°C ,年均降水480 mm,适合种植大豆、玉米、甜菜、亚麻、小麦、玉米等作物,田间土壤类型为黑钙土。2008年,该田间试验区开始准备中国和欧盟有机认证工作,2010年有机转换期结束,通过认证。

1.2 试验材料

试验以有机大豆为主,玉米为轮作作物,田间作物管理按照有机大豆种植技术规程要求进行。生育期内浇水2次,分别在6月和8月。大豆于2010年4月24日播种;5月上旬出苗;6月中下旬至7月中下旬为开花期;8月为鼓粒灌浆期;9月为成熟期。品种为94-9B,生育期为120 d。有机大豆农田(OF)种植面积 1.73 hm^2 ,大豆和玉米各占一半(0.87 hm^2);常规大豆农田(CF) 0.8 hm^2 ,大豆和玉米各占一半(0.4 hm^2)。试验仅以大豆农田研究为主,设置常规农作大豆(CF)和有机农作大豆(OF)两个处理。为了获得测定团聚体分布的原状土样,先挖一个采样坑(30 cm宽,45 cm深),然后在0—20 cm土层采集大小一致的原状土样(长×宽×高= $20\text{ cm}\times 10\text{ cm}\times 10\text{ cm}$),同时测定土壤容重。每个处理采3个原状土样,装入方形塑料盒,小心运回实验室。在实验室内,立刻将土样过8 mm土筛,较大的土块沿着自然裂隙轻轻破碎,最后风干土样,以便进行土壤团聚体及稳定性分析。

1.3 研究方法

1.3.1 土壤团聚体及微团聚体组成 土壤团聚体分离采用湿筛法^[4]:将2,0.25,0.053 mm各级套筛放在盛有去离子水的圆筒中,当整套筛子处于最下端时,最上层筛子的上边缘保持低于水面。然后将100.0 g的风干土样置于最上层的2 mm的筛子上,浸泡5 min,然后使机器上下垂直运动2 min,机械参数为垂直频率40次/min,振幅约5 cm,2 min后将2 mm筛子上的团聚体收集到铝盒里,然后重复湿筛

小于2 mm的颗粒,2 min后收集0.25 mm筛子上的土粒,直至0.053 mm筛子上的土粒全部收集完毕。所有的团聚体组分在 60°C 下烘48 h后称重,密封备用。根据粒径大小可以将团聚体分为以下4级: $>2, 0.25\sim 2, 0.053\sim 0.25, <0.053\text{ mm}$ 。

较大小团聚体($0.25\sim 2\text{ mm}$)分离采用超声波分离法:将上述分离的较小的 $0.25\sim 2\text{ mm}$ 大团聚体土壤置于盛有500 ml去离子水的烧杯中,在超声清洗槽中用21.5 Hz,300 mA超声分散30 min,用尼龙湿筛法分离 $0.25\sim 2, 0.053\sim 0.25$ 和 $<0.053\text{ mm}$ 颗粒有机质,收集于已知重量的铝盒中,分离出的样品在烘箱中 60°C 下烘48 h后称重,密封备用。由于 $0.25\sim 2\text{ mm}$ 颗粒有机质样品比重极小,因此将 $0.25\sim 2$ 和 $0.053\sim 0.25\text{ mm}$ 颗粒有机质样品合并,记为 $0.053\sim 2\text{ mm}$ 颗粒有机质。

团聚体稳定性用平均当量直径(mean weight diameter, MWD)表示^[5]:

$$\text{MWD} = \sum_{i=1}^4 \bar{X}_i W_i \quad (1)$$

式中: \bar{X}_i ——第*i*个粒级的平均孔径(mm),即筛分该粒级前后2个筛子孔径的均值; W_i ——第*i*个粒级团聚体质量百分比(%);*i*——4个不同粒级($<0.053, 0.053\sim 0.25, 0.25\sim 2$ 和 $>2\text{ mm}$)。

1.3.2 土壤碳氮含量分析 土壤有机碳和全氮采用碳氮分析仪测定(Elementar V analyzer,德国)。土壤及团聚体中有机碳(TOC)和全氮(TN)分析具体步骤:取风干土样3~5 g置于离心管中,加入0.5 mol/L的HCl溶液20 ml(根据样品含碳酸盐的多少可调整HCl溶液的浓度或体积),用手充分摇匀,震荡1 h后静置过夜。第2 d去上清液,并加入去离子水离心3 min(3 000 rpm),直至上清液为中性为止。将样品在 60°C 下烘干至恒重研磨过0.15 mm筛,并于 105°C 下烘干2 h后装于自封袋中备用^[6]。土壤有机碳储量($\text{SOC}_{\text{density}}, \text{ kg/m}^2$)和全氮储量($\text{TN}_{\text{density}}, \text{ kg/m}^2$)计算方法^[7]:

$$\text{SOC}_{\text{density}} = \frac{\text{SOC}_{ij} \times \beta_j \times H_j}{1000} \quad (2)$$

$$\text{TN}_{\text{density}} = \frac{\text{TN}_{ij} \times \beta_j \times H_j}{100} \quad (3)$$

式中: $\text{SOC}_{ij}, \text{TN}_{ij}$ ——不同粒级土壤有机碳或全氮含量(g/kg); β_j ——容重(g/cm^3); H_j ——第*i*层的土壤深度(mm)。土壤容重采用环刀法测定。

1.3.3 数据处理与分析 用Excel 2003进行基础数据处理与图表制作,用SPSS 17.0 for Windows进行显著性检验。

2 结果与讨论

2.1 土壤团聚体组成及稳定性

团聚体在常规与有机农作大豆田土壤中的分布较为相似(图 1)。以 <0.053 mm 粉粒加黏粒所占组成较大,介于 45.4%~61.8%;其次是 0.25~2 mm 较小的大团聚体和 0.053~0.25 mm 较小团聚体,分别为 21.4%~30.2%和 14.5%~24.2%;2~8 mm 大团聚体所占组成最小,介于 0.9%~1.1%。与常规农作大豆田土壤相比,有机农作大豆田土壤除 <0.053 mm 颗粒在有机耕作中所占组成减少了 18.7%($p<0.05$)外,其他类型团聚体均有不同程度的增加,其中 0.053~0.25 mm 较小团聚体所占组成增加最为明显(48.9%, $p<0.05$)。常规与有机农作大豆土壤的优势团聚体均为 <0.053 mm 颗粒。

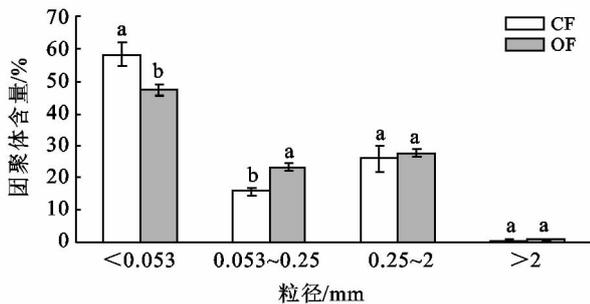


图 1 常规(CF)与有机(OF)农作大豆田土壤团聚体的分布
注:a 代表统计检验 1% 水平差异显著; b 代表统计检验 5% 水平差异显著。下同。

基于团聚体大小分布的数据计算土壤平均当量直径(MWD)可描述土壤结构稳定性。常规农作大豆转化为有机农作大豆后土壤 MWD 的数值未达到显著影响($p>0.05$),有机农作大豆(1.125 ± 0.015)比常规农作大豆(1.050 ± 0.020)高 19.0%。

2.2 包被于大团聚体内的微团聚体分布

对较小的大团聚体(0.25~2 mm)的微团聚体进一步分离后得到 <0.053 , 0.053~2 mm 这 2 种颗粒有机质。结果表明,较小的大团聚体(0.25~2 mm)内,以 <0.053 mm 细颗粒有机质所占比例较大,达到 86.9%~92.9%,0.053~2 mm 粗颗粒有机质仅占 7.1%~13.1%。常规与有机农作大豆较小的大团聚体内的 2 种颗粒表现各异,其中常规农作大豆田土壤中 <0.053 mm 细颗粒有机质比有机农作大豆百分比高 6.4%($p<0.01$),而有机农作大豆田土壤 0.053~2 mm 粗颗粒有机质百分比比较常规农作大豆高 77.6%($p<0.01$)。

2.3 耕层土壤及团聚体中碳氮含量

常规与有机农作大豆 0—20 cm 土壤有机碳含量

分别为 17.21 和 19.51 g/kg($p<0.05$),全氮含量分别为 1.79 和 2.00 g/kg($p<0.05$)。与常规农作大豆相比,有机农作大豆土壤各颗粒中有机碳和全氮含量均呈现不同程度的增加(图 2—3),其中有机碳和全氮含量在 <0.053 , 0.053~0.25, 0.25~2 和 2~8 mm 颗粒中的分别增加了 14.0%, 12.0%, 14.4%, 24.1%和 11.7%, 9.4%, 9.5%, 17.0%。

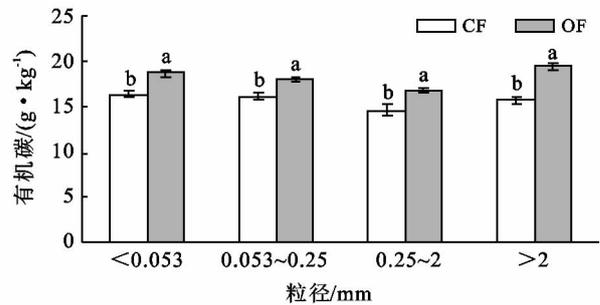


图 2 常规(CF)与有机(OF)农作大豆田土壤团聚体中有机碳含量

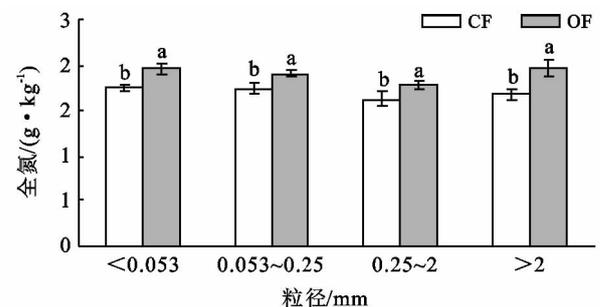


图 3 常规(CF)与有机(OF)农作大豆田土壤团聚体中全氮含量

2.4 包被于大团聚体内微团聚体中碳氮含量

常规与有机农作大豆田土壤有机碳和全氮含量在较小的大团聚体(0.25~2 mm)内的微团聚体中表现各异(表 1)。与常规农作大豆土壤相比,有机农作大豆田土壤 <0.053 mm 细颗粒有机质中的有机碳和全氮含量分别增加了 14.0%和 13.8%($p<0.01$), 0.053~2 mm 粗颗粒有机质中的有机碳和全氮含量分别增加了 23.1%和 19.4%($p<0.01$)。

2.5 土壤及团聚体中碳氮储量

常规与有机农作大豆田土壤碳氮储量在土壤及团聚体中表现各异(表 2)。常规与有机农作大豆田 0—20 cm 土壤有机碳和全氮储量分别为 4.67 ± 0.046 , 5.603 ± 0.055 , 和 0.455 ± 0.024 , 0.575 ± 0.023 kg/m², 常规农作大豆田土壤有机碳和全氮储量显著低于有机农作大豆田土壤 20.0%和 18.5%($p<0.01$)。对于土壤团聚体而言,除 2~8 mm 大团聚体全氮储量,其他团聚体有机碳和全氮储量常规农作大豆均显著低于有机农作大豆($p<0.01$)。常规与

有机农作大豆土壤有机碳和全氮储量在 <0.053 粉粒加黏粒中最高, $2 \sim 8$ mm 大团聚体中最低。 $<0.053, 0.053 \sim 0.25, 0.25 \sim 2, 2 \sim 8$ mm 团聚体中

有机碳储量有机农作比常规农作大豆依次高 20.7%, 18.5%, 21.0%, 31.3%, 全氮储量依次高 18.2%, 15.8%, 15.8%, 23.8%。

表 1 包被于大团聚体(0.25~2 mm)内的微团聚体碳氮含量

土壤指标	粒径/mm	常规农田	有机农田	显著性
有机碳/ ($\text{g} \cdot \text{kg}^{-1}$)	<0.053	15.92 ± 0.37	18.15 ± 0.51	<0.01
	$0.053 \sim 2$	14.82 ± 0.23	18.25 ± 0.36	<0.01
显著性	—	<0.05	>0.05	—
全氮/ ($\text{g} \cdot \text{kg}^{-1}$)	<0.053	1.71 ± 0.04	1.95 ± 0.07	<0.01
	$0.053 \sim 2$	1.61 ± 0.02	1.92 ± 0.04	<0.01
显著性	—	<0.05	>0.05	—

表 2 常规与有机农作大豆田土壤团聚体中碳氮储量

土壤指标	粒径/mm	常规农田	有机农田	显著性
有机碳储量/ ($\text{kg} \cdot \text{m}^{-2}$)	<0.053	2.105 ± 0.002	2.540 ± 0.002	<0.01
	$0.053 \sim 0.250$	1.017 ± 0.001	1.205 ± 0.000	<0.01
	$0.250 \sim 2.000$	1.113 ± 0.002	1.347 ± 0.001	<0.01
显著性	—	<0.010	<0.010	—
全氮储量/ ($\text{kg} \cdot \text{m}^{-2}$)	<0.053	0.277 ± 0.000	0.327 ± 0.001	<0.01
	$0.053 \sim 0.250$	0.074 ± 0.000	0.085 ± 0.000	<0.01
	$0.250 \sim 2.000$	0.114 ± 0.001	0.132 ± 0.001	<0.01
显著性	—	<0.010	<0.010	—

2.6 讨论

2.6.1 土壤团聚体稳定性与碳氮储量 常规农作大豆转换为有机农作大豆后,土壤团聚体稳定性增加,有利于增加土壤碳氮储量。(1)有机农作大豆田土壤 <0.053 mm 粉粒加黏粒百分比显著减少, $0.053 \sim 0.25$ mm 较小团聚体比重显著增加,包被于较小的大团聚体中 $0.053 \sim 2$ mm 粗颗粒有机质百分比也显著增加,表明有机农作方式促进了土壤团聚作用。(2)有机农作大豆田土壤团聚体中碳氮含量增加,表明土壤团聚作用增强了土壤碳氮固持能力。(3)有机农作大豆田土壤及团聚体中的碳氮储量与碳氮含量变化规律基本相同,表明有机农作有利于土壤碳汇和氮汇效应。徐阳春等^[8]研究也指出长期施有机肥后土壤各粒级复合体中 C, N 含量都增加。这是由于施用有机肥可改变土壤结构,增加团聚体稳定性^[9]。Shukla 等^[10]指出不同耕作模式下土壤通气性和团聚性是影响土壤有机碳变化的主要因素。耕作土壤中年轻的有机质对大团聚体稳定性起重要作用,年轻的有机碳通过团聚体的破坏和重新形成又分布到不同粒级中^[11]。耕作以后,有机矿质复合体破坏,团聚体破坏以后,原来被隔绝的有机质释放出来,这种解团

聚作用使有机碳在更细、更轻的颗粒中累积^[12]。土壤管理措施影响的结果首先体现在大团聚体级别上,微团聚体内有机碳则维持在较稳定水平上^[13]。但有机农作大豆仅 3 a,土壤碳氮含量仍存在很大的变异性,因此,研究仅说明有机农作方式可能更有利于土壤团聚体形成及有机碳的积累。

2.6.2 不同农作方式对土壤碳氮的固持机制不同 农作方式不同其具体管理措施也不同,对土壤碳氮的固持机制也不同。首先,常规与有机农作土壤及团聚体的碳氮比介于 9.1~9.9,变化不大,但与常规农作大豆田相比,土壤及团聚体碳氮含量变化量的碳氮比介于 9.4~13.8,碳氮比有所增大。以 $0.25 \sim 2$ mm 较小的大团聚体最大,包被于较小的大团聚体中 $0.053 \sim 2$ mm 粗颗粒有机质最小,说明 $0.25 \sim 2$ mm 较小的大团聚体已开始土壤有机碳累积,但包被于较小的大团聚体中 $0.053 \sim 2$ mm 粗颗粒有机质中土壤有机碳并没有更新增加。Elliott^[14]指出大团聚体(高 C:N 比)比小团聚体含有更新更多的不稳定碳。其次,施用化肥和有机肥后土壤可利用的碳氮资源不同,有机农作方式施用有机肥不仅改变了土壤的碳氮比,还影响了土壤微生物活性。土壤碳氮比降低,微

生物在氮源充足的情况下,需要更多有机碳才能维持活性,因而会加快土壤有机碳的分解矿化^[15],常规农作方式施用化肥无法维持土壤有机质的活性,有机碳储量下降。虽然试验未测定土壤微生物活性,但有机农作土壤团聚体中碳氮含量增加,已说明施用化肥和有机肥影响了土壤碳氮的固持能力。

3 结论

有机农作大豆土壤稳定性增加,团聚体中碳氮含量显著增加,土壤碳汇效应增强,有机农作方式可能比常规农作方式更有利于土壤碳氮资源持续利用。常规农作大豆经过 3 a 转换为有机农作大豆,虽然时间短,但土壤团聚体及碳氮储量特征对有机农作管理方式响应敏感,有机农作方式不仅提升了土壤有机质水平,而且固定了更多的有机碳,有利于农业固碳和减排温室气体。

[参 考 文 献]

- [1] 卢金伟,李占斌. 土壤微团聚体研究进展[J]. 水土保持研究,2002,9(1):81-85.
- [2] Golchin A, Clarke P, Oades J M, et al. The effects of cultivation on the composition of organic matter and structural stability of soils[J]. Australian Journal of Soil Research, 1995,33(6):975-993.
- [3] Jastrow J D. Soil aggregate formation and the accrual of particulate and mineral-associated organic matter [J]. Soil Biology and Biochemistry, 1996,28(425):665-676.
- [4] Six J, Conant R T, Paul E A, et al. Stabilization mechanisms of soil organic matter: Implications for C-saturation of soils[J]. Plant and Soil, 2002,241(2):155-176.
- [5] 闰峰陵,李朝霞,史志华,等. 红壤团聚体特征与坡面侵蚀定量关系[J]. 农业工程学报,2009,25(3):37-41.
- [6] Nelson D W, Sommers L E. Total carbon, organic carbon, and organic matter: Laboratory methods [M] // Sparks D L. Methods of Soil Analysis (Part 3): Chemical Method. SSSA, Inc.: Madison, 1996:961-1010.
- [7] Rodriguez J C. Organic carbon content under different types of land use and soil in peninsular Spain[J]. Biology and Fertility of Soils, 2001,33(1):53-61.
- [8] 徐阳春,沈其荣. 长期施用不同有机肥对土壤各粒级复合体中 C,N,P 含量与分配的影响[J]. 中国农业科学, 2000,33(5):65-71.
- [9] Martens D A, Frankenberger J. Modification of infiltration rates in an organic-amended irrigated soil[J]. Journal of Agronomy and Crop Science, 1992,84(4):707-717.
- [10] Shukla M K, Lal R, Ebinger M. Determining soil quality indicators by factor analysis[J]. Soil and Tillage Research, 2006,87(2):194-204.
- [11] 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(4):595-605.
- [12] Balesdent J, Besnard E, Arrouays D, et al. The dynamics of carbon in particle-size fractions of soil in a forest-cultivation sequence[J]. Plant and Soil, 1998, 201(1):49-57.
- [13] 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.
- [14] Elliott E T, Coleman D C. Let the soil work for us[J]. Ecological Bulletin, 1988,39(1):23-32.
- [15] 孟磊,蔡祖聪,丁维新. 长期施肥对土壤碳储量和作物固定碳的影响[J]. 土壤学报,2005,42(5):769-776.
- [13] 吴承祯,洪伟. 不同经营模式土壤团粒结构的分形特征研究[J]. 土壤学报,1999,36(2):162-167.
- [14] 赵勇钢,赵世伟,华娟,等. 半干旱典型草原区封育草地土壤结构特征研究[J]. 草地学报,2009,17(1):106-112.
- [15] 侯扶江,杨中艺. 放牧对草地的作用[J]. 生态学报, 2006,26(1):243-264.
- [16] 李以康,韩发,冉飞,等. 三江源区高寒草甸退化对土壤养分和土壤酶活性影响的研究[J]. 中国草地学报, 2008,30(4):51-58.
- [17] 蔡晓布,张永青,邵伟. 不同退化程度高寒草原土壤肥力变化特征[J]. 生态学报,2008,28(3):1034-1044.
- [18] 周万海,冯瑞章,满元荣. 黄河源区不同退化程度高寒草地土壤特征研究[J]. 草原与草坪,2008(4):24-28.
- [19] 田佳倩,周志勇,包彬,等. 农牧交错区草地利用方式导致的土壤颗粒组分变化及其对土壤碳氮含量的影响[J]. 植物生态学报,2008,32(3):601-610.
- [20] 徐冰,赵淑银,郭克贞,等. 草地开发与保护过程中土壤颗粒分形特征[J]. 草业科学,2009,26(7):143-146.
- [21] 廖咏梅,陈劲松. 米亚罗地区亚高山针叶林在不同人为干扰条件下的土壤分形特征[J]. 生态学杂志,2005,24(8):878-882.

(上接第 142 页)