

DOI: 10.5846/stxb201710281931

苑亚茹, 李娜, 邹文秀, 尤孟阳, 韩晓增, 马大龙. 典型黑土区不同生态系统下土壤团聚体有机碳的分布特征. 生态学报, 2018, 38(17): - .
Yuan Y R, Li N, Zou W X, You M Y, Han X Z, Ma D L. Distribution characteristics of organic carbon in aggregates of soils of three ecosystems in typical Mollisols of Northeast China. Acta Ecologica Sinica, 2018, 38(17): - .

典型黑土区不同生态系统下土壤团聚体有机碳的分布特征

苑亚茹^{1,2}, 李娜², 邹文秀², 尤孟阳², 韩晓增^{2,*}, 马大龙¹

1 哈尔滨师范大学地理科学学院, 哈尔滨 150025

2 中国科学院东北地理与农业生态研究所, 黑土区农业生态院重点实验室, 哈尔滨 150081

摘要: 基于团聚体分组和闭蓄态微团聚体分离技术, 利用典型黑土区 27 年长期定位试验, 研究草地生态系统、农田生态系统和裸地生态系统下土壤团聚体及团聚体内部组分中有机碳的分布, 以解析不同生态系统下土壤团聚体和有机碳固持间的关系, 揭示黑土有机碳的物理稳定性机制。结果显示, 与农田相比, 草地土壤有机碳含量显著提高 7.6%; 裸地土壤有机碳含量显著下降 14.1%。草地促进了大团聚体 (>250 μm), 尤其 >2000 μm 团聚体的形成, 提高了土壤团聚体的稳定性; 裸地则降低了土壤的团聚化程度及稳定性, 大团聚体和微团聚体含量下降, 粉粘粒含量相应增加。草地大团聚体中有机碳含量显著高于农田, 且内部各组分有机碳含量均有显著提高, 其中粗颗粒有机质、闭蓄态微团聚体和粉粘粒有机碳含量增幅分别为 600%、54% 和 65%; 裸地增加了粉粘粒结合有机碳含量, 降低了大团聚体和微团聚体中有机碳含量, 且大团聚体和微团聚体内部各组分有机碳含量均有所下降。3 种生态系统类型土壤均以总粉粘粒结合有机碳为主, 占土壤总有机碳 52%—79%, 其作为惰性碳库是黑土有机碳的重要组成部分。黑土有机碳的累积或损失主要表现为活性较强的有机碳库—团聚体中颗粒有机质的增加或减少, 与农田相比, 草地土壤有机碳的累积主要归因于大团聚体中粗颗粒有机质的增加, 为总有机碳增量的 3 倍; 裸地土壤有机碳的损失主要归因于微团聚体中总细颗粒有机质的减少, 对总有机碳损失的贡献率为 60%。

关键词: 水稳性团聚体; 闭蓄态微团聚体; 有机碳组分; 长期定位试验; 黑土

Distribution characteristics of organic carbon in aggregates of soils of three ecosystems in typical Mollisols of Northeast China

YUAN Yaru^{1,2}, LI Na², ZOU Wenxiu², YOU Mengyang², HAN Xiaozeng^{2,*}, MA Dalong¹

1 College of Geographical Science, Harbin Normal University, Harbin 150025, China

2 Key Laboratory of Mollisols Agroecology, Northeast Institute of Geography and Agroecology, Chinese Academy of Sciences, Harbin 150081, China

Abstract: Using fractionation of aggregate and occluded microaggregate techniques, the present study was performed to determine the organic carbon (C) content in aggregates and subfractions within aggregates of three ecosystems, including the grassland, farmland, and bare land in a long-term (27-year) trial in typical Mollisols of Northeast China. We aimed to analyze the links between aggregation and aggregate-protected C, and to reveal the physical protection mechanism of organic C stabilization of Mollisols. We found that, as compared with the farmland, the grassland showed significantly increased soil organic C (SOC) content by 7.6%; in contrast, the bare land showed greatly decreased SOC content by 14.1%. The grassland promoted the formation of macroaggregates (> 250 μm), especially the large macroaggregates (> 2000 μm), and significantly increased the mean weight diameters (MWD) of aggregates and thus aggregate stability. However, the proportions of macroaggregates and microaggregates decreased, while the proportion of silt and clay particles increased

基金项目: 国家自然科学基金项目 (41601316, 41771327, 41571285); 中科院前沿科学研究重点计划项目 (QYZDB-SSW-SYS022); 黑龙江省自然科学基金项目 (D2015002)

收稿日期: 2017-10-28; 网络出版日期: 2018-00-00

* 通讯作者 Corresponding author. E-mail: xzhan@iga.ac.cn

accordingly in the bare land, indicating a deaggregation effect. As compared with the farmland, the C contents in microaggregates and silt and clay particles decreased, but increased the C contents in macroaggregates and all subfractions within macroaggregates in the grassland. Compared with the farmland, the C contents in coarse particulate organic matter (cPOM_M), occluded microaggregates (mM), and silt and clay particles (S&C_M) in the grassland increased by 600%, 54% and 65%, respectively. In the bare land, the C contents increased in silt and clay particles, but decreased in macroaggregates, microaggregates, and in all subfractions within them. Carbon associated with silt and clay particles as passive C pool represents a major part of the total C stock of Mollisols of the three ecosystems, which accounted for 52%—79% of the total SOC. The accumulation or loss of Mollisols in Northeast China was mainly due to the intra-aggregate particulate organic matter (iPOM) fraction as relatively active C pool. The increment of organic C in the grassland relative to the farmland was primarily located in total coarse particulate matter (total cPOM) in macroaggregates, which was three times of the total increases in bulk SOC in the grassland as compared with that of the farmland. The loss of organic C in the bare land relative to the farmland was primarily located in total fine particulate matter (total fPOM) in microaggregates, which contributed to 60% of the total loss in bulk SOC in the bare land relative to the farmland.

Key Words: water-stable aggregate; occluded microaggregate; organic carbon fraction; long-term experiment; black soil

土壤有机碳(SOC)对于维持土壤肥力和农业可持续发展,缓解温室气体增加和全球气候变化的影响具有重要的双重意义^[1]。SOC 取决于土壤有机物质的输入量和输出量的动态平衡,不同生态系统既可以通过影响地表净初级生产量和死亡有机物质的滞留量直接影响植物残体的输入,也可以通过潜在改变土壤的生物、化学与物理过程而间接影响输出^[2],因此,生态系统类型是影响 SOC 水平的重要因素。关于生态系统类型对 SOC 影响的研究已有大量报道,然而其对 SOC 的变化方向以及数量大小的影响仍存在很大的差异及不确定性,可能与区域自然条件、植被类型、土壤类型、管理措施、试验时间的长短等因素有关^[3]。

土壤有机碳变化对不同生态系统的响应通常是相对较慢的过程,同时相对于 SOC 背景值较高的土壤,其变化又是很小的。因此,将 SOC 分为具有不同周转周期和生物稳定性的有机碳组分,并定量相应碳库的容量是进行 SOC 动态变化研究的基础。目前,基于土壤团聚体分级的物理分组方法被广泛应用于 SOC 的动态研究之中^[4-5]。由于土壤团聚体对 SOC 保护机制的不同,有机碳在不同粒径团聚体以及团聚体内部组分中的稳定程度不同。一般而言,粉粘粒通过物理或物理化学机制与有机碳紧密结合,比大团聚体和微团聚体更具稳定性;微团聚体对土壤有机碳的保护程度大于大团聚体^[6]。土壤团聚体可进一步分为颗粒有机质和粉粘粒两种组分。由于微团聚体和大团聚体本身稳定性的差异,微团聚体,尤其是闭蓄态微团聚体中细颗粒有机质稳定性较强^[7],而大团聚体中粗颗粒有机质稳定性相对较差^[8]。因此,从土壤有机碳物理稳定性上,基于团聚体分级得到的粗颗粒有机质、细颗粒有机质和粉粘粒组分,分别对应活性碳库、慢性碳库和惰性碳库等 3 个概念库^[9]。基于团聚体分级将土壤有机碳进行分组并定量研究相应碳库的容量,将有助于理解不同生态系统下土壤有机碳的变化及潜在机制。

东北自然黑土富含有机质,土壤结构良好,0—12 cm 表土层>250 μm 水稳性团聚体比例可达 88%^[10]。但黑土开垦为农田后,表层水稳性大团聚体含量迅速减少^[11],土壤有机质急剧下降。前人已开展了生态系统类型对黑土总有机碳储量和团聚体粒级分布的影响研究^[12-14],然而尚缺乏对不同生态系统下土壤团聚体,尤其团聚体内部组分有机碳的定量研究。本研究利用典型黑土区 27 年长期定位试验,在气候、母质、地形和开垦历史等因素相同的条件下,研究草地生态系统、农田生态系统和裸地生态系统下土壤团聚体及团聚体内部组分中有机碳的分布,解析不同生态系统类型下黑土团聚体和有机碳固持间的关系,从团聚体尺度揭示黑土有机碳的物理稳定性机制。

1 材料与方法

1.1 研究区域概况

试验位于海伦农田生态系统国家野外科学观测研究站(47°26'N, 126°38'E),地处我国东北黑土带的中心

区域,海拔 240 m。该区域属于温带大陆性季风气候,年均气温 1.5℃,年均降水量 550 mm,80%集中在 5—9 月。作物有效生长季为 120—130 d,生长季 $\geq 10^{\circ}\text{C}$ 有效积温为 2450—2500℃,全年日照时数 2600—2800 h,无霜期 120 d 左右。季节性冻层发育时间从每年 10 月末开始,最大冻层发育深度为 185—227 cm,翌年 3 月开始融冻,直至 7 月上旬化通,历时 240 d 左右。土壤为第四纪黄土状亚粘土发育而成的中厚黑土。研究区有 100 年以上的垦殖历史,开垦前自然植被类型为草原化草甸。

1.2 试验设计与样品采集

长期定位试验始于 1985 年,设置 3 种生态系统:(1)草地生态系统(Grassland),退耕休闲至今,不加任何管理,草原化草甸植被自然恢复,主要植被有狗尾草(*Leymus chinensis*)、苔草(*Cares sp.*)、问荆(*Equisetum arvense*)等;(2)裸地生态系统(Bare land),每年在植物生长初期定期将植物人工铲除,保持土壤裸露状态;(3)农田生态系统(Farmland),作物种植方式为小麦-玉米-大豆轮作,一年一熟制,采用传统耕作方式,作物生长季进行 4—6 次耕作,耕作深度为 20 cm,秋季收获后作物地上部全部移除。作物施肥量为小麦 120.0 kg N/hm²、55.0 kg P₂O₅/hm²;玉米 150.0 kg N/hm²、75.0 kg P₂O₅/hm²;大豆 32.3 kg N/hm²、82.4 kg P₂O₅/hm²。农田生态系统设置 3 个试验小区即 3 次重复,小区面积为 224 m²;草地和裸地面积分别为 10000 m²和 6670 m²,由于两者面积较大,因此,分别随机选择 3 个样方作为重复。土壤样品于作物收获后采集,采样深度为 0—20 cm。采样时将土壤表面的植被和枯草小心铲除,每个小区/样方随机选择 5 个取样点,然后将土壤样品均匀混合为 1 个混合土样,用硬纸盒将土样带回实验室,手动剔除砾石、侵入体及粗有机体。当土块含水量达到塑限时,用手把大土块沿自然破碎面扳开,待样品完全风干后,备用。1985 年试验开始时耕层土壤肥力性状如下:pH 6.2,有机碳 31.3 g/kg,全氮 3.0 g/kg,有效磷 25.8 mg/kg,速效钾 191 mg/kg。供试土壤基础理化性质见表 1。

表 1 供试土壤的基本性质

Table 1 Selected soil characteristics of different ecosystems

生态系统类型 Ecosystem type	全氮 Total N/ (g/kg)	pH (H ₂ O)	电导率 EC/ (mS/m)	容重 Bulk density/ (g/cm ³)	机械组成 Mechanical composition/%				
					>100μm	50—100μm	20—50μm	2—20μm	<2μm
草地生态系统 Grassland	2.9	5.92	10.7	1.08	0.31	12.39	22.86	29.10	35.34
裸地生态系统 Bare land	2.1	5.75	10.1	1.14	0.05	12.59	22.88	33.28	31.20
农田生态系统 Farmland	2.0	5.55	13.4	1.06	0.18	12.49	22.87	31.19	33.27

1.3 土壤分级方法

土壤样品按图 1 所示流程进行分级^[9]。第一步:团聚体分级采用湿筛法,得到>2000 μm 团聚体(LM),250—2000 μm 团聚体(SM)、微团聚体(m, 53—250 μm)和粉粘粒(S&C, <53 μm);第二步:按全土中>2000 μm 团聚体(LM)和 250—2000 μm 团聚体(SM)的质量百分比称取大团聚体(M, >250 μm)15 g,采用微团聚体分离装置进行分离,得到粗颗粒有机质(cPOM_M)、闭蓄态微团聚体(mM)和粉粘粒(S&C_M);第三步:采用 0.5%六偏磷酸钠溶液分离微团聚体(m),得到细颗粒有机质(fPOM_m)和粉粘粒(S&C_m);第四步:采用 0.5%六偏磷酸钠溶液分离闭蓄态微团聚体(mM),得到细颗粒有机质(fPOM_mM)和粉粘粒(S&C_mM)。所有组分于 60℃烘干称重。将各步筛分后得到的组分按粒径大小进行归类统计,得到总粗颗粒有机质(>250 μm, total cPOM)、总细颗粒有机质(53—250 μm, total fPOM)和总粉粘粒(<53 μm, total S&C)。

1.4 分析方法与数据处理

土壤全土、团聚体及团聚体内部组分有机碳采用元素分析仪测定(Heraeus Elementar Vario EL, Hanau, Germany),因黑土中不含碳酸盐,土壤总碳即有机碳;团聚体稳定性指标采用平均重量直径(Mean Weight Diameters, MWD)进行描述^[4]。不同处理间的差异显著性通过 SPSS 16.0 采用 LSD 法进行统计分析,显著性检验设 $P<0.05$ 。

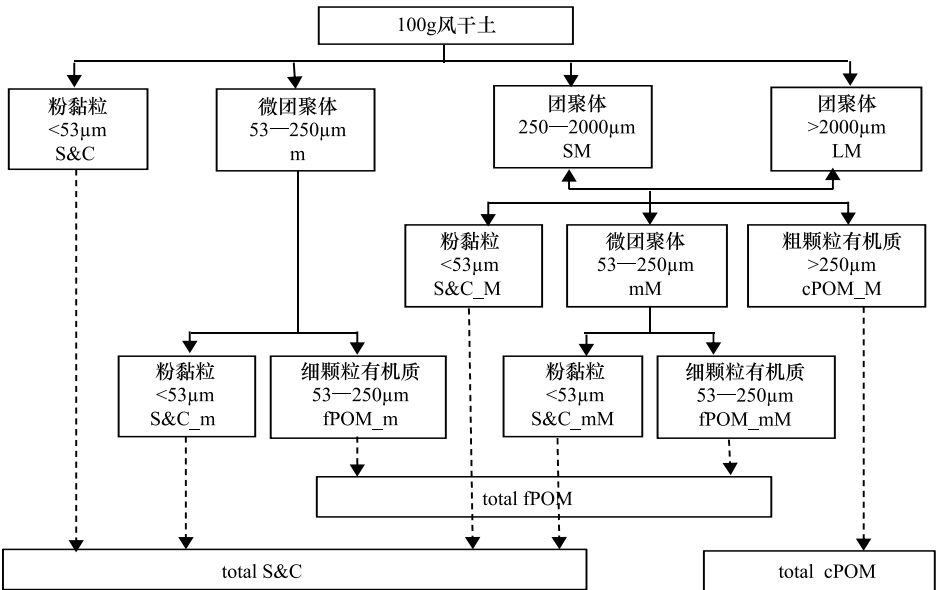


图 1 土壤筛分流程图

Fig.1 Fractionation scheme to isolate aggregate and aggregate associated C fractions

total cPOM:总粗颗粒有机质,total coarse particulate organic matter;total fPOM:总细颗粒有机质,total fine particulate organic matter;total S&C:总粉黏粒,total silt and clay particles

2 结果与分析

2.1 土壤团聚体及团聚体内部组分的质量分布

不同生态系统下土壤各粒级水稳性团聚体及其内部组分的质量分布如表2所示。草地土壤以大团聚体

表 2 不同生态系统土壤团聚体及其内部组分的质量分数/%

Table 2 Weight proportion of aggregates and subfractions within aggregates of different ecosystems

土壤组分 Soil fraction		生态系统类型 Ecosystem type		
		草地生态系统 Grassland	裸地生态系统 Bare land	农田生态系统 Farmland
全土 Bulk soil	LM	35.9 a	0.2 b	2.4 b
	SM	41.0 a	33.0 b	35.3 b
	m	12.2 c	38.2 b	40.2 a
	S&C	10.8 c	28.6 a	22.1 b
大团聚体 M	cPOM_M	16.2 a	1.1 b	1.5 b
Macroaggregate	mM	40.6 a	21.5 c	25.1 b
	S&C_M	20.2 a	10.5 b	11.2 b
闭蓄态微团聚体 mM	fPOM_mM	12.1 a	4.3 b	5.1 b
Microaggregate within macroaggregate	S&C_mM	28.5 a	17.2 c	19.9 b
微团聚体 m	fPOM_m	4.9 b	7.7 a	9.5 a
Microaggregate	S&C_m	7.4 b	30.5 a	30.7 a

M: 大团聚体(>250 μm) macroaggregate; LM: >2000 μm 团聚体 large macroaggregate; SM: 250—2000 μm 团聚体 small macroaggregate; m: 微团聚体(53—250 μm) microaggregate; S&C: 粉黏粒(<53 μm) free silt and clay particles; cPOM_M: 大团聚体中粗颗粒有机质(>250 μm) coarse particulate organic matter (POM) within macroaggregate; mM: 闭蓄态微团聚体(53—250 μm) microaggregate within macroaggregate; S&C_M: 粉黏粒(<53 μm) silt and clay particles within macroaggregate; fPOM_mM: 闭蓄态微团聚体中细颗粒有机质(53—250 μm) fine POM within mM; S&C_mM: 闭蓄态微团聚体中粉黏粒(<53 μm) silt and clay particles within mM; fPOM_m: 微团聚体中细颗粒有机质(53—250 μm) fine POM within microaggregate; S&C_m: 微团聚体中粉黏粒(<53 μm) silt and clay particles within microaggregate. 同行不同字母代表不同处理间同一组分显著差异(P<0.05) Different letters in the same column mean significant difference among treatments at 0.05 level

(M, >250 μm)为主要存在形式,>2000 μm 团聚体(LM)和 250—2000 μm 团聚体(SM)之和达 77%,而微团聚体(m)和粉黏粒(S&C)所占比例相对较小,占土壤总重的 10%—12%;农田和裸地各粒级土壤团聚体含量的大小趋势相同,均为 m> SM > S&C> LM。

与农田相比,草地土壤大团聚体含量显著增加,尤其是>2000 μm 团聚体含量增加明显,约为农田处理的 15 倍,而微团聚体和粉黏粒含量显著降低,分别下降 70%和 51%。草地大团聚体内部组分较农田均有显著增加,其中 cPOM_M、mM 和 S&C_M 分别为农田土壤的 10.8 倍、1.6 倍和 1.8 倍;mM 内部组分中 fPOM_mM 和 S&C_mM 分别为农田的 2.4 倍和 1.4 倍。微团聚体内部组分 fPOM_m 和 S&C_m 含量均显著下降,分别降低 48%和 76%。裸地土壤大团聚体和微团聚体较农田均有所下降,粉黏粒含量显著增加。裸地土壤大团聚体含量的下降主要表现为大团聚体中 mM 的减少,其中粉黏粒(S&C_mM)减少明显。

不同生态系统下土壤水稳性团聚体的平均重量直径比较指出,与农田相比,草地土壤团聚体的平均重量直径显著增加,约为农田处理的 3.2 倍,增加了土壤团聚体的稳定性;裸地土壤团聚体的平均重量直径略低于农田,但统计上差异并不显著(图 2)。

2.2 土壤总有机碳、土壤团聚体及团聚体内部组分中有机碳的分布

不同生态系统下土壤总有机碳(TOC)含量以如下趋势递减:草地>农田>裸地(表 3)。与农田相比,草地土壤有机碳显著增加至 32.7 g C/kg 土,增幅 7.6%;裸地土壤有机碳显著下降至 26.1 g C/kg 土,降幅为 14.1%。不同生态系统下有机碳在不同粒径团聚体中的分布存在明显差异(表 3)。草地土壤有机碳主要赋存于大团聚体(>250 μm),所占比例高达 80%,而微团聚体和粉黏粒中有机碳比例相对较小,分别为 13%和 7%;农田和裸地土壤有机碳主要分布于微团聚体和大团聚体,两者所占比例相当,为 35%—42%。

草地大团聚体中有机碳含量显著高于农田,为农田土壤的 2.1 倍,且内部各组分有机碳含量均有显著增加,其中 cPOM_M、mM 和 S&C_M 有机碳含量增幅分别为 600%、54%和 65%;微团聚体和粉黏粒有机碳含量均显著下降,分别降低 66%和 54%;微团聚体内部组分 fPOM_m 和 S&C_m 中有机碳分别降低 45%和 79%。与农田相比,裸地土壤粉黏粒(S&C)中有机碳含量增加,大团聚体和微团聚体及其内部各组分有机碳均有所下降。

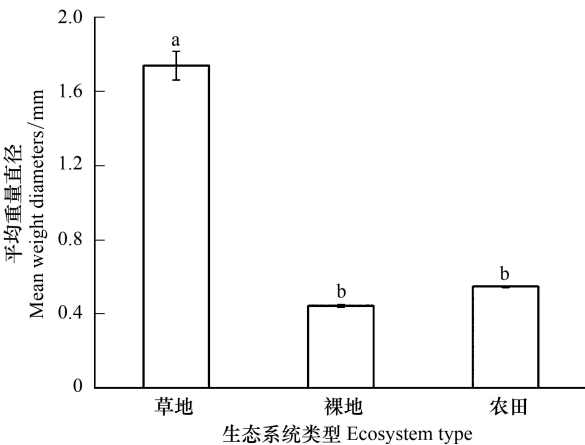


图 2 不同生态系统下土壤水稳性团聚体的平均重量直径
Fig. 2 The mean weight diameters (MWD) of water-stable aggregates of soils of different ecosystems

表 3 不同生态系统下土壤总有机碳、土壤团聚体及团聚体内部组分中有机碳的分布/(g C/kg 土)

土壤组分 Soil fraction		生态系统类型 Ecosystem type		
		草地生态系统 Grassland	裸地生态系统 Bare land	农田生态系统 Farmland
全土 Bulk soil	TOC	32.7 a	26.1 c	30.4 b
	M	25.5 a	9.3 c	12.2 b
	m	4.3 c	11.3 b	12.8 a
	S&C	2.1 c	5.7 a	4.6 b
大团聚体 M	cPOM_M	7.8 a	0.5 b	1.1 b
	mM	13.4 a	7.0 c	8.7 b
	S&C_M	4.3 a	2.1 c	2.6 b
闭蓄态微团聚体 mM	fPOM_mM	5.1 a	2.1 b	2.4 b
	S&C_mM	8.1 a	4.9 c	5.9 b
微团聚体 m	fPOM_m	2.1 c	3.2 b	3.8 a
	S&C_m	1.9 c	8.1 b	9.0 a

2.3 土壤总粗颗粒有机质、总细颗粒有机质和总粉粘粒含量及其有机碳含量

如图 3 所示,不同生态系统土壤均以总粉黏粒(total S&C)含量最高。total S&C 含量大小趋势为裸地>农田>草地,质量分数分别为 87%、84%和 67%;与 total S&C 含量趋势相反,总细颗粒有机质(total fPOM)大小顺序为草地>农田>裸地,质量分数分别为 17%、15%和 12%;总粗颗粒有机质(total cPOM)草地含量最高,约占 16%,农田和裸地含量很小,仅占 1%左右。

不同生态系统影响有机碳在土壤各组分中的分布(图 4)。草地、农田和裸地有机碳在 total cPOM、total fPOM 和 total S&C 分配比例分别为 25%: 23%: 52%、3%: 23%: 73%和 2%: 19%: 79%。各处理均以 total S&C 有机碳含量最高,所占比例为 52%—79%。与农田相比,草地并没有改变 total fPOM 有机碳含量,尽管小幅度降低了 total S&C 有机碳含量,但显著提高了 total cPOM 有机碳含量,其有机碳的增量为 6.8 g C/kg 土,约为草地与农田土壤总有机碳增量的 3 倍,因此,从总体看,草地土壤有机碳的累积主要归因于 total cPOM 有机碳的增加。裸地与农田土壤 total cPOM 和 total S&C 有机碳含量差异不显著,而 total fPOM 有机碳含量显著低于农田。可见,裸地土壤有机碳的损失主要归因于 total fPOM 的减少,对总有机碳损失的贡献率为 60%。

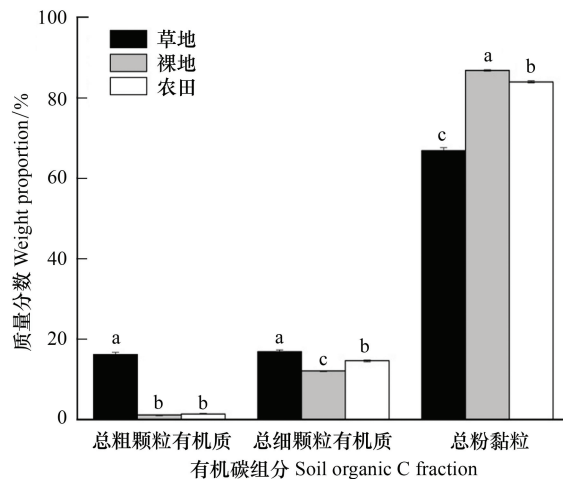


图 3 不同生态系统土壤总粗颗粒有机质、总细颗粒有机质和总粉粘粒的质量分数

Fig. 3 Weight proportion of total coarse particulate organic matter, total fine particulate organic matter and total silt and clay particles in soils of different ecosystems

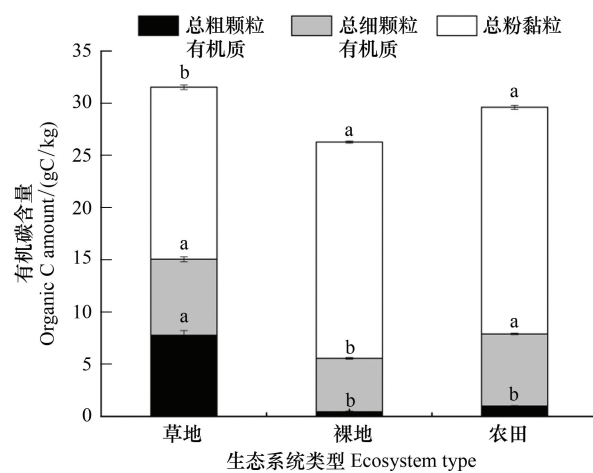


图 4 不同生态系统土壤总粗颗粒有机质、总细颗粒有机质和总粉粘粒中有机碳含量

Fig. 4 Carbon amount in total coarse particulate organic matter, total fine particulate organic matter and total silt and clay particles in soils of different ecosystems

3 讨论

土壤有机碳水平取决于土壤有机物质输入量与输出量之间的动态平衡,其对不同生态系统类型的响应明显。经过 27 年 3 种生态系统类型土壤有机碳总量发生明显分异,植被自然恢复的草地生态系统最高,农田生态系统居中,无植被覆盖的裸地生态系统最低。从碳输入量看,农田生态系统的作物收获后秸秆全部移除生态系统,仅有部分根茬归田,而草地作为自然生态系统每年有大量的植物残体及根系归还土壤,草地碳输入量 (6872 kg C/hm^2) 显著高于农田 (242 kg C/hm^2)^[15];从碳输出量看,草地生态系统全年土壤碳排放总量 (4786 kg C/hm^2) 显著高于农田生态系统 (4224 kg C/hm^2)^[15]。表明,草地生态系统碳累积量(碳输入与碳输出之差)高于农田生态系统,土壤处于碳积累的过程。裸地生态系统尽管全年土壤碳排放总量 3 种生态系统中最低 (2025 kg C/hm^2)^[15],但由于长期无外源有机碳的输入,因此,土壤处于碳损失过程。农田土壤总有机碳高于裸地体现了在传统耕作和秸秆移除的条件下,源于作物根系及根系分泌物的碳输入对农田土壤有机碳的保持起着重要的作用。

不同生态系统下土壤有机胶结物质的变化驱动土壤团聚体组成发生分异,进而影响 SOC 在不同粒径团

聚体中的分配。农田经过 27 年植被自然恢复为草地后,土壤有机碳含量增加至 32.7 g/kg,土壤团聚化程度大幅度提高,平均重量直径达 1.74 mm(图 2)。苑亚茹等^[16]基于邻近地块长期定位试验的结果显示,在传统耕作条件下,长期有机无机配施的农田黑土有机碳含量为 39.4 g/kg,而平均重量直径仅为 0.74 mm。对比分析表明,不同耕作体系下土壤团聚化程度的高低取决于有机碳的质量即有机胶结剂的类型,而不是有机碳的数量。根据团聚体等级发育模型,根系和真菌菌丝是大团聚体的主要胶结剂,而腐殖性有机物是微团聚体的胶结剂^[17]。草地土壤以大团聚体占有绝对优势,尤其>2000 μm 团聚体含量显著高于农田和裸地,这与草被植物根系的作用直接相关。作为自然生态系统的草地生态系统根密度显著高于农田,约为农田的 23 倍^[18],草被植物根系包括死亡根系通过缠绕和联结土壤颗粒并释放分泌物,促进了土壤大团聚体的形成与稳定;相反,农田频繁的耕作扰动一是直接破坏了大团聚体,二是影响了植物根系的生长发育,从而影响了大团聚体,尤其是>2000 μm 团聚体的形成和稳定;而无根系作用的裸地几乎不存在>2000 μm 团聚体。草地在促进粉黏粒和微团聚体形成大团聚体的同时,使更多的 SOC 向大团聚体富集,使大团聚体成为碳赋存的主体。裸地土壤由于长期没有有机碳的投入而只有输出,这使得土壤中的微生物只能依靠土壤中原有有机质作为能量,从而加速了土壤有机质的分解,而作为黑土团聚体的主要胶结物质被分解利用的结果,必然导致稳定性相对较差的较大团聚体的崩解,进而降低了其中有机碳含量,增加了粉黏粒组分及其有机碳含量。

不同生态系统下土壤有机碳在总粗颗粒有机质、总细颗粒有机质和总粉黏粒中的分配即在不同活性有机碳库中的含量和比例不同,影响了土壤有机碳库的稳定性。与农田相比,草地土壤相对稳定的总粉黏粒结合有机碳的含量和比例降低,活性较强的总粗颗粒有机质的含量和比例增加,土壤有机碳库的稳定性降低;相反,裸地土壤总粗颗粒有机质和总细颗粒有机质中有机碳含量降低,总粉粘粒结合有机碳含量相对增加,因而,裸地土壤有机碳库的稳定性相对增强。无论何种生态系统类型土壤均以总粉黏粒结合有机碳含量最高,占土壤总有机碳 52%—79%(图 4)。这是由于东北黑土粘粒含量高^[19]且以 2:1 型黏土矿物为主^[20]。相对于 1:1 型黏土矿物,2:1 型黏土矿物 CEC 含量高,比表面积大,可为有机质的吸附提供足够的场所^[21]。因而,粉粘粒是黑土有机碳储存的主体,其作为惰性碳库是黑土有机碳的重要组成部分。与农田相比,草地土壤有机碳的增加主要归因于大团聚体中粗颗粒有机质有机碳含量的增加。同样,有研究显示,粮田转为菜田 8 年后土壤有机碳显著增加,有机碳的累积主要源于团聚体中颗粒有机质的增加^[9]。然而,本人相关研究显示,黑土母质经过 8 年植被自然恢复,土壤总粗颗粒有机质、总细颗粒有机质和总粉粘粒均有显著提高,对总有机碳增加量的贡献率分别为 40%、41%和 19%^[22]。由于粉粘粒的比表面积有限,其固持有机碳存在一个最大含量,即饱和值^[23]。而对于成熟黑土而言,粉粘粒中有机碳已接近或达到饱和值,因而更多的新增有机碳向较大团聚体富集,固持在活性相对较强的有机碳库—颗粒有机质(intra-aggregate POM, iPOM)之中。裸地土壤有机碳的下降主要归因于微团聚体中总细颗粒有机质中有机碳的损失。综上所述,草地与裸地有机碳的累积或损失主要表现为活性较强的有机碳库—团聚体中颗粒有机质的增加或减少。颗粒有机碳对生态系统类型变化的响应比土壤总有机碳更为灵敏,可作为不同生态系统下土壤有机碳变化的一个敏感指示因子。

4 结论

(1) 经过 27 年 3 种生态系统类型土壤有机碳总量发生明显分异:与农田相比,草地土壤有机碳含量显著提高 7.6%;裸地土壤有机碳含量显著下降 14.1%。

(2) 草地促进了大团聚体(>250 μm),尤其>2000 μm 团聚体的形成,提高了土壤团聚体的稳定性;裸地则降低了土壤的团聚化程度及稳定性,大团聚体和微团聚体含量下降,粉粘粒含量相应增加。草地土壤有机碳主要赋存于大团聚体,占比达 80%;农田和裸地土壤主要分布于微团聚体与大团聚体,两者占比相当,为 35%—42%。

(3) 草地大团聚体中有机碳含量显著高于农田,且其内部各组分有机碳含量均有显著提高,粗颗粒有机质、闭蓄态微团聚体和粉黏粒有机碳含量增幅分别为 600%、54%和 65%;裸地增加了粉粘粒中有机碳含量,降

低了大团聚体和微团聚体中有机碳含量,且大团聚体和微团聚体内部各组分有机碳含量均有所下降。

(4) 3 种生态系统类型土壤均以总粉粘粒结合有机碳为主,占土壤总有机碳的 52%—79%,其作为惰性碳库是黑土有机碳的重要组成部分。与农田相比,草地土壤有机碳的累积主要归因于大团聚体中粗颗粒有机质的增加,为总有机碳增量的 3 倍;裸地土壤有机碳的损失主要归因于微团聚体中总细颗粒有机质的减少,对总有机碳损失的贡献率为 60%。表明,黑土有机碳的累积或损失主要表现为活性较强的有机碳库—团聚体中颗粒有机质的增加或减少。

参考文献 (References):

- [1] Lal R. Global potential of soil carbon sequestration to mitigate the greenhouse effect. *Critical Reviews in Plant Sciences*, 2003, 22(2): 151-184.
- [2] Zhou T, Shi P J. Indirect impacts of land use change on soil organic carbon change in China. *Advances in Earth Science*, 2006, 21(2): 138-143.
- [3] 陈朝, 吕昌河, 范兰, 武红. 土地利用变化对土壤有机碳的影响研究进展. *生态学报*, 2011, 31(18): 5358-5371.
- [4] Six J, Callewaert P, Lenders S, Gryze D, Morris S J, Gregorich E G, Paul E A, Paustian K. Measuring and understanding carbon storage in afforested soils by physical fractionation. *Soil Science Society of America Journal*, 2002, 66(6): 1981-1987.
- [5] Li N, You M Y, Zhang B, Han X Z, Panakoulia S K, Yuan Y R, Liu K, Qiao Y F, Zou W X, Nikolaidis N P, Banwart S A. Modeling soil aggregation at the early pedogenesis stage from the parent material of a Mollisol under different agricultural practices. *Advances in Agronomy*, 2017, 142: 181-214.
- [6] Chung H, Grove J H, Six J. Indications for soil carbon saturation in a temperate agroecosystem. *Soil Science Society of America Journal*, 2008, 72(4): 1132-1139.
- [7] Zotarelli L, Alves B J, Urquiaga S, Six J. Impact of tillage and crop rotation on light fraction and intra-aggregate soil organic matter in two Oxisols. *Soil and Tillage Research*, 2007, 95(1/2): 196-206.
- [8] Bandyopadhyay P K, Saha S, Mani P K, Mandal B. Effect of organic inputs on aggregate associated organic carbon concentration under long-term rice-wheat cropping system. *Geoderma*, 2010, 154(3/4): 379-386.
- [9] Yan Y, Tian J, Fan M S, Zhang F S, Li X L, Christie P, Chen H Q, Lee J, Kuzyakov Y, Six J. Soil organic carbon and total nitrogen in intensively managed arable soils. *Agriculture, Ecosystems & Environment*, 2012, 150: 102-110.
- [10] 史奕, 陈欣, 闻大中. 东北黑土团聚体水稳定性研究进展. *中国生态农业学报*, 2005, 13(4): 95-98.
- [11] 梁爱珍, 张晓平, 申艳, 李文凤, 杨学明. 东北黑土水稳性团聚体及其结合碳分布特征. *应用生态学报*, 2008, 19(5): 1052-1057.
- [12] Li H B, Han X Z, Wang F, Qiao Y F, Xing B S. Impact of soil management on organic carbon content and aggregate stability. *Communications in Soil Science and Plant Analysis*, 2007, 38(13/14): 1673-1690.
- [13] 邹文秀, 韩晓增, 陆欣春, 郝翔翔, 江恒, 刘元明. 不同土地利用方式对黑土剖面土壤物理性质的影响. *水土保持学报*, 2015, 29(5): 187-199.
- [14] 郝翔翔, 韩晓增, 李禄军, 邹文秀, 陆欣春, 乔云发. 土地利用方式对黑土剖面有机碳分布及碳储量的影响. *应用生态学报*, 2015, 26(4): 965-972.
- [15] 李海波, 韩晓增. 不同土地利用和施肥方式下黑土碳平衡的研究. *中国生态农业学报*, 2014, 22(1): 16-21.
- [16] 苑亚茹, 李禄军, 李娜, 尤孟阳, 韩晓增. 长期施肥对东北黑土不同活性有机碳库的影响. *生态学杂志*, 2016, 35(6): 1435-1439.
- [17] Tisdall J, Oades J. Organic matter and water-stable aggregates in soils. *European Journal of Soil Science*, 1982, 33(2): 141-163.
- [18] 李海波, 韩晓增, 许艳丽, 候雪莹. 不同管理方式对黑土农田根际土壤团聚体稳定性的影响. *水土保持学报*, 2008, 22(3): 110-115.
- [19] 申聪颖, 赵兰坡, 刘杭, 张志丹, 姜亦梅. 不同母质发育的东北黑土的粘粒矿物组成研究. *矿物学报*, 2013, 33(3): 382-388.
- [20] 郑庆福, 刘艇, 赵兰坡, 冯君, 王鸿斌, 李春林. 东北黑土耕层土壤黏粒矿物组成的区域差异及其演化. *土壤学报*, 2010, 47(4): 734-746.
- [21] Saidy A R, Smernik R J, Baldock J A, Kaiser K, Sanderman J. Microbial degradation of organic carbon sorbed to phyllosilicate clays with and without hydrous iron oxide coating. *European Journal of Soil Science*, 2015, 66(1): 83-94.
- [22] 苑亚茹. 不同土地利用与施肥管理对黑土团聚体中有机碳的影响[D]. 北京: 中国科学院大学东北地理与农业生态研究所, 2013.
- [23] Hassink J, Whitmore A P. A model of the physical protection of organic matter in soils. *Soil Science Society of America Journal*, 1997, 61(1): 131-139.