

云雾山草原区不同植被恢复阶段土壤 团聚体活性有机碳分布特征

华 娟^{1,2}, 赵世伟¹, 张 扬^{1,2}, 马 帅^{1,2}

(1. 中国科学院、水利部水土保持研究所, 陕西 杨凌 712100; 2. 中国科学院研究生院, 北京 100049)

摘要:以宁夏云雾山草原自然保护区不同植被群落为研究对象,对 0~20 cm 土层土壤团聚体活性有机碳分布特征进行分析。结果表明:(1)不同植被群落土壤团聚体活性有机碳含量顺序为退耕草地 < 百里香群落 < 铁杆蒿群落 < 大针茅群落 < 长芒草群落,与退耕草地相比,封育草地各粒径团聚体活性有机碳含量均显著提高 ($P < 0.05$),表明随着植被的恢复土壤团聚体活性有机碳含量提高并趋于稳定,土壤碳汇效应有可能增强。(2)植被恢复主要影响大团聚体 (>0.25 mm) 中活性有机碳含量,其中 0.5~0.25 mm 粒径团聚体中活性有机碳含量最高,微团聚体 (<0.25 mm) 中活性有机碳含量最低。(3)植被恢复前期(退耕草地-铁杆蒿群落)0~10 cm 土层 >0.5 mm 粒径团聚体中活性有机碳含量较 10~20 cm 土层有所增加, <0.5 mm 粒径团聚体活性有机碳含量变化不大,恢复至后期到长芒草阶段时,0~10 cm 土层 <0.5 mm 粒径团聚体中活性有机碳含量也开始提高,各粒径 0~10 cm 土层团聚体活性有机碳含量均比 10~20 cm 土层有所提高。(4)相关性分析表明,土壤团聚体活性有机碳含量与土壤团聚体总有机碳含量呈极显著线性正相关关系 ($r = 0.9394$),团聚体活性有机碳含量可以作为衡量土壤团聚体有机碳动态的一个敏感性指标。

关键词:云雾山;草地植被群落;团聚体活性有机碳

文章编号:1000-0933(2009)09-4613-07 中图分类号:Q142,Q948,S154.4 文献标识码:A

Distribution Characteristics of labile organic carbon in soil aggregates in different stages of vegetation restoration of grassland in Yunwu Mountain

HUA Juan^{1,2}, ZHAO Shi-Wei¹, ZHANG Yang^{1,2}, MA Shuai^{1,2}

1 Institute of Soil and Water Conservation, Chinese Academy of Sciences and Ministry of Water Resources, Yangling, Shanxi 712100, China

2 Graduate School of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China

Acta Ecologica Sinica, 2009, 29(9): 4613~4619.

Abstract: Labile organic carbon (LOC) in soil aggregates plays an important role in carbon fixation. We analyzed content of labile organic carbon (LOC) in soil aggregates from 0 to 20 cm during vegetation restoration in Yunwu Mountain. The results showed that: (1) content of LOC in soil aggregates followed the order of abandoned grassland < *Thymus mongolicus* community < *Artemisia gmelinit* community < *Stipa grandis* community < *Stipa bungeana* community, and the difference between abandoned grassland and enclosed meadows was significant ($P < 0.05$) in each size fraction. The results showed that content of LOC in aggregates increased significantly with vegetation restoration. This may showed a large carbon sink. (2) The vegetation restoration mainly effected content of LOC in macro-aggregate (>0.25 mm). Furthermore, Content of LOC in fraction of 0.5~0.25 mm was higher than other size fraction and the content was lowest in micro-aggregate (<0.25 mm). (3) The effects of soil depths on content of LOC in soil aggregates was different. Content of LOC in depth of 0~10 cm in size of >0.5 mm was higher than the depth of 10~20 cm in prophase of vegetation restoration (abandoned grassland-*Artemisia gmelinit* community) while content of LOC in size of <0.5 mm showed similar community in the late of

基金项目:国家“十一五”科技支撑计划重大资助项目(2006BCA01A07);国家“十一五”科技支撑计划重点资助项目(2006BAD0908)

收稿日期:2008-11-19; 修订日期:2009-12-23

* 通讯作者 Corresponding author. E-mail: swzhao@ms.iswc.ac.cn

vegetation restoration (*Stipa bungeana* community). (4) The linearly positive correlation was found between content of LOC and total organic carbon in soil aggregates. The correlation coefficient reached 0.9493 which was extremely significant. This showed that content of labile organic carbon in soil aggregates could be a sensitive index to indicate dynamic of soil organic carbon.

Key Words: Yunwu Mountain; grassland vegetation; labile organic carbon in soil aggregates

团聚体是土壤结构的基本单位,也是微生物活动的主要场所,土壤物质和能量的循环转化主要发生在团聚体内^[1]。土壤活性有机碳是在一定的时空条件下受植物、微生物影响强烈、具有一定溶解性,且在土壤中移动较快、不稳定、易氧化、易分解、易矿化,其形态和空间位置对植物和微生物有较高活性的那部分土壤碳素^[2]。尽管这部分碳素占全碳的比例很小,但它们对维持土壤肥力及土壤碳贮量变化方面具有重要的作用^[3]。

国内外很多学者^[2,4~6]对土壤中活性有机碳分布进行了研究,但是这些研究针对的只是全土的活性有机碳含量。土壤中活性有机碳包括游离于土壤团聚体之间的活性有机碳和团聚体内部的活性有机碳,团聚体内部的活性有机碳由于包裹在土壤团聚体中受团聚体物理保护而隔离了微生物活动,有可能对土壤碳汇功能产生重要影响,因此这部分碳素对土壤有机碳的稳定和固碳具有重要意义。黄土高原西部退耕还草工程的实施,必将对土壤有机碳的积累和碳循环产生重要影响,而目前对草地植被恢复条件下土壤团聚体活性有机碳含量的变化规律及其分布特征还知之甚少。本研究以位于黄土高原半干旱草原植被带的云雾山草原自然保护区为研究区域,通过对不同植被群落土壤团聚体中活性有机碳分布特征的研究,揭示草地恢复过程团聚体活性有机碳的变化规律,为研究草地植被恢复的土壤固碳机制提供科学依据。

1 材料与方法

1.1 研究区概况

云雾山草原自然保护区(宁夏固原)位于位于黄土高原西部的半干旱区黄土丘陵,地理位置为 106°24' ~ 106°28'E, 36°13' ~ 36°19'N, 海拔为 1800 ~ 2148 m, 面积 7000 hm², 是我国西北黄土高原以长芒草为优势种的草原植物保留较好的典型地段。该区年均气温 4 ~ 6 °C, ≥0 °C 的积温 2370 ~ 2880 °C, 月均温以 7 月份最高, 为 24 °C, 1 月份为均温最低月, 为 -14 °C; 年日照时数为 2,500 h, 辐射总量 125 × 4.183 kJ · cm⁻²; 年均降水量 400 ~ 450 mm, 蒸发量 1500 ~ 1700 mm, 无霜期 112 ~ 137 d。地带性土壤为山地灰褐土和淡黑垆土。该自然保护区经过 25a 的封育, 生态系统恢复进入了良性循环, 草地的植被覆盖度平均达到 95% 以上, 产草量不断增加, 植物种类增加到 182 种, 脊椎动物和昆虫共计 200 余种^[7]。

退耕封育初期赖草 (*Leymus secalinus*) 为优势种, 随着时间的推移, 多数伴生种群如猪毛蒿 (*Artemisia scoparia*)、长芒草 (*Stipa bungeana*) 等开始出现, 随着长芒草的竞争力不断提高, 竞争能力较差的铁杆蒿 (*Artemisia gmelinit*) 和百里香 (*Thymus mongolicus*) 等由优势种降为伴生种。形成了坡耕地-退耕草地到百里香群落、铁杆蒿群落、长芒草群落和大针茅群落 (*Stipa grandis*) 的草地植被演替序列^[8,9]。

1.2 样地设置及样品采集

选取植被恢复过程不同草地群落进行植被调查, 调查样方内植物种类、数量、生物量和群落年限; 同时调查样地的立地条件, 即海拔、坡度、坡向和土壤类型等^[8]。

2007 年 10 月在宁夏固原云雾山自然保护区采集土样。以坡耕地为对照, 分别采集退耕草地(退耕 7a)、百里香群落、铁杆蒿群落、长芒草群落和大针茅群落的 0 ~ 5 cm、5 ~ 10 cm、10 ~ 20 cm 土层原状土, 其中百里香、铁杆蒿、长芒草和大针茅 4 个群落为封育草地。每个群落采集 3 个剖面的原状土, 将土样带回室内风干保存, 待室内分析。

1.3 测定方法

土壤团聚体采用沙维诺夫湿筛法测定, 即将风干原状土先掰成 10 ~ 12 mm 的土块, 然后按比例配成 50 g

风干土样。将配好的土样小心放入 1 000 mL 沉降筒内,然后再沿沉降筒壁徐徐加水,直至土样逐渐达到饱和状态。用水灌满沉降筒,并用毛玻璃塞塞住筒口。将沉降筒倒转,固定在架子上静置几秒钟,一直到大部分土样沉降到底部为止;然后再将沉降筒倒转,重复 10 次。将塞好的沉降筒倒放在广口水桶内的一套筛子上。迅速将倒置在水中的沉降桶打开,并将量筒缓缓移动,将土壤均匀分散在筛子上面,然后从水中取出筛子。分别收集 >5 mm、5~2 mm、2~1 mm、1~0.5 mm、0.5~0.25 mm 和 <0.25 mm 粒径土样,将留在各级筛子上的团聚体洗入烧杯中,烘干称量。

团聚体活性有机碳采用高锰酸钾氧化法测定,称取约含 15 mg 碳的土壤团聚体样品于 100 mL 的离心管中;加入 25mL 高锰酸钾,振荡 1h,然后在时速 4000 r/min 下离心 5 min,将上清液用去离子水以 1:250 稀释,用分光光度计在 565 nm 下测定稀释样品的吸光率,由不加土壤的空白与土壤样品的吸光率之差,计算出高锰酸钾浓度的变化,并进而计算出氧化的碳量^[2,4]。

1.4 数据处理

1.4.1 不同植被群落团聚体活性有机碳含量的计算

$$\bar{L} = \frac{L_1 f_1 + L_2 f_2 + \cdots + L_i f_i}{f_1 + f_2 + \cdots + f_i}$$

式中, $\bar{L}$ 为*i*层不同粒径土壤团聚体活性有机碳含量的平均值(g/kg), $L_1, L_2, \cdots, L_i$ 为各土层不同粒径团聚体活性有机碳含量(g/kg), $f_1, f_2, \cdots, f_i$ 为土层厚度(cm)。

1.4.2 试验数据应用 Excel 和 SPSS 软件进行处理,显著性检验用 LSD 法进行。

2 结果与分析

2.1 不同植被群落土壤团聚体活性有机碳含量变化

从表 1 可以看出,不同植被群落土壤团聚体活性有机碳含量在各个粒径均比坡耕地有极显著提高($p < 0.01$),各群落土壤团聚体活性有机碳含量分别比坡耕地提高了 2.82、5.08、5.76、8.92 倍和 6.41 倍,表明明植被恢复使得团聚体中活性有机碳含量得到很大提高。同一粒径不同植被群落土壤团聚体活性有机碳含量总体表现为退耕草地 < 百里香群落 < 铁杆蒿群落 < 大针茅群落 < 长芒草群落。与退耕草地相比,封育草地各群落团聚体活性有机碳含量分别提高了 57.83%、74.41%、160.82% 和 92.11%,差异显著($p < 0.05$)。封育草地各群落中,百里香群落与铁杆蒿群落除 <0.25 mm 粒径差异显著($p < 0.05$)外,其余粒径之间差异均未达到显著水平($p > 0.05$)。长芒草与铁杆蒿群落不同粒径团聚体活性有机碳含量的差异均达到极显著水平($p < 0.01$),恢复至大针茅群落时,团聚体活性有机碳含量比长芒草群落有所下降。

表 1 不同植被群落土壤团聚体活性有机碳含量变化

Table 1 Content of labile organic carbon in soil aggregates among different vegetation communities

样地 Land use	团聚体活性有机碳含量 Content of labile organic carbon in soil aggregates(g/kg)					
	>5 mm	5~2 mm	2~1 mm	1~0.5 mm	0.5~0.25 mm	<0.25 mm
坡耕地 Slope land	0.66(0.11) De*	0.66(0.11) Dd	0.65(0.10) Dd	0.71(0.08) Ee	1.23(0.16) De	0.39(0.06) Dd
退耕草地 Abandoned grassland	2.52(0.36) Cd	2.64(0.45) Cc	2.45(0.32) Cc	2.52(0.37) Dd	3.28(0.20) Cd	2.01(0.07) Cc
百里香 <i>Thymus mongolicus</i>	3.69(0.48) BCc	4.02(0.02) Bb	4.12(0.08) Bb	4.19(0.14) Cc	4.71(0.50) Bc	3.42(0.30) Bb
铁杆蒿 <i>Artemisia gmelinii</i>	4.32(0.23) Bbc	4.17(0.12) Bb	4.27(0.19) Bb	4.57(0.40) BCc	5.16(0.11) Bbc	4.09(0.06) ABe
长芒草 <i>Stipa bungeana</i>	6.36(0.25) Aa	6.68(0.48) Aa	6.99(0.70) Aa	7.36(0.26) Aa	8.14(0.10) Aa	4.69(0.49) Aa
大针茅 <i>Stipa grandis</i>	4.68(0.48) Bb	4.82(0.58) Bb	4.76(0.54) Bb	5.35(0.25) Bb	5.62(0.44) Bb	4.14(0.10) ABb

* 表中大写字母不同表示不同植被群落活性有机碳含量差异极显著($p < 0.01$),小写字母不同表示不同植被群落活性有机碳含量差异显著($p < 0.05$) Different capital letters signify the extremely significant difference among different vegetation communities while different lower case letters signify significant difference for content of labile organic carbon in soil; 括号内为标准差 Values in parenthesis are standard deviation

2.2 不同粒径土壤团聚体活性有机碳含量变化

表 1 显示不同粒径土壤团聚体活性有机碳含量在不同植被群落略有差异,但总体上均表现为 0.5 ~ 0.25 mm 粒径团聚体活性有机碳含量最高,其最高达到 8.14 g/kg, <0.25 mm 粒径含量最低,说明植被恢复主要影响大团聚体 (>0.25 mm) 内活性有机碳含量。退耕草地大团聚体 (>0.25 mm) 活性有机碳含量除 0.5 ~ 0.25 mm 粒径显著提高外,其余粒径之间差异不大,封育草地的 4 个群落在 >0.25 mm 粒径范围内呈现随着粒径的减小团聚体活性有机碳含量增加的趋势。Conteh 和 Blair^[11] 也发现土壤活性有机碳含量随团聚体颗粒粒径的减小而增加,与本研究结果一致。

2.3 不同土层土壤团聚体活性有机碳含量变化

图 1 显示了各群落不同土层土壤团聚体活性有机碳在不同粒径的分布,结果表明坡耕地团聚体活性有机碳含量在各粒径均表现为 5 ~ 10 cm 土层略高于 0 ~ 5 cm 和 10 ~ 20 cm 土层。退耕草地 >1 mm 粒径团聚体活性有机碳含量 0 ~ 5 cm 土层最高,5 ~ 20 cm 土层变化不大,1 ~ 0.25 mm 粒径随着土层的增加其含量减小,<0.25 mm 粒径表现为 5 ~ 10 cm 土层最高,0 ~ 5 cm 土层次之,10 ~ 20 cm 土层最小。封育草地不同群落之间规律也不相同,百里香群落 >2 mm 粒径随着土层的加深团聚体活性有机碳含量减小,2 ~ 0.25 mm 粒径在 0 ~ 10 cm 土层随着深度的增加呈减小的趋势,10 cm 以下土层其含量基本不变,<0.25 mm 团聚体在 0 ~ 10 cm 土层基本不变,10 ~ 20 cm 土层其含量有所下降。铁杆蒿群落在 >0.5 mm 粒径随着土层的增加团聚体活性有机碳含量减小,<0.5 mm 粒径表现为先减小后增加的趋势。长芒草群落在各个粒径均随土层的增加其含量减小。大针茅群落除 >5 mm 粒径也呈现随着土层的加深团聚体活性有机碳含量减小的趋势。可见,植被恢复前期(退耕草地-铁杆蒿群落)0 ~ 10 cm 土层 >0.5 mm 粒径团聚体中活性有机碳含量比 10 ~ 20 cm 土层有所增加,<0.5 mm 粒径团聚体活性有机碳含量变化不大,恢复至后期到长芒草阶段时,0 ~ 10 cm 土层 <

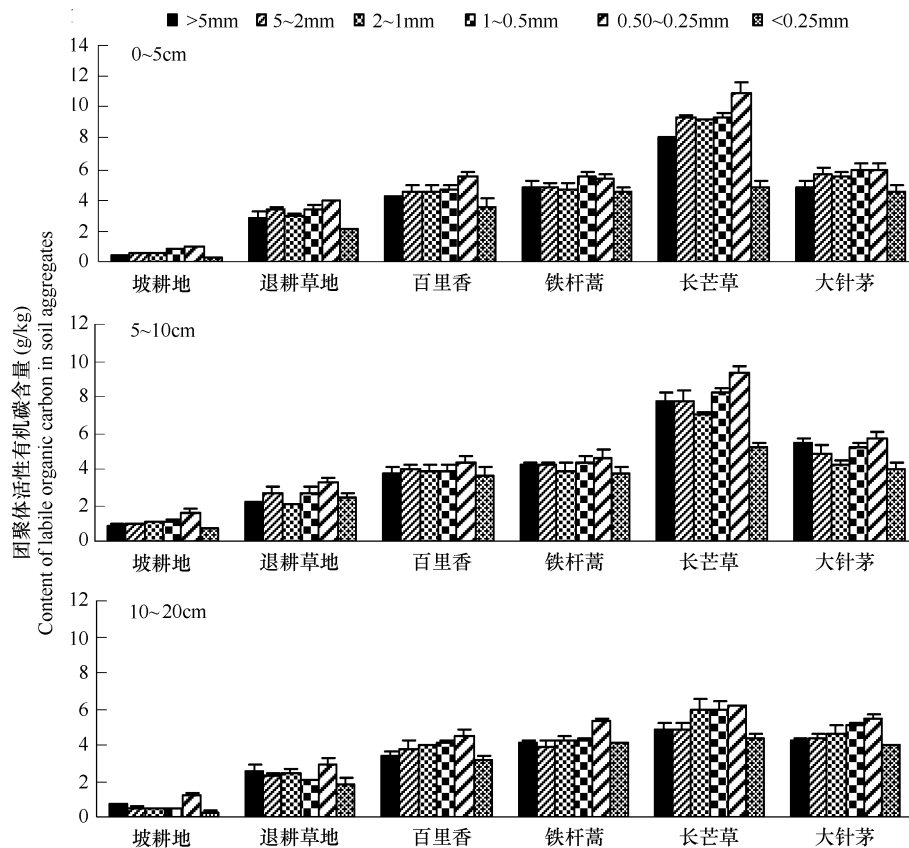


图 1 不同土层土壤团聚体活性有机碳含量变化

Fig. 1 Content of labile organic carbon in soil aggregates in different depths

0.5 mm 粒径团聚体中活性有机碳含量也有所提高,各粒径 0 ~ 10 cm 土层团聚体活性有机碳含量均比 10 ~ 20 cm 土层有所提高。

2.4 土壤团聚体活性有机碳含量与团聚体总有机碳含量的相关性

图 2 显示土壤团聚体活性有机碳含量与团聚体总有机碳含量呈线性相关关系,其线性方程为:

$$y = 4.0977x + 4.6911$$

式中, y 为土壤团聚体总有机碳含量 (g/kg); x 为土壤团聚体活性有机碳含量 (g/kg)。

相关性分析表明,土壤团聚体活性有机碳含量与团聚体总有机碳含量的相关性系数达到 0.9394,二者呈极显著的线性正相关关系,说明土壤团聚体活性有机碳含量与团聚体总有机碳含量的关系密切,团聚体活性有机碳含量的增加在很大程度上有赖于团聚体总有机碳含量的增加。同时,图 2 表明团聚体活性有机碳含量可以作为衡量土壤团聚体有机碳动态的一个敏感性指标,对于研究土壤团聚体有机碳转化具有重要作用。

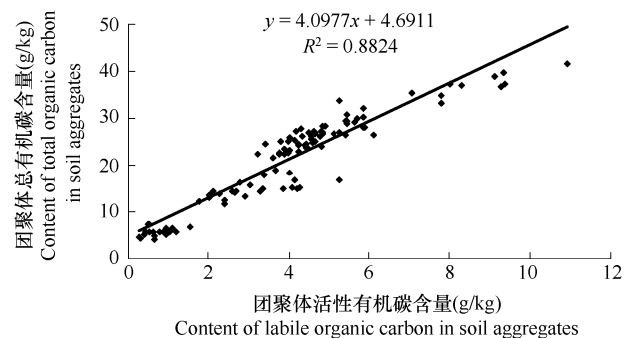


图 2 团聚体活性有机碳与团聚体总有机碳之间的相关性

Fig. 2 Correlations between labile organic carbon and total organic carbon in aggregates

样本数 $n = 108$ numbers of sampling $n = 108$

3 结论与讨论

(1) 不同植被群落土壤团聚体活性有机碳含量表现为退耕草地 < 百里香群落 < 铁杆蒿群落 < 大针茅群落 < 长芒草群落,且退耕草地与封育草地各群落土壤团聚体含量差异达到显著水平 ($p < 0.05$),表明随着植被的正向演替,土壤团聚体活性有机碳含量显著提高。活性有机碳本来是一个重要的碳源,但是土壤团聚体活性有机碳是包裹在团聚体中受到团聚体物理保护的那部分活性有机碳,这部分碳素由于受到物理保护而隔离了生物,因此其不易分解,有可能成为土壤碳汇,本研究结果表明随着植被的恢复土壤团聚体活性有机碳含量增加,土壤碳汇效应有可能增强。土壤团聚体活性有机碳在长芒草群落达到最大值,演替至大针茅群落其含量有所下降,这主要是由于大针茅群落是在干旱环境下出现的顶级群落,干旱环境使其生物量减少,凋落物的积累量也相应减小^[12],使其土壤中活性有机碳总量减少,团聚体活性有机碳含量也随之下降。通过对其土壤含水量、土壤总有机碳、全量及速效氮磷钾含量变化的研究后均表现出呈相似规律^[8,13]。

(2) 本研究发现植被恢复主要影响大团聚体 (> 0.25 mm) 中活性有机碳含量,且 0.5 ~ 0.25 mm 粒径团聚体中活性有机碳含量最高,微团聚体 (< 0.25 mm) 中活性有机碳含量最低。安韶山^[14]对这一地区团聚体有机碳的研究表明 0.5 ~ 0.25 mm 粒径团聚体有机碳含量最高。李辉信^[15]研究长期施肥对红壤性水稻土团聚体活性有机碳的影响也发现相同规律。Wright 等^[16]研究发现大量的有机碳储存在 250 ~ 2 000 μm 的团聚体中。Camberdella 和 Elliott^[17]发现耕作主要影响的也是土壤大团聚体内的有机碳。这主要是由于新输入的有机碳首先出现在大团聚体中,大团聚体的形成速度比微团聚体快^[18,19]。Jastraw 等^[20]利用¹³C 示踪法进一步证实微团聚体中有机碳比大团聚体中的有机碳形成时间早,大团聚体比微团聚体含更多的有机碳。Elliott^[21]研究表明与大团聚体相联系的有机碳比微团聚体中的有机碳更易矿化,大团聚体中的有机碳比较年轻,一般不足 10 ~ 20a。而与微团聚体结合的有机质大部分是由高度腐殖化的惰性组分组成,且受到物理保护,因而微团聚体有机碳的周转时间显著高于大团聚体的^[22]。Puget^[23]也发现小团聚体中的有机碳比大团聚体中的有机碳老化,大团聚体的形成是微团聚体通过有机碳的胶结形成的,耕作方式和土地利用方式影响微团聚体与大团聚体之间的转化和再分布。

(3) 植被恢复对不同深度土壤团聚体活性有机碳含量的影响因恢复阶段不同而异,植被恢复前期(退耕草地-铁杆蒿群落)0 ~ 10 cm 土层 > 0.5 mm 粒径团聚体中活性有机碳含量比 10 ~ 20 cm 土层有所增加, < 0.5 mm 粒径团聚体活性有机碳含量变化不大,恢复至后期到长芒草阶段时,0 ~ 10 cm 土层 < 0.5 mm 粒径团聚体

中活性有机碳含量也有所提高,各粒径 0~10 cm 土层团聚体活性有机碳含量均比 10~20 cm 土层有所提高。由于采取封育措施草本植物残体主要积累在表层,且长期封育使得植物根系也多集中在表层,因此表层土壤微生物活动强烈,土壤有机质含量丰富,而这些新碳又首先出现在大团聚体中,因此表层土壤大团聚体中活性有机碳含量先增加,随着土层的加深其含量减小,小团聚体(<0.5 mm)中其含量在各土层变化不大;植被恢复后期表层大团聚体中有机碳趋于稳定,小团聚体中有机碳开始增加,所以,恢复后期小团聚体活性有机碳含量也随着土层深度的增加而呈现减小的趋势,其影响深度表现在 0~10 cm 土层。

(4)土壤团聚体活性有机碳含量与土壤团聚体总有机碳含量的相关性系数达到 0.9394,二者呈极显著的线性正相关关系,表明团聚体活性有机碳含量可以作为衡量土壤团聚体有机碳动态的一个敏感性指标。许明祥等^[24]也通过主成分分析和判别分析预测黄土丘陵区影响土壤生产力和抗冲能力的敏感性指标,发现活性有机碳是土壤环境质量评价和管理的最敏感指标之一。李辉信^[15]研究显示团聚体潜在可矿化碳、可溶性碳与团聚体总有机碳也呈极显著正相关关系。团聚体活性有机碳含量对于研究土壤团聚体碳素转化具有重要作用,今后应加强这方面的研究。土壤团聚体活性有机碳含量对土壤碳汇功能的促进作用,也需要进一步研究。

References:

- [1] Wen Q, Zhao X R, Chen H W. Distribution characteristics of microbial biomass carbon in different soil aggregates in semi-arid area. *Scientia Agricultura Sinica*, 2004, 10: 1504—1509.
- [2] Shen H, Cao Z H. Characteristics and ecological effects of the active organic carbon in soil. *Chinese Journal of Ecology*, 1999, 18 (3): 32—38.
- [3] Post W M, Kwon K C. Soil carbon sequestration and land use change: processes and potential. *Global Change Biology*, 2000, 6: 317—327.
- [4] Wu J G, Zhang X Q, Xu D Y. Changes in soil labile organic carbon under different land use in the Liupan Mountain Forest Zone. *Acta Phytocologica Sinica*, 2004, 28 (5): 657—664.
- [5] Blair G J, Lefroy R D. Soil carbon fractions based on their degree of oxidation, and the developments of a carbon management index for agricultural systems. *Australian Journal of Agricultural Research*, 1995, 46: 1456—1466.
- [6] McDowell W H. Effects of chronic nitrogen amendments on production of dissolved organic carbon and nitrogen in forest soil. *Water, Air and Soil Pollution*, 1998, 105 (1/2): 175—182.
- [7] Zou H Y, Chen J M. Natural recovery succession and regulation of the prairie vegetation on the Loess Plateau. *Research on Soil and Water Conservation*, 1998, 5 (1): 126—138.
- [8] Liu N N, Zhao S W, Yang Y H. Study on water-holding capacity of the top soil of a steppe reserve in the Yunwu Mountains, Guyuan, Ningxia Hui Autonomous Region. *Acta Agrestia Sinica*, 2006, 14 (4): 338—342.
- [9] Management office of Yunwu Mountain natural conservation area in Ningxia. Collected works of scientific investigation and management in Yunwu Mountain natural conservation area in Ningxia. Ningxia People's Publishing House, Yinchuan, 2001. 1—131.
- [10] Soil physical research laboratory in Nanjing soil research institution of Chinese Academy of Sciences. *Methods of soil physical properties*. Beijing: Science Press, 1978. 77—88.
- [11] Conte A, Blair B J. The distribution and relative loss of soil organic carbon fraction in aggregate size fractions from cracking clay soils (vertisols) under cotton production. *Australian Journal of Soil Research*, 1998, 36: 257—271.
- [12] Chen J M, Wang H E, Hu X M. Accumulation and decomposition of litter in the semiarid enclosed grassland. *Acta Ecologica Sinica*, 2006, 26 (4): 1207—1212.
- [13] Chen J, Gao Y J. Variability of soil nutrient in enclosed grassland of Yunwu Mountain. *Acta Agrestia Sinica*, 2007, 15 (3): 273—277.
- [14] An S S, Zhang X, Zhang Y. Distribution of organic carbon in different soil aggregates size during revegetation in Hilly-Gully Region of Loess Plateau. *Journal of Soil and Water Conservation*, 2007, 21 (6): 109—113.
- [15] Li H X, Yuan Y H, Huang Q R. Effects of long-term fertilization on labile organic carbon in soil. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2008, 45 (2): 259—266.
- [16] Wright A L, Hons F M. Carbon and nitrogen sequestration and soil aggregation under sorghum cropping sequences. *Biology and Fertility Soils*, 2004, 43: 265—272.
- [17] Camberdella C A, Elliott E T. Methods of physical characterization of soil organic matter fractions. *Geoderma*, 1993, 56: 449—457.
- [18] Gale W J, Oades J. Root-derived carbon and the formation and stabilization of aggregates. *Soil Science Society of America*, 2000, 64: 201—207.

- [19] Xie J S, Yang Y S, Cheng G S. Effects of vegetation restoration on water stability and organic carbon distribution in aggregates of degraded red soil in subtropics of China. *Acta Ecologica Sinica*, 2008, 28 (2): 702 — 709.
- [20] Jastrow J D, Boutton T W, Miller R M. Carbon dynamics of aggregate-associated organic matter estimated by ^{13}C natural abundance. *Soil Science Society of America*, 1996, 60: 801 — 807.
- [21] Elliott E T, Cambardella C A. Physical separation of soil organic matter. *Agriculture, Ecosystems & Environment*, 1991, 34: 407 — 419.
- [22] Tisdall J M, Oades J M. Organic matter and water-stable aggregates. *European Journal of Soil Science*, 1982, 33: 141 — 163.
- [23] Puget P, Chenu C, Balesdent J. Dynamic of soil organic matter associated with particle-size fractions of water-stable aggregate. *European Journal of Soil Science*, 2000, 51: 595 — 605.
- [24] Xu M X, Liu D B, Zhao Y G. Assessment indicators of soil quality in hilly Loess Plateau. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2005, 16 (10): 1843 — 1848.

参考文献:

- [1] 文倩, 赵小蓉, 陈焕伟, 等. 半干旱地区不同土壤团聚体中微生物量碳的分布特征. *中国农业科学*, 2004, (10): 1504 ~ 1509.
- [2] 沈宏, 曹志洪. 土壤活性有机碳的表征及其生态效应. *生态学杂志*, 1999, 18 (3): 32 ~ 38.
- [4] 吴建国, 张小全, 徐德应. 六盘山林区几种土地利用方式下土壤活性有机碳的比较. *植物生态学报*, 2004, 28 (5): 657 ~ 664.
- [7] 宇万太, 马强, 赵鑫, 等. 不同土地利用类型下土壤活性有机碳库的变化. *生态学杂志*, 2007, 26 (12): 2013 ~ 2016.
- [8] 朱志建, 姜培坤, 徐秋芳. 不同森林植被下土壤微生物量碳和易氧化态碳的比较. *林业科学研究*, 2006, 19 (4): 523 ~ 526.
- [9] 邹厚远, 程积民. 黄土高原草原植被的自然恢复演替及调节. *水土保持研究*, 1998, 5 (1): 126 ~ 138.
- [10] 刘娜娜, 赵世伟, 杨永辉, 等. 云雾山封育草原对表土持水性的影响. *草地学报*, 2006, 14 (4): 338 ~ 342.
- [11] 宁夏云雾山草原自然保护区管理处编. 宁夏云雾山自然保护区科学考察与管理文集. 银川: 宁夏人民出版社, 2001. 1 ~ 131.
- [12] 中国科学院南京土壤研究所土壤物理研究室. 土壤物理性质测定法. 北京: 科学出版社, 1978. 77 ~ 88.
- [14] 程积民, 万惠娥, 胡相明, 等. 半干旱区封禁草地凋落物的积累与分解. *生态学报*, 2006, 26 (4): 1207 ~ 1212.
- [15] 程杰, 高亚军. 云雾山封育草地土壤养分变化特征. *草地学报*, 2007, 15 (3): 273 ~ 277.
- [16] 安韶山, 张玄, 张扬, 等. 黄土丘陵区植被恢复中不同粒级土壤团聚体有机碳分布特征. *水土保持学报*, 2007, 21 (6): 109 ~ 113.
- [17] 李辉信, 袁颖红, 黄欠如, 等. 长期施肥对红壤性水稻土团聚体活性有机碳的影响. *土壤学报*, 2008, 45 (2): 259 ~ 266.
- [21] 谢锦升, 杨玉盛, 陈光水, 等. 植被恢复对退化红壤团聚体稳定性及碳分布的影响. *生态学报*, 2008, 28 (2): 702 ~ 709.
- [26] 许明祥, 刘国彬, 赵允格. 黄土丘陵区土壤质量评价指标研究. *应用生态学报*, 2005, 16 (10): 1843 ~ 1848.