植物营养与肥料学报 2012,18(4):876 -883
Plant Nutrition and Fertilizer Science

黄土高原植被恢复提高大于0.25 mm粒级水稳性团聚体在土壤增碳中的作用

于寒青[1], 李 勇[2*], 金发会[1], 孙丽芳[1]
(1 中国农业科学院农业环境与可持续发展研究所,北京 100081; 2 河南师范大学生命科学学院, 河南新乡 453000)

摘要: 本研究选择陕北黄土高原绥德、吴旗、宜川3个地区,调查分析了不同植被恢复类型(草、灌、乔)下0—5 cm表层土壤水稳性团聚体粒径分布及其有机碳含量的变化。结果表明:不同植被恢复类型均显著提高了 >2 mm和2～0.25 mm两个粒级的水稳性团聚体及其有机碳(SOC)的含量,但不同植被恢复类型的作用在3个地区有所不同。与农地相比,在绥德,油松和柠条分别使 >2 mm和2～0.25 mm粒级的水稳性团聚体中的SOC含量提高了99%～153%和219%～350% ,但苜蓿没有明显作用;在吴旗,苜蓿和沙棘分别使 >2 mm和2～0.25 mm水稳性团聚体中SOC含量提高了28%～30%和85%～130%,而刺槐对 >2 mm水稳性团聚体没有作用,而使2～0.25 mm粒级的水稳性团聚体SOC含量提高了210%;在宜川,白草、羊胡草、狼牙刺和油松使 >2 mm和2～0.25 mm粒级的水稳性团聚体中的SOC含量提高了405%～932%和724%～1130%。植被恢复土壤增碳主要是提高了2～0.25 mm和>2 mm两个粒级的水稳性团聚体中SOC的含量,提高值分别为514%和470%,占土壤有机碳库增量的49%和43%,而对其它粒级水稳性团聚体中SOC含量的贡献小于16%。以上研究结果说明,植被恢复稳定土层结构、促进土壤水稳性大团聚体中SOC的形成,可能在黄土丘陵侵蚀景观土壤固碳过程中起重要作用。

关键词: 植被恢复;水稳性团聚体;团聚体中有机碳含量;土壤碳储量
中图分类号: S157.2; S152.3　　**文献标识码:** A　　**文章编号:** 1008-505X(2012)04-0876-08

The role of increasing soil water-stable aggregates with diameter > 0.25 mm by vegetation restoration in enhancement of soil organic carbon in the Loess Plateau

YU Han-qing[1], Li Yong[2*], JIN Fa-hui[1], SUN Li-fang[1]
(*1 Institute of Environment and Sustainable Development in Agriculture, CAAS, Beijing 100081, China;*
2 College of Life Sciences, Henan Normal University, Xinxiang, Henan 453000, China)

Abstract: In this study, we investigated the changes in soil water stable aggregates of 0-5 cm surface and their organic carbon contents induced by different restoration vegetation types (grass, shrub and tree) at 3 sites including Suide, Wuqi, Yichuan in Shaanxi province on the Chinese Loess Plateau. Water stable aggregates with diameters of > 2 mm and 2-0.25 mm and their organic carbon contents (SOC) were significantly increased by all vegetation types and these increases were different among three investigated sites. Compared with farmland, restoration of *Pinus tabulaeformis* and *Caragana* in Suide site resulted in an increase of SOC in water stable aggregates of >2 mm and 2 - 0.25 mm by 99%-153% and 219%-350%, respectively. At Wuqi site, alfalfa and *Hippophae* respectively increased SOC in water stable aggregates of >2 mm and 2-0.25 mm by 28%-30% and 85%-130%, whereas Locust tree did not increase SOC in water stable aggregates of >2 mm but increased SOC by 210% of 2-0.25 mm diameter. At Yichuan site, *Pennisetum flaccidum*, *Bothriochloa ischemum* (L.) Keng, *Sophora viciifolia*

收稿日期: 2011-12-20　　**接受日期:** 2012-04-23
基金项目: 国家自然科学基金项目(31000944, 41171231);国际原子能机构项目(IAEA research contract No. 15479, 15938)资助。
作者简介: 于寒青(1983—),女,陕西岐山人,研究实习员,主要从事土壤肥力方面的研究。E-mail: chunlinxi@126.com
*通讯作者 E-mail: yongli32@hotmail.com

and *Pinus tabulaeformis* respectively increased SOC in water stable aggregates of >2 mm and 2-0.25 mm by 405% - 932% and 724% - 1130%. The enhancement of SOC by restoration of vegetation on cultivated slopes is mainly the increase of SOC in soil water-stable aggregates of two diameters >2 mm (514%) and 2-0.25 mm (470%), but not for other diameters. The increased values of SOC of >2 mm and 2 - 0.25 mm respectively contributed to 49% and 43% of total SOC increased by vegetation restoration while less than 16% SOC increase in other diameters of water-stable aggregates. These results suggest that the formation of water-stable aggregates of > 0.25 mm diameter through stabilization of soil structure by vegetation may play an important role in soil carbon sequestration in the eroding landscapes of the Chinese Loess Plateau.

Key words: vegetation restoration; water stable aggregates; organic carbon content in soil aggregates; soil carbon storage

大量研究表明,植被覆盖及其根系可以显著提高土壤水稳性团聚体含量,从而稳定土层结构,改善土壤质量,减少土壤侵蚀[1-2]。植被主要通过改善土壤特性而提高土壤抗侵蚀能力,植被恢复后土壤有机质、水稳性团聚体及渗透性等抗侵蚀特性分别提高了6、2.5、4.5 倍,土壤抗冲性提高了 20 多倍[3]。杨建国[4]的研究表明随着植被恢复土壤水稳性大团聚体含量增加。朱冰冰[5]的研究表明随着植被恢复年限的增加土壤水稳性团聚体分形维数减小。

在侵蚀坡地景观,水稳性团聚体的含量大小对提高土壤碳库储存及其稳定性,维持土壤肥力方面具有重要作用。研究表明[6],土壤有机碳库储量与水稳性团聚体关系密切。有机碳含量随团聚体粒径的增大而增加,且大团聚体比微团聚体含有更多初期不稳定的新成有机物质[7]。谢锦升等[2]在研究南方红壤裸地植被恢复中认为,有机物质输入的增加促进了团聚体的形成,从而改变了土壤团聚体有机碳含量和分配比例。Yang 等[8]研究认为大团聚体中有机碳含量较高。Six 等[9]研究发现,在 2:1 粘类矿物土壤中,大团聚体中有机碳的含量是微团聚体有机碳含量的 1.6 倍。

土壤有机碳与土壤中的物理团聚过程有着密切的联系,土壤活性有机碳丰富的地方是团聚体形成的"热点"[2, 10-11],而研究土壤有机碳在不同大小团聚体中的分布被认为是研究土壤中碳循环的重要手段[12-13]。以前的研究大多集中于土壤团聚体中有机碳库的分布[14-17],但很少对坡耕地不同植被恢复类型提高土壤水稳性团聚体中有机碳含量在侵蚀退化土壤增碳中的作用进行研究。因此,本研究是以黄土高原侵蚀坡地景观为对象,定量评价典型地区不同植被恢复类型对土壤水稳性团聚体含量在土壤增碳中的作用,为侵蚀退化土壤的生态环境恢复和土壤增碳提供基础数据。

1 材料与方法

1.1 研究区概况

本研究分别在黄土高原丘陵区的绥德、吴旗和宜川 3 个区域进行调查采样。3 个研究区域在气温、降水、植被类型和土壤类型上均有差异。其中绥德县韭园沟(水土保持监测示范区,37°49′ N、110°24′ E)海拔 820 ~ 1180 m,年均气温 10.2℃,年降水量 470 mm,属温带干旱半干旱大陆性季风气候,土壤类型主要为黄绵土和黑垆土,主要植被类型包括油松、洋槐、紫花苜蓿、柠条等。吴旗(退耕还林示范带,36°93′ N、108°22′ E)海拔 860 ~ 1200 m,年均气温 7.8℃,年降水量 570 mm,属暖温带半干旱大陆性季风气候,土壤类型主要为黄绵土,主要植被类型为柠条、油松、山杏、刺槐、沙棘、苜蓿等。宜川铁龙湾林场(次生林林场,35°39′ N、110°06′ E)海拔 860 ~ 1200 m,年均气温 9.8℃,年降水量 570.4 mm,属暖温带半干旱大陆性季风气候,土壤类型为灰褐色森林土,主要植被类型有油松、白桦、山杨、辽东栎、胡颓子、黄刺梅、忍冬、柠条、狼牙刺、白草、羊胡草等。

1.2 样地选择与采样

根据黄土高原不同土壤类型、植被恢复典型区域,我们因地制宜选择了坡度小于 30°的退耕坡地进行采样(表 1)。采样时间为 2005 年 11 月。在各区域选定典型植物群落坡地后,分别在每个坡地的坡上部、坡中部和坡下部的各植被恢复类型下,沿与坡面垂直方向直线布设 3 个采样点(绥德、吴旗和宜川分别采集了 27、27 和 36 个样品),去除土壤表层植被枯落物(不扰动表层土壤),用铝盒(20 cm ×10 cm ×5 cm)采集表层 0—5 cm 原状土,然后将各植被下采集的 3 个土样充分混均,根据四分法,将部分土样带回实验室。待土样室内风干后,取部分

表1 3个研究区域植被分布类型基本情况

Table 1 Basic information of distribution of vegetation types in 3 study regions

绥德韭园沟 Suide Jiuyuangou	吴旗退耕示范带 Wuqi convert cultivated land into forests demonstration zone	宜川铁龙湾林场 Yichuan Tielongwan forest centre
苜蓿、柠条、油松 Alfalfa, *Caragana*, *Pinus tabulaeformis*	苜蓿、沙棘、刺槐 Alfalfa, *Hippophae*, Locust tree	白草、羊胡草、狼牙刺、油松 *Pennisetum flaccidum*, *Bothriochloa ischemum*(L.) Keng, *Sophora viciifolia*, *Pinus tabulaeformis*

土样做团聚体分析,另取部分土样研磨过0.25 mm筛,测定其有机碳含量。同时,在每个研究区域采样的坡地附近采集耕作状态的农田土壤作对照(绥德、吴旗和宜川共采集9个样品)。

1.3 样品分析

土壤有机碳及各级团聚体内有机碳(重铬酸钾容量法—外加热法)按照鲁如坤主编的《土壤农业化学分析》一书中介绍的方法测定[18]。

水稳性团聚体分级采用湿筛法[15]。具体操作方法为:取100 g土样于铺有滤纸的表面皿上,用滴管缓慢地从滤纸下面加去离子水,直至土壤水分达到田间持水量+5%,静置30 min(土壤质地过粘需延长时间)使土样完全湿润,而后将土样置于4℃冰箱过夜。振筛通过土壤内部的空气压力导致团聚体破碎,湿润土壤可以降低稳定性对振筛的抵抗。样品准备过筛前预先在水中浸泡5 min,使团聚体中残留的空气排出,最大量减少空气对团聚体结构的破坏。振筛时土样通过2 mm、0.25 mm、0.053 mm系列筛。手工振动套筛,上下振幅3 cm,每分钟25次手工振筛,振动时间为2 min。振筛后,将2 mm筛上的水中悬浮枯落物、根系等杂质捞出(即非土壤有机质物质),然后将套筛取出,水流尽后,依次将各筛上的土壤颗粒冲洗到铝盘中,冲洗过程中尽量不破坏团粒结构。最后将土样在50℃过夜烘干,称重,计算各粒级团聚体的质量百分比,并将土样储存于玻璃瓶。

1.4 数据统计分析

1)土壤有机碳储量 土壤有机碳密度是指单位面积一定深度的土层中土壤有机碳的储量,由于排除了面积因素的影响而以土体体积为基础进行计算,土壤碳密度已成为评价和衡量土壤中有机碳储量的一个极其重要的指标[19]。

某一土层i的有机碳密度SOC_i(C kg/m^2)的计算公式如下:

$$SOC_i = C_i D_i E_i (1 - G_i)/10 \quad (1)$$

式中:C_i为土壤有机碳含量(%);D_i为容重(g/cm^3);E_i为土层厚度(cm);G_i为大于2 mm的石砾所占的体积百分比(%)。

如果某一土体的剖面由k层组成,那么该剖面的有机碳密度SOC_t的计算公式为:

$$SOC_t = \sum_{i=1}^{k} SOC_i = \sum_{i=1}^{k} C_i D_i E_i (1 - G_i)/10 \quad (2)$$

不同类型土壤的有机碳储量等于该类型土壤的有机碳密度与其面积的乘积。

2)土壤各粒级团聚体碳总量占土壤有机碳总储量的百分含量 根据土壤容重,计算出1 m^{2}面积内,深度为5 cm的土壤总质量,然后根据土壤中各粒级团聚体百分含量和各粒级团聚体碳含量计算出各粒级团聚体碳总量,得出土壤各粒级团聚体碳总量占土壤有机碳总储量的百分含量。

3)各样地土壤性状值均为3次重复。采用Excel 2003进行数据处理。

2 结果与分析

2.1 不同植被恢复类型对土壤水稳性团聚体含量的影响

由表2可知,绥德韭园沟>2 mm的土壤大团聚体含量由高到低依次为油松>柠条>苜蓿>农地,分别是农地的4.7、2.7、1.9倍;2~0.25 mm的土壤小团聚体含量的大小顺序为柠条>苜蓿>农地>油松;土壤0.25~0.053 mm微团聚体含量表现为柠条>苜蓿>农地>油松,与小团聚体含量顺序一致;土壤<0.053 mm粉砂含量的大小顺序是农地>苜蓿>柠条>油松,与大团聚体含量的顺序相反;各植被土壤中>0.25 mm团聚体含量大小依次是油松>柠条>苜蓿>农地,油松、柠条和苜蓿分别比农田提高了177%、132%和68%。土壤中>0.25mm团聚体含量在乔木下大于灌木下的含量,可能是由于乔木和草本混合生长,草类植被对改善

土壤性质起到了一定的作用。

在吴旗退耕示范区,不同植被下 >2 mm 的土壤大团聚体含量大小顺序是苜蓿 > 沙棘 > 刺槐 > 农地；2 ～ 0.25 mm 小团聚体含量高低为沙棘 > 苜蓿 > 农地 > 刺槐；0.25 ～ 0.053 mm 土壤微团聚体含量的顺序为刺槐 > 农地 > 沙棘 > 苜蓿；>0.25 mm 团聚体的含量依次是苜蓿 > 沙棘 > 农地 > 刺槐。苜蓿和沙棘分别比农地高 48% 和 41%。以上数据表明,草类植被的恢复显著提高了 >2 mm 大团聚体含量,而土壤小团聚体(2 ～ 0.25 mm)则是在灌木植被下含量较高,>0.25 mm 土壤团聚体含量在农地略高于刺槐,可能与农地施肥有关。

表 2　不同植被类型土壤水稳性团聚体分布特征

Table 2　Characteristics of water stable aggregation distribution under different vegetation types

采样地点 Sampling sites	植被类型 Plant types	质量百分比 Quality percentage(%)				
		>2 mm	2 ～ 0.25 mm	0.25 ～ 0.053 mm	<0.053 mm	>0.25 mm
绥德 Suide	苜蓿 Alfalfa	23.63	16.35	17.66	42.36	39.98
	柠条 *Caragana*	32.96	22.23	20.74	24.07	55.19
	油松 *Pinus tabulaeformis*	57.64	8.36	9.16	24.84	66.00
	农地 Cultivated land	12.34	11.46	13.69	62.51	23.80
吴旗 Wuqi	苜蓿 Alfalfa	29.85	17.67	26.08	26.40	47.52
	沙棘 *Hippophae*	21.92	23.30	26.80	27.98	45.22
	刺槐 Locust tree	21.19	8.84	37.12	32.85	30.03
	农地 Cultivated land	19.16	13.01	33.28	34.55	32.17
宜川 Yichuan	白草 *Pennisetum flaccidum*	58.21	25.44	7.60	8.75	83.65
	羊胡草 *Bothriochloa ischemum* (L.) Keng	33.44	33.36	15.20	18.00	66.80
	狼牙刺 *Sophora viciifolia*	22.88	43.67	12.15	21.30	66.55
	油松 *Pinus tabulaeformis*	22.84	32.31	12.91	31.94	55.15
	农地 Cultivated land	16.91	26.02	25.63	31.44	42.93

宜川铁龙湾林场 >2 mm 的土壤大团聚体含量大小顺序是白草 > 羊胡草 > 狼牙刺 > 油松 > 农地；2 ～ 0.25 mm 土壤小团聚体含量大小依次为狼牙刺 > 羊胡草 > 油松 > 农地 > 白草；0.25 ～ 0.053 mm 土壤微团聚体含量高低顺序为农地 > 羊胡草 > 油松 > 狼牙刺 > 白草；>0.25 mm 团聚体含量的顺序依次是白草 > 羊胡草 > 狼牙刺 > 油松 > 农地,分别比农地提高 95%、56%、55% 和 28%。总之,宜川地区草类植被白草的恢复提高 >2 mm 大团聚体含量最明显,而灌木植被下 2 ～ 0.25 mm 土壤小团聚体含量较高。

2.2　不同植被恢复类型下土壤水稳性团聚体中有机碳含量的变化

研究结果表明(图 1a),绥德韭园沟各植被恢复类型下,柠条和油松 >2 mm、2 ～ 0.25 mm 和 0.25 ～ 0.053 mm 土壤团聚体中有机碳含量分别比农地显著提高了 155% 和 99%、350% 和 219%、459% 和 240%,其中柠条植被下 2 ～ 0.25 mm 土壤团聚体有机碳含量最高达 61.13 g/kg。苜蓿下只有在 2 ～ 0.25 mm 粒级团聚体内有机碳含量略高于农地,其他粒级中有机碳含量均低于农地。各植被恢复类型和农地土壤中 2 ～ 0.25 mm 小团聚体有机碳含量最高,而小于 0.053 mm 的粉砂粒中有机碳含量最低。

在吴旗退耕示范区(图 1b),苜蓿、沙棘和刺槐下 2 ～ 0.25 mm 团聚体中有机碳含量比农地分别提高了 130%、85% 和 210%。苜蓿、沙棘、刺槐和农地 >2 mm、0.25 ～ 0.053 mm 和 <0.053 mm 粒级团聚体有机碳的含量都非常接近。各植被恢复类型土壤 2 ～ 0.25 mm 小团聚体有机碳含量(平均为 22.04 g/kg)显著高于其他粒级团聚体的有机碳含量。

宜川铁龙湾林场不同植被恢复类型土壤各粒级团聚体中有机碳含量大小的顺序如图 1c,白草和油

松 > 狼牙刺、羊胡草 > 农地。土壤有机碳含量在不同粒级团聚体中的变化特征是 2 ~ 0.25 mm > 0.25 ~ 0.053 mm >(>2 mm) >(<0.053 mm),其中白草、油松、羊胡草和狼牙刺下 2 ~ 0.25 mm 粒级团聚体中有机碳分别比农地增加了 1130%、1087%、804% 和 724%。

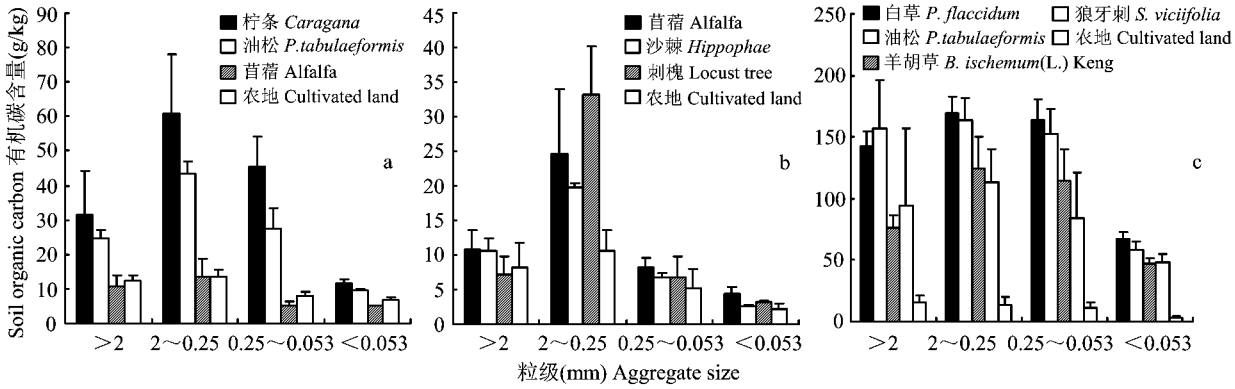

图1 各研究点植被恢复对团聚体有机碳含量的影响

Fig. 1 The effect of vegetation restoration on organic carbon in aggregates in Suide, WuQi and Yichuan sites

2.3 不同植被恢复类型提高各粒级土壤水稳性团聚体中有机碳含量对土壤增碳的贡献

不同植被恢复类型提高各粒级土壤水稳性团聚体中有机碳含量对土壤增碳的贡献如表 3 所示。在绥德韭园沟,油松在提高 >2 mm 土壤水稳性团聚体中有机碳储量最高,比农地增加了 7.24 t/hm^2,占土壤增碳量的 91%;柠条在提高 2 ~ 0.25 mm 土壤大团聚体中的有机碳储量最高,相比农地增加了 7.55 t/hm^2,占土壤增碳量的 43%,其次是提高 >2 mm 土壤水稳性团聚体中有机碳储量,占土壤增碳量的 32%;苜蓿对提高土壤各粒级团聚体中有机碳储量不显著。柠条和油松分别提高了 0.25 ~ 0.053 mm 团聚体中有机碳 5.21 和 0.78 t/hm^2,分别占增碳量的 30% 和 10%,苜蓿没有显著提高这一粒级中的有机碳储量。三种植被恢复类型在 <0.053 mm 粒级均没有显著提高团聚体中有机碳储量。

在吴旗退耕示范带,苜蓿、沙棘和刺槐相对农田提高 2 ~ 0.25 mm 团聚体有机碳储量最大,分别增加了 1.71、1.90 和 0.76 t/hm^2,分别占土壤增碳量的 55%、80% 和 69%,其次是提高 >2 mm 团聚体中有机碳储量,分别占土壤增碳量的 30%、18% 和 -11%,可见苜蓿和沙棘恢复对提高土壤有机碳起重要作用。而各植被恢复类型对 0.25 ~ 0.053 mm 和 <0.053 mm 粒径中有机碳储量的提高不显著,比农地增加了 -0.01 ~ 0.35 t/hm^2。

宜川铁龙湾林场,各植被恢复类型均提高了 >2 mm 和 2 ~ 0.25 mm 土壤团聚体中有机碳储量。其中白草、羊胡草、狼牙刺和油松对 >2 mm 团聚体中有机碳储量较农地分别增加了 41.56、12.09、8.34 和 15.01 t/hm^2,分别占土壤增碳量的 61%、28%、23% 和 29%;2 ~ 0.25 mm 土壤团聚体中有机碳储量分别增加了 20.12、19.93、20.75 和 22.26 t/hm^2,分别占土壤增碳量的 29%、46%、58% 和 42%。0.25 ~ 0.053 mm 和 <0.053 mm 粒径团聚体中有机碳储量提高较小,对土壤增碳量的贡献仅为 3% ~ 17%。

3 讨论

本研究结果进一步证实了我们前期的研究结果[20-21],即黄土高原陡坡地人工植被恢复可显著增加 >2 mm 和 2 ~ 0.25 mm 水稳性团聚体的数量。不同植被恢复类型对 >0.25 mm 水稳性团聚体的数量增加的大小顺序为:在绥德,油松 > 柠条 > 苜蓿 > 农地;在吴旗,苜蓿 > 沙棘 > 农地 > 刺槐;在宜川,白草 > 羊胡草 > 狼牙刺 > 油松 > 农地(表 2)。闫俊华等[22]研究结果也表明,土壤吸持水分能力、土壤的抗侵蚀能力等水文效应与土壤中粒级 >0.25 mm 土壤团聚体的量呈正相关。因此,吴旗和宜川表土层草灌植被土壤水稳性团聚体较乔木和农地土壤稳定,土壤抗侵蚀能力也较强,这与其他研究结果一致[23]。

表 3　不同植被类型恢复提高各粒级土壤水稳性团聚体中有机碳含量对土壤增碳的贡献

Table 3　Contribution of the increase of soil organic carbon (SOC) in water-stable aggregates induced by vegetation restoration to SOC stocks under different vegetation restoration types

采样地点 Sampling sites	植被类型 Vegetation types	不同植被恢复提高水稳性团聚体中有机碳储量(t/hm^2)及其对土壤有机碳储量提高的贡献(%) Amount of SOC storage in water-stable aggregates increased by different vegetation restoration and the contribution of that to SOC stocks				团聚体中有机碳提高总储量 Total amount of increased SOC storage in aggregates (t/hm^2)
		>2 mm	2～0.25 mm	0.25～0.053 mm	<0.053 mm	
绥德 Suide	苜蓿 Alfalfa	0.61 (-167)	0.40 (-110)	-0.10 (29)	-1.27 (348)	-0.36
	柠条 *Caragana*	5.55 (32)	7.55 (43)	5.21 (30)	-0.84 (-5)	17.47
	油松 *Pinus tabulaeformis*	7.24 (91)	1.14 (14)	0.78 (10)	-1.22 (-15)	7.95
吴旗 Wuqi	苜蓿 Alfalfa	0.92 (30)	1.71 (55)	0.22 (7)	0.23 (7)	3.08
	沙棘 *Hippophae*	0.43 (18)	1.90 (80)	0.07 (3)	-0.01 (-1)	2.39
	刺槐 Locust tree	-0.12 (-11)	0.76 (69)	0.35 (32)	0.12 (11)	1.11
宜川 Yichuan	白草 *Pennisetum flaccidum*	41.56 (61)	20.12 (29)	4.60 (7)	2.37 (3)	68.66
	羊胡草 *Bothriochloa ischemum* (L.) Keng	12.09 (28)	19.93 (46)	7.39 (17)	3.82 (9)	43.22
	狼牙刺 *Sophora viciifolia*	8.34 (23)	20.75 (58)	2.88 (8)	4.09 (11)	36.06
	油松 *Pinus tabulaeformis*	15.01 (29)	22.26 (42)	7.29 (14)	7.96 (15)	52.52

注(Note): 括号外的数值表示不同植被恢复提高水稳性团聚体中有机碳储量 Values outside brackets means the amount SOC storage in water-stable aggregates were increased by different vegetation restoration; 括号内的数值表示不同植被恢复提高的水稳性团聚体中有机碳储量对土壤有机碳储量提高的贡献 Values in brackets means the contribution of SOC storage in water-stable aggregates were increased by different vegetation restoration to SOC stocks.

在土壤团聚体形成过程中,有机胶结物质起着十分重要的作用,其形成主要依赖于土壤中各种胶结物质的数量和性质[24]。凋落物是森林土壤有机碳的主要来源之一,苜蓿、白草和羊胡草虽为草本,但每年几乎全部死亡凋落进入土壤,以往研究表明,草本植物残体中的根茎以及深层的残体都有利于有机碳积累[25-26],这与 Jennifer 的研究结果也较为一致[27]。刘梦云等[28]的研究表明,不同土地利用方式下土壤团聚体总量的顺序为天然草地>灌木林地>果园>农地>人工草地,对于不同的用地类型,灌木林地及天然草地有利于形成大粒径的团聚体颗粒,而农地、果园和人工草地形成的团聚体颗粒粒径较小; 灌木林地和草地土壤微团聚体含量较高而果园偏低。李阳兵等[29]的研究指出: >0.25 mm 水稳性团聚体表现为草地>林地>弃耕地>果园>耕地; 林地、草地的土壤表层和亚表层水稳性团聚体以>2mm 为主。因此,在吴旗和宜川 >2mm 和 2～0.25 mm 水稳性团聚体的数量增加的大小顺序分别为苜蓿>沙棘>刺槐>农地和白草>羊胡草>灌木>油松>农地。而对于绥德,油松土壤 >0.25mm 水稳性团聚体含量最大,这可能是由于油松林下有草类植被混合生长,增加了有机物质的投入。同时,由于恢复 20 年后的人工油松林,虽然随着林龄的增加,凋落物分解速率降低[30],但其主根和副主根根系粗壮发达,水平根系形成构架,根分泌物较多。有关研究表明,较为发达的根系可为土壤生物栖息提供更好的场所,并产生更多根系分泌物促进土壤微生物活动,使得有机残体分解更强烈[2,25]。

黄土高原 3 个区域的研究结果表明: 植被恢复后,不同粒径团聚体有机碳含量均明显提高,而>0.25 mm 粒径尤其是 2～0.25 mm 团聚体的有机碳含量最高[31](图 1),这与土壤中游离的轻组物质较多有关。>0.25 mm 团聚体有机碳含量一般高于全土的有机碳含量,表明大团聚体对有机碳具有一定的富集作用[15,32]。0.25～0.053 mm 微团聚体

有机碳含量低于 >0.25 mm 大团聚体的,因为有机质是团聚体形成的主要黏结介质,有机分子与粘粒和阳离子相互胶结形成微团聚体,微团聚体与周围基本粒子或微团聚体之间相互胶结形成大团聚体[32]。同时在大团聚体内部由于颗粒有机质的分解,大团聚体解体也可形成微团聚体[7]从而使微团聚体有机碳含量更低。各研究区域大团聚体有机碳含量变化与 >0.25 mm 水稳性团聚体的数量在不同植被恢复类型下增加的大小顺序一致,即在绥德,油松 > 柠条 > 苜蓿 > 农地; 在吴旗,苜蓿 > 沙棘 > 刺槐 > 农地; 在宜川,白草 > 羊胡草 > 狼牙刺 > 油松 > 农地,这与上述提到的土壤中各种胶结物质的投入量和性质有关,同时也说明大团聚体有机碳与土壤有机碳总量成正比[2,31]。在植被恢复过程中, > 0.25 mm 大团聚体有机碳含量的增幅明显快于 0.25 ~ 0.053 mm 微团聚体和 <0.053 mm 粘砂中有机碳含量的增幅(表3),说明新增加的碳可能首先出现在大团聚体中,因而增加了大团聚体中有机碳的分配比例。Gale 等也认为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[33]。同时微团聚体通过有机质的胶结形成大团聚体而减少了微团聚体有机碳的比例[32],从而增加了大团聚体有机碳的分配比例。

4 结论

1) 黄土高原侵蚀陡坡退耕地人工植被恢复后,显著提高了 >2 mm 和 2 ~ 0.25 mm 两个粒级的水稳性团聚体及其有机碳的含量,但不同植被恢复类型的作用在3个地区有所不同。与农地相比,在绥德,油松、柠条、苜蓿分别使 >2 mm 和 2 ~ 0.25 mm 粒级的水稳性团聚体中的有机碳含量提高了 99%、153%、-13% 和 219%、350%、1%; 在吴旗,种植苜蓿、沙棘、刺槐分别提高了 30%、28%、-13% 和 130%、85%、210%; 在宜川,白草、羊胡草、狼牙刺和油松使 >2 mm 和 2 ~ 0.25 mm 粒级的水稳性团聚体中的有机碳含量提高了 840%、405%、517%、932% 和 1130%、804%、724%、1087%。草灌植被对土壤水稳性团聚体的分布及其有机碳含量的影响较大。

2) 黄土高原3个研究区域的结果表明: 植被恢复后 >0.25 mm 粒径团聚体有机碳含量显著提高,其中 0.25 ~ 2 mm 团聚体中有机碳储量提高最大(平均占土壤增碳量的 49%),其次是提高 >2 mm(平均占土壤增碳量的 43%)和 0.25 ~ 0.053 mm(平均占土壤增碳量的 16%)土壤团聚体中有机碳储量, <0.053 mm 粘砂中有机碳储量提高最小(平均占土壤增碳量的 9%)。除绥德的苜蓿植被外,其他研究点草灌植被恢复类型均对提高黄土高原土壤水稳性团聚体含量和土壤碳库起重要作用。

参 考 文 献:

[1] 苏静, 赵世伟. 植被恢复对土壤团聚体分布及有机碳、全氮含量的影响[J]. 水土保持研究, 2005, 12(3): 44-46.
Su J, Zhao S W. Influence of vegetation restoration on distribution of aggregate and organic carbon and nitrogen in Loess Plateau[J]. Res. Soil Water Conserv., 2005, 12(3): 44-46.

[2] 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[J]. 生态学报, 2008, 28(2): 702-709.
Xie J S, Yang Y S, Chen G S *et al*. Effects of vegetation restoration on water stability and organic carbon distribution in aggregates of degraded red soil in subtropics of China[J]. Acta Ecol. Sin., 2008, 28(2): 702-709.

[3] 查轩, 唐克丽, 张科利, 等. 植被对土壤特性及土壤侵蚀的影响研究[J]. 水土保持学报, 1992, 6(2): 52-58.
Zha X, Tang K L, Zhang K L *et al*. The impact of vegetation on soil characteristics and soil erosion[J]. J. Soil Water Conserv., 1992, 6(2): 522-58.

[4] 杨建国, 安韶山, 郑粉莉. 宁南山区植被自然恢复中土壤团聚体特征及其与土壤性质关系[J]. 水土保持学报, 2006, 20(1): 72-75.
Yang J G, An S S, Zheng F L. Characteristics of soil water stable aggregates and relationship with soil properties during vegetation rehabilitation in Ningxia Loess Hilly Region[J]. J. Soil Water Conserv., 2006, 20(1): 72-75.

[5] 朱冰冰, 李占斌, 李鹏, 等. 黄丘区植被恢复过程中土壤团粒分形特征及抗蚀性演变[J]. 西安理工大学学报, 2009, 25(4): 377-382.
Zhu B B, Li Z B, Li P *et al*. Research on the fractal features of soil aggregate and dynamic changes in anti-erodibility during the process of vegetation recovery on the Loess hilly areas[J]. J. Xi'an Univ. Technol., 2009, 25(4): 377-382.

[6] Angers D A, Carter M R. Aggregation and organic matter storage in cool, humid agricultural soils [A]. Carter M R, Stewart B A. Structure and organic matter storage in agricultural soils[M]. Boca Raton, FL: CRC Press, 1996. 193-211.

[7] Six J, Elliott E T, Paustian K. Soil macro-aggregate turn over and micro-aggregate formation: A mechanism for C sequestration under no-tillage agriculture[J]. Soil Biol. Biochem., 2000(a), 32: 2099-2103.

[8] Yang Z H, Singh B R, Hansen S. Aggregate associated carbon, nitrogen and sulfur and their ratios in long-term fertilized soils[J]. Soil Till. Res., 2007, 95: 161-171.

[9] Six J, Paustian K, Elliott E T, Combrink C. Soil structure and organic matter Ⅰ. Distribution of aggregate size classes and

aggregate associated carbon[J]. Soil Sci. Soc. Am. J., 2000 (b), 64: 681-689.

[10] Cerdà A. Soil aggregate stability under different mediterranean vegetation types[J]. Catena, 1998, 32: 73-86.

[11] Plante A F, Conant R T, Stewart C E *et al*. Impact of soil texture on the distribution of soil organic matter in physical and chemical fractions[J]. Soil Sci. Soc. Am. J., 2006, 70: 287-296.

[12] Christensen B T. Physical fractionation of soil and organic matter in primary particle size and density separates[J]. Adv. Soil Sci., 1992, 20: 1289.

[13] Christensen B T. Carbon in primary and secondary organ mineral complexes[A]. Cater M R, Stewart A B. Structure and organic matter storage in agricultural soils[M]. Boca Raton, Florida: CRC Press, 1996. 97-165.

[14] Six J, Conant R T, Paul E A *et al*. Stabilization mechanisms of soil organic matter: Implications for C-saturation of soils[J]. Plant Soil, 2002, 41: 155-176.

[15] Cambardella C A, Elliot E T. Carbon and nitrogen distribution in aggregates from cultivated and nature grassland soils[J]. Soil Sci. Soc. Am. J., 1993, 57: 1071-1076.

[16] Lorenz K, Lal R, Shipitalo M J. Stabilization of organic carbon in chemically separated pools in no-till and meadow soils in northern Appalachia[J]. Geoderma, 2006, 137: 205-211.

[17] Lorenz K, Lal R, Shipitalo M J. Chemical stabilization of organic carbon pools in particle size fractions in no-till and meadow soils [J]. Biol. Fert. Soils, 2008, 44: 1043-1051.

[18] 鲁如坤. 土壤农业化学分析方法[M]. 北京: 中国农业科技出版社, 1999.
Lu R K. Analytical methods for soil and agricultural chemistry [M]. Beijing: China Agricultural Science and Technology Press, 1999.

[19] 解宪丽, 孙波, 周慧珍, 等. 中国土壤有机碳密度和储量的估算与空间分布分析[J]. 土壤学报, 2004, 41(1): 35-43.
Xie X L, Sun B, Zhou H Z *et al*. Organic carbon density and storage soils of China and spatial analysis[J]. Acta Pedol. Sin., 2004, 41(1): 35-43.

[20] 李勇, 徐晓琴, 朱显谟, 田积莹. 黄土高原植物根系强化土壤渗透力的有效性[J]. 科学通报, 1992, 37(4): 366-369.
Li Y, Xu X Q, Zhu X M, Tian J Y. Effectivenee of plant roots on increasing the soil premeability on the Loess Plateau [J]. Chin. Sci. Bull., 1992, 37(4): 366-369.

[21] 李勇. 黄土高原植物根系与土壤抗冲性 [M]. 北京: 科学出版社, 1995.
Li Y. Plant roots and soil anti-scouribility on the Loess Plateau [M]. Beijing: Science Press, 1995.

[22] 闫俊华, 周国逸. 鼎湖山三种演替群落与其土壤结构及某些水文效应耦合研究[J]. 地球科学进展, 2000, 11(1): 6-11.
Yan J H, Zhou G Y. The coupling research of three serial community and theirs soil structure and some hydrologic effects in Dinghu Mountain[J]. Adv. Earth Sci., 2000, 11(1): 6-11.

[23] 周纯亮, 吴明. 中亚热带四种森林土壤团聚体及其有机碳分布特征[J]. 土壤, 2011, 43(3): 406-410.
Zhou C L, Wu M. Distribution of soil aggregates and SOC of aggregates under four forest types in mid-subtropics[J]. Soils, 2011, 43(3): 406-410.

[24] 王清奎, 汪思龙. 土壤团聚体形成与稳定机制及影响因素[J]. 土壤通报, 2005, 36(3): 415-421.
Wang Q K, Wang S L. Forming and stable mechanism of soil aggregate and influencing factors[J]. Chin. J. Soil Sci., 2005, 36(3): 415-421.

[25] 宋日, 吴春胜, 郭继勋. 东北草原植物残体腐解动态研究[J]. 草业学报, 2002, 11(2): 105-108.
Song R, Wu C S, Guo J X. Decomposition dynamics of plant residues in natural meadow in Northeast China[J]. Acta Pratac. Sci., 2002, 11(2): 105-108.

[26] 郑子成, 王永东, 李廷轩, 等. 退耕对土壤团聚体稳定性及有机碳分布的影响[J]. 自然资源学报, 2011, 26 (1): 119-126.
Zheng Z C, Wang Y D, Li T X *et al*. Effect of abandoned cropland on stability and distributions of organic carbon in soil aggregates[J]. J. Nat. Resour., 2011, 26(1): 119-126.

[27] Jennifer S P. Changes in soil carbon and nitrogen after contrasting land-use transitions in North Eastern Costa Rica [J]. Ecosystems, 2004, 7: 134-146.

[28] 刘梦云, 常庆瑞, 安韶山, 郑顺安. 土地利用方式对土壤团聚体及微团聚体的影响[J]. 中国农学通报, 2005, 21(11): 247-250.
Liu M Y, Chang Q R, An S S, Zheng S A. Features of soil aggregate and tiny aggregate under different land use[J]. Chin. Agric. Sci. Bull., 2005, 21(11): 247-250.

[29] 李阳兵, 谢德体. 不同土地利用方式对岩溶山地土壤团粒结构的影响[J]. 水土保持学报, 2001, 15(4): 122-125.
Li Y B, Xie D T. Features of water-stable aggregate structure under different land use in Karst Mountains[J]. J. Soil Water Conserv., 2001, 15(4): 122-125.

[30] 徐扬. 抚育间伐对油松人工林凋落物分解影响的研究 [D]. 北京: 北京林业大学硕士学位论文, 2007.
Xu Y. The effects of thinning on litter decomposition of *Pinus tabulaeformis* plantation [D]. Beijing: Ms thesis, Beijing Forestry University, 2007.

[31] 毛艳玲, 杨玉盛, 刑世和, 等. 土地利用方式对土壤水稳性团聚体有机碳的影响[J]. 水土保持学报, 2008, 22(4): 132-137.
Mao Y L, Yang Y S, Xing S H *et al*. Effects of land use on soil organic carbon in water-stable aggregates [J]. J. Soil Water Conserv., 2008, 22(4): 132-137.

[32] Tisdall J M, Oades J M. Organic matter and water-stable aggregates[J]. J. Soil Sci., 1982, 33: 141-163.

[33] Gale W J, Cambardella C A, Bailey T B. Root-derived carbon and the formation and stabilization of aggregates[J]. Soil Sci. Soc. Am. J., 2000, 64: 201-207.