

ISSN 1000-0933
CN 11-2031/Q

生态学报

Acta Ecologica Sinica



第33卷 第9期 Vol.33 No.9 **2013**

中国生态学学会
中国科学院生态环境研究中心
科学出版社

主办
出版



中国科学院科学出版基金资助出版

生态学报

(SHENGTAI XUEBAO)

第 33 卷 第 9 期

2013 年 5 月 (半月刊)

目 次

前沿理论与学科综述

- 可持续发展研究的学科动向 茶 娜, 邬建国, 于润冰 (2637)
- 代谢异速生长理论及其在微生物生态学领域的应用 贺纪正, 曹 鹏, 郑袁明 (2645)
- 植物内生菌促进宿主氮吸收与代谢研究进展 杨 波, 陈 晏, 李 霞, 等 (2656)
- 中国园林生态学发展综述 于艺婧, 马锦义, 袁韵珏 (2665)

个体与基础生态

- 基于最小限制水分范围评价不同耕作方式对土壤有机碳的影响 陈学文, 王 农, 时秀焕, 等 (2676)
- 草原土壤有机碳含量的控制因素 陶 贞, 次旦朗杰, 张胜华, 等 (2684)
- 外源钙离子与南方菟丝子寄生对喜旱莲子草茎形态结构的影响 车秀霞, 陈惠萍, 严巧娣, 等 (2695)
- 毛竹出笋后快速生长期茎秆色素含量与反射光谱的相关性 刘 琳, 王玉魁, 王星星, 等 (2703)
- 巴郎山异型柳叶片功能性状及性状间关系对海拔的响应 冯秋红, 程瑞梅, 史作民, 等 (2712)
- 外源磷或有机质对板蓝根吸收转运砷的影响 高宁大, 耿丽平, 赵全利, 等 (2719)
- 不同猎物饲喂对南方小花蝽捕食量和喜好性的影响 张昌容, 郅军锐, 莫利锋 (2728)
- 捕食风险对东方田鼠功能反应格局的作用 陶双伦, 杨锡福, 姚小燕, 等 (2734)
- 基于线粒体细胞色素 c 氧化酶亚基 I 基因序列的帘蛤科贝类分子系统发育研究
..... 程汉良, 彭永兴, 董志国, 等 (2744)
- 不同实验生态环境对海刺猬遮蔽行为的影响 常亚青, 李云霞, 罗世滨, 等 (2754)

种群、群落和生态系统

- 基于 RS 与 GIS 的赣江上游流域生态系统服务价值变化 陈美球, 赵宝华, 罗志军, 等 (2761)
- 长江口及邻近海域富营养化指标响应变量参照状态的确定 郑丙辉, 朱延忠, 刘录三, 等 (2768)
- 长江口及邻近海域富营养化指标原因变量参照状态的确定 郑丙辉, 周 娟, 刘录三, 等 (2780)
- 鸭绿江口及邻近海域生物群落的胁迫响应 宋 伦, 王年斌, 杨国军, 等 (2790)
- 杭州西溪湿地大型底栖动物群落特征及与环境因子的关系 陆 强, 陈慧丽, 邵晓阳, 等 (2803)
- 生物土壤结皮对荒漠土壤线虫群落的影响 刘艳梅, 李新荣, 赵 昕, 等 (2816)
- 大棚模拟条件下角倍蚜春季迁飞数量动态及其与气象因子的关系 李 杨, 杨子祥, 陈晓鸣, 等 (2825)
- 宁南山区植被恢复对土壤团聚体水稳定及有机碳粒径分布的影响 程 曼, 朱秋莲, 刘 雷, 等 (2835)
- 1958—2008 年太白山太白红杉林碳循环模拟 李 亮, 何晓军, 胡理乐, 等 (2845)
- 不同干扰对黄土区典型草原物种多样性和生物量的影响 陈芙蓉, 程积民, 刘 伟, 等 (2856)
- 乌拉山自然保护区白桦种群的年龄结构和点格局分析 胡尔查, 王晓江, 张文军, 等 (2867)
- 西南干旱对哀牢山常绿阔叶林凋落物及叶面积指数的影响 杞金华, 章永江, 张一平, 等 (2877)
- 阿尔泰山小东沟林区乔木物种丰富度空间分布规律 井学辉, 曹 磊, 臧润国 (2886)

景观、区域和全球生态

太湖流域生态风险评价 许妍,高俊峰,郭建科 (2896)

基于 GIS 的关中-天水经济区土地生态系统固碳释氧价值评价 周自翔,李晶,冯雪铭 (2907)

资源与产业生态

淹水条件下控释氮肥对污染红壤中重金属有效性的影响..... 梁佩筠,许超,吴启堂,等 (2919)

研究简报

高温强光对小麦叶绿体 Deg1 蛋白酶和 D1 蛋白的影响及水杨酸的调节作用
..... 郑静静,赵会杰,胡巍巍,等 (2930)

不同 CO₂ 浓度变化下干旱对冬小麦叶面积指数的影响差异 李小涵,武建军,吕爱锋,等 (2936)

期刊基本参数:CN 11-2031/Q * 1981 * m * 16 * 308 * zh * P * ¥90.00 * 1510 * 32 * 2013-05



封面图说: 肥美的当雄草原——高寒草甸是在寒冷环境条件下,发育在高原和高山的一种草地类型。其植被组成主要是多年生草本植物,冬季往往有冰雪覆盖,土壤主要为高山草甸土。当雄草原位于藏北高原,藏南与藏北的交界地带,海拔高度为 5200—4300m,受海洋性气候影响,呈现高原亚干旱气候,年平均降水量 293—430mm。主要有小嵩草草甸、藏北嵩草草甸和沼泽草甸等,覆盖度为 60%—90%,其中小嵩草草甸分布面积最大,连片分布于广阔的高原面上。高寒草甸草层低,草质良好,是畜牧业优良的夏季牧场。

彩图及图说提供: 陈建伟教授 北京林业大学 E-mail: cites.chenjw@163.com

DOI: 10.5846/stxb201202090169

程曼, 朱秋莲, 刘雷, 安韶山. 宁南山区植被恢复对土壤团聚体水稳定及有机碳粒径分布的影响. 生态学报, 2013, 33(9): 2835-2844.

Cheng M, Zhu Q L, Liu L, An S S. Effects of vegetation on soil aggregate stability and organic carbon sequestration in the Ningxia Loess Hilly Region of northwest China. Acta Ecologica Sinica, 2013, 33(9): 2835-2844.

宁南山区植被恢复对土壤团聚体水稳定及 有机碳粒径分布的影响

程 曼^{1,2}, 朱秋莲², 刘 雷², 安韶山^{1,2,*}

(1. 西北农林科技大学 资源环境学院, 杨陵 712100;

2. 西北农林科技大学 黄土高原土壤侵蚀与旱地农业国家重点实验室, 杨陵 712100)

摘要: 土壤团聚作用和土壤有机碳固定之间密切相关。对宁南山区不同植被恢复措施和年限下土壤团聚体粒径分布及稳定性、土壤团聚体中有机碳及其组分分布进行了研究, 探讨了有机碳及其组分对植被恢复的响应。结果表明, 不同植被恢复措施下, 土壤团聚体粒径分布表现为“V”字分布: $> 5\text{ mm}$ 和 $< 0.25\text{ mm}$ 这两个粒径的团聚体含量最多, $5\text{—}2\text{ mm}$ 、 $1\text{—}0.25\text{ mm}$ 团聚体的含量次之, $2\text{—}1\text{ mm}$ 粒径的团聚体含量最少。坡耕地的平均重量直径(MWD)最低, 为 1.4, 其他植被恢复措施下土壤的平均重量直径 MWD 在 1.9—3.1 之间。不同的植被恢复措施下, $0\text{—}20\text{ cm}$ 土层和 $20\text{—}40\text{ cm}$ 土层全土有机碳含量在 7.4—17.7 g/kg 之间、微生物碳含量分布在 50.3—664.7 mg/kg 之间、腐殖质碳含量在 0.9—2.5 g/kg 之间。胡敏酸碳含量分布在 0.2—0.6 g/kg, 富里酸碳含量在 0.6—1.9 g/kg 之间。全土有机碳、微生物碳、腐殖质碳、富里酸碳均为坡耕地最低, 其他植被恢复措施的有机碳、微生物碳、腐殖质碳、富里酸碳含量分别是坡耕地的 1.1—2.3 倍、2.0—8.4 倍、1.0—2.0 倍、1.2—2.4 倍。不同粒径团聚体有机碳相比较, 大多呈现中间高两边低的变化趋势, 最大值出现在中间粒径, 即 $5\text{—}2\text{ mm}$ 、 $2\text{—}1\text{ mm}$ 、 $1\text{—}0.25\text{ mm}$ 这 3 个粒径。逐步回归表明, $5\text{—}2\text{ mm}$ 团聚体和 $1\text{—}0.25\text{ mm}$ 团聚体有机碳含量的提高有助于土壤水稳性团聚体的形成。研究结果表明, 植被恢复提高了土壤团聚体有机碳含量, 在碳形态上, 富里酸碳和微生物生物量碳对不同植被恢复措施的敏感度较高, 胡敏酸碳含量则相对稳定。

关键词: 碳组分; 宁南山区; 植被恢复; 团聚体稳定性

Effects of vegetation on soil aggregate stability and organic carbon sequestration in the Ningxia Loess Hilly Region of northwest China

CHENG Man^{1,2}, ZHU Qiulian², LIU Lei², AN Shaoshan^{1,2,*}

1 College of Resource and Environment, Northwest Agriculture and Forestry University, Yangling 712100, China

2 State Key Laboratory of Soil Erosion and Dryland Farming on the Loess Plateau, Northwest Agriculture and Forestry University, Yangling 712100, China

Abstract: A close correlation exists between soil aggregation and soil organic carbon sequestration. Soil organic matter is the main material needed in the formation of soil aggregates and soil aggregates provide a place for soil organic matter to sequester carbon. The effects of different revegetation types on the aggregation of soil particles, the stability of soil aggregates, as well as carbon and fractions in soil aggregates were studied in a loess hilly-gully area; soil organic carbon and fraction's micro-response to different revegetation types are discussed. The results show the distribution of soil aggregates has a “V” distribution under a variety of revegetation and restoration measures. Small ($< 0.25\text{ mm}$) and large ($> 5.0\text{ mm}$) particle sizes form the most aggregates. The next largest aggregate size classes were $2\text{—}5\text{ mm}$ and $0.25\text{—}1.0\text{ mm}$,

基金项目: 国家自然科学基金面上项目(40971171, 41171226); 西北农林科技大学优秀人才科研专项计划资助(QN2011049)

收稿日期: 2012-02-09; **修订日期:** 2012-11-15

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

while the 1—2 mm size class had the fewest aggregates. The mean weight diameter (MWD) of cropland is approximately 1.4. After land is revegetated the MWD increased to 1.9—3.1 in the soil indicating soil aggregate stability and porosity increased significantly. The aggregate stability of an area of natural grassland and also in a stand of 25-year-old *Caragana korshinskii* Kom. was higher than aggregate stability in a stand of 15-year-old *C. korshinskii* Kom. We measured various soil conditions under different revegetation types and found differences between the 0—20 cm and 20—40 cm soil layers. The soil organic carbon content was 7.4 and 17.7 g/kg; the microbial carbon content was 50.3 and 664.7 mg/kg; the carbon content of humus was 0.9 and 2.5 g/kg; the content of humic acid carbon was 0.2 and 0.6 g/kg; and the fulvic acid was 0.6 and 1.9 g/kg for the 0—20 cm and 20—40 cm soil layers, respectively. The organic carbon and the fraction in 0—20 cm soil layer were higher than measurements in 20—40 cm soil layer. The content of organic carbon, microbial carbon, humus carbon and fulvic acid carbon in the soil are the lowest in cropland; these contents under other revegetation types were 1.1—2.3 times, 2.0—8.4 times, 1.0—2.0 times and 1.2—2.4 times higher than those of cropland soils, respectively. Most of the soil organic carbon content was concentrated on intermediate sized aggregates (2—5 mm, 1—2 mm, 0.25—1.0 mm). The result of stepwise regression analysis show the higher the content of soil organic carbon was in the small and large particles (0.25—1.0 mm and 2—5 mm diameter aggregate, respectively) the more stable the water-stable aggregates were. The findings suggest vegetation restoration improved the soil organic carbon aggregate content, and in terms of forms of soil carbon, soil microbial biomass carbon and fulvic acid carbon, their content in the soil was sensitive to changes in aggregate size, while humic acid carbon was stable regardless of aggregate size.

Key Words: carbon fraction; Ningxia Loess Hills Region; revegetation; stability of soil aggregates

土壤是陆地生态系统中最大的碳库,其中碳的循环周转与全球气候和生态环境变化有密切联系^[1-3]。土壤固碳是一个动力学积累和稳定的过程,有机碳的转化与稳定和有机碳对于微生物分解的抗性是土壤固碳容量的实质^[4]。土壤团聚体是由矿物颗粒和有机物在土壤成分的参与下形成的不同尺度大小的多孔结构单元,是土壤中物质和能量转化的场所,稳定的团聚体为土壤有机碳提供了抗微生物分解的物理保护。可见,土壤固碳功能和土壤团聚过程相伴而生,二者相互促进,进一步研究土壤团聚体稳定性和团聚体中碳及碳组分的关系,对阐明土壤团聚体和碳库固定的相关具有十分重要的科学意义。

有关植被恢复的研究已有很多报道,结果显示植被恢复可提高土壤有机碳含量^[5-6]。宁南山区生态环境脆弱,植被恢复是该区进行生态恢复的主要内容,一些研究先后就该区植被恢复措施下土壤的有机碳和团聚体的关系进行了探讨^[7-8],但是土壤有机质是混合异质体,有机碳组分对植被恢复的响应敏感程度、团聚体对有机碳的保护机制等这些问题仍不完全清楚,因此将土壤有机质形态微观化,研究植被恢复对土壤有机碳组分分布及其与团聚体稳定性的关系有助于揭示黄土丘陵区的碳固定及恢复机制。本文对不同植被恢复措施下土壤进行团聚体分级,将团聚体分级和有机碳的化学分组相结合、团聚体分组和有机碳的生物学稳定性分组结合,研究不同大小团聚体有机碳、腐殖质碳、微生物生物量碳分布特征,从微观的角度探索土壤固碳和土壤团聚体的相关,进而为该区植被恢复的可持续提供理论依据。

1 材料和方法

1.1 研究区概况及样地设置

研究区域位于固原市东部黄土丘陵区的河川乡上黄村,属泾河水系支流小川河的中游。下伏基岩为中生代砂岩(只在主河道少量出露),第三纪晚期红土和第四纪新老黄土先后堆积其上。地理位置 35°59′—36°03′ N, 106°26′—106°30′ E, 海拔 1534—1822 m, 年均降水量 420 mm, 年均气温 7 °C, 干燥度 1.5—2.0, 属半干旱中温带向暖温带过渡季风气候。试区沟坡地占 90%, 平缓台地仅占 8%, 而且 51% 的土地坡度在 15°—20° 之间, 总土地面积 7.6 km²。研究区由小川河分为两部分, 东部为梁状丘陵, 地形起伏较大, 西部自东向西依次为台、坪、梁地形, 较为开阔。研究区的土壤类型主要是黄土母质上发育的淡黑垆土和黄绵土, 土壤质地为中

壤土。根据研究区植被恢复措施进行样地布设, 所调查样地的植被恢复类型包括天然草地 *Natural grassland* (N. G.)、15a 柠条(15-year-old *Caragana korshinskii* Kom. C. K. 15)、25a 柠条(25-year-old *Caragana korshinskii* Kom. C. K. 25)以及坡耕地 *Cropland* (Cr.)。

天然草地为封育 10a 的草地(封育前为放牧草地), 盖度为 69%, 100 cm×100 cm 的地上总生物量为 110 g, 主要植物为长芒草(*Stipa bungeana* Trin.), 间有百里香(*Thymus mongolicus*)、猪毛蒿(*Artemisia scoparia* Waldst. et Kit.)、冷蒿(*Artemisia frigida* Willd. Sp. Pl.)、阿尔泰狗娃花(*Heteropappus altaicus* (Willd) Novopokr)、翻白草(*Potentilla discolor*)等草本植物。15 年柠条为 1995 年种植的灌丛, 盖度为 40%, 平均单枝生物量为 960 g, 高度 130 cm, 枝下高 22 cm, 株幅为 190 cm×110 cm, 草本层以长芒草为主。25 年柠条为 1985 年种植的灌丛, 盖度为 64%, 平均单枝生物量为 4640 g, 高度 160 cm, 枝下高 75 cm, 株幅为 140 cm×150 cm, 草本层以长芒草为主。坡耕地主要种植小麦(*Triticum aestivum* Linn)、玉米(*Zea mays*)、荞麦(*Fagopyrum esculentum*)。

1.2 土壤样品的采集和分析

于 2010 年 7 月中旬在每种植被恢复方式下, 沿等高线划分为坡上、中、下分别建立 3 个 10 m×10 m 大小的样地, 沿坡长划分为 3 个 3.3 m×10 m 小样区, 在每个样区内, 在 0—20 cm 和 20—40 cm 两个土层分别采取土样, 野外重复 2 次, 每个植被恢复类型下, 获得 36 个土壤原状土样, 存于硬质塑料饭盒中, 带回实验站进行自然风干, 同时, 采集环刀样品, 加盖密封后带回室内进行室内分析。原状土风干后利用湿筛法^[9]测定水稳性团聚体含量, 得到 > 5 mm、5—2 mm、2—1 mm、1—0.25 mm、0—0.25 mm 粒径的团聚体后, 记录各粒径团聚体含量并收集团聚体样品。本文采用平均重量直径(mean weight diameter, MWD)来衡量团聚体稳定性:

$$MWD = \frac{\sum_{i=1}^n \bar{x}_i \times w_i}{\sum_{i=1}^n w_i}$$

式中, \bar{x}_i 为某级团聚体的平均直径, w_i 为 i 粒级团聚体重量所占的比例。

土壤有机碳及其组分的测定:(1)重铬酸钾容量法测定土壤有机质含量;(2)利用焦磷酸钠-氢氧化钠混合液提取法^[10]测定土壤团聚体样品的腐殖质及其组分含量;(3)氯仿熏蒸-K₂SO₄ 浸提法^[11]测定土壤微生物碳含量。

1.3 数据统计分析

所有试验数据通过 ANOVA 变异分析程序进行统计分析, 采用邓肯新复检验法(Duncan's New Multiple Range Test)对不同植被恢复措施的差异进行统计, 不同植被恢复措施在 5% 的概率水平视为显著; 通过逐步回归分析和回归系数来描述团聚体稳定性和不同粒级碳组分的相关程度。所有数据使用 Excel 2007 和 SAS 8.0 进行数据处理。

2 结果与分析

2.1 不同植被恢复措施对土壤团聚体大小及稳定性的影响

由表 1 可以看出, 湿筛法测定得到的土壤团聚体粒径分布呈中间低两边高的趋势, >5 mm 和 0—0.25 mm 这两个粒径的团聚体为优势粒径, 二者之和在 65% 以上; 5—2 mm 和 1—0.25 mm 居中; 2—1 mm 这一粒径的团聚体含量最少, 为 9% 以下。植被恢复后, 天然草地、25a 柠条、15a 柠条在 0—20 cm 土层中 > 5 mm 团聚体百分含量分别是坡耕地的 2.6、2.2、2.3 倍, 20—40 cm 土层的分别是坡耕地的 2.9、2.8、2.4 倍。这说明灌木林地和天然草地对土壤水稳性有很好的改善作用, 且天然草地更为有利。

土壤平均重量直径(MWD)是反映土壤团聚体大小分布状况的常用指标, 其值随大粒径团聚体含量的增大而增大。由表 1 可见, 在 0—40 cm 土层坡耕地的 MWD 约为 1.4, 其他植被恢复措施下土壤的 MWD 在 1.9—3.1 之间, 其中, 在 0—20 cm 土层 MWD 值依次为天然草地>25a 柠条=15a 柠条>坡耕地, 且天然草地和柠条林地之间存在显著性差异($P<0.05$), 25a 柠条和 15a 柠条之间差异不显著($P<0.05$), 坡耕地与其他 3 种

植被恢复措施存在显著性差异 ($P < 0.05$); 20—40 cm 土层则表现为 25a 柠条 > 天然草地 > 15a 柠条 > 坡耕地, 25a 柠条、天然草地、15a 柠条之间无显著性差异 ($P < 0.05$), 三者与坡耕地存在显著性差异 ($P < 0.05$)。这表明坡耕地的土壤团聚体水稳性很差, 无论是天然草地还是人工林地, 土壤团聚体稳定性都有显著提高。

表 1 不同植被恢复下土壤水稳性团聚体粒径分布

Table 1 Composition of water-stable aggregate under different vegetation types

植被恢复 Vegetation type	土层/cm Soil depth	团聚体粒径分布 Aggregate contents/%					平均重量直径 MWD/mm
		>5mm	5—2mm	2—1mm	1—0.25mm	<0.25 mm	
坡耕地 Cr.	0—20	18.4	7.3	7.9	17.9	48.6	1.45c
	20—40	13.4	8.6	8.8	17.2	52.1	1.37B
天然草地 N. G	0—20	48.2	15.8	5.6	7.5	23.0	3.10a
	20—40	39.0	12.5	5.8	8.5	34.3	2.31A
25 年柠条 C. K. 25	0—20	40.4	11.0	5.0	8.4	35.3	2.59b
	20—40	37.3	10.0	5.1	7.9	39.7	2.33A
15 年柠条 C. K. 15	0—20	42.2	12.3	4.7	8.3	32.5	2.59b
	20—40	32.3	9.7	5.4	8.4	44.3	1.99A

不同小写字母表示 0—20 cm 土层不同植被恢复措施之间差异显著 ($P < 0.05$), 不同大写字母表示 20—40 cm 土层不同植被恢复措施之间差异显著 ($P < 0.05$); Cr.: 坡耕地 *Cropland*; N. G.: 天然草地 *Natural grassland*; C. K. 15: 15a 柠条 (15-year-old *Caragana korshinskii* Kom.); C. K. 25: 25a 柠条 (25-year-old *Caragana korshinskii* Kom.).

2.2 不同植被恢复下土壤有机碳在团聚体中的粒径分布

图 1 所示, 不同植被恢复措施下 0—20 cm 土层和 20—40 cm 土层的土壤全土有机碳含量变化在 7.4—17.7 g/kg 之间, 不同植被恢复措施之间存在显著差异, 0—20 cm 土层表现为天然草地 > 15a 柠条 > 25a 柠条 > 坡耕地, 20—40 cm 土层则为天然草地 > 25a 柠条 > 15a 柠条 > 坡耕地, 0—20 cm 土层全土有机碳含量是 20—40 cm 土层全土有机碳含量的 1.2—1.4 倍。在 0—20 cm 土层, > 5 mm、5—2 mm 和 0—0.25 mm 粒径土壤团聚体有机碳含量表现为天然草地 > 15a 柠条 > 25a 柠条 > 坡耕地, 且天然草地和其他植被恢复措施间存在显著差异, 2—1 mm 团聚体为天然草地 > 15a 柠条 > 坡耕地 > 25a 柠条, 1—0.25 mm 团聚体有机碳含量则表现为天然草地 > 25a 柠条 > 15a 柠条 > 坡耕地; 20—40 cm 土层土壤各粒径团聚体土壤有机碳均表现为天然草地、25a 柠条高于坡耕地和 15a 柠条。各粒径土壤团聚体有机碳含量不同植被恢复措施之间相比较, 因植被恢复措施的不同呈现不同的规律, 0—20 cm 土层除 15a 柠条, 其他植被恢复措施有机碳含量最高出现在中间粒径, 25a 柠条在 1—0.25 mm 大小团聚体最高 (16.95 g/kg), 天然草地在 5—2 mm 粒径团聚体为最高 (21.26 g/kg), 坡耕地最高有机碳含量出现在 2—1 mm 粒径团聚体, 为 10.82 g/kg; 20—40 cm 土层则表现为 25 柠条和坡耕地的 0—0.25 mm 团聚体有机碳含量最高, 15a 柠条和天然草地的有机碳含量最高值出现在 > 5 mm 大小团聚体, 分别为 8.13、12.14 g/kg。

2.3 不同植被恢复下土壤微生物生物量碳在团聚体中的粒径分布

图 2 显示, 全土微生物生物量碳含量在 50.3—664.7 mg/kg 之间, 且因植被恢复措施不同而不同, 0—20 cm 土层全土微生物生物量碳含量随天然草地、15a 柠条、25a 柠条、坡耕地依次下降, 20—40 cm 土层则为 25a 柠条最高, 15a 柠条和天然草地次之, 坡耕地最低, 0—20 cm 土层原土微生物生物量碳含量明显高于 20—40 cm 土层, 其中坡耕地最为明显, 0—20 cm 土层是 20—40 cm 土层的 4.1 倍。各粒径团聚体不同植被恢复措施之间的微生物生物量碳含量相比较, 在 0—20 cm 土层和 20—40 cm 土层均表现为, 除 > 5 mm 粒级团聚体以外, 其他大小团聚体与原土呈现相同的规律; > 5 mm 粒级团聚体随天然草地、25a 柠条、15a 柠条、坡耕地依次降低。天然草地和 15a 柠条不同粒径团聚体微生物碳在 0—20 cm 土层呈相同变化趋势, 即随粒径减小而增大, 在 2—1 mm 这一粒径达到最大, 之后又随着粒径的减小而减少。另外, 除 25a 柠条 0—20 cm 土层和坡耕地 20—40 cm 土层以外, 其他植被恢复下土壤微生物碳的最大值均出现在中间粒径, 即 5—2 mm、2—1 mm、1—0.25 mm 这 3 个粒径。

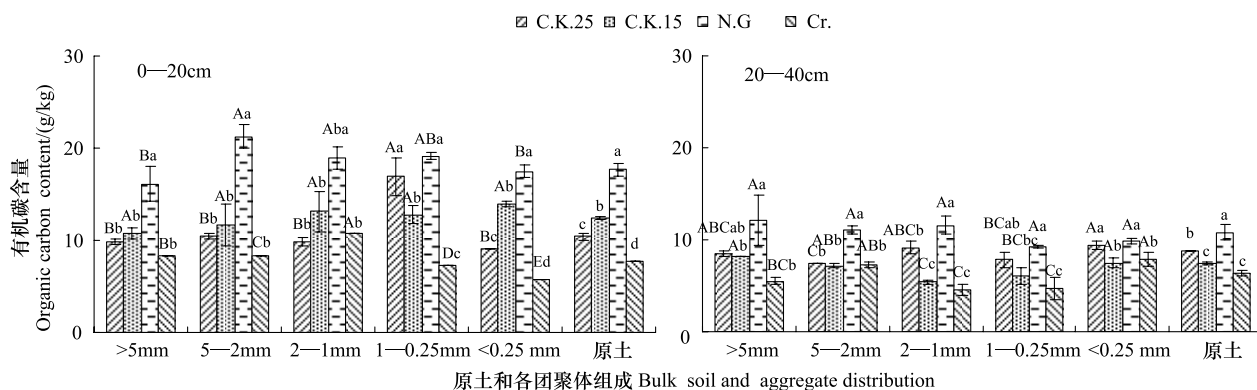


图1 不同植被恢复下不同粒径团聚体中有机碳含量分布

Fig. 1 The content of organic carbon in soil aggregate under different revegetation types

不同小写字母表示同一粒径团聚体或原土不同植被恢复措施之间差异显著 ($P < 0.05$), 不同大写字母表示同一植被恢复措施下各级团聚体中指标之间差异显著 ($P < 0.05$)

Cr.: 坡耕地 *Cropland*; N.G.: 天然草地 *Natural grassland*; C.K.15; 15a 柠条 (15-year-old *Caragana korshinskii* Kom.; C.K.25; 25a 柠条 (25-year-old *Caragana korshinskii* Kom.

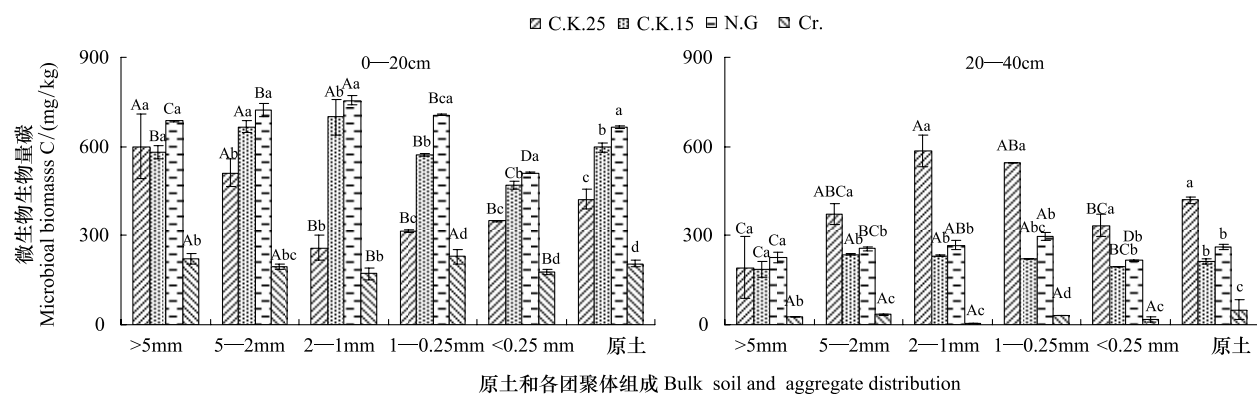


图2 不同植被恢复下土壤团聚体微生物碳含量

Fig. 2 The content of microbial biomass carbon in soil aggregate under different revegetation types

不同小写字母表示同一粒径团聚体或原土不同植被恢复措施之间差异显著 ($P < 0.05$), 不同大写字母表示同一植被恢复措施下各级团聚体中指标之间差异显著 ($P < 0.05$)

2.4 不同植被恢复下腐殖质碳及其组分在团聚体中的粒径分布

由图3可以看出,不同植被恢复措施下全土腐殖质含量在0.9—2.5 g/kg之间变化,因植被恢复措施的不同而各不相同,0—20 cm土层随天然草地、15a柠条、25a柠条、坡耕地依次降低,20—40 cm土层则为天然草地和25a柠条的全土腐殖质含量相对较高,且天然草地与其他植被恢复措施存在显著差异;0—20 cm土层腐殖质含量高于20—40 cm土层。各粒径团聚体腐殖质含量在不同植被恢复措施下存在差异,0—20 cm土层5—2 mm、1—0.25 mm、0—0.25 mm大小团聚体和原土呈现相同的趋势,>5 mm和2—1 mm粒径团聚体则为天然草地>25a柠条>15a柠条>坡耕地;20—40 cm土层则为5—2 mm、2—1 mm、1—0.25 mm大小团聚体和全土呈相同的趋势即天然草地>25a柠条>15a柠条>坡耕地,>5 mm和0—0.25 mm粒径团聚体表现为25a柠条>天然草地>15a柠条>坡耕地。可见,25柠条有利于>5 mm团聚体腐殖质碳的形成。不同粒径团聚体的腐殖质碳相比较,天然草地在0—20 cm土层和20—40 cm土层都表现为中间高,两边低的趋势,即在2—1 mm或1—0.25 mm的腐殖质含量大,>5 mm和<0.25 mm这两个粒径土壤的腐殖质含量相对最小。25a柠条和15a柠条的<0.25 mm团聚体腐殖质碳含量相对较小,随粒径增大而增大,在1—0.25 mm处出现极大值,又随之减小,在5—2 mm或2—1 mm处出现极小值。坡耕地的团聚体腐殖质含量在0.5—1.7 g/kg之间。

图4为不同植被恢复措施下土壤团聚体和原土胡敏酸碳含量,0—20 cm 土层和20—40 cm 土层原土胡敏酸碳含量在0.2—0.6 g/kg 之间,0—20 cm 土层胡敏酸碳含量随天然草地、25a 柠条、15a 柠条、坡耕地依次降低,且四者之间无显著性差异,20—40 cm 土层则为25a 柠条最高(0.41 g/kg),天然草地和坡耕地次之、15a 柠条最低,25a 柠条和其他3种植被恢复措施之间存在显著性差异。0—20 cm 土层土壤的胡敏酸碳含量大于20—40 cm 土层。各粒径团聚体胡敏酸碳因植被恢复措施的不同存在差异,0—20 cm 土层除>5 mm 粒径团聚体,其它团聚体均表现为天然草地的胡敏酸碳含量最高,最高值为0.71 g/kg,20—40 cm 土层>5 mm 和0—0.25 mm 粒径团聚体为25a 柠条和坡耕地相对较高,其他粒径团聚体则为天然草地和25a 柠条的胡敏酸碳含量相对较高。天然草地和15a 柠条的不同粒径团聚体胡敏酸碳呈现两边小中间大的趋势,随粒径的减小而增大,0—20 cm 土层在1—0.25 mm 处达到最大值,20—40 cm 土层在2—1 mm 处为最大值。25a 柠条在0—20 cm 和20—40 cm 土层都表现为>5 mm 和1—0.25 mm 团聚体的胡敏酸碳含量相对较大;坡耕地5—2 mm 团聚体胡敏酸含量最小,0—20 cm 土层为>5 mm 团聚体胡敏酸碳含量最大,20—40 cm 土层为0—0.25 mm 团聚体胡敏酸碳含量最大。

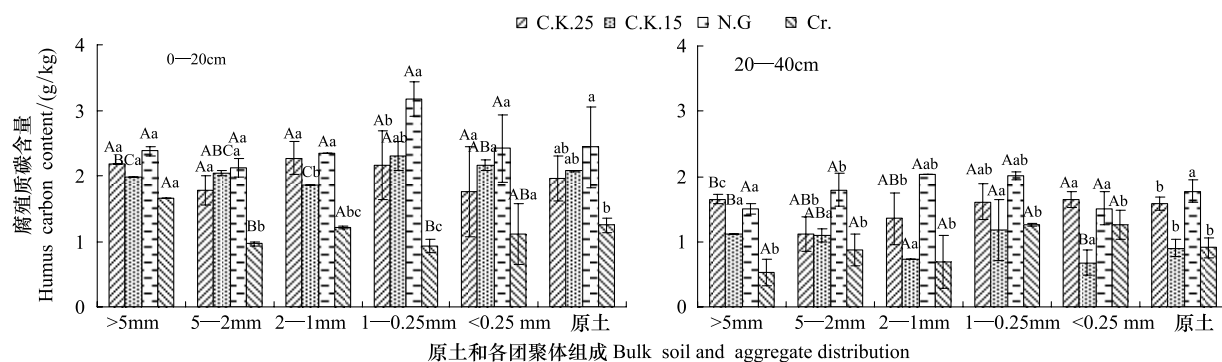


图3 不同植被恢复下土壤团聚体腐殖质碳含量

Fig.3 The content of humus carbon in soil aggregate under different revegetation type

不同小写字母表示同一粒径团聚体或原土不同植被恢复措施之间差异显著 ($P < 0.05$),不同大写字母表示同一植被恢复措施下各级团聚体中指标之间差异显著 ($P < 0.05$)

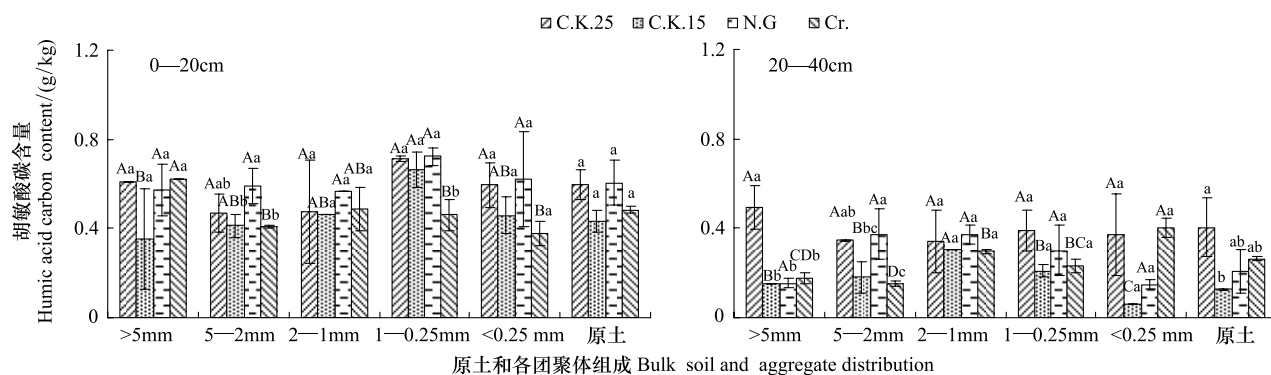


图4 不同植被恢复下土壤团聚体胡敏酸碳含量

Fig.4 The content of humic acid in soil aggregate under different revegetation types

不同小写字母表示同一粒径团聚体或原土不同植被恢复措施之间差异显著 ($P < 0.05$),不同大写字母表示同一植被恢复措施下各级团聚体中指标之间差异显著 ($P < 0.05$)

富里酸是腐殖物质中相对分子质量小,活性较大,氧化程度较高的组分,在提高土壤肥力和促进作物生长等方面,都起着积极的促进作用^[6]。图5可以看出,不同植被恢复措施下,全土富里酸碳含量在0.6—1.9 g/kg 之间,0—20 cm 土层和20—40 cm 土层均表现为天然草地最高、柠条林地次之、坡耕地最低;0—20 cm

土层明显高于 20—40 cm 土层。同一粒径不同植被恢复措施的富里酸碳含量在 0—20 cm 土层天然草地、25a 柠条、15a 柠条的富里酸碳是坡耕地的 1.09—4.24 倍,除 2—1 mm 这一粒径,15a 柠条的富里酸碳含量均高于 25a 柠条;20—40 cm 土层天然草地和 25a 柠条富里酸碳含量相对高于坡耕地和 15a 柠条。由不同粒径团聚体富里酸碳含量的比较可知,天然草地的富里酸含量呈现中间大两边小的趋势,> 5 mm 团聚体和 < 0.25 mm 的富里酸碳含量相对较小,1—0.25 mm 团聚体的富里酸碳含量最大;25a 柠条的 2—1 mm、1—0.25 mm 团聚体的富里酸碳含量相对较大;坡耕地在 0—20 cm 土层>5 mm 团聚体的富里酸碳含量最大,<0.25 mm 的富里酸碳含量最小,在 20—40 cm 土层则为 1—0.25 mm 和 < 0.25 mm 团聚体的富里酸碳含量相对较大,>5 mm 的富里酸碳最小;15a 柠条富里酸碳在 0—20 cm 土层呈现中间低两边高的趋势,20—40 cm 土层则为 1—0.25 mm 团聚体的富里酸碳含量最大。

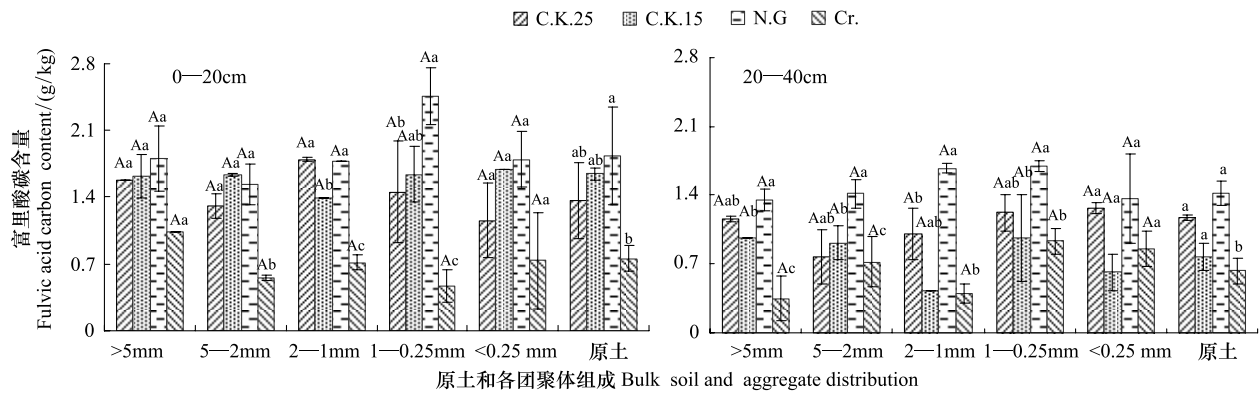


图 5 不同植被恢复下土壤团聚体富里酸碳含量

Fig. 5 The content of fuvia acid carbon in soil aggregate under different revegetation types

不同小写字母表示同一粒径团聚体或原土不同植被恢复措施之间差异显著 ($P < 0.05$),不同大写字母表示同一植被恢复措施下各级团聚体中指标之间差异显著 ($P < 0.05$)

2.5 团聚体中有机碳及其组分和平均重量直径 (MWD) 的逐步回归分析

通过简单相关可知,土壤有机碳及组分和 MWD 存在显著的正相关,为了探讨不同植被恢复措施下,不同粒径团聚体中有机碳及碳组分含量和水稳性团聚体稳定性之间的关系,本文将 > 5 mm、5—2 mm、2—1 mm、1—0.25 mm、0—0.25 mm 粒径团聚体中有机碳及其组分含量 (g/kg) 作为自变量 (依次为 X_1 、 X_2 、 X_3 、 X_4 、 X_5), MWD (Y) 作为为依变量,进行逐步回归分析,结果见表 2。表 2 中的回归方程,通过 F 检验,均达到了显著水平 ($P < 0.01$),这说明团聚体有机碳及碳组分含量和团聚体之间存在一定的相关关系,数据显示,5—2 mm 团聚体和 1—0.25 mm 团聚体的有机碳含量的增加可以增强土壤团聚体水稳性,其中,土壤团聚体碳组分中,0—0.25 mm 团聚体微生物碳含量、5—2 mm 团聚体胡敏酸碳含量和 1—0.25 mm 团聚体富里酸碳含量对土壤水稳性团聚体稳定性影响显著。

表 2 土壤团聚体碳及碳组分与平均重量直径的回归方程

Table 2 The stepwise regression equation of the content of organic carbon fraction in soil aggregate and MWD

碳组分 Carbon fraction	方程 Equation	R^2	F	P
有机碳 O. C	$Y = 0.082X_2 + 0.046X_4 + 0.693$	0.9421	40.67	0.0008
微生物量碳 C. mic	$Y = 3.31X_5 + 1.281$	0.8448	32.55	0.0013
腐殖质 HS	$Y = 0.881X_4 + 0.628$	0.8743	41.31	0.0007
胡敏酸 HA	$Y = 10.773X_2 - 2.705X_1 - 7.680X_3 + 2.671$	0.9595	31.61	0.0030
富里酸 FA	$Y = 1.066X_4 + 0.783$	0.8226	27.81	0.0019

3 讨论

3.1 植被恢复对土壤团聚体大小及稳定性的影响

土壤团聚体,作为土壤结构的基本单元,与土壤的物理、化学和生物学性质直接相关,其含量与粒径分布不仅影响作物生长发育而且对土壤抗蚀性和土壤可持续利用等有重要影响^[12-13]。由上文可知,湿筛法得到的团聚体粒径分布中,0—20 cm 土层和 20—40 cm 土层均表现为“V”字分布:> 5 mm 和 0—0.25 mm 这两个粒径的团聚体含量最多,5—2 mm,1—0.25 mm 团聚体的含量次之,2—1 mm 粒径的团聚体含量最少。土壤粒径分布趋势与以往的研究大致相同,高飞^[14]等对宁南土壤进行干筛,结果表明,土壤中的团聚体主要以>5 mm 土壤团聚体为主;苏静^[15]用萨维诺夫湿筛法测定土壤水稳定性团聚体含量的结果表明,不同粒径团聚体含量的分布为:< 0.25 mm 团聚体含量最高,其次为> 5 mm 团聚体含量,2.0—5.0 mm 和 0.25—0.5 mm 和 0.5—1.0 mm 粒径团聚体含量差异不大。土壤团聚体稳定性是土壤物理质量的综合体现^[16],MWD 值越大表示团聚体的平均粒径团聚度越高,稳定性越强。本文测定结果 MWD 为天然草地、25a 柠条相对较大,15a 柠条次之,坡耕地最小,进一步表明植被恢复可以增强土壤团聚体水稳性,这是因为天然草地的地上植物种类丰富,且生物量归还相对较多,柠条林地随着恢复年限的增加,林地的盖度变大,单株生物量增大,植物有机残体归还相应增多,可供微生物维系生命活动的能量充足,从而促进土壤的生物活性,包括真菌生长、根和土壤动物区系,有助于在大团聚体内部结合形成微粒有机质,增加其结构稳定性^[17]。谢锦升^[18]等研究了植被恢复对侵蚀退化红壤团聚体稳定性的影响,表明红壤侵蚀裸地大团聚体水稳定性程度低,植被恢复后大团聚体稳定性显著提高。

3.2 植被恢复对土壤团聚体中有机碳及碳组分的影响

土壤有机质是土壤具有结构和生物学性质的基本物质,它既是生命活动的条件,也是生命活动的产物。不同植被恢复措施下,全土有机碳、腐殖质碳、富里酸碳含量在 0—20 cm 土层随天然草地、15a 柠条、25a 柠条、坡耕地依次降低,在 20—40 cm 土层则为天然草地、25a 柠条、15a 柠条、坡耕地依次降低。这表明植被恢复可以有效的增加土壤有机碳的含量,这与前人的研究相一致,Thuille^[19]等研究表明,在农田转变为林地的过程中,土壤中有机碳的含量逐渐上升,并最终有大幅度增长。本研究中可以看出天然草地比柠条林地更加有利于有机碳的积累,并且从不同粒径团聚体有机碳含量相比较,天然草地不同大小团聚体有机碳含量是坡耕地的 1.3—2.6 倍。这可能与植物返还土壤的有机物料的种类有关,天然草地土壤的有机物料输入量大且丰富,草原植被尤其是 1 年生草本植物每年均有大量的根系死亡进入土壤碳循环过程,25a 柠条的草本层和 15a 柠条的草本层的草本植物种类多,且地上生物量大,盖度较大,加之土壤团聚体稳定性较好,孔隙度大,土层的水、热、气等土壤环境有利于微生物的繁殖和生长。0—20 cm 土层不同植被恢复措施全土胡敏酸含量随天然草地、25a 柠条、15a 柠条、坡耕地降低,但是四者之间无显著性差异,20—40 cm 土层柠条 25 年胡敏酸含量最高。可以看出,腐殖质碳含量的差异是因为富里酸碳的增加而引起的,富里酸属于相对活性比较大的碳组分,植被恢复可以增加土壤中富里酸的含量,恢复年限的时间越长,则会形成土壤腐殖质中腐殖化程度更高的胡敏酸碳,成为土壤中的比较稳定的碳汇。土壤微生物量碳含量仅占土壤总有机碳的很小一部分(1%—5%)^[20],但其动态变化与土壤条件密切相关,是土壤总有机碳变化的指示器。由上文可知,15a 柠条和 25a 柠条相比较,除胡敏酸以外其他的有机碳组分均表现为 0—20 cm 土层 15a 柠条较高,20—40 cm 土层则为 25a 柠条较高。这可能是因为柠条恢复年限的不同,柠条植株地下侧根发生的部位不同,从而影响根系分泌物的多寡。

土壤各粒径团聚体中的有机碳含量是土壤有机质平衡和矿化速率的微观表征,在土壤肥力和土壤碳汇中具有双重意义,不同大小团聚体的有机碳的稳定性不同,微团聚体内的有机碳比大团聚体内的有机碳更不易变化^[21]。植被恢复可以增加土壤有机碳含量,但是对不同大小团聚体有机碳增加幅度有所不同,谢锦升^[17]研究了植被恢复对退化红壤团聚体稳定性及有机碳分布的影响,结果表明,植被恢复后,不同粒径团聚体有机碳含量明显提高,而 2—0.25 mm 团聚体的有机碳含量最高。本研究中不同植被恢复措施下,土壤不同粒径

团聚体有机碳及其组分相比较,大多呈现中间高两边低的变化趋势,最大值出现在中间粒径,即 5—2 mm、2—1 mm、1—0.25 mm 这 3 个粒径。安韶山^[8]对黄土丘陵区植被恢复下土壤团聚体有机碳的研究表明:同一深度土壤各粒级团聚体中有机碳的分布表为:0.5—0.25 mm 与 1—0.5 mm 两个粒级中有机碳的含量最高。高会议^[22]等研究了长期施肥对不同粒径水稳性团聚体中有机碳分布的影响,结果表明黄土塬区黑垆土 5—2 mm 和 2—1 mm 水稳性团聚体有机碳含量较高。郭菊花等^[23]在江西对红壤性水稻土团聚体有机碳的研究也指出,有机碳主要分配在 2—0.25 mm 的大团聚体上。李恋卿等^[24]研究发现,植被恢复尤其是豆科、禾本科植物轮作能够较快增加土壤有机碳储存,促进了土壤碳截存,显著贡献于陆地系统对大气 CO₂ 的汇作用,这种碳存储主要发生在 2—0.25 mm 团聚体。郝翔翔^[25]等对休闲地、耕地、裸地 3 种土地利用方式下土壤水稳性团聚体中腐殖质组成及胡敏酸结构特征,表明土地利用方式对团聚体中碳含量的影响主要体现在大团聚体中。以上研究结果都进一步说明了植被演替增加土壤团聚体有机碳含量,首先是增加较大粒径团聚体的有机碳含量,随着演替的进一步进行,小粒径团聚体有机碳含量也相应增加。

3.3 植被恢复中土壤有机碳与团聚体稳定性的关系

土壤有机质是形成土壤团聚体的主要胶结物质,团聚体是土壤有机碳固定的场所。彭新华^[26]试验证明不同植被恢复措施对团聚体稳定性影响表现为:马尾松>菜园地>胡枝子>樟树、裸地,说明植被恢复过程中有机碳促进了土壤团聚体的形成并提高其稳定性。植被恢复可以增加土壤有机碳含量,简单相关可知土壤有机碳和团聚体稳定性指标呈显著的正相关,将土壤进行团聚体分级,分析可知,5—2 mm 团聚体和 1—0.25 mm 团聚体的有机碳含量的增加可以增强土壤团聚体水稳性。不同粒径团聚体中有机碳的性质不同,不同大小团聚体有机质组分在对土壤团聚体稳定性的提高中贡献率各不相同。逐步回归分析可知,该区不同植被恢复措施下,0—0.25 mm 团聚体微生物生物量碳含量、5—2 mm 团聚体胡敏酸含量和 1—0.25 mm 团聚体富里酸含量的增加有助于土壤水稳性团聚体的形成。

4 结论

不同植被恢复措施下,土壤团聚体粒径分布表现为“V”字分布:>5 mm 和 0—0.25 mm 这两个粒径的团聚体含量最多,5—2 mm、1—0.25 mm 团聚体的含量次之,2—1 mm 粒径的团聚体含量最少。天然草地和 25a 柠条的团聚体水稳性相对较好,15a 柠条次之,坡耕地的团聚体水稳性最差。

植被恢复后,土壤各粒径团聚体有机碳、微生物生物量碳、腐殖质碳、富里酸碳含量都有一定程度的提高,胡敏酸碳含量则相对稳定。不同粒径团聚体有机碳相比较,大多呈现中间高两边低的变化趋势,最大值出现在中间粒径,即 5—2 mm、2—1 mm、1—0.25 mm 这 3 个粒径。逐步回归表明,5—2 mm 团聚体和 1—0.25 mm 团聚体有机碳含量对土壤团聚体水稳性有显著的影响。

References:

- [1] Pan G X, Wu L S, Li L Q, Zhang X H, Gong W, Yvonne W. Organic carbon stratification and size distribution of three typical paddy soils from Taihu Lake region, China. *Journal of Environmental Sciences*, 2008, 20(4): 456-463.
- [2] Li F S, Kang S Z, Zhang F C. Effect of atmospheric CO₂ and temperature increment on crop physiology and ecology. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2002, 13(9): 1169-1173.
- [3] Huang Y F, Zhou Z Y, Fan X Y, Zhang H Y. Spatial variability of soil organic matter content in an arid desert area. *Acta Ecologica Sinica*, 2004, 24(12): 2776-2781.
- [4] Pan G X, Zhou P, Li L Q, Zhang X H. Core issues and research progresses of soil science of sequestration. *Acta Pedologica Sinica*, 2007, 44(2): 327-334.
- [5] Oades J M. Soil organic matter and structural stability: mechanisms and implications for management. *Plant and Soil*, 1984, 76(1/3): 319-337.
- [6] Jobbágy E G, Jackson R B. The vertical distribution of soil organic carbon and its relation to climate and vegetation. *Ecological Applications*, 2000, 10(2): 423-436.
- [7] Hua J, Zhao S W, Zhang Y, Ma S. Distribution characteristics of labile organic carbon in soil aggregates in different stages of vegetation restoration of grassland in Yunwu Mountain. *Acta Ecologica Sinica*, 2009, 29(9): 4613-4619.
- [8] An S S, Zhang X, Zhang Y, Zheng F L. 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.
- [9] Institute of Soil Science, Chinese Academy of Sciences. *Soil physical and chemical analysis*. Shanghai: Shanghai Science and Technology Press,

1978; 517-518.

- [10] Yan C S. The Soil Fertility Research Methods. Beijing: China Agricultural Press, 1988: 124-128
- [11] Wu J S, Lin Q M, Huang Q Y, Xiao H A. Soil Microbial Biomass Determination Method and Its Application. Beijing: China Meteorological Press, 2006.
- [12] Zhou H, Lü Y Z, Li B G. Advancement in the study on quantification of soil structure. *Acta Pedologica Sinica*, 2009, 46(3): 501-506.
- [13] Madari B, Machado P L O A, Torres E, de Andrade A, Valencia L I O. No tillage and crop rotation effects on soil aggregation and organic carbon in a Rhodic Ferralsol from southern Brazil. *Soil and Tillage Research*, 2005, 80(1/2): 185-200.
- [14] Gao F, Jia Z Z, Han Q F, Han Q F, Yang B P, Nie J F. Effects of different organic fertilizer treatments on distribution and stability of soil aggregates in the semiarid area of South Ningxia. *Agricultural Research in the Arid Areas*, 2010, 28(3): 100-106.
- [15] Su J, Zhao S W. Comparison of analysis methods for soil the aggregate Stability. *Bulletin of Soil and Water Conservation*, 2009, 29(5): 114-117.
- [16] Bronick C J, Lal R. Soil structure and management; a review. *Geoderma*, 2005, 124(1/2): 3-22.
- [17] Cambardella C A, Elliott E T. Particulate soil organic matter across a grassland cultivation sequence. *Soil Science Society of America Journal*, 1992, 56(3): 776-783.
- [18] Xie J S, Yang Y S, Chen G S, Zhu J M, Zeng H D, Yang Z J. 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): 702-708.
- [19] Thuille A, Buchmann N, Schulze E D. Carbon stocks and soil respiration rates during deforestation, grassland use and subsequent Norway spruce afforestation in the Southern Alps, Italy. *Tree Physiology*, 2000, 20(13): 849-857.
- [20] Wu T Y, Jeff J S, Li F M, Qian P Y, Zhang S Q, Sukhadev S M, Wang F. Concepts and relative analytical techniques of soil organic matter. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2004, 15(4): 717-722.
- [21] Cambardella C A, Elliott E T. Carbon and nitrogen distribution in aggregates from cultivated and native grassland soils. *Soil Science Society of America Journal*, 1993, 57(4): 1071-1076.
- [22] Gao H Y, Guo S L, Liu W Z, Che S G, Li M. Effect of fertilization on organic carbon distribution in various fractions of aggregates in caliche soils. *Acta Pedologica Sinica*, 2010, 47(5): 933-937.
- [23] Guo J H, Chen X Y, Liu M Q, Hu F, Li H X. Effects of fertilizer management practice on distribution of aggregates and content of organic carbon and nitrogen in red paddy soil. *Soils*, 2007, 39(5): 787-793.
- [24] Li L Q, Pan G X, Zhang X H. Changes in organic carbon storage in aggregates of the surface horizon in a degraded Paleudlt upon vegetation recovery. *Chinese Journal of Soil Science*, 2000, 31(5): 193-195.
- [25] Hao X X, Dou S, AN F H, Li M M. Humus composition and structural characteristics of humic acid in soil aggregates under different utilization of land. *Journal of Soil and Water Conservation*, 2010, 24(5): 248-252.
- [26] Peng X H, Zhang B, Zhang Q G. Effect of soil organic carbon on aggregate stability after vegetative restoration on eroded red soil. *Acta Ecologica Sinica*, 2003, 23(10): 2176-2183.

参考文献:

- [2] 李伏生, 康绍忠, 张富仓. 大气 CO₂ 浓度和温度升高对作物生理生态的影响. *应用生态学报*, 2002, 13(9): 1169-1173.
- [3] 黄元仿, 周志宇, 苑小勇, 张红艳. 干旱荒漠区土壤有机质空间变异特征. *生态学报*, 2004, 24(12): 2776-2781.
- [4] 潘根兴, 周萍, 李恋卿, 张旭辉. 固碳土壤学的核心科学问题与研究进展. *土壤学报*, 2007, 44(2): 327-334.
- [7] 华娟, 赵世伟, 张杨, 马帅. 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. *生态学报*, 2009, 29(9): 4613-4619.
- [8] 安韶山, 张玄, 张杨, 郑粉莉. 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.
- [9] 中国科学院南京土壤研究所. 土壤理化分析. 上海: 上海科学技术出版社, 1978.
- [10] 严昶升. 土壤肥力研究方法. 北京: 农业出版社, 1988: 124-128
- [11] 吴金水, 林启美, 黄巧云, 肖和艾. 土壤微生物生物量的测定方法及其应用. 北京: 中国气象出版社, 2006.
- [12] 周虎, 吕贻忠, 李保国. 土壤结构定量研究进展. *土壤学报*, 2009, 46(3): 501-506.
- [14] 高飞, 贾志宽, 韩清芳, 杨宝平, 聂俊峰. 有机肥不同施用量对宁南土壤团聚体粒级分布和稳定性的影响. *干旱地区农业研究*, 2010, 28(3): 100-106.
- [15] 苏静, 赵世伟. 土壤团聚体稳定性评价方法比较. *水土保持通报*, 2009, 29(5): 114-117.
- [18] 谢锦升, 杨玉盛, 陈光水, 朱锦懋, 曾宏达, 杨智杰. 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): 702-708.
- [20] 武天云, Jeff J S, 李凤民, 钱佩源, 张树清, Sukhadev S M, 王方. 土壤有机质概念和分组技术研究进展. *应用生态学报*, 2004, 15(4): 717-722.
- [22] 高会议, 郭胜利, 刘文兆, 车升国, 李森. 不同施肥处理对黑垆土各粒级团聚体中有机碳含量分布的影响. *土壤学报*, 2010, 47(5): 933-937.
- [23] 郭菊花, 陈小云, 刘满强, 胡锋, 李辉信. 不同施肥处理对红壤性水稻土团聚体的分布及有机碳、氮含量的影响. *土壤*, 2007, 39(5): 787-793.
- [24] 李恋卿, 潘根兴, 张旭辉. 退化红壤植被恢复中表层土壤微团聚体及其有机碳的分布变化. *土壤通报*, 2000, 31(5): 193-195.
- [25] 郝翔翔, 窦森, 安丰华, 李明敏. 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*, 2010, 24(5): 248-252.
- [26] 彭新华, 张斌, 赵其国. 红壤侵蚀裸植被恢复及土壤有机碳对团聚体稳定性的影响. *生态学报*, 2003, 23(10): 2176-2183.

ACTA ECOLOGICA SINICA Vol. 33, No. 9 May, 2013 (Semimonthly)

CONTENTS

Frontiers and Comprehensive Review

- Analysis of subject trends in research on sustainable development CHA Na, WU Jianguo, YU Runbing (2637)
- Metabolic scaling theory and its application in microbial ecology HE Jizheng, CAO Peng, ZHENG Yuanming (2645)
- Research progress on endophyte-promoted plant nitrogen assimilation and metabolism
..... YANG Bo, CHEN Yan, LI Xia, et al (2656)
- Review on the development of landscape architecture ecology in China YU Yijing, MA Jinyi, YUAN Yunjue (2665)

Autecology & Fundamentals

- Evaluating tillage practices impacts on soil organic carbon based on least limiting water range
..... CHEN Xuewen, WANG Nong, SHI Xiuhuan, et al (2676)
- Controls over soil organic carbon content in grasslands TAO Zhen, CI Dan Langjie, ZHANG Shenghua, et al (2684)
- Antagonistic interactive effects of exogenous calcium ions and parasitic *Cuscuta australis* on the morphology and structure of
Alternanthera philoxeroides stems CHE Xiuxia, CHEN Huiping, YAN Qiaodi, et al (2695)
- Correlation between pigment content and reflectance spectrum of *Phyllostachys pubescens* stems during its rapid growth stage
..... LIU Lin, WANG Yukui, WANG Xingxing, et al (2703)
- Response of leaf functional traits and the relationships among them to altitude of *Salix dissa* in Balang Mountain
..... FENG QiuHong, CHENG Ruimei, SHI Zuomin, et al (2712)
- Effects of phosphate and organic matter applications on arsenic uptake by and translocation in *Isatis indigotica*
..... GAO Ningda, GENG Liping, ZHAO Quanli, et al (2719)
- Effect of different preys on the predation and prey preference of *Orius similis* ... ZHANG Changrong, ZHI Junrui, MO Lifeng (2728)
- Effects of predation risk on the patterns of functional responses in reed vole foraging
..... TAO Shuanglun, YANG Xifu, YAO Xiaoyan, et al (2734)
- Phylogenetic analysis of Veneridae (Mollusca: Bivalvia) based on the mitochondrial cytochrome c oxidase subunit I gene fragment ...
..... CHENG Hanliang, PENG Yongxing, DONG Zhiguo, et al (2744)
- Effects of different ecological environments in the laboratory on the covering behavior of the sea urchin *Glyptocidaris crenularis*
..... CHANG Yaqing, LI Yunxia, LUO Shibin, et al (2754)

Population, Community and Ecosystem

- The ecosystem services value change in the upper reaches of Ganjiang River Based on RS and GIS
..... CHEN Meiqiu, ZHAO Baoping, LUO Zhijun, et al (2761)
- The reference condition for Eutrophication Indicator in the Yangtze River Estuary and adjacent waters — response variables
..... ZHENG Binghui, ZHU Yanzhong, LIU Lusan, et al (2768)
- The reference condition for eutrophication Indicator in the Yangtze River Estuary and adjacent waters — Causal Variables
..... ZHENG Binghui, ZHOU Juan, LIU Lusan, et al (2780)
- The stress response of biological communities in China's Yalu River Estuary and neighboring waters
..... SONG Lun, WANG Nianbin, YANG Guojun, et al (2790)
- Ecological characteristics of macrobenthic communities and its relationships with environmental factors in Hangzhou Xixi Wetland
..... LU Qiang, CHEN Huili, SHAO Xiaoyang, et al (2803)
- Effects of biological soil crusts on desert soil nematode communities LIU Yanmei, LI Xinrong, ZHAO Xin, et al (2816)
- Associations between weather factors and the spring migration of the horned gall aphid, *Schlechtendalia chinensis*
..... LI Yang, YANG Zixiang, CHEN Xiaoming, et al (2825)
- Effects of vegetation on soil aggregate stability and organic carbon sequestration in the Ningxia Loess Hilly Region of northwest
China CHENG Man, ZHU Qiulian, LIU Lei, et al (2835)

- Simulation of the carbon cycle of *Larix chinensis* forest during 1958 and 2008 at Taibai Mountain, China LI Liang, HE Xiaojun, HU Lile, et al (2845)
- Effects of different disturbances on diversity and biomass of communities in the typical steppe of loess region CHEN Furong, CHENG Jimin, LIU Wei, et al (2856)
- Age structure and point pattern of *Butula platyphylla* in Wulashan Natural Reserve of Inner Mongolia HU Ercha, WANG Xiaojiang, ZHANG Wenjun, et al (2867)
- The impacts of the Southwest China drought on the litterfall and leaf area index of an evergreen broadleaf forest on Ailao Mountain ... QI Jinhua, ZHANG Yongjiang, ZHANG Yiping, et al (2877)
- Spatial distribution of tree species richness in Xiaodonggou forest region of the Altai Mountains, Northwest China JING Xuehui, CAO Lei, ZANG Runguo (2886)
- Landscape, Regional and Global Ecology**
- The ecological risk assessment of Taihu Lake watershed XU Yan, GAO Junfeng, GUO Jianke (2896)
- The value of fixing carbon and releasing oxygen in the Guanzhong-Tianshui economic region using GIS ZHOU Zixiang, LI Jing, FENG Xueming (2907)
- Resource and Industrial Ecology**
- Effect of different controlled-release nitrogen fertilizers on availability of heavy metals in contaminated red soils under waterlogged conditions LIANG Peijun, XU Chao, WU Qitang, et al (2919)
- Research Notes**
- Effect of heat and high irradiation stress on Deg1 protease and D1 protein in wheat chloroplasts and the regulating role of salicylic acid ZHENG Jingjing, ZHAO Huijie, HU Weiwei, et al (2930)
- The difference of drought impacts on winter wheat leaf area index under different CO₂ concentration LI Xiaohan, WU Jianjun, LÜ Aifeng, et al (2936)

《生态学报》2013 年征订启事

《生态学报》是由中国科学技术协会主管,中国生态学学会、中国科学院生态环境研究中心主办的生态学高级专业学术期刊,创刊于 1981 年,报道生态学领域前沿理论和原始创新性研究成果。坚持“百花齐放,百家争鸣”的方针,依靠和团结广大生态学科工作者,探索自然奥秘,为生态学基础理论研究搭建交流平台,促进生态学研究深入发展,为我国培养和造就生态学科人才和知识创新服务、为国民经济建设和发展服务。

《生态学报》主要报道生态学及各分支学科的重要基础理论和应用研究的原始创新性科研成果。特别欢迎能反映现代生态学发展方向的优秀综述性文章;研究简报;生态学新理论、新方法、新技术介绍;新书评价和学术、科研动态及开放实验室介绍等。

《生态学报》为半月刊,大 16 开本,300 页,国内定价 90 元/册,全年定价 2160 元。

国内邮发代号:82-7,国外邮发代号:M670

标准刊号:ISSN 1000-0933 CN 11-2031/Q

全国各地邮局均可订阅,也可直接与编辑部联系购买。欢迎广大科技工作者、科研单位、高等院校、图书馆等订阅。

通讯地址:100085 北京海淀区双清路 18 号 电 话:(010)62941099; 62843362

E-mail: shengtaixuebao@rcees.ac.cn 网 址: www.ecologica.cn

本期责任副主编 欧阳志云

编辑部主任 孔红梅

执行编辑 刘天星 段 靖

生 态 学 报

(SHENGTAI XUEBAO)

(半月刊 1981 年 3 月创刊)

第 33 卷 第 9 期 (2013 年 5 月)

ACTA ECOLOGICA SINICA

(Semimonthly, Started in 1981)

Vol. 33 No. 9 (May, 2013)

编 辑	《生态学报》编辑部 地址:北京海淀区双清路 18 号 邮政编码:100085 电话:(010)62941099 www.ecologica.cn shengtaixuebao@rcees.ac.cn	Edited by	Editorial board of ACTA ECOLOGICA SINICA Add:18, Shuangqing Street, Haidian, Beijing 100085, China Tel:(010)62941099 www.ecologica.cn shengtaixuebao@rcees.ac.cn
主 编	王如松	Editor-in-chief	WANG Rusong
主 管	中国科学技术协会	Supervised by	China Association for Science and Technology
主 办	中国生态学学会 中国科学院生态环境研究中心 地址:北京海淀区双清路 18 号 邮政编码:100085	Sponsored by	Ecological Society of China Research Center for Eco-environmental Sciences, CAS Add:18, Shuangqing Street, Haidian, Beijing 100085, China
出 版	科 学 出 版 社 地址:北京东黄城根北街 16 号 邮政编码:100717	Published by	Science Press Add:16 Donghuangchenggen North Street, Beijing 100717, China
印 刷	北京北林印刷厂	Printed by	Beijing Bei Lin Printing House, Beijing 100083, China
发 行	科 学 出 版 社 地址:东黄城根北街 16 号 邮政编码:100717 电话:(010)64034563 E-mail:journal@cspg.net	Distributed by	Science Press Add:16 Donghuangchenggen North Street, Beijing 100717, China Tel:(010)64034563 E-mail:journal@cspg.net
订 购	全国各地邮局	Domestic	All Local Post Offices in China
国外发行	中国国际图书贸易总公司 地址:北京 399 信箱 邮政编码:100044	Foreign	China International Book Trading Corporation Add:P. O. Box 399 Beijing 100044, China
广告经营 许 可 证	京海工商广字第 8013 号		



ISSN 1000-0933
CN 11-2031/Q

国内外公开发行

国内邮发代号 82-7

国外发行代号 M670

定价 90.00 元