

黄土丘陵区草地表层土壤固碳特征及影响因素

王琼芳¹, 陈云明², 曹扬², 崔静³, 张婷²

(1. 张家川回族自治县水务局, 甘肃 天水 741500; 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, 陕西 杨凌 712100; 3. 西北农林科技大学 资源环境学院, 陕西 杨凌 712100)

摘要: 采用野外调查与室内分析相结合的方法, 分析了黄土丘陵区长芒草(*Stipa bungeana*)、白羊草(*Bothriochloa ischaemum*)草地表层(0—20 cm)土壤有机碳(SOC)及其与地形、土壤、植被等因子的相关性, 以期揭示自然恢复过程土壤固碳特征及显著影响因子。结果表明, 不同恢复年限长芒草群落土壤表层SOC平均含量14~18 a显著增加, 年均增加量为0.295 g/kg; 18~26 a增加平缓, 年均增加量为0.186 g/kg; 26~45 a略微下降, 33, 45 a SOC平均含量分别低于26 a(8.92%, 3.18%), 差异均不显著。白羊草群落则表现25~40 a平缓增加, 年均增加量为0.054 g/kg, 40~45 a以上显著增加, 40 a SOC平均含量低于45 a以上29.38%, 差异显著($p < 0.05$)。不同土层剖面, SOC含量均表现为土层0—10 > 土层10—20 cm。土壤总SOC密度变化趋势与SOC平均含量一致。相关分析表明, 长芒草、白羊草群落SOC平均含量随着恢复年限、地上生物量、地下生物量、全氮的增加而增加, 随着海拔、容重的增加而减小。随着恢复年限的增加, 长芒草、白羊草群落土壤表层SOC存在明显固存效应, 海拔、恢复年限、地上生物量、地下生物量、全氮、容重为显著影响因子。

关键词: 黄土丘陵区; 长芒草群落; 白羊草群落; 土壤有机碳含量

文献标识码: A

文章编号: 1000-288X(2014)01-0058-07

中图分类号: S153.6+21

Topsoil Carbon Sequestration Characteristics and Influencing Factors for Two Grasslands in Loess Hilly Region

WANG Qiong-fang¹, CHEN Yun-ming², CAO Yang², CUI Jing³, ZHANG Ting²

(1. Water Supplies Bureau of Zhangjiachuan Hui Autonomous County, Tianshui, Gansu 741500, China;

2. State Key Laboratory of Soil Erosion and Dryland Farming on the Loess Plateau, Northwest A&F University, Yangling, Shaanxi 712100, China; 3. College of Resources and Environment, Northwest A&F University, Yangling, Shaanxi 712100, China)

Abstract: Combing field investigation with laboratory analysis, we studied soil organic carbon(SOC) content in topsoil(0—20 cm) with different ages of the *Stipa bungeana* and *Bothriochloa ischaemum* grassland communities and presented the correlations of SOC content with geography, soil and vegetation characteristics of the communities in the loess hilly region, in order to proclaim soil carbon sequestration characteristics and notable influencing factors in the natural grassland restoration process. For the *Stipa bungeana* grassland, average SOC content dramatically increased from the 14 a to 18 a, with an average annual increment of 0.295 g/kg. The average SOC content gently increased first from the 18 a to 26 a, with an average annual increment of 0.186 g/kg, and then gradually decreased from the 26 to 45 a. The average SOC contents in 33 a and 45 a were 8.92% and 3.18% lower than that in the 25 a, respectively, but the difference was not significant. For the *Bothriochloa ischaemum* grassland, average SOC content gently increased from the 25 a to 40 a, with an average annual increment of 0.054 g/kg. The average SOC content obviously increased from the 40 a to 45 a, and the average SOC content in the 40 a was only 29.38% of that in the 45 a, and the difference was significant($p < 0.05$). SOC content in 0—10 cm soil layer was higher than that in 10—20 cm soil layer. Correlation analysis indicated that average SOC contents for *Stipa bungeana* and *Bothriochloa ischaemum* grasslands

收稿日期: 2013-03-31

修回日期: 2013-04-07

资助项目: 中国科学院战略性先导科技专项“暖温带落叶阔叶混交林区域森林固碳现状、速率和潜力研究”(XDA05050203); 中国科学院百人计划项目“黄土高原半干旱区群落水分平衡与调控机理”(kzcx2-yw-BR-02)

作者简介: 王琼芳(1987—), 女(回族), 甘肃省白银市人, 硕士, 科员, 研究方向为水土保持与荒漠化防治。E-mail: gansuwqf@126.com。

通信作者: 陈云明(1967—), 男(汉族), 陕西省澄城县人, 博士, 研究员, 主要从事生态恢复与水文研究。E-mail: ymchen@ms.iswc.ac.cn。

increased with the increases in restoration year, aboveground biomass, underground biomass and soil total nitrogen, and decreased with altitude and soil bulk density. Therefore, topsoils of *Stipa bungeana* and *Bothriochloa ischaemum* grasslands show the obvious function of carbon sequestration. Altitude, restoration year, aboveground biomass, underground biomass, soil total nitrogen and soil bulk density are the significant factors.

Keywords: loess hilly region; *Stipa bungeana*; *Bothriochloa ischaemum*; soil organic carbon content

草地植被恢复是影响 SOC 积累的重要因素,其通过面积的增加,提高植被生物量生产,从而增加 SOC 含量^[1]。黄土丘陵区是中国生态环境脆弱、水土流失严重地区之一,是进行生态环境建设和水土流失治理的重点区域^[2]。自 1998 年国家在这一地区实施坡耕地“退耕还林还草”以来,形成了不同年限的退耕荒地,不仅在水土流失治理、改善生态环境等方面起着十分重要的作用,同时也对区域植被碳汇做出了重要贡献。长芒草和白羊草是黄土丘陵半干旱区退耕地植被演替的优势物种和主要伴生种,构成了不同恢复阶段的植物群落,分布广泛且具有代表性,在该区草地碳储存中占据重要位置^[3]。黄土高原丘陵沟壑区退耕地植被恢复过程中,演替进程依次经历猪毛蒿群落—赖草群落—长芒草群落、铁杆蒿群落、达乌里胡枝子群落—白羊草群落^[4],长芒草群落、白羊草群落是其自然恢复过程中的重要阶段,因此,研究该区长芒草群落、白羊草群落土壤有机碳库特征在黄土高原地区最具代表性。近年来,关于白羊草的研究主要集中在自然群落特性、生产力及水分利用特征方面^[5-7],白羊草植株所含生物活性成分也有一些研究^[8],对长芒草则主要从种群特征、水分效应等方面进行了研究^[9-10],而对二者自然恢复过程中表层土壤固碳特征及影响因子的相关性研究则少见报道。本研究以黄土丘陵区不同退耕年限白羊草群落和长芒草群落为对象,采用野外调查与室内分析相结合的方法,揭示黄土丘陵区草地恢复过程中土壤固碳特征,阐述草地土壤固碳的影响因子,丰富黄土丘陵区草地生态系统土壤固碳增汇相关研究成果,为其经营管理提供理论依据。

1 研究区概况

研究区设在典型的黄土丘陵沟壑区陕西省安塞县中国科学院安塞水土保持试验站的示范推广区,地理坐标为 105°51'44"—109°26'18"E, 36°22'40"—36°32'16"N,海拔 997~1 731 m。气候属暖温带半干旱季风气候,多年平均降水量 505.3 mm,且存在年际变化大,年内分布不均的特点,主要集中在 6—8 月;全年无霜期 160~180 d,年日照时数 2 352~2 573 h,日照百分率达 54% 左右;年平均气温

8.9 °C, ≥10 °C 积温 2 866 °C,干燥度为 1.5~2.5,年总辐射量为 552.68 kJ/cm²。土壤以黄绵土为主,水土流失面积约占总面积的 96%,属典型的生态环境脆弱区。植被区划为森林草原区,天然林已全遭破坏,水分条件较好的沟谷仅生长一些散生乔木和灌木组成的林分,如小叶杨 (*Populus simonii*)、臭椿 (*Ailanthus altissima*)、狼牙刺 (*Sophora davidii*)、土庄绣线菊 (*Spiraea pubescens*) 等;草本植被多分布在梁峁坡,主要为长芒草 (*Stipa bungeana*)、白羊草 (*Bothriochloa ischaemum*)、茭蒿 (*Artemisia giraldii*)、兴安胡枝子 (*Lespedeza daurica*) 等优势种。

2 材料与方法

2.1 野外调查

于 2012 年 7 月在全面踏查的基础上,根据植物群落结构特征和物种组成及撂荒年限,在安塞县的纸坊沟和县南沟流域,选定人为干扰较少且群落以天然更新为主、面积为 30 m×30 m 的白羊草群落样地 9 块、长芒草群落样地 11 块,样地基本情况见表 1。

退耕年限通过访问当地居民获取。调查取样时,按对角线法在每块样地内设置面积为 1 m×1 m 的 3 个样方,调查群落植物种类、盖度、高度、株丛数、地上生物量、地下生物量等。样地地理位置、坡向、海拔采用手持 GPS 测定,坡度采用坡度仪测定,具体操作为:选择代表性的坡面位置,将坡度仪直面靠在斜坡上,旋转刻度盘,当水平气泡处于水平位置时读取刻度盘上的刻度值为斜坡的坡度。

群落盖度采用目测法测定。地上生物量测定采用收获法:分优势种和其他种齐地面刈割,分别野外称鲜重后取一定比列的鲜样带回实验室经杀青以后,在 80 °C 恒温烘至恒重,以获取生物量干重。地下生物量测定与地上调查同步进行,采用土钻法,钻头直径 10 cm,长 15 cm,在群落调查的样方内取样,深度为 20 cm,只取一层样。将取的根样带回实验室分别用 1,0.5 mm 孔径的筛子组成的冲洗设备进行冲洗,然后用镊子将根系从 2 个筛子中挑出,以确保根系挑拣完全,将挑出的根系置于 80 °C 烘箱恒温烘干至恒重后,用精确度为 0.000 1 的天平称干重并记录。

土壤容重采用环刀法,分 0—10 和 10—20 cm 两个土层进行测定,3 个重复。土壤养分取样方法与土

壤容重相同,将土样在风干后,磨碎分别过 1,0.25 mm 筛,然后装入塑封袋中。

表 1 样地基本情况

恢复年限/a	纬度	经度	坡度/(°)	海拔/m	坡位	坡向	物种组成
25	36°51'05"N	109°18'47"E	17	1 292	上	南偏东 12°	白羊草—胡枝子
30	36°51'06"N	109°18'40"E	34	1 274	上	南偏西 11°	白羊草—铁杆蒿
30	36°51'06"N	109°18'41"E	32	1 284	上	南偏西 11°	白羊草—铁杆
34	36°51'03"N	109°18'43"E	34	1 282	下	西偏南 27°	白羊草
34	36°51'04"N	109°18'44"E	27	1 299	下	南偏西 10°	白羊草—胡枝子
40	36°51'03"N	109°18'39"E	41	1 273	上	南	白羊草—铁杆蒿
40	36°51'04"N	109°18'38"E	35	1 285	上	南	白羊草
>45	36°44'22"N	109°20'11"E	30	1 112	上	西偏北 10°	白羊草
>45	36°44'22"N	109°20'11"E	42	1 120	上	西偏北 11°	白羊草—茭蒿
14	36°51'15"N	109°18'45"E	22	1 285	中	西偏北 35°	长芒草
14	36°51'21"N	109°19'02"E	26	1 287	中	东偏北 10°	长芒草—胡枝子
18	36°51'07"N	109°18'43"E	11	1 281	上	北偏东 35°	长芒草—铁杆蒿
18	36°51'06"N	109°18'43"E	13	1 310	上	南偏西 45°	长芒草—铁杆蒿
22	36°51'06"N	109°18'45"E	5	1 303	上	西偏南 35°	长芒草
22	36°51'04"N	109°18'37"E	27	1 275	上	南偏东 40°	长芒草—胡枝子
26	36°45'57"N	109°15'50"E	26	1 106	下	西偏南 10°	长芒草—胡枝子
33	36°45'56"N	109°15'49"E	30	1 202	下	西偏北 20°	长芒草—胡枝子
33	36°45'55"N	109°15'52"E	35	1 181	下	西偏北 11°	长芒草
45	36°51'21"N	109°19'04"E	20	1 186	上	东	长芒草
45	36°51'21"N	109°19'05"E	25	1 178	上	东偏南 17°	长芒草

2.2 土壤样品分析及计算方法

土壤样品:用重铬酸钾容量法—外加热法(GB7857—87)测定有机质,半微量开氏法(GB7173—87)测定全氮,硫酸—高氯酸消煮—钼锑抗比色法(GB7852—87)分析全磷^[4]。

土壤有机碳密度(SOC_{density})是指单位面积一定深度的土层中有机碳的储量,一般用 t/hm² 或 kg/m² 表示。本研究采用的第 *i* 层土壤有机碳密度计算公式^[11]为:

$$\text{SOC}_{\text{density}} = C_i \cdot \theta_i \cdot D_i \cdot (1 - \delta_i) / 100 \quad (1)$$

式中:*i*——第 *i* 土层; C_i ——第 *i* 层土壤有机碳的平均含量(g/kg); θ_i ——第 *i* 层土壤容重(g/cm³); D_i ——第 *i* 层土壤厚度(cm); δ_i ——第 *i* 层中直径大于 2 mm 砾石所占的体积百分比(%)。下同。根据土壤石质度级别与 δ 的关系,鉴于黄土高原土壤特性,几乎没有粒径大于 2 mm 的砾石,取 δ 值为 0.5%^[12]。如果某一土壤剖面由 *m* 层组成,那么该剖面的有机碳密度(DSOC, kg/m²)为^[11]:

$$\begin{aligned} \text{DSOC} &= \sum_{i=1}^m \text{SOC}_i \\ &= \sum_{i=1}^m C_i \cdot \theta_i \cdot D_i \cdot (1 - \delta_i) / 100 \quad (2) \end{aligned}$$

式中:*m*——土壤剖面的总土层数。

2.3 数据处理

应用单因素方差分析(one-way ANOVA)和最小显著差异法(LSD)比较 SOC 含量差异显著性;利用相关性分析 SOC 含量和各因子的关系,所有的统计分析均用 SPSS 13.0 软件完成。

3 结果与讨论

3.1 不同恢复年限长芒草和白羊草群落表层 SOC 含量

3.1.1 长芒草群落 SOC 含量 黄土丘陵区不同恢复年限长芒草群落土壤表层(0—20 cm)SOC 平均含量表现为先增加后减小再增加的趋势(图 1),26 a 出现最大值(5.600 g/kg)。随着退耕年限的增加,14~18 a SOC 平均含量显著增加,年均增加量为 0.295 g/kg;18~26 a 增加平缓,年均增加量为 0.186 g/kg,相邻年限间差异不显著;26~45 a 略微下降,33,45 a SOC 平均含量分别低于 26 a 的 8.92%,3.18%,差异均不显著。0—10 cm 土层 SOC 含量变化趋势为先增加后减小再增加,45 a 出现最大值(6.948 g/kg);10—20 cm 土层 SOC 含量变化趋势为先增加后减小,33 a 出现最大值(5.634 g/kg)。0—10 cm 土层,14~18 a SOC 含量显著增加,年均增加量为 0.424 g/kg;18~22 a 增加平

缓,22~26 a 显著增加,年均增加量为 0.317 g/kg;26~45 a SOC 含量先减小再增加,33 a SOC 含量分别低于 26,45 a 31.32%,34.28%,均达到显著性水平($p < 0.05$)。10—20 cm 土层,14~45 a 增加平缓,相邻年限间差异不显著,表明 10—20 cm 受综合因子的干扰较 0—10 cm 小,SOC 含量较 0—10 cm 稳定。不同剖面土层,除 33 a 外 SOC 含量均表现为土层 0—10 > 土层 10—20 cm,且 14 a 减幅最小为 0.863 g/kg,45 a 减幅最大为 3.053 g/kg。

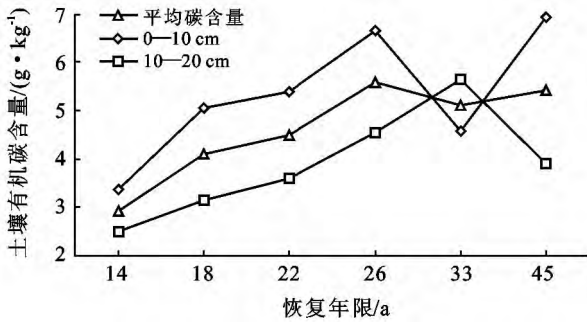


图 1 不同恢复年限长芒草群落 SOC 含量

3.1.2 长芒草群落 SOC 密度 黄土丘陵区不同恢复年限长芒草群落土壤表层总 SOC 密度变化趋势与 SOC 平均含量相同(图 2),26 a 出现最大值(1.353 kg/m²)。随着退耕年限的增加,14~26 a 总 SOC 密度平缓增加,年均增加量为 0.054 kg/m²,相邻年限差异不显著;26~45 a 略微下降,33,45 a 总 SOC 密度分别低于 26 a 5.91%,2.10%,差异均不显著。0—10,10—20 cm 土层 SOC 密度变化趋势分别与 0—10,10—20 cm 土层 SOC 含量相同,分别在 45,33 a 出现最大值(0.831,0.731 kg/m²)。0—10 cm 土层,14~18 a SOC 密度显著增加,年均增加量为 0.048 kg/m²,18~26 a 增加平缓,年均增加量为 0.025 kg/m²,26~45 a SOC 密度减小再增加,33 a SOC 密度分别低于 26,45 a 30.25%,34.80%,达到显著性水平($p < 0.05$)。10—20 cm 土层,14~45 a 增加平缓,相邻年限间差异不显著。不同剖面土层,除 33 a 外 SOC 密度均表现为土层 0—10 > 土层 10—20 cm,且 14 a 减幅最小为 0.075 kg/m²,45 a 减幅最大 0.338 kg/m²。

3.1.3 白羊草群落 SOC 含量 黄土丘陵区不同恢复年限白羊草群落土壤表层(0—20 cm)SOC 平均含量表现为先增加后减小再增加的趋势(图 3),45 a 以上出现最大值(6.875 g/kg)。随着退耕年限的增加,25~40 a SOC 平均含量平缓增加,年均增加量为 0.054 g/kg;40~45 a 以上显著增加,40 a SOC 平均含量低于 45 a 以上 29.38%,差异显著($p < 0.05$)。

0—10,10—20 cm 土层 SOC 含量均表现为先增加后减小再增加的趋势,且均在 45 a 以上出现最大值(7.781,5.968 g/kg)。0—10 cm 土层 25~40 a SOC 含量平缓增加,年均增加量为 0.040 g/kg,40~45 a 以上显著增加,40 a SOC 含量低于 45 a 以上 26.01%,差异显著($p < 0.05$)。10—20 cm 土层 25~30 a SOC 含量显著增加,年均增加量为 0.226 g/kg,30~40 a 平缓增加,40~45 a 以上显著增加,40 a SOC 含量低于 45 a 以上 33.77%,差异显著($p < 0.05$)。不同剖面土层,SOC 含量表现为土层 0—10 > 土层 10—20 cm,40 a SOC 含量减幅最小为 1.804 g/kg;30 a 减幅最大为 2.443 g/kg。

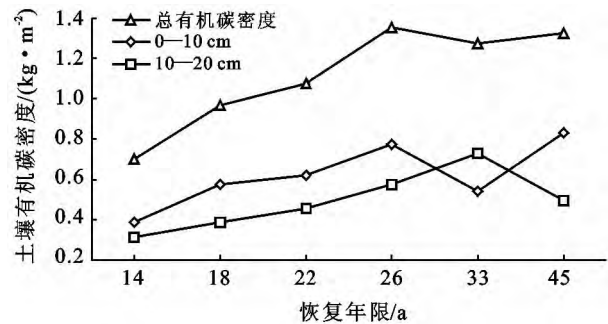


图 2 不同恢复年限长芒草群落 SOC 密度

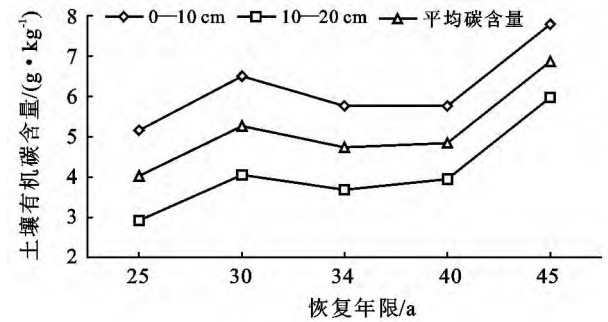


图 3 不同恢复年限白羊草群落 SOC 含量

3.1.4 白羊草群落 SOC 密度 黄土丘陵区不同恢复年限白羊草群落土壤表层总 SOC 密度变化趋势与 SOC 平均含量相同(图 4),45 a 以上出现最大值(1.766 kg/m²)。随着退耕年限的增加,25~30 a 总 SOC 密度显著增加,年均增加量为 0.061 kg/m²;30~40 a 增加平缓,40~45 a 以上显著增加,40 a 总 SOC 密度低于 45 a 以上 38.89%,差异显著($p < 0.05$)。0—10,10—20 cm 土层 SOC 密度分别与 0—10,10—20 cm SOC 含量变化趋势相同,均在 45 a 以上出现最大值(1.000,0.766 kg/m²)。0—10 cm 土层 25~40 a SOC 密度平缓增加,年均增加量为 0.007 kg/m²;40~45 a 以上显著增加,40 a SOC 密度低于 45 a 以上的 30.21%,差异显著($p < 0.05$)。

10—20 cm 土层, 25~30 a SOC 密度显著增加, 年均增加量为 0.030 kg/m^2 , 30~40 a 平缓增加, 40~45 a 以上显著增加, 40 a SOC 密度低于 45 a 以上 38.89%, 差异显著 ($p < 0.05$)。不同剖面土层, SOC 密度表现为土层 0—10 > 土层 10—20 cm, 34 a SOC 密度减幅最小为 0.209 kg/m^2 , 30 a 减幅最大为 0.278 kg/m^2 。

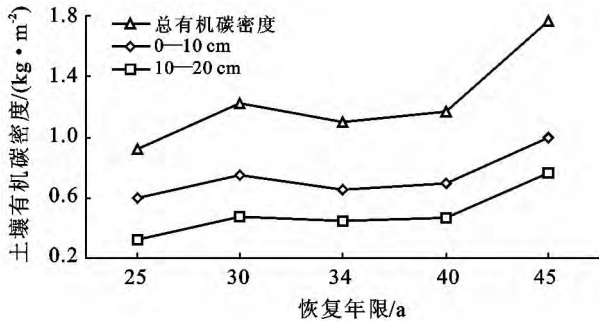


图 4 不同恢复年限白羊草群落 SOC 密度

3.2 长芒草、白羊草群落表层 SOC 平均含量与各影响因子的关系

3.2.1 表层 SOC 平均含量与地形因子、恢复年限的关系 表 2 为长芒草、白羊草群落表层 SOC 平均含量与地形因子、恢复年限的相关性分析结果, 结果表明海拔分别与长芒草、白羊草群落 SOC 平均含量呈显著负相关、极显著负相关; 恢复年限与长芒草、白羊草群落 SOC 平均含量呈显著正相关(坡度、坡位对长芒草、白羊草群落总 SOC 平均含量的影响不显著), 表明长芒草、白羊草群落总 SOC 平均含量随着海拔的降低而增加, 随着恢复年限的增加而增加。海拔、恢复年限是长芒草、白羊草群落 SOC 平均含量的显著影响因素。

表 2 长芒草、白羊草群落的 SOC 平均含量与地形因子、恢复年限关系

影响因子	长芒草群落的 SOC 平均含量	白羊草群落的 SOC 平均含量
海拔	$R = -0.704^*$	-0.834^{**}
高度	$P = 0.016$	0.005
恢复	$R = 0.657^*$	0.709^*
年限	$P = 0.028$	0.032
	$N = 11$	9

注: * 表示显著性在 0.05 水平; ** 表示显著性在 0.01 水平; R 表示相关系数; P 表示概率; N 表示样本数。下同。

3.2.2 表层 SOC 平均含量与植被因子的关系 表 3 为长芒草、白羊草群落表层 SOC 平均含量与植被因子的相关性分析结果, 结果表明地上、地下生物量与

长芒草、白羊草群落 SOC 平均含量分别呈显著正相关、极显著正相关(平均高度、平均盖度对长芒草、白羊草群落 SOC 平均含量影响不显著)。表明长芒草、白羊草群落 SOC 平均含量随着地上生物量、地下生物量的增加而增加。地上、地下生物量是长芒草、白羊草群落 SOC 平均含量的显著影响因素。

表 3 长芒草、白羊草群落 SOC 平均含量与植被因子关系

植被因子	长芒草群落的 SOC 平均含量	白羊草群落的 SOC 平均含量
地上生物量	$R = 0.733^*$	0.705^*
	$P = 0.010$	0.034
地下生物量	$R = 0.769^{**}$	0.846^{**}
	$P = 0.006$	0.004
	$N = 11$	9

3.2.3 表层 SOC 平均含量与土壤理化因子的关系

表 4 为长芒草、白羊草群落表层 SOC 平均含量与土壤理化因子的相关性分析结果。结果表明, 0—10, 10—20 cm 全氮与长芒草、白羊草群落 SOC 平均含量呈极显著正相关, 0—10 cm 容重与长芒草、白羊草群落 SOC 平均含量分别呈极显著负相关、显著负相关; 10—20 cm 容重与白羊草群落 SOC 平均含量显著负相关(0—10, 10—20 cm 全磷对长芒草、白羊草群落 SOC 平均含量影响不显著), 10—20 cm 容重对长芒草群落 SOC 平均含量影响不显著。表明长芒草、白羊草群落 SOC 平均含量随着 0—10, 10—20 cm 全氮的增加而增加, 随着 0—10, 10—20 cm 容重的减小而增加。0—10, 10—20 cm 全氮、0—10 cm 容重是长芒草、白羊草群落 SOC 平均含量的显著影响因子, 10—20 cm 容重是白羊草群落 SOC 平均含量的另一显著影响因子。

表 4 长芒草、白羊草群落 SOC 平均含量与土壤理化因子的关系

土壤理化因子	长芒草群落的 SOC 平均含量	白羊草群落的 SOC 平均含量
0—10 cm 全氮含量	$R = 0.919^{**}$	0.961^{**}
	$P = 0.000$	0.000
10—20 cm 全氮含量	$R = 0.767^{**}$	0.973^{**}
	$P = 0.006$	0.000
0—10 cm 容重	$R = -0.777^{**}$	-0.766^*
	$P = 0.005$	0.019
10—20 cm 容重	$R = -$	-0.784^*
	$P = -$	0.006
	$N = 11$	9

3.3 讨论

退耕地植被恢复,以改良土壤为基础,通过植被枯枝落叶层、根系和固氮作用,对地表生物种类、丰度和组成产生重大影响,改善土壤物理性质,改变地表特征,从而促进土壤碳的固定^[13]。黄土丘陵区长芒草、白羊草群落自然恢复过程中,土壤表层 SOC 平均含量均表现为先增加后减小再增加的趋势。已有研究表明,植被恢复后,SOC 含量随植被群落的演替呈先增加后减少再增加的趋势^[14],本研究中黄土丘陵区不同恢复年限长芒草、白羊草群落 SOC 平均含量的变化趋势与前人研究结果一致。表明植被的恢复和重建有利于土壤有机碳的积累。

土壤有机碳密度是计算土壤有机碳储量的关键因子,是评价和衡量土壤中有有机碳储量的重要指标^[15],本研究得出,长芒草、白羊草群落土壤总 SOC 密度随着恢复年限总体上呈增加的趋势。黄土丘陵区,合理的植被恢复措施,不仅可有效地保持水土,避免土壤侵蚀,而且可有效地提高土壤固碳增汇潜力。

海拔作为环境因子的综合体现,其对 SOC 的影响具有复杂性,通过对植被类型和植被生产力的制约直接影响输入土壤的有机物质量,通过对土壤温度和水分等条件的改变影响微生物对有机质的分解和转化^[16]。本研究得出长芒草、白羊草群落 SOC 平均含量与海拔呈显著负相关。刘伟等^[17]在黄土高原草地土壤有机碳的影响因素分析研究中得出黄土高原土壤有机碳含量与海拔高度呈显著正相关($p < 0.01$),孙文义等^[18]得出黄土丘陵区小流域不同深度 SOC 含量的空间分布特征随海拔升高而降低,充分说明了海拔对 SOC 影响的复杂性。本研究中长芒草、白羊草群落 SOC 平均含量与恢复年限呈正相关,这与郭志彬^[19]在半干旱黄土高原地区不同干预方式下撂荒地演替植被生物量与土壤理化性质变化研究中得出的土壤表层 0—20 cm 的 SOC 与自然恢复年限成正相关的结果一致。SOC 是由碳的输入和输出共同决定的^[20],有机质来源的匮乏是其含量较低的主要原因。土壤中的有机碳都来源于植物,其根或枝条的死亡残体通过腐殖化过程形成土壤有机质,植物生长过程中向根际释放的根系分泌物或脱离物,如根毛和代谢的细根,植被自然恢复过程中,主要是通过改变二者的数量和质量及其环境条件,从而影响有机碳的储存量、组成和稳定性^[21]。黄土丘陵区不同恢复年限长芒草、白羊草群落 SOC 平均含量与地上、地下生物量呈显著正相关,表明植被是 SOC 的显著影响因子,这与田玉强等^[22]在青藏高原样带高寒生态系统植被恢复过程得出的 SOC 与生物量的关系一致。

本研究还得出 0—10 cm 全氮含量、10—20 cm 全氮含量、0—10 cm 容重、10—20 cm 容重也是 SOC 含量显著影响因素。碳、氮循环是两个紧密联系的生物过程,土壤碳库与氮库紧密相关,土壤全氮的增加促进 SOC 的固定^[23]。李明峰等^[24]经过研究得出草原 SOC 和氮含量呈正相关,在对高寒农牧交错带植被恢复研究中张平良等^[25]得出了同样的结果。李晓东^[26]通过对土地利用方式对陇中黄土高原土壤碳素影响的研究,得出了草地 SOC 与土壤容重呈负相关,曹丽花等^[27]在退化高寒草甸 SOC 分布特征及与土壤理化性质的关系的研究中得出 SOC 与土壤容重呈显著负相关。

4 结论

(1) 不同恢复年限长芒草群落土壤表层 SOC 平均含量 14~18 a 显著增加,年均增加量为 0.295 g/kg;18~26 a 增加平缓,年均增加量为 0.186 g/kg;26~45 a 略微下降,33,45 a SOC 平均含量分别低于 26 a 8.92%,3.18%。白羊草群落则为 25~40 a 平缓增加,年均增加量为 0.054 g/kg,40~45 a 以上显著增加,40 a SOC 平均含量低于 45 a 以上 29.38%,差异显著($p < 0.05$)。植被恢复过程中 SOC 平均含量存在明显的固存效应。

(2) 不同恢复年限长芒草群落土壤表层总 SOC 密度 14~26 a 平缓增加,年均增加量为 0.054 kg/m²,26~45 a 略微下降,33,45 a 总 SOC 密度分别低于 26 a 5.91%,2.10%。白羊草群落土壤表层总 SOC 密度 25~30 a 显著增加,年均增加量为 0.061 kg/m²;30~40 a 增加平缓,40~45 a 以上显著增加,40 a 总 SOC 密度低于 45 a 以上 38.89%,差异显著($p < 0.05$)。长芒草、白羊草群落的演替过程有助于提高土壤的固碳能力。

(3) 长芒草、白羊草群落 SOC 平均含量随着恢复年限、地上生物量、地下生物量、全氮的增加而增加,随着海拔、0—10 cm 全氮的增加而减小,白羊草群落 SOC 平均含量随着 10—20 cm 全氮的增加而减小。海拔、恢复年限、地上生物量、地下生物量、全氮、0—10 cm 容重为长芒草、白羊草群落 SOC 平均含量显著影响因子,10—20 cm 全氮为白羊草群落 SOC 平均含量另一显著影响因子。

[参 考 文 献]

- [1] 程积民,程杰,杨晓梅,等.黄土高原草地植被碳密度的空间分布特征[J].生态学报,2012,32(1):227-237.
- [2] 郭曼,郑粉莉,和文祥,等.黄土丘陵区不同退耕年限植被多样性变化及其与土壤养分和酶活性的关系[J].土

- 壤学报, 2010, 47(5): 980-985.
- [3] 焦菊英, 张振国, 贾燕锋, 等. 陕北丘陵沟壑区撂荒地自然恢复植被的组成结构与数量分类[J]. 生态学报, 2008, 28(7): 2981-2997.
- [4] 马祥华, 焦菊英. 黄土丘陵沟壑区退耕地自然恢复植被特征以及与土壤环境的关系[J]. 中国水土保持科学, 2005, 3(2): 15-22.
- [5] 张娜, 梁一民. 干旱气候对白羊草群落土壤水分和地上部生长的初步观察[J]. 生态学报, 2000, 20(6): 964-970.
- [6] 张桂莲, 张金屯, 陈林美. 山西南部山地白羊草群落数量分类与排序[J]. 草业学报, 2003, 12(3): 63-69.
- [7] 李琪, 张金屯, 高洪文. 山西高原三种白羊草群落的生物量研究[J]. 草业学报, 2003, 12(1): 53-58.
- [8] 李兰芳, 王涛, 张文彦, 等. 白羊草化学成分的研究[J]. 沈阳医科大学学报, 2000, 17(4): 269-270.
- [9] 武春华, 陈云明, 王国梁. 黄土丘陵区典型群落特征及其与环境因子的关系[J]. 水土保持学报, 2008, 22(3): 64-69.
- [10] 王国梁, 刘国彬. 黄土丘陵区长芒草群落对土壤水分入渗的影响[J]. 水土保持学报, 2009, 23(3): 228-231.
- [11] 刘伟, 程积民, 陈芙蓉, 等. 黄土高原中部草地土壤有机碳密度特征及碳储量[J]. 草地学报, 2011, 19(3): 425-431.
- [12] 姚贤良, 程云生. 土壤物理学[M]. 北京: 农业出版社, 1986: 8-33.
- [13] Franzen D W, Cihacek L J, Hofman V I. Variability of soil nitrate and phosphate under different landscapes [C]// Proceedings of the 3th International Conference on Precision Agriculture. Minneapolis, Minnesota: ASA, CSSA, SSSA, 1996: 521-529.
- [14] 焦峰, 温仲明, 焦菊英, 等. 黄土丘陵区退耕地土壤养分变异特征[J]. 植物营养与肥料学报, 2006, 11(6): 724-730.
- [15] 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.
- [16] 武小钢, 郭晋平, 杨秀云, 等. 芦芽山典型植被 SOC 剖面分布特征及碳储量[J]. 生态学报, 2011, 31(11): 3009-3019.
- [17] 刘伟, 程积民, 高阳, 等. 黄土高原草地土壤有机碳分布及其影响因素[J]. 土壤学报, 2012, 49(1): 68-76.
- [18] 孙文义, 郭胜利, 宋小燕. 黄土丘陵沟壑区小流域 SOC 空间分布及其影响因素[J]. 生态学报, 2011, 31(6): 1604-1616.
- [19] 郭志彬. 在半干旱黄土高原地区不同干预方式下撂荒地演替植被生物量与土壤物化性质变化[D]. 兰州: 兰州大学, 2010.
- [20] Thompson M V, Randerson J T, Malmstrom C M, et al. Change in net primary production and net heterotrophic respiration: How much is necessary to sustain the terrestrial carbon sink [J]. Global Biogeochemical Cycles, 1996, 10(4): 711-726.
- [21] IGBP, Terrestrial Carbon Working Group. The terrestrial carbon cycle: Implications for the Kyoto Protocol [J]. Science, 1998, 280(5368): 1393-1394.
- [22] 田玉强, 欧阳华, 宋明华, 等. 青藏高原样带高寒生态系统 SOC 分布及其影响因子[J]. 浙江大学学报, 2007, 33(4): 443-449.
- [23] Steltzer H. Soil carbon sequestration with forest expansion in an arctic forest-tundra landscape[J]. Canadian Journal of Forest Research, 2004, 34(7): 538-542.
- [24] 李明峰, 董云社, 耿元波, 等. 草原土壤的碳氮分布与 CO₂ 排放通量的相关性分析[J]. 环境科学, 2004, 25(2): 7-11.
- [25] 张平良, 李小刚, 李银科, 等. 高寒农牧交错带植被恢复对 SOC、全氮含量的影响[J]. 甘肃农业大学学报, 2007, 42(2): 98-102.
- [26] 李晓东. 土地利用方式对陇中黄土高原土壤碳素的影响[D]. 兰州: 兰州大学, 2009.
- [27] 曹丽花, 刘合满, 赵世伟. 退化高寒草甸 SOC 分布特征及与土壤理化性质的关系[J]. 草业科学, 2011, 28(8): 1411-1415.