

# 不同干扰对黄土高原典型草原土壤有机碳的影响

陈芙蓉<sup>1,2</sup>, 程积民<sup>1\*</sup>, 刘 伟<sup>1,2</sup>, 李 媛<sup>3</sup>, 陈 奥<sup>3</sup>, 赵新宇<sup>1,2</sup>

(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; 3. 西北农林科技大学动物科技学院, 陕西 杨凌 712100)

**摘要:**以黄土高原典型草原为对象,研究了封育+施肥、封育+火烧、封育和放牧 4 种干扰类型对土壤有机碳含量和有机碳密度的影响。结果表明:黄土高原典型草原不同干扰类型下土壤有机碳含量和有机碳密度都随土层深度的增加而减少,且干扰类型不同其减少程度不同;不同干扰类型对土壤有机碳含量影响不同。封育+施肥地在 0~50 cm 各土层有机碳含量均显著高于其他 3 个干扰类型,变化范围为 24.08~34.99 g·kg<sup>-1</sup>;其次为封育+火烧地,变化范围为 19.59~32.05 g·kg<sup>-1</sup>;在 0~40 cm 各土层,放牧地有机碳含量均最低,为 19.07~25.37 g·kg<sup>-1</sup>。不同干扰类型对有机碳密度的影响与对有机碳含量的影响基本相似。不同干扰对土壤有机碳的影响主要表现在 0~20 cm 土壤表层;在 0~50 cm 土层,4 种干扰类型土壤有机碳密度大小依次为:封育+施肥>封育+火烧>封育>放牧,分别为 14.51, 13.86, 12.27 和 11.85 kg·m<sup>-2</sup>。综上所述,人为干扰对典型草原土壤有机碳含量和有机碳密度具有明显影响;放牧导致土壤碳密度显著下降,而施肥和封育可以提高土壤碳密度。

**关键词:**黄土高原;典型草原;干扰类型;土壤有机碳含量;有机碳密度;

中图分类号:S812;S153.61

文献标识码:A

文章编号:1007-0435(2012)02-0298-08

## Effects of Disturbances on Organic Soil Carbon in the Typical Grassland of Loess Plateau

CHEN Fu-rong<sup>1,2</sup>, CHENG Ji-min<sup>1\*</sup>, LIU Wei<sup>1,2</sup>, LI Yuan<sup>3</sup>, CHEN Ao<sup>3</sup>, ZHAO Xin-yu<sup>1,2</sup>

(1. Institute of Soil and Water Conservation, Chinese Academy of Sciences & Ministry of Water Resources,

Yangling, Shaanxi Province 712100, China; 2. Graduate University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China;

3. College of Animal Science and Technology, Northwest Agricultural & Forestry University, Yangling, Shaanxi Province 712100, China)

**Abstract:** This study investigated the effects of four disturbances (enclosure-fertilization, enclosure-burning, fencing and grazing) on organic soil carbon content and density in Loess Plateau. Results are that organic carbon content and density decreased with increased soil depth and the decreasing amount differed for the four disturbances. Different disturbances made different effects on organic soil carbon content. The organic carbon content of 0~50 cm soil layer in the enclosure-fertilization grassland was the highest (from 24.08 to 34.99 g·kg<sup>-1</sup>), followed by enclosure-burning grassland (19.59~32.05 g·kg<sup>-1</sup>). In the 0~40 cm soil layer, the organic carbon content of grazing grassland was the lowest (from 19.07 to 25.37 g·kg<sup>-1</sup>). The effects of four disturbances on organic carbon density were similar to that on organic carbon content. In the 0~50 cm layer, enclosure-fertilized grassland got the highest organic carbon density (14.51 kg·m<sup>-2</sup>), followed by enclosure-burning grassland (13.86 kg·m<sup>-2</sup>), fencing grassland (12.27 kg·m<sup>-2</sup>) and grazing grassland (11.85 kg·m<sup>-2</sup>). These findings indicated that human interference could cause significant influence on organic soil carbon content and density of typical grasslands. Grazing could decrease organic soil carbon density while fertilization and fencing could increase it.

**Key words:** Loess plateau; Typical grassland; Disturbances type; Soil organic carbon content; Organic carbon density

收稿日期:2011-10-09;修回日期:2011-12-20

基金项目:中国科学院战略性先导科技专项“应对气候变化的碳收支认证及相关问题”(XDA05050202);国家重点实验室基金项目(10502-Z8);林业公益性行业科研专项(200904056)资助

作者简介:陈芙蓉(1986-),女,山西大同人,硕士研究生,主要从事恢复生态学研究,E-mail: cfrmax@163.com; \*通信作者 Author for correspondence, E-mail: gyzcjm@ms.iswc.ac.cn

土壤碳库是陆地生态系统最大的碳库,其储存的有机碳占整个陆地生态系统碳库的 2/3,约为植物碳库的 3 倍或大气碳库的 2 倍,是全球碳循环非常重要的组成部分<sup>[1]</sup>。中国草地面积约为  $331 \times 10^6 \text{ hm}^2$ ,是我国陆地最大的生态系统之一<sup>[2]</sup>,总碳库 1.15 Pg C,其中土壤碳库占了 92%。我国草地土壤碳库在全球碳循环中占有非常重要的地位。黄土高原半干旱区典型草原面积为  $1.5 \times 10^5 \text{ hm}^2$ <sup>[3]</sup>,其潜在的固碳潜力不容忽视。然而近年来随着该区人口的增加及经济的发展,典型草原受到强烈的人为干扰,这些人为干扰势必影响到典型草原碳库功能的发挥<sup>[4]</sup>。

土壤有机碳是土壤质量与土壤持续能力的重要表征。不同的人为干扰对土壤有机碳会产生不同的效果,不合理的人为干扰会破坏草原生态系统的碳平衡,使草地生态系统中储存的碳大量释放<sup>[5]</sup>; Lal<sup>[6]</sup>指出合理的人为干扰不仅可以增加地上生物量,增加土壤有机碳的输送来源,同时降低土壤有机碳矿化分解的速率,也可以改善土壤的理化性质,使土壤质量得到恢复。施肥、火烧、封育和放牧是人类在草原管理实践中施加于草原的主要干扰类型,对草原土壤有机碳储量会产生重要的影响。

目前,国内外很多研究多着眼于干扰对草地土壤有机碳的影响,定位试验表明长期施用有机和无机配合肥能显著提高土壤活性有机碳的含量,增大草地生态系统碳蓄积量<sup>[7]</sup>。Frank 等<sup>[8]</sup>通过在美国北部半干旱草地试验发现放牧管理活动对草地土壤的扰动与天然草地相比明显加强了土壤的呼吸作用;何念鹏等<sup>[9]</sup>认为长期封育(或禁牧)是内蒙古典型草地实现固碳效应最经济、最有效的途径之一。许中旗等<sup>[10]</sup>认为放牧导致典型草原土壤碳密度和总碳贮量明显下降。国外在 20 世纪初就有学者进行火烧对草地影响的研究,而我国关于火烧对草地影响的研究较少,对火烧草地的认识还存在着争议。多数研究表明火烧后草地土壤表层有机质含量会下降,草地烧荒也会导致碳储量的大量流失<sup>[11,12]</sup>。

黄土高原作为全球最大的干旱半干旱区域之一,目前对黄土高原典型草原这一特殊的植被类型的研究甚少,对该区草原不同干扰类型对土壤有机碳影响的综合研究更少。所以,本文以黄土高原典型草原云雾山自然保护区为对象,研究不同干扰类型(封育+施肥、封育+火烧、封育和放牧)对黄土高原典型草原土壤有机碳的影响,为典型草原的合理利用及其在全球气候变化中的贡献提供科学依据。

## 1 材料与方法

### 1.1 研究区自然概况

研究区位于宁夏回族自治区固原市云雾山草原自然保护区境内,地理位置为 E  $106^{\circ}24' \sim 106^{\circ}28'$ , N  $36^{\circ}13' \sim 36^{\circ}19'$ ,面积  $6700 \text{ hm}^2$ ,海拔  $1800 \sim 2100 \text{ m}$ ,年平均气温  $5^{\circ}\text{C}$ ,最热月为 7 月,气温在  $22 \sim 25^{\circ}\text{C}$ ,最冷月为 1 月,平均最低气温  $-14^{\circ}\text{C}$ , $\geq 10^{\circ}\text{C}$  积温  $2100 \sim 3200^{\circ}\text{C} \cdot \text{a}^{-1}$ 。年降水量  $400 \sim 450 \text{ mm}$ ,主要集中在 7—9 月,蒸发量  $1330 \sim 1640 \text{ mm}$ ,属典型的半干旱草原气候。土壤类型主要为黑垆土和黄绵土。植被类型主要是温带典型草原,其建群种和优势种为本氏针茅(*Stipa bungeana*)、大针茅(*S. grandis*)、百里香(*Thymus mongolicus*)和铁杆蒿(*Artemisia sacrorum*)群落,伴生种以芨芨蒿(*A. giraldii*)、扁穗冰草(*Agropyron cristatum*)、星毛委陵菜(*Comarum acaulis*)群落为主,其中丛生禾本科植物本氏针茅在该区分布范围最广<sup>[13]</sup>。

### 1.2 采样方法

试验共设置 4 个群落特征相近、地形一致,并具有相同水热条件的阳坡样地,按不同干扰类型设置 4 个处理。①封育+施肥地(enclosure-fertilization, EF):2010 年 7 月中旬在封禁 20 年的样地进行施肥处理,施氮磷钾复合肥(N-P-K)(其中总氮(N)含量 20.2%,有效磷( $\text{P}_2\text{O}_5$ )含量 9.5%,钾( $\text{K}_2\text{O}$ )含量 10.5%),施肥量  $600 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$ ;②封育+火烧地(enclosure-burning, EB):同样在封禁 20 年的草地设置样地,2011 年 4 月初由于人为原因,草地遭火烧,火烧比例  $< 30\%$ ,属于轻度火烧;③封育地(enclosure, E):封禁年限为 20 年;④放牧地(grazing, G):根据草地产草量  $4500 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2} \cdot \text{a}^{-1}$ ,每只羊每天需要 3 kg 草,设置载畜率水平 2.07 羊单位  $\cdot \text{hm}^{-2} \cdot \text{半年}^{-1}$ ,属中度放牧,放牧绵羊数为 4 只。放牧试验于 2010 年 5 月初开始,10 月末结束,采取轮牧方式,放牧期 3 个月,即每隔 1 个月进行 1 次放牧,每次 10 d,每天从早上 6 点将家畜赶入放牧区让其自由采食,到下午 6 点赶回畜圈休息。

采样时间为 2011 年 5 月初,考虑到地形因素的影响,在每个样地选取坡底、坡中和坡上 3 个坡位,每个坡位随机法选择 3 个样方作为重复,用直径 5 cm 的土钻取样,取样深度为 50 cm,每 10 cm 一层共分 5 层(0~10, 10~20, 20~30, 30~40, 40~50

cm)进行取样,对相同土层的3次重复土样进行混匀装袋,带回实验室处理。在每个坡位挖一个50 cm×50 cm×50 cm的土壤剖面,50 cm深度上每隔10 cm分5层采用环刀法来取土用于测定土壤容重,每层2个重复。

### 1.3 样品分析方法

取回的土样置于室内风干,去除细根及杂质,过0.25 mm土壤筛,采用浓硫酸-重铬酸钾外加热法测定土壤有机碳(soil organic carbon, SOC);土壤含水量和土壤容重都采用烘干法,在(105±2)°C条件下烘干至恒重。

### 1.4 土壤有机碳密度计算方法

土壤有机碳密度(soil organic carbon density, SOCD)通常是指单位面积一定深度土体中土壤有机碳质量,单位为 $\text{kg C} \cdot \text{m}^{-2}$ 。其计算公式为:

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

式中: $i$ 为土层, $C_i$ 为第 $i$ 层土壤有机碳的平均含量( $\text{g} \cdot \text{kg}^{-1}$ ), $\theta_i$ 为第 $i$ 层土壤容重( $\text{g} \cdot \text{cm}^{-3}$ ), $D_i$ 为第 $i$ 层土壤厚度(cm), $\delta_i$ 为第 $i$ 层中直径大于2 mm的石砾所占的体积百分比(%)。鉴于黄土高原典型草原的土壤特性,几乎没有粒径大于2 mm的砾石, $\delta$ 值可以忽略不计。

如果某一土壤剖面由 $m$ 层组成,那么该剖面的

有机碳密度(SOCD,  $\text{kg} \cdot \text{m}^{-2}$ )为<sup>[14]</sup>:

$$\text{SOCD} = \sum_{i=1}^m \text{SOC}_i = \sum_{i=1}^m C_i \cdot \theta_i \cdot D_i / 100$$

### 1.5 统计分析

采用 SAS V8 统计分析软件对土壤分析结果进行预分析,由 Shapiro-Wilk 检验发现数据符合正态分布,采用 ANOVA 分析方法检验在  $P=0.05$  显著水平上各处理间差异,如差异显著,采用 Duancan 法在  $P=0.05$  显著水平上进行多重比较。

## 2 结果与分析

### 2.1 土壤有机碳含量(SOC)

**2.1.1 不同干扰类型土壤有机碳剖面垂直分布特征** 土壤有机碳含量是指单位质量土壤中有有机碳的含量,代表土壤中有有机碳的比例,用  $\text{g} \cdot \text{kg}^{-1}$  表示,草地上不同的干扰会影响土壤有机碳的输入和输出,而输入和输出又决定了土壤有机碳含量的变化<sup>[15]</sup>。由图1可知,在土壤有机碳含量的垂直分布中,黄土高原典型草原各种干扰类型下土壤有机碳含量总体上呈自上向下逐渐降低的趋势,但不同干扰类型土壤有机碳含量随土壤深度的增加而减少的程度不同,即减小的规律不同。

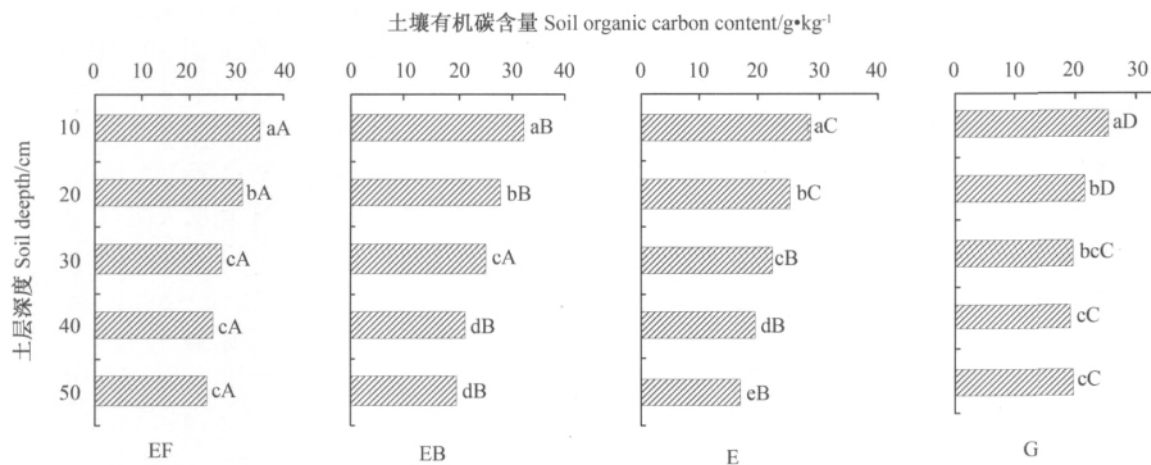


图1 黄土高原典型草原不同干扰类型各土层土壤有机碳含量

Fig. 1 The vertical distribution of SOC content with four disturbance treatments in different soil layers

注:不同大小写字母分别表示不同干扰类型同一土层和同一干扰类型不同土层间在0.05水平下差异显著

Note: Different small letters mean significant difference between different soil layers at the 0.05 level;

different captial letters mean significant difference between different disturbance types at the 0.05 level

如表1所示,封育+施肥地、封育+火烧地和封育地土壤有机碳含量与土层深度之间的关系呈直线

函数关系,且极显著负相关( $P < 0.01$ ),说明随土壤深度的增加有机碳含量呈直线下降低的趋势,由斜率

的大小得出土壤有机碳含量在 0~50 cm 土层中的递减速率依次为封育+火烧>封育>封育+施肥地,其分别减少了 40.62%,38.88%和 29.36%。放牧地有机碳含量与土层深度间可用二次幂函数很好

的拟合,相关性达到了极显著。这说明在浅层土壤,有机碳含量下降的速率较快,在 0~30 cm 土层减少了 22.31%,而随着土层深度的增加,下降速率逐渐减慢(仅减少了 3.25%)。

表 1 土壤有机碳与土层深度的关系

Table 1 Relationship of soil organic carbon and soil depth

干扰类型 Disturbance type	SOC 含量与土层深度的关系 Relationship of SOC content and soil layer	SOCD 与土层深度的关系 Relationship of SOCD and soil layer
封育+施肥 Enclosure-Fertilization	$y = -0.2752x + 36.724$ $R^2 = 0.9443^*$	$y = -0.0237x + 3.6144$ $R^2 = 0.9601^{**}$
封育+火烧 Enclosure-Burning	$y = -0.3133x + 34.614$ $R^2 = 0.9859^{**}$	$y = -0.025x + 3.5218$ $R^2 = 0.9818^{**}$
封育 Enclosure	$y = -0.2912x + 31.233$ $R^2 = 0.9973^{**}$	$y = -0.0142x + 2.9268$ $R^2 = 0.9104^*$
放牧 Grazing	$y = 0.0071x^2 - 0.5671x + 30.165$ $R^2 = 0.9911^{**}$	$y = 0.0011x^2 - 0.08264x + 3.6912$ $R^2 = 0.9307^*$

注:\*表示显著相关( $P < 0.05$ ),\*\*表示极显著相关( $P < 0.01$ )

Note:\* means significant correlation at 5% level,\*\* means significant correlation at 1% level

同一干扰类型的不同土层之间有机碳含量差异不同(图 1)。封育+施肥地除了 20~30,30~40,40~50 cm 土层间无明显差异,其他各层间均差异显著;封育+火烧地除 30~40 cm 与 40~50 cm 土层间差异不明显外,其他各层间差异显著;封育地各土层间有机碳含量均有显著性差异( $P < 0.05$ )。放牧地 0~10 cm 与其他 4 层差异显著,10~20 cm 与 30~40 cm 和 40~50 cm 土层间差异显著( $P < 0.05$ ),其他各层间没有显著性差异。总之,4 种干扰类型中,0~10 cm 表层土壤有机碳含量都显著高于其他 4 层( $P < 0.05$ )。

### 2.1.2 不同干扰类型对土壤有机碳含量的影响

由图 1 可知,不同干扰类型土壤有机碳含量在同一土层的分布也是有差异的,封育+施肥地的有机碳含量最高;在 0~40 cm 土层,有机碳含量为封育+施肥>封育+火烧>封育>放牧地,在 40~50 cm 土层,有机碳含量为封育+施肥>封育+火烧>放牧>封育地。在 0~10 cm 和 10~20 cm 土层,4 种干扰类型间有机碳含量均有显著性差异( $P < 0.05$ );在 20~30 cm 土层,仅封育+施肥与封育+火烧地间有机碳含量差异不明显,其他干扰类型间差异显著( $P < 0.05$ );在 30~40 cm 土层,除封育+火烧与封育地间有机碳含量差异不显著外,其他干扰类型之间差异明显( $P < 0.05$ );在 40~50 cm 土层,除封育+火烧与放牧地间有机碳含量无显著性差异,其他干扰类型间均差异显著( $P < 0.05$ )。总

之,在 0~20 cm 土壤表层,4 种干扰类型之间有机碳含量差异最明显( $P < 0.05$ )。

## 2.2 土壤有机碳密度(SOCD)

### 2.2.1 不同干扰类型土壤有机碳密度(SOCD)剖面垂直分布特征

土壤有机碳密度(SOCD)通常是指单位面积一定深度土体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来计算,土壤碳密度已成为评价和衡量土壤有机碳储量的一个极其重要的指标<sup>[16]</sup>。不同干扰类型土壤有机碳密度在 0~50 cm 不同土层的垂直分布如图 2 所示。由于不同干扰类型样地土壤容重差异较小,土壤有机碳密度在土体中的变化趋势与有机碳含量的变化趋势相似,不同干扰类型土壤有机碳密度在土壤剖面中的垂直分布表现出相同的规律,即土壤有机碳密度随土层深度的增加而逐渐减小。在 4 种干扰类型中,0~20 cm 表层土壤碳储量( $\text{kg} \cdot \text{m}^{-2}$ )占到 0~50 cm 土层总碳储量的 45%以上,而 0~30 cm 土层的碳储量则占到总量的 65%以上,30~50 cm 土层碳储量占总碳储量的比例不足 35%。

但对于不同干扰类型有机碳密度随土层深度增加而减少的趋势不同(表 1)。封育+施肥、封育+火烧和封育地土壤有机碳密度与土层深度成显著的负线性相关,所以根据斜率大小,可以说明土壤有机碳密度在土层中的递减速率为封育+火烧>封育+

施肥>封育,而放牧地土壤有机碳密度与土层深度成二次幂函数相关,即表层土壤有机碳密度随土层增加而减少快,越往深层越慢。因此对每种干扰类型的不同土层进行方差分析发现:封育+施肥地只有0~10 cm与30~40和40~50 cm土层有机碳密度之间差异显著( $P<0.05$ ),其他各层之间差异不显著;封育+火烧地0~10 cm土层有机碳密度与其他各层间差异显著( $P<0.05$ ),10~20 cm和20~30 cm土层有机碳与30~40和40~50 cm土层有机碳密度差异显著( $P<0.05$ ),其他各层间没有显著性差异;封育地相邻土层间有机碳密度差异不显著,其他各层间差异显著( $P<0.05$ );放牧地则是0~10 cm与其他各层之间有机碳达到显著性差异(图2)。

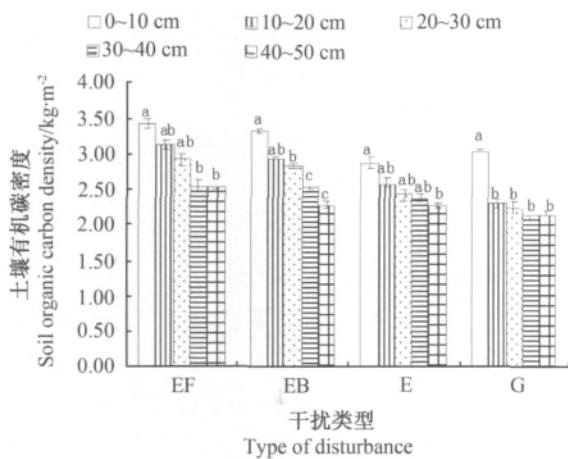


图2 不同干扰类型土壤有机碳密度的垂直分布

Fig. 2 The vertical distribution of soil organic carbon density under different disturbance treatments

注:不同小写字母表示差异显著( $P<0.05$ ),下同  
Note: Different lowercase letters mean significant difference at 5% level, the same as below

**2.2.2 不同干扰类型对土壤有机碳密度的影响**  
为了对不同土类和地域间进行比较,一般计算0~20 cm和0~100 cm深的土壤有机碳密度<sup>[10]</sup>,考虑到黄土高原典型草原植物根系主要集中在0~50 cm土层<sup>[17]</sup>,所以为了对土壤有机碳密度在不同干扰类型间进行比较,本文研究各干扰类型土壤0~20 cm和0~50 cm的有机碳密度。

如图3所示,在0~20 cm土层深度,不同干扰类型的土壤有机碳密度大小依次为:封育+施肥>封育+火烧>封育>放牧,分别为6.54, 6.25, 5.88和5.34  $\text{kg} \cdot \text{m}^{-2}$ ;封育+施肥地土壤有机碳密度与封育地、放牧地之间差异显著,其他干扰类型

间差异不显著。在0~50 cm土层深度,不同干扰类型典型草原土壤有机碳密度表现出如0~20 cm土层一样的变化规律,即封育+施肥>封育+火烧>封育>放牧地,分别为14.51, 13.86, 12.27和11.85  $\text{kg} \cdot \text{m}^{-2}$ ;仅封育+施肥地与放牧地之间有显著性差异,其他几种干扰类型之间差异不显著。人为干扰对碳密度的影响主要集中于土壤表层,对深层没有影响或影响较小。本研究结果表明,封育+施肥可以提高0~20 cm和0~50 cm土层土壤有机碳密度,而放牧使该土层有机碳密度处于较低水平。

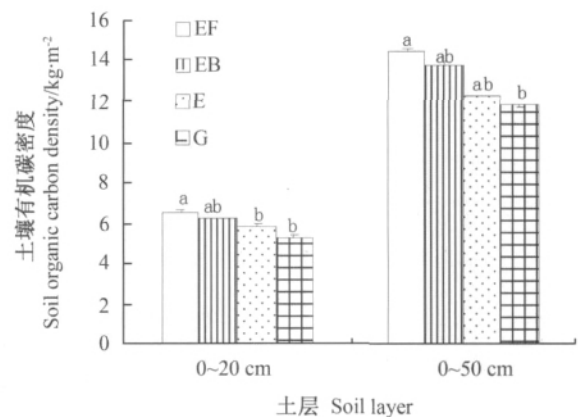


图3 不同干扰类型下0~20 cm和0~50 cm土层土壤有机碳密度

Fig. 3 The soil organic carbon density of 0~20 cm and 0~50 cm soil layer with different disturbance treatments

### 3 讨论与结论

#### 3.1 黄土高原土壤有机碳含量随土壤深度的变化

黄土高原典型草原土壤有机碳含量随土壤深度的增加而减少,而且不同干扰类型土壤有机碳含量的差异主要表现在0~20 cm土壤表层。土壤有机碳含量的这种分布规律与地上枯落物、根系深度和根生物量密切相关,因为土壤有机碳的主要来源是植物根系及枯落物的分解,因此它们的变化都会影响土壤有机碳输入的模式、速度和数量<sup>[18]</sup>。而在黄土高原典型草原中,枯落物在土壤表层,植物根系也主要分布在0~20 cm土层,随着土壤深度的增加,土壤温度、含水量和质地条件变差,根量也随之减少,有机质来源少,因此出现了有机碳含量随土层深度的增加而表现出逐渐降低的趋势,这与前人研究结果一致<sup>[19,14,20]</sup>。

不同干扰类型随土层深度有机碳含量降低的趋

势不同,封育+施肥地、封育+火烧地和封育地有机碳含量与土层深度成显著负线性相关;放牧地有机碳含量呈二次幂函数分布,因为放牧直接导致草原植被的破坏,使得根系生物量及枯落物的积累量明显减少,导致 0~30 cm 土层有机碳减少幅度很大,而在深层差别逐渐减小,即放牧使枯落物和植物根系向浅层土壤转移有机碳的功能在减弱,说明放牧干扰对土壤有机碳含量的影响主要集中在表层<sup>[21]</sup>。

### 3.2 封育对土壤有机碳的影响

封育是一种可以通过自然力的作用使退化草地的植被与土壤得到恢复和重建的有效措施<sup>[22]</sup>。封育一方面有效降低了草地的人为刈割和牲畜的采食、践踏,使植被盖度和植物多样性得到了较快的恢复,随着大量凋落物的归还,增加了土壤的碳贮量;另一方面,封育后植被盖度增加使土壤受到的侵蚀减少,保护了有机碳含量较高的表层土壤,而且植被对降尘和风吹蚀的细粒组分的截获增加<sup>[23]</sup>,凋落物的养分输入增加,这些都促进了土壤有机碳含量的增加。而本研究选用的是封育 20 年的草地,封禁时间过长,草地未得到合理利用,大量枯落物积累没有及时分解,抑制了草地幼苗的更新,出现了大量的杂草,其物种多样性降低<sup>[24]</sup>,优势种群根部缺少营养物质的供给而发生退化,减少了草地根部向土壤中碳源的输送。所以不管是有机碳含量还是有机碳密度都少于封育+施肥地和封育+火烧地,但均大于放牧地。

### 3.3 施肥对土壤有机碳的影响

施肥是人类在草地管理实践活动中施加于草地植被的主要干扰类型之一<sup>[25]</sup>。本研究中不管是有机碳含量还是有机碳密度(0~20 cm 和 0~50 cm),封育+施肥都高于其他 3 种干扰类型,这是因为施肥(N-P-K)直接补充草地土壤养分,一方面提高了草地生产力,使地上枯落物和植物根系增多,也增加了输入土壤中有机物质的量,而且氮、磷、钾合理搭配,可以提高养分利用效率,降低牧草的病虫害<sup>[26]</sup>;另一方面会影响土壤微生物的数量和活性,进而影响有机质生物降解过程<sup>[27]</sup>。特别是施氮不仅会增加群落的生物量,而且氮也是限制土壤微生物活动的主要因素之一<sup>[28]</sup>,加上钾的供应也增加了单位氮的利用效率<sup>[29]</sup>,促进了土壤有机物质的积累。所以与其他干扰类型相比,封育+施肥干扰显著增加了土壤有机碳含量。但由于本试验研究的是施肥第 2

年的效应,一部分立枯物没有进入土壤,因此土壤有机物质增加不明显,有机碳密度只显著高于放牧地。

### 3.4 火烧对土壤有机碳的影响

测定火烧后土壤有机碳含量是研究土壤、判断土壤肥力状况以及恢复情况的一项重要工作。本研究得出在火烧后的第 1 个生长季中,表层土壤有机碳含量较高,高于未火烧的样地(封育地)。在 0~10 cm 浅表层土壤有机碳含量比未烧地(封育地)多 11%,这是由于火烧主要是烧除了地表以上的枯落物和立枯物,同时草本植物燃烧迅速,土层增温不大,在浅表层土壤中的有机质受火烧的直接作用较小或者那些抗分解的有机残留物积累在土壤表层,而且不完全火烧促进了植物根部的残留枯落物的分解,分解的有机质补充到土壤中,使得土壤有机碳含量升高,另外也可能与火烧后土壤灰分中的交换性阳离子增加有关<sup>[30]</sup>。

与封育地相比,火烧后 10~20 cm 和 20~30 cm 土层有机碳含量分别显著增加了 9%和 12%,这是因为火烧后地表植被盖度减小,土壤温度升高,土壤微生物活动加强,土壤中的根系分解加快,分解过程中较为细小的有机质易于随水分向下层运移,到了土层 30~50 cm 处,向下移的有机质愈来愈少,有机碳含量虽有升高,但不明显。这与戴伟<sup>[31]</sup>研究人工油松(*Pinus tabulaeformis*)林、邓继武等<sup>[32]</sup>研究西双版纳次生林火烧前后土壤表层有机质含量大幅度增加的结果一致。而对于 0~20 cm 和 0~50 cm 有机碳密度,火烧地略高于封育地,但差异不显著。

国内外大量研究都表明火烧也会导致草地碳储量大量流失,一方面火烧最直接的影响就是去除地表的枯落物,使地上生物量及表层土壤中有机物质通过燃烧在极短的时间内氧化分解,使土壤有机碳的输入量几乎减少为零,减少了土壤有机碳来源;另一方面火烧后物质燃烧所产生的 CO<sub>2</sub> 大量排向大气,增加了大气中的 CO<sub>2</sub> 浓度<sup>[33]</sup>。但土壤有机碳是否损失或损失的强度与火烧强度及持续时间有关,且土壤表层的有机碳含量与火烧频率和烧后的时间密切相关<sup>[12]</sup>。由于本研究涉及的火烧为轻度火烧,持续时间短,而且所测定的土壤有机碳为火烧后 1 个月的效应,因此火烧使土壤有机碳增加并不能说明火烧增加了草地土壤碳储量。李政海等<sup>[12]</sup>、Ross 等<sup>[34]</sup>研究得出火烧后 1~2 年或连年火烧都会使土壤有机碳含量下降。所以草原火烧后土壤有机碳增加是短暂的。

### 3.5 放牧对土壤有机碳的影响

放牧是人类活动作用于草原土壤的一项非常重要的干扰因素,过度放牧是影响草地生态系统土壤有机碳含量的一个主要因素<sup>[35]</sup>。Li等<sup>[36]</sup>认为锡林河流域过度放牧是土壤有机质损失的重要原因,0~20 cm深的土体有机质平均损失在12.4%左右。关世英等<sup>[37]</sup>研究也表明,随着放牧强度的增加,土壤有机质呈明显的下降趋势,尤其是0~10 cm土层有机质下降最为明显。本研究中对于0~20 cm表层和0~50 cm土层来说,放牧地土壤碳储量比封育+施肥、封育+火烧和封育地分别低18%,15%和2%~5%,可见放牧对土壤碳储量的影响主要在表层。因牲畜对草的采食量增加,使植被盖度和地上生物量下降,枯落物减少,同时根系得不到养分供应,地下生物量也随之下降,从而使土壤有机碳含量减少;特别是在冬春季节,植被层低矮,盖度小,土壤风蚀严重,加剧了土壤有机质的损失。Derner等<sup>[38]</sup>、Zhao等<sup>[39]</sup>的研究也都表明,放牧减少了碳素向土壤的输入,从而减少了土壤有机碳含量。本研究表明,在0~10 cm土层,封育地土壤有机碳含量虽显著高于放牧地,但由于牲畜踩踏作用使草地土壤紧实度增加,容重变大,使放牧地有机碳密度略高于封育地,所以在0~20 cm土层两者间土壤碳储量没有差异。

## 4 结论

黄土高原典型草原不同干扰类型下土壤有机碳含量和密度都随土层深度的增加而减少,类型不同其减少程度不同。封育+施肥、封育和封育+火烧草地土壤有机碳与土层深度成显著负线性相关,且斜率依次减小;放牧草地有机碳与土层深度间的关系呈二次幂函数分布;不同干扰对土壤有机碳的影响主要在0~20 cm土壤表层。

不同干扰类型对土壤有机碳含量影响不同。在0~50 cm各土层封育+施肥地有机碳含量均显著高于其他3种干扰类型;在0~40 cm土层,放牧地有机碳含量最低;在40~50 cm土层,封育地有机碳含量最低。

不同干扰类型对土壤有机碳密度的影响与对有机碳含量的影响基本相似。在0~20 cm土层和0~50 cm土层,4种干扰类型土壤有机碳密度大小依次为:封育+施肥>封育+火烧>封育>放牧地。放牧导致土壤碳密度明显下降,而施肥和封育则可

以提高土壤碳密度,火烧后土壤有机碳增加是短暂性的。因此,从提高碳储量的角度来看,应该严格禁止典型草原的过度放牧行为,鼓励实行适当的草原管理措施(施肥、封育等)。

### 参考文献

- [1] Post W M, Peng T H, Emanuel W R, *et al.* The global carbon cycle[J]. *American Scientist*, 1990, 78: 310-326
- [2] 方精云,郭兆迪,朴世龙,等. 1981~2000年中国陆地植被碳汇的估算[J]. *中国科学D辑:地球科学*, 2007, 37(6): 804-812
- [3] 程积民,程杰,杨晓梅. 黄土高原草地植被与土壤固碳量研究[J]. *自然资源学报*, 2011, 26(3): 401-411
- [4] 李凌浩. 土地利用变化对草原生态系统土壤碳贮量的影响[J]. *植物生态学报*, 1998, 22(4): 300-302
- [5] 董云社,耿元波,齐玉春. 草地生态系统碳循环研究评述[J]. *地理科学进展*, 2004, 23(3): 74-81
- [6] Lal R. Soil carbon sequestration impacts on global climate change and food security[J]. *Science*, 2004, 304: 1623-1627
- [7] 王改兰,段建南,贾宁凤,等. 长期施肥对黄土丘陵区土壤理化性质的影响[J]. *水土保持学报*, 2006, 20(4): 81-89
- [8] Frank A B, Liebig M A, Tanaka D L. Management effects on soil CO<sub>2</sub> efflux in northern semiarid grassland and cropland[J]. *Soil & Tillage Research*, 2006, 89: 78-85
- [9] 何念鹏,韩兴国,于贵瑞. 长期封育对不同类型草地碳贮量及其固持速率的影响[J]. *生态学报*, 2011, 31(15): 4270-4276
- [10] 许中旗,李文华,许晴,等. 人为干扰对典型草原土壤碳密度及生态系统碳贮量的影响[J]. *自然资源学报*, 2009, 24(4): 621-629
- [11] Emily E Y Moghaddas, Scott L Stephens. Thinning, burning, and thin-burn fuel treatment effects on soil properties in a Sierra Nevada mixed-conifer forest[J]. *Forest Ecology and Management*, 2007, 250: 156-166
- [12] 李政海,绛秋. 火烧对草原土壤养分状况的影响[J]. *内蒙古大学学报:自然科学版*, 1994, 25(4): 444-449
- [13] 宁夏云雾山草原自然保护区管理处. 宁夏云雾山自然保护区科学考察与管理文集[M]. 银川:宁夏人民出版社, 2001
- [14] 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
- [15] Jackson R B, Schenk H J, Jobbágy E G, *et al.* Belowground consequences of vegetation change and their treatment in models[J]. *Ecological Applications*, 2000, 10(2): 470-483
- [16] 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
- [17] 陈芙蓉,程积民,于鲁宁,等. 封育和放牧对黄土高原典型草原生物量的影响[J]. *草业科学*, 2011, 26(6): 1079-1084
- [18] IGBP Terrestrial Carbon Working Group. The terrestrial carbon cycle: Implications for the Kyoto Protocol[J]. *Science*, 1998, 280: 1393-1394
- [19] 李金芬,程积民,刘伟,等. 黄土高原云雾山草地土壤有机碳、全氮分布特征[J]. *草地学报*, 2010, 18(5): 661-668

(下转 311 页)

- [J]. 生态环境, 2008, 17(5): 1974-1979
- [12] 巴吐尔·阿不都热和曼. 牧草混播的优越性及牧草混播的选择原则[J]. 新疆农业科技, 2009(5): 67-68
- [13] 余华阳, 刘斌, 于徐根, 等. 罗顿豆引种及品比试验小结[J]. 江西畜牧兽医杂志, 2004(3): 21
- [14] A Bogban, 李兰兴. 优质耐寒的热带豆科牧草: 罗顿豆[J]. 国外畜牧学: 草原与牧草, 1988(4): 35-37
- [15] 易克贤. 我国亚热带有栽培前途的豆科牧草: 罗顿豆[J]. 中国草地, 1992, 14(6): 73
- [16] 颜水华, 陈志阳. 草灌混播在边坡绿化防护中的应用[J]. 中国农村小康科技, 2010(10): 37-38, 79
- [17] 郑煜基, 卓慕宁, 李定强, 等. 草灌混播在边坡绿化防护中的应用[J]. 生态环境, 2007(1): 155-157
- [18] 鲍士坦. 土壤农化分析[M]. 3 版. 北京: 中国农业出版社, 2000: 267
- [19] Tothill J C. Measuring botanical composition of grasslands [C]// Wilson L R, ed. Plant relations in pasture. CSIRO, Canberra, Australia, 1978: 385-401
- [20] Haynes R L. Competitive aspects of the grass-legume association [J]. Advance in Agronomy, 1981, 33(4): 227-259
- [21] 兰兴平, 王峰. 禾本科牧草与豆科牧草混播的四大优点[J]. 四川畜牧兽医, 2004(12): 4261
- [22] 张永亮, 王建丽, 胡自治. 杂花苜蓿与无芒雀麦混播群落间竞争及稳定性[J]. 草地学报, 2007, 15(1): 43-49
- [23] 张强强, 靳瑰丽, 朱进忠, 等. 不同建植年限混播人工草地主要植物种群空间分布格局分析[J]. 草地学报, 2011, 19(5): 735-739
- [24] 李洪影, 高飞, 刘昭明, 等. 青贮玉米不同混播方式对饲料作物产量和品质的影响[J]. 草地学报, 2011, 19(5): 825-829
- [25] 李恺恺, 孙涛, 旺扎, 等. 西藏地区燕麦与箭筈豌豆不同混播比例对牧草产量和质量的影响[J]. 草地学报, 2011, 19(5): 830-833

(责任编辑 李美娟)

(上接 304 页)

- [20] 赵锦梅, 高超, 张德罡, 祁连山东段不同退化高寒草甸土壤有机碳密度研究[J]. 草地学报, 2010, 18(1): 21-26
- [21] 张东为, 李树会. 美国有关放牧对土壤性质影响的研究[J]. 水土保持科技情报, 2003(1): 8-9
- [22] Husey K F, Steven S S, Bilal S. The effect of long term grazing enclosure on range plants in the central Anatolian Region of Turkey[J]. Environmental Management, 2007, 39: 326-337
- [23] 赵哈林, 大黑俊哉, 周瑞莲, 等. 人类活动与气候变化对科尔沁沙质草地植被的影响[J]. 地球科学进展, 2008, 23(4): 408-414
- [24] 刘楠, 张英俊. 放牧对典型草原土壤有机碳及全氮的影响[J]. 草业科学, 2010, 27(4): 11-14
- [25] 刘昊, 赵宁, 曹喆, 等. 干扰对草地植被与土壤的影响之研究进展[J]. 中国农学通报, 2008, 24(5): 8-16
- [26] Hall R L, Plummer R M, Watt T A. The influence of crown rust on tiller production and survival of perennial ryegrass (*Lolium perenne*) plants in simulated swards[J]. Grass and Forage Science, 1990, 45: 9-16
- [27] 杨景成, 韩兴国, 黄建辉, 等. 土壤有机质对农田管理措施的动态响应[J]. 生态学报, 2003, 23(4): 787-796
- [28] Donald R Zak, David F Grigal, Scott Gleeson, et al. Carbon and nitrogen cycling during old-field succession: Constraints on plant and microbial biomass [J]. Biogeochemistry, 1990, 11(2): 111-129
- [29] Steineck O, Haeder H E. The role of potassium in yield formation [J]. Worblaufen-Bern: International Potash Institute, 1980
- [30] Tarrant R F. Effect of slash burning on some physical soil properties[J]. Forest Science, 1956, 2(1): 18-22
- [31] 戴伟. 人工油松林火烧前后土壤化学性质变化的研究[J]. 北京林业大学学报, 1994, 16(1): 102-105
- [32] 邓继武, 沙丽清, 谢克金, 等. 西双版纳次生林火烧前后土壤养分变化的研究[J]. 植物生态学报, 1998, 22(6): 513-517
- [33] 石峰. 管理措施对草地土壤有机碳含量的影响[D]. 北京: 中国农业科学院, 2009
- [34] Ross D J, Speir T W, Tate K R, et al. Burning in a New Zealand Snow-Tussock grassland: effects on soil microbial biomass and nitrogen and phosphorus availability [J]. New Zealand Journal of Ecology, 1997, 21(1): 63-71
- [35] Chen Z Z, Li L H, Wang Q B. Changes in soil carbon storage due to overgrazing in *Leymus chinensis* steppe in Xilinriver basin of Inner Mongolia [J]. Journal of Environmental Science, 1997, 9(4): 486-490
- [36] 关世英, 齐沛钦, 康师安, 等. 不同牧压强度对草原土壤养分含量的影响初析[M]. 北京: 科学出版社, 1997: 17-22
- [37] Derner J D, Boutton T W, Briske D D. Grazing and ecosystem carbon storage in the North American Great Plains [J]. Plant and Soil, 2006, 280(1/2): 77-90
- [38] Zhao Y, Peth S, Krummel J, et al. Spatial variability of soil properties affected by grazing intensity in Inner Mongolia grassland [J]. Ecological Modelling, 2007, 205(1/2): 241-254

(责任编辑 刘云霞)