

# 不同管理措施对铝矿废弃地复垦区土壤有机碳的影响

原 芩<sup>1</sup>, 梅 娟<sup>1</sup>, 李 华<sup>1\*</sup>, 张 强<sup>2</sup>, 郜春花<sup>2</sup>, 张秋华<sup>1</sup>

(1.山西大学环境与资源学院, 太原 030006; 2.山西省农业科学院农业环境与资源研究所, 太原 030006)

**摘 要:** 试验设置于山西省孝义铝矿废弃地复垦区, 采用施肥及轮作双因素完全随机区组设计, 研究铝矿废弃地复垦过程中不同管理措施对玉米田土壤有机碳的影响。结果表明, 不同管理措施下, 土壤有机碳含量随着土层深度的增加而降低, 土壤  $\delta^{13}\text{C}$  值随着土层深度的增加而增加; 施肥能显著提高土壤有机碳含量, 其中以有机+无机肥为最佳施肥方式, 与对照相比, 在前茬种植晋豆 28 和晋豆 25 条件下, 土层 0~20 cm 的有机碳含量分别提高了 1.85、1.35  $\text{g}\cdot\text{kg}^{-1}$ , 土层 20~40 cm 的有机碳含量分别提高了 1.50、1.45  $\text{g}\cdot\text{kg}^{-1}$ ; 与前茬种植晋豆 25 的轮作方式相比, 前茬种植晋豆 28 处理的土壤  $\delta^{13}\text{C}$  值普遍偏低; 玉米籽粒  $\delta^{13}\text{C}$  值显著高于秸秆, 说明玉米籽粒比秸秆更容易富集  $^{13}\text{C}$ , 但玉米籽粒和秸秆的  $\delta^{13}\text{C}$  值之间无显著相关性; 豆科作物-玉米轮作的土壤有机碳主要来源于豆科作物, 前茬晋豆 28 和晋豆 25 对土壤有机碳的贡献率分别为 64.82%、60.64%。以上结果表明, 在铝矿废弃地的复垦过程中, 采取施肥配合轮作的管理措施有利于土壤有机碳的积累。

**关键词:** 铝矿废弃地; 复垦区; 土壤有机碳; 施肥; 轮作

**中图分类号:** S153.6    **文献标志码:** A    **文章编号:** 1672-2043(2012)07-1374-07

## Effects of Different Management Measures on Soil Organic Carbon of Reclaimed Minesoils in Abandoned Aluminum Mining Land

YUAN Qin<sup>1</sup>, MEI Juan<sup>1</sup>, LI Hua<sup>1\*</sup>, ZHANG Qiang<sup>2</sup>, GAO Chun-hua<sup>2</sup>, ZHANG Qiu-hua<sup>1</sup>

(1.College of Environmental Science&Resources, Shanxi University, Taiyuan 030006, China; 2.Institute of Agricultural Environment&Resources, Shanxi Academy of Agricultural Sciences, Taiyuan 030006, China)

**Abstract:** This field study was conducted in a corn cropping system in reclaimed minesoils of the aluminum mining wasteland in 2010 in Xiaoyi County, Shanxi Province in north of China. The purpose is to characterize the soil organic under different applications of: organic manures, organic manures compound with inorganic fertilizer, inorganic fertilizer, and control treatment, i.e. without any fertilizer in the inter-planting system of bean(Jindou28 and Jindou25) and maize(Yitian18). The randomized complete block design was used in reclaimed minesoils with each treatment in triplicate. Results showed that deeper soil corresponded to reducing soil organic carbon but increasing  $\delta^{13}\text{C}$  values. Fertilization significantly increased soil organic carbon content, and organic manures compound with inorganic fertilizer was the best fertilization pattern. In the field previously planted with Jindou28 and Jindou25, the organic carbon content increased by 1.85  $\text{g}\cdot\text{kg}^{-1}$  and 1.35  $\text{g}\cdot\text{kg}^{-1}$  at 0~20 cm soil layers and by 1.50  $\text{g}\cdot\text{kg}^{-1}$  and 1.45  $\text{g}\cdot\text{kg}^{-1}$  at 20~40 cm soil layers. On the other hand the field previously planted with Jindou25 showed better results than Jindou28 in terms of  $\delta^{13}\text{C}$  values in soil. Maize grain accumulated much more  $^{13}\text{C}$  than stem, as evidenced by the statistically significant difference, in spite that no significant correlation was found. It was noted that the organic carbon mainly came from leguminous plants in both crop rotation patterns with beans and corn, and the contributions of Jindou28 and Jindou25 in soil organic carbon were 64.82% and 60.64%. Overall, both fertilization and rotation can improve the accumulation of soil organic carbon in aluminum mining wasteland.

**Keywords:** aluminum mining wasteland; reclaimed minesoils; soil organic carbon; fertilization; rotation

收稿日期: 2012-01-05

基金项目: 国家科技支撑计划项目(2008BAD95B04)

作者简介: 原 芩(1988—), 女, 山西长治人, 硕士研究生, 研究方向为恢复生态学。E-mail: yuanqinsxu@163.com

\* 通讯作者: 李 华 E-mail: lihua@sxu.edu.cn

土壤有机碳库是陆地生态系统中最大的碳库,与生态系统中生物存活率有非常紧密的联系。土壤有机碳虽然占土壤总质量的比例很小,但是在土壤肥力、农业可持续发展、生态系统平衡等方面扮演着重要角色<sup>[1]</sup>。此外,土壤有机碳的变化对大气 CO<sub>2</sub> 浓度的影响明显,被认为是影响全球气候变暖的重要因素之一。因此,充分评估土壤有机碳库的周转时间和大小对提高土壤生产能力、模拟全球碳循环动力学具有非常重要的意义<sup>[2]</sup>。为了实现这一目的,通常采用稳定碳同位素技术来评估土壤有机碳的分解程度、土壤碳周转以及研究 C<sub>3</sub>/C<sub>4</sub> 植被变化历史中作物对土壤有机碳的贡献率<sup>[3-4]</sup>。随着人们对全球问题的日益重视,和对农业土壤碳库在全球碳循环及大气 CO<sub>2</sub> 浓度增加作用认识的不断深入<sup>[5]</sup>,土地利用模式和农艺措施等对土壤有机碳的影响受到更为广泛的关注<sup>[6]</sup>。土壤有机碳增加和损失的幅度与采取的管理措施密切相关<sup>[7]</sup>,通过采取合理的管理措施将提高有机碳输入和降低有机碳输出结合起来,从而提高土壤有机碳储量。大量研究表明<sup>[8-9]</sup>,施肥及轮作等管理措施能改良土壤结构,增加土壤有机碳含量。

山西是我国沉积型铝土矿储量 大省,孝义铝矿是我国目前开采量最大的露天铝土矿 山,矿区总占地面积达 1 158.2 hm<sup>2</sup> <sup>[10]</sup>。矿区废弃地占用大量的耕地面积,使得周围生态系统退化,土壤肥力下降,多种不利因素(如土壤侵蚀、养分流失、植被退化等)严重制约土壤有机碳的累积<sup>[11]</sup>。新《土地管理法》规定了占用耕地补偿制度,要求严格执行和落实建设占用耕地“先补后占”、“占一补一”的审核制度,从而确保耕地占补平衡落到实处<sup>[12]</sup>。

为了综合整治退化的生态系统,实现土地的有效合理利用及对生态环境的保护,通过系统研究不同管理措施对复垦过程中土壤有机碳产生的影响,确定合理的管理措施来提高土壤碳储量,进而达到改善土壤质量和减缓温室效应的双赢结果<sup>[13]</sup>。本文以铝矿废弃地复垦区玉米种植地为研究对象,采用施肥及轮作双因素完全随机区组设计,探讨不同管理措施对土壤碳固定的影响,为评价不同管理措施对铝矿废弃地复垦区碳循环的影响提供理论依据。

1 材料与方法

1.1 试验点的基本概况

试验区位于山西省孝义市西部山区,为我国目前开采量最大的露天铝土矿 山废弃地复垦区。该区属于典型的大陆性半干旱气候,四季划分明显,春季多风,夏季炎热,秋季多雨,冬季寒冷干燥,一年的最高气温达 37 ℃,最低气温在-20 ℃以下。一般情况下,年降雨量在 450~550 mm 之间,平均降雨量为 529 mm,降雨形式主要以暴雨为主,据统计日最大暴雨量可达 113.3 mm。降雨主要集中在 7—9 月,占全年总降雨量的 61%以上,除秋季外其余时间一般是干旱无雨,且每年的无雨期长达 100 d 以上,其蒸发量是降雨量的 3~4 倍。供试土壤为褐土,土质适宜耕种。试验地土壤理化性质见表 1。

1.2 试验设计

供试作物为玉米(益田 18)。试验采用双因素完全随机区组设计,分别是前茬处理和肥料处理。前茬处理分别为晋豆 28 和晋豆 25 (矿区复垦区首次种植);肥料处理分别是有机肥、有机+无机肥、无机肥、对照组(不施肥)。共 8 个处理,每个处理设 3 个小区,具体见表 2。

1.3 采样及处理

土样采集:2010 年 10 月 14 日夏玉米收获后进

| 表 2 试验中的施肥处理                                              |                           |                                                   |
|-----------------------------------------------------------|---------------------------|---------------------------------------------------|
| Table 2 Fertilization treatments selected from experiment |                           |                                                   |
| 处理                                                        | 肥料使用量/kg·hm <sup>-2</sup> |                                                   |
|                                                           | 有机肥(鸡粪)                   | 无机肥(氮磷复合肥 N:P <sub>2</sub> O <sub>5</sub> =18:12) |
| JD28/M+OF                                                 | 9 000                     | 0                                                 |
| JD28/M+OF-IF                                              | 4 500                     | 375                                               |
| JD28/M+IF                                                 | 0                         | 750                                               |
| JD28/M+CK                                                 | 0                         | 0                                                 |
| JD25/M+OF                                                 | 9 000                     | 0                                                 |
| JD25/M+OF-IF                                              | 4 500                     | 375                                               |
| JD25/M+IF                                                 | 0                         | 750                                               |
| JD25/M+CK                                                 | 0                         | 0                                                 |

注:JD28:前茬晋豆 28;JD25:前茬晋豆 25;M:玉米;OF:有机肥;OF-IF:有机+无机肥;IF:无机肥;CK:对照(不施肥)。

表 1 试验地土壤理化性质

| Table 1 Basic properties of experimental field |                        |                       |                       |      |                         |                         |                         |      |
|------------------------------------------------|------------------------|-----------------------|-----------------------|------|-------------------------|-------------------------|-------------------------|------|
| 土层                                             | 有机碳/g·kg <sup>-1</sup> | 全氮/g·kg <sup>-1</sup> | 全磷/g·kg <sup>-1</sup> | 全钾/% | 碱解氮/mg·kg <sup>-1</sup> | 有效磷/mg·kg <sup>-1</sup> | 速效钾/mg·kg <sup>-1</sup> | pH   |
| 0~20 cm                                        | 2.68                   | 0.23                  | 0.43                  | 1.85 | 21.6                    | 6.8                     | 91                      | 8.27 |
| 20~40 cm                                       | 1.59                   | 0.14                  | 0.4                   | 1.81 | 52.4                    | 7.8                     | 42.5                    | 8.33 |

行土样采集,每个样点分 0~20 cm 和 20~40 cm 不同土层取样。剔除土样中的植物根系和残渣,带回室内自然风干,磨碎过筛备用。

植株地上部分样品采集:待玉米成熟以后,收集玉米的籽粒及秸秆,洗净于 105 ℃ 的温度下杀青 30 min,60 ℃ 温度下烘干至恒重,粉碎备用。

#### 1.4 实验方法

##### 1.4.1 土壤有机碳含量测定

重铬酸钾容量法-外加热法<sup>[14]</sup>。

##### 1.4.2 有机质稳定碳同位素分析

土壤样品风干后过 0.2 mm 筛,植物样品(包括秸秆、籽粒)经过磨细过 0.1 mm 筛。用 Thermal Finnigan MATDELTA<sup>plus</sup> XP 质谱仪分别测定  $\delta^{13}\text{C}$  值<sup>[15]</sup>。

##### 1.4.3 土壤全氮及碱解氮的测定<sup>[14]</sup>

土壤全氮测定采用半微量开氏法。土壤碱解氮采用碱解扩散法测定。

##### 1.4.4 土壤全磷及有效磷的测定<sup>[14]</sup>

土壤全磷采用  $\text{HClO}_4\text{-H}_2\text{SO}_4$  法测定。土壤有效磷采用  $0.5\text{ mol}\cdot\text{L}^{-1}\text{NaHCO}_3$  法测定。

##### 1.4.5 土壤全钾及速效钾的测定<sup>[14]</sup>

土壤全钾采用 NaOH 熔融,火焰光度法测定。土壤速效钾采用  $\text{NH}_4\text{OAc}$  浸提,火焰光度法测定。

##### 1.4.6 土壤 pH 值测定

称取过 2 mm 筛孔的风干土样 10.00 g,采用无  $\text{CO}_2$  的去离子水作浸提剂,以 1:2.5 的土水比测定土壤 pH 值。

#### 1.5 实验原理

稳定碳同位素天然丰度值用来描述样品与标准化合物天然丰度变异的指标:

$$\delta^{13}\text{C}(\text{‰}) = (R_{\text{sample}}/R_{\text{standard}} - 1) \times 1000$$

其中  $R$  为  $^{13}\text{C}/^{12}\text{C}$  比值,  $\delta^{13}\text{C}$  的天然丰度  $R_{\text{PDB}}$  为 0.011 237 2。

根据不同光合途径的植物 ( $\text{C}_3$ 、 $\text{C}_4$  和 CAM 植物) 具有不同  $^{13}\text{C}$  丰度的特点,形成的光合产物不一样,且植物在光合作用过程中对  $^{13}\text{C}$  的吸收比例不同 ( $\text{C}_3$  植物  $\delta^{13}\text{C}$  值的变化范围是  $-23\text{‰} \sim -40\text{‰}$ , 平均值为  $-27\text{‰}$ 。  $\text{C}_4$  植物  $\delta^{13}\text{C}$  值的变化范围是  $-9\text{‰} \sim -19\text{‰}$ , 平均值为  $-12\text{‰}$ <sup>[16-17]</sup>)。将长期生长  $\text{C}_3$  植物的土壤称作  $\text{C}_3$  土壤,长期生长  $\text{C}_4$  植物的土壤称作  $\text{C}_4$  土壤。研究表明<sup>[18]</sup>,将  $\text{C}_3$  植物种植在  $\text{C}_4$  土壤上,或者  $\text{C}_4$  植物种植在  $\text{C}_3$  土壤上,经过一段时间以后,通过测定土壤  $\delta^{13}\text{C}$  的变化,可以计算出土壤有机碳的周转或更新速率。假设种植  $\text{C}_3$  植物 A 的土壤碳  $\delta^{13}\text{C}$  值为  $\delta A$ ,现改

为种植  $\text{C}_4$  植物 B 的土壤碳  $\delta^{13}\text{C}$  值为  $\delta B$ ,那么  $\text{C}_3$  植物被  $\text{C}_4$  植物取代以后,经过一定的转化时间  $t$ ,设  $\text{C}_4$  植物 B 对土壤有机碳的贡献是  $f_t(\%)$ ,此时土壤有机碳的  $\delta^{13}\text{C}$  值( $\delta t$ )可表示为  $\delta A$ 、 $\delta B$  和  $f_t$  的函数:

$$\delta t = f_t \times \delta B + (1 - f_t) \times \delta A$$

由此求出  $\text{C}_4$  植物 B 对土壤有机碳的贡献率  $f_t$ :

$$f_t = (\delta t - \delta A) / (\delta B - \delta A)$$

#### 1.6 数据处理与分析

数据经 Excel 2003 整理后,采用 SPSS 13.0 进行统计分析,处理间的差异显著性采用单因素 (One-Way ANOVA) 检验,并用 LSD 多重比较法检验其差异显著性 ( $P < 0.05$ );采用独立样本 T 检验法检验土层 0~20 cm 和 20~40 cm 土壤有机碳含量以及土壤  $\delta^{13}\text{C}$  值之间的显著性水平 ( $P < 0.05$ ),依次来明确施肥及轮作是否引起铝矿复垦区土壤有机碳含量的变化。此外,玉米籽粒和秸秆  $\delta^{13}\text{C}$  值两者之间的简单相关采用 Linear 相关统计方法,可以明确施肥及轮作条件下玉米籽粒和秸秆中  $\delta^{13}\text{C}$  值之间是否具有相关性。所有测定数据结果以平均值  $\pm$  标准误的形式表达。

## 2 结果与分析

### 2.1 土壤有机碳含量

由表 3 可以看出,管理措施对铝矿复垦区土壤有机碳含量的影响显著。0~20 cm 土层中,前茬晋豆 28 条件下,使用肥料的处理组均可使土壤有机碳含量显著提高 ( $P < 0.05$ ),分别提高了 2.23、1.85、0.90  $\text{g}\cdot\text{kg}^{-1}$ ,其中有机肥和有机+无机肥较无机肥更能显著提高土壤有机碳含量 ( $P < 0.05$ ),而前两种肥料对土壤有机碳含量的影响差异不显著 ( $P > 0.05$ )。前茬晋豆 25 条件下,施肥亦能显著提高土壤有机碳含量 ( $P < 0.05$ ),分别提高了 1.10、1.35、0.85  $\text{g}\cdot\text{kg}^{-1}$ 。在施加有机肥和有机+无机肥条件下,前茬种植晋豆 28 较晋豆 25 更能显著提高土壤有机碳含量 ( $P < 0.05$ ),分别提高了 1.17、0.54  $\text{g}\cdot\text{kg}^{-1}$ 。施加无机肥和不施肥条件下,前茬种植晋豆 28 和晋豆 25 对土壤有机碳含量的影响差异均不显著 ( $P > 0.05$ )。20~40 cm 土层中,前茬晋豆 28 条件下,有机肥和有机+无机肥均能显著提高土壤有机碳含量 ( $P < 0.05$ ),分别提高了 1.84、1.60  $\text{g}\cdot\text{kg}^{-1}$ ,而无机肥对土壤有机碳含量的影响差异不显著 ( $P > 0.05$ )。前茬晋豆 25 条件下,有机肥和有机+无机肥均能显著提高土壤有机碳含量,分别提高了 1.73、1.35  $\text{g}\cdot\text{kg}^{-1}$ ,且有机肥对有机碳含量的影响更为明显 ( $P < 0.05$ ),无机肥对土壤有机碳含量的影响差异不显著 ( $P > 0.05$ )。在

施加有机肥、无机肥和不施肥条件下,前茬晋豆 28 和晋豆 25 对土壤有机碳含量的影响差异不显著 ( $P>0.05$ )。施加有机+无机肥的条件下,前茬晋豆 28 较晋豆 25 更能显著提高土壤有机碳含量( $P<0.05$ )。总之,在铝矿废弃地复垦区采取不同管理措施对土壤有机碳含量均有影响,前茬晋豆 28 条件下,施加有机肥和有机+无机肥的土壤有机碳含量最高。

表 3 进一步表明,在前茬种植晋豆 28 和晋豆 25 条件下,施肥及对照中,随着土层深度的增加有机碳含量均显著降低( $P<0.05$ )。此外,与复垦前未进行农业耕种的土壤相比,在不施肥条件下,前茬种植晋豆 28 和晋豆 25 的土壤有机碳含量偏低,说明不施肥单一轮作并不能提高土壤有机碳含量。在前茬处理的基础上,施用肥料可显著提高土壤中有机碳含量,可见轮作方式配合施肥更有利于土壤中有机碳的积累。

表 3 不同管理措施对土壤有机碳含量的影响( $\text{g}\cdot\text{kg}^{-1}$ )

| 项目     | 0~20 cm 土层  |             | 20~40 cm 土层 |            |
|--------|-------------|-------------|-------------|------------|
|        | 前茬晋豆 28     |             | 前茬晋豆 25     |            |
|        | 前茬晋豆 28     | 前茬晋豆 25     | 前茬晋豆 28     | 前茬晋豆 25    |
| 有机肥    | 4.24±0.21a* | 3.07±0.14ab | 2.40±0.43a  | 2.32±0.04a |
| 有机+无机肥 | 3.86±0.14a* | 3.32±0.02a  | 2.16±0.02a* | 1.94±0.04b |
| 无机肥    | 2.91±0.23b  | 2.82±0.96b  | 1.76±0.14b  | 1.69±0.98c |
| 对照组    | 2.01±0.35c  | 1.97±0.23c  | 0.56±0.16b  | 0.59±0.98c |

注:平均值±SE,  $n=3$ , 用 LSD 法进行多重比较。同列不同小写字母表示组间差异显著( $P<0.05$ )。行向数据之间显著性差异用独立样本 T 检验,同行标有 \* 表示组间差异显著( $P<0.05$ )。

## 2.2 土壤 $\delta^{13}\text{C}$ 值

由图 1 可知,不同管理措施可对铝矿复垦区土壤的  $\delta^{13}\text{C}$  值产生显著影响, $\delta^{13}\text{C}$  值的变幅为 $-14.33\text{‰}$ ~

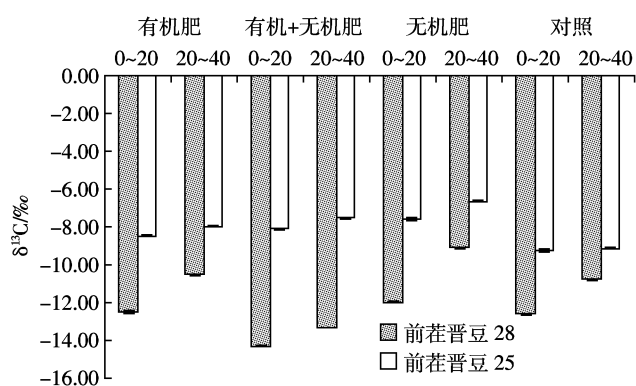


图 1 不同管理措施对土壤有机碳  $\delta^{13}\text{C}$  值的影响

Figure 1 The values of  $\delta^{13}\text{C}$  in soil organic carbon under different management measures

$-6.64\text{‰}$ 。两种轮作方式对土壤中碳  $\delta^{13}\text{C}$  值的影响存在显著差异 ( $P<0.05$ ), 表现为不同施肥及对照处理中,前茬种植晋豆 28 的土壤中碳  $\delta^{13}\text{C}$  值均显著低于前茬种植晋豆 25 ( $P<0.05$ ) 的处理。两种土层深度的土壤碳  $\delta^{13}\text{C}$  值的变化趋势基本一致: 前茬种植晋豆 25 的小区中, 各肥料处理土壤  $\delta^{13}\text{C}$  值的变化规律为对照组<有机肥<有机+无机肥<无机肥; 前茬种植晋豆 28 的小区中, 各肥料处理土壤  $\delta^{13}\text{C}$  值的变化规律为有机+无机肥<对照组<有机肥<无机肥。

由此可见,不同施肥及对照处理中,前茬种植晋豆 28 的土壤中碳  $\delta^{13}\text{C}$  值均显著低于前茬种植晋豆 25 处理, 两种土层深度中各肥料处理的土壤碳  $\delta^{13}\text{C}$  值变化趋势一致。此外,结果表明各施肥及对照处理中, 土壤  $\delta^{13}\text{C}$  值均随着土层深度的增加而显著升高 ( $P<0.05$ )。

## 2.3 玉米籽粒和秸秆 $\delta^{13}\text{C}$ 值

由图 2 可以看出, 不同管理措施可对玉米籽粒的  $\delta^{13}\text{C}$  值产生显著影响, 玉米籽粒  $\delta^{13}\text{C}$  值的变幅为 $-13.47\text{‰}$ ~ $-9.60\text{‰}$ 。两种轮作方的对玉米籽粒  $\delta^{13}\text{C}$  值存在显著差异( $P<0.05$ ), 表现为不同的施肥处理及对照中,前茬种植晋豆 28 的玉米籽粒  $\delta^{13}\text{C}$  值均显著低于前茬种植晋豆 25 的处理( $P<0.05$ ), 使用有机肥、有机+无机肥、无机肥及对照组中, 籽粒  $\delta^{13}\text{C}$  值分别降低  $1.02\text{‰}$ 、 $3.47\text{‰}$ 、 $3.02\text{‰}$ 、 $2.86\text{‰}$ 。两种轮作方式中各肥料处理的玉米籽粒  $\delta^{13}\text{C}$  值的变化趋势基本一致, 其规律为: 有机+无机肥>无机肥>对照组>有机肥。

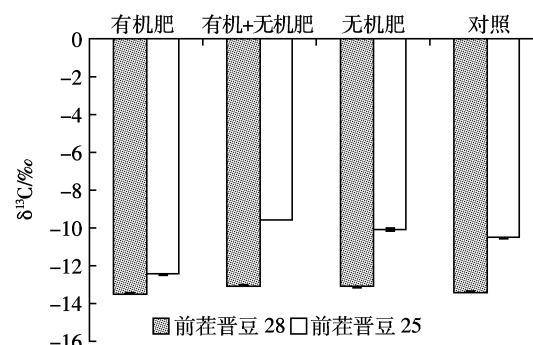
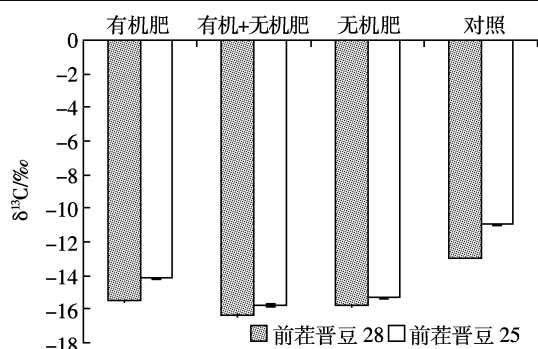


图 2 不同管理措施对玉米籽粒  $\delta^{13}\text{C}$  值的影响

Figure 2 The values of  $\delta^{13}\text{C}$  in maize grain under different management measures

由图 3 可知, 玉米秸秆  $\delta^{13}\text{C}$  值的变幅为 $-16.32\text{‰}$ ~ $-10.97\text{‰}$ 。两种轮作方式对玉米秸秆  $\delta^{13}\text{C}$  值的影响存在差异( $P<0.05$ ), 表现为各施肥处理及对照组中, 前茬种植晋豆 28 的玉米秸秆  $\delta^{13}\text{C}$  值均显著低于前茬种植晋豆 25 的处理( $P<0.05$ ), 使用有机肥、有机+无

图3 不同管理措施对玉米秸秆  $\delta^{13}\text{C}$  值的影响Figure 3 The values of  $\delta^{13}\text{C}$  in maize stem under different management measures

机肥、无机肥及对照组中, 秸秆  $\delta^{13}\text{C}$  值分别降低 1.37‰、0.58‰、0.49‰、1.99‰。前茬晋豆 28 条件下, 施肥对玉米秸秆  $\delta^{13}\text{C}$  值的影响差异不显著 ( $P>0.05$ ), 其中肥料的各处理组对玉米秸秆  $\delta^{13}\text{C}$  值的影响差异也不显著 ( $P>0.05$ )。前茬晋豆 25 条件下, 施肥可显著降低玉米秸秆  $\delta^{13}\text{C}$  值 ( $P<0.05$ ), 分别降低了 3.19‰、4.77‰、4.36‰, 其中肥料各处理之间对秸秆  $\delta^{13}\text{C}$  值的影响差异不显著 ( $P>0.05$ )。

由此可见, 不同施肥及对照处理中, 前茬种植晋豆 28 的玉米籽粒和秸秆的  $\delta^{13}\text{C}$  值均显著低于前茬种植晋豆 25 的处理。此外, 由图 2 和图 3 亦可看出, 施肥及轮作条件下, 玉米籽粒较秸秆的  $\delta^{13}\text{C}$  值高, 说明玉米籽粒比秸秆更容易富集  $^{13}\text{C}$ 。

### 3 讨论

#### 3.1 管理措施对土壤有机碳含量的影响

在本研究中, 通过测定施肥及轮作方式下不同土壤层次 (0~20 cm、20~40 cm) 的有机碳含量, 可知土壤有机碳含量随着土层深度的增加而逐渐降低。土壤表层接受大量的枯枝落叶, 而且植物根系主要集中在土壤表层, 有机质来源比较丰富, 而微生物活动会造成土壤有机碳的部分损失, 但是表层中输入的有机碳量足可以弥补因微生物分解以及矿化作用损失的那部分, 所以表层土壤有机碳含量较高<sup>[9,19]</sup>。随着土层的加深, 微生物数量逐渐减少, 有机碳的周转速率减缓, 有机碳的含量进入一个缓慢降低的层面, 最后含量在深部土层基本保持稳定<sup>[8,20]</sup>。

在本文表 3 中, 有机肥或者有机+无机肥的施加都能显著提高复垦区土壤有机碳含量, 可能原因是施加肥料能够增加土壤中微生物数量, 提高微生物活性, 促进土壤中有机碳的更新, 其次有机肥中含大量

的碳素, 增加土壤呼吸底物的供应, 另外施有机肥能促进有机质的输入, 从而使得土壤有机碳含量显著提高。施加无机肥能增加土壤表层有机碳含量, 可能的原因是施无机肥能增加作物的生物量, 土壤中的作物残渣向有机碳的转化利用率也会相对提高<sup>[21]</sup>。在不同前茬处理条件下, 施有机肥和有机+无机肥处理的有机碳含量均高于无机肥处理, 说明施有机肥和有机+无机肥是增加土壤有机碳累积的主要途径。此外, 有研究表明<sup>[22]</sup>, 施有机肥使土壤有机质的氧化稳定性降低, 而无机肥或不施肥则使土壤有机质的氧化稳定性升高。由此不难看出, 有机肥与无机肥的配合施用不仅能提高土壤有机碳的含量, 而且能增强有机碳的氧化稳定性。

本研究表明, 轮作配合施肥能显著提高土壤有机碳含量, 分析其原因: 一方面是施肥能够增加土壤有机碳的储存; 另一方面是轮作可以增加作物根系以及土层中残渣的数量, 改变残渣的化学质量, 影响其矿化固定, 从而降低耕作对有机碳的衰减效应<sup>[23]</sup>。有研究表明, 在轮作体系中加入豆科作物有利于土壤有机碳的固存<sup>[24]</sup>。但在不施肥条件下, 前茬晋豆 28 和晋豆 25 后土壤有机碳含量偏低, 说明不施肥单一轮作并不能提高土壤有机碳含量, 其可能的原因是后一种作物的生物量偏低造成前一种作物累积的土壤有机碳损失<sup>[25]</sup>。

#### 3.2 管理措施对土壤 $\delta^{13}\text{C}$ 值的影响

本研究结果表明, 铝矿复垦区土壤  $\delta^{13}\text{C}$  值随土层深度的增加而增加, 于贵瑞等<sup>[26]</sup>研究表明, 土壤  $\delta^{13}\text{C}$  值增加可能归功于  $^{13}\text{C}$  贫化的有机化合物的分解作用, 土层深度越深, 其土壤中含有老的以及稳定的有机化合物的含量越高, 而表层土壤中的有机碳大多为较年轻和非稳定的有机化合物, 这也会导致稳定碳  $^{13}\text{C}$  值的垂直变化。此外还有学者<sup>[20]</sup>认为, 在土壤的不同土层中有机碳  $\delta^{13}\text{C}$  值的上升幅度也不同, 这可能与土壤有机质分解过程中碳同位素分馏效应的强弱程度有关, 分馏效应越强, 上升幅度越大, 表明有机碳分解程度也就越高。

土壤有机碳稳定同位素组成主要受地表植物类型和土壤成土环境等因素的制约, 通过对不同管理措施下土壤有机碳稳定同位素组成特征分析得到, 在不同施肥条件下, 与前茬种植晋豆 25 的轮作方式相比, 前茬种植晋豆 28 处理的土壤  $\delta^{13}\text{C}$  值普遍偏低, 说明土壤  $\delta^{13}\text{C}$  值与有机碳的来源存在显著的相关关系。分析其可能的原因, 两种作物以及不同的肥料输入到

土壤中的有机碳不同,导致土壤有机碳更新程度不一致,使得土壤  $\delta^{13}\text{C}$  值产生差异,同时也与不同肥料及前茬作物携带的外援物质本身的  $\delta^{13}\text{C}$  值差异有关。由于  $\text{C}_3$  和  $\text{C}_4$  植物的  $\delta^{13}\text{C}$  值都是在一定的范围之内,同一种类植物的  $\delta^{13}\text{C}$  值之间也必然存在一定的差异,其中  $\text{C}_3$  植物之间  $\delta^{13}\text{C}$  值的最大差异为 12‰,  $\text{C}_4$  植物为 4‰<sup>[2]</sup>。由于土壤  $\delta^{13}\text{C}$  值是不同植物种类对群落净初级生产力相对贡献的综合结果,如果地表植物组成保持稳定,则土壤表层的  $\delta^{13}\text{C}$  值与植物群落的  $\delta^{13}\text{C}$  值相近似,而且地面植物种类是制约土壤  $\delta^{13}\text{C}$  值变化的主要因素<sup>[27]</sup>。

### 3.3 管理措施对作物中 $\delta^{13}\text{C}$ 值的影响

不同管理措施会对玉米籽粒和秸秆中的碳  $\delta^{13}\text{C}$  值产生显著影响。据分析,造成这一差异的原因可能有两个方面:一是作物从土壤中吸收的有机碳来源比较复杂,不仅包括作物残渣中的有机碳,还有肥料及前茬作物中携带的碳素;二是作物吸收的外援物质中碳素的  $\delta^{13}\text{C}$  值本身就有差异。

前茬种植晋豆 28 的处理中,将施加不同肥料的玉米籽粒和秸秆的  $\delta^{13}\text{C}$  值进行回归分析,获得回归方程为  $y = -34.797 - 0.371x$  ( $P = 0.158$ );前茬种植晋豆 25 的处理中,将施加不同肥料的玉米籽粒和秸秆的  $\delta^{13}\text{C}$  值进行回归分析,获得回归方程为  $y = -25.541 - 0.016x$  ( $P = 0.725$ )。两个  $P$  值均大于 0.05,说明在不同的施肥处理下,玉米籽粒和秸秆中  $\delta^{13}\text{C}$  值之间没有显著相关性。对玉米籽粒和秸秆中  $\delta^{13}\text{C}$  值进行  $T$  检验,其结果表明,不同的施肥及前茬处理下,玉米籽粒和秸秆的  $\delta^{13}\text{C}$  值均有显著性差异,说明秸秆中的同化物向籽粒转移时,发生了碳同位素的分馏作用。

### 3.4 管理措施对有机碳贡献率的影响

通过测定土壤有机碳的自然丰度值,以及可能来源的植物残体的  $^{13}\text{C}$  丰度值,来计算土壤有机碳的来源和比例,可有效阐明土壤碳动态和土壤碳储量的迁移与转换,定量化评价新老土壤有机碳对碳储量的相对贡献<sup>[28]</sup>。在本研究的施肥条件下,土壤有机碳的来源比较复杂,不仅包括作物残体中的碳,而且还含肥料中的碳,因此在施肥的 3 个处理中,豆科作物残体对土壤碳的贡献是无法计算出来。根据上述 1.5 节公式计算不施肥条件下豆科作物残体对土壤有机碳的贡献率发现,前茬种植晋豆 28 和晋豆 25 对土壤有机碳的贡献率分别为 64.82%、60.64%,由此可见,在前茬种植晋豆 28 和晋豆 25 条件下,种植玉米后土壤有机碳主要来自豆科作物的残渣。

## 4 结论

(1)不同施肥及轮作方式处理时,土壤有机碳的含量随着土层深度的增加而降低,而土壤  $\delta^{13}\text{C}$  值则随着土层深度增加而增加。

(2)轮作配合施肥能显著提高土壤有机碳含量,但是不施肥单一轮作并不能提高土壤有机碳含量。施肥方式以有机无机配合的复合肥最佳,不仅可增加土壤有机碳含量,在前茬种植晋豆 28 和晋豆 25 条件下,土层 0~20 cm 的有机碳含量分别提高了 1.85、1.35  $\text{g} \cdot \text{kg}^{-1}$ ,土层 20~40 cm 的有机碳含量分别提高了 1.50、1.45  $\text{g} \cdot \text{kg}^{-1}$ ,而且有机+无机肥能提高有机碳的氧化稳定性。

(3)在不同施肥条件下,与前茬种植晋豆 25 的轮作方式相比,前茬种植晋豆 28 处理的土壤  $\delta^{13}\text{C}$  值普遍偏低,说明土壤  $\delta^{13}\text{C}$  值与有机碳的来源存在显著的相关关系。另外根据稳定碳同位素来判断新老土壤对土壤碳储量贡献率,发现前茬种植晋豆 28 和晋豆 25 对土壤有机碳的贡献率分别为 64.82%、60.64%,说明在豆科-玉米轮作体系中,土壤有机碳主要来源于豆科作物。

(4)玉米籽粒的  $\delta^{13}\text{C}$  值较秸秆的高,说明玉米籽粒比秸秆更容易富集  $^{13}\text{C}$ 。此外,两者之间差异显著,但没有显著相关性。

轮作配合施肥能有效增强铝矿废弃地复垦区土壤的固碳能力,可为大幅度提高我国工矿宜农废弃地复垦过程中的固碳能力提供技术支撑。

### 参考文献:

- [1] 马力,杨林章,慈恩,等.长期不同施肥处理对水稻土有机碳分布变异及其矿化动态的影响[J].土壤学报,2009,46(6):1050-1058. MA Li, YANG Lin-zhang, CI En, et al. Effects of long-term fertilization on distribution and mineralization of organic carbon in paddy soil[J]. *Acta Pedologica Sinica*, 2009, 46(6):1050-1058.
- [2] 朱书法,刘丛强,陶发祥.  $\delta^{13}\text{C}$  方法在土壤有机质研究中的应用[J].土壤学报,2005,42(3):495-503. ZHU Shu-fa, LIU Cong-qiang, TAO Fa-xiang. Use of  $\delta^{13}\text{C}$  method in studying soil organic matter[J]. *Acta Pedologica Sinica*, 2005, 42(3):495-503.
- [3] Ehleringer J R, Buchmann N, Flanagan L B. Carbon isotope ratios in below ground carbon cycle processes[J]. *Ecological Applications*, 2000, 10:412-422.
- [4] Connin S L, Feng X, Virginia R A. Isotopic discrimination during long-term decomposition in an arid land ecosystem[J]. *Soil Biology and Biochemistry*, 2001, 33:41-51.
- [5] 潘根兴,李恋卿,张旭辉.土壤有机碳库与全球变化研究的若干前沿

- 问题:兼开展中国水稻土有机碳固定研究的建议[J]. 南京农业大学学报, 2002, 25(3):100-109.
- PAN Gen-xing, LI Lian-qing, ZHANG Xu-hui. Perspectives on issues of soil carbon pools and global change: With suggestions for studying organic carbon sequestration in paddy soils of China[J]. *Journal of Nanjing Agricultural University*, 2002, 25(3):100-109.
- [6] 王玲莉, 姜翼来, 石元亮, 等. 长期施肥对土壤活性有机碳指标的影响[J]. 土壤通报, 2008, 39(4):752-755.
- WANG Ling-li, LOU Yi-lai, SHI Yuan-liang, et al. Long-term fertilization on indicators of soil active organic carbon[J]. *Soil Science*, 2008, 39(4):752-755.
- [7] 王文静, 魏 静, 马文奇, 等. 氮肥用量和秸秆根茬碳投入对黄淮海平原典型农田土壤有机质积累的影响[J]. 生态学报, 2010, 30(13):3591-3598.
- WANG Wen-jing, WEI Jing, MA Wen-qi, et al. Effect of nitrogen amendment and straw-stubble input on accumulation of soil organic matter in typical farm lands of Huang-Huai-Hai Plain[J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2010, 30(13):3591-3598.
- [8] Rehana Rasool, Kukal S S, Hira G S. Soil organic carbon and physical properties as affected by long-term application of FYM and inorganic fertilizers in maize-wheat system[J]. *Soil & Tillage Research*, 2008, 101:31-36.
- [9] Gong Wei, Yan Xiaoyuan, Wang Jingyan, et al. Long-term manure and fertilizer effects on soil organic matter fractions and microbes under a wheat-maize cropping system in northern China[J]. *Geoderma*, 2009, 149, 318-324.
- [10] 吴安福. 孝义铝矿民采空区矿体安全高效开采技术研究[D]. 长沙:中南大学, 2011.
- WU An-fu. Study on safety and highly-efficient mining technology in civil mined-out of Xiaoyi Aluminum Mine[D]. Changsha: Central South University, 2011.
- [11] 李 文, 任晓旭, 蔡体久. 不同排矸年限煤矸石废弃地养分含量及重金属污染评价[J]. 林业科学, 2011, 47(6):162-166.
- LI Wen, REN Xiao-xu, CAI Ti-jiu. Assessment of nutrient content and heavy metal pollution in gangue waste lands with different dumping years[J]. *Scientia Silvae Sinicae*, 2011, 47(6):162-166.
- [12] 王世忠, 胡文霞, 刘卫东. 我国耕地占补平衡制度的研究[J]. 农机化研究, 2007(8):13-16.
- WANG Shi-zhong, HU Wen-xia, LIU Wei-dong. Review on Chinese balance of farmland in occupation and supplement[J]. *Journal of Agricultural Mechanization Research*, 2007(8):13-16.
- [13] 郭胜利, 吴金水, 党廷辉. 轮作和施肥对半干旱区作物地上部生物量与土壤有机碳的影响[J]. 中国农业科学, 2008, 41(3):744-751.
- GUO Sheng-li, WU Jin-shui, DANG Ting-hui. Effect of crop rotation and fertilization on aboveground biomass and soil organic C in semi-arid region[J]. *Scientia Agricultura Sinica*, 2008, 41(3):744-751.
- [14] 鲍士旦. 土壤农化分析[M]. 北京:中国农业出版社, 1999.
- BAO Shi-dan. Soil and agricultural chemistry analysis [M]. Beijing: China Agricultural Press, 1999.
- [15] 张庆忠. 秸秆还田对华北高产粮区碳截留的贡献[D]. 北京:中国农业大学, 2006.
- ZHANG Qing-zhong. Straw on the high grain-producing area in North China's contribution to carbon sequestration[D]. Beijing: China Agricultural University, 2006.
- [16] Cheng W. Measurement of rhizosphere respiration and organic matter decomposition using natural  $^{13}\text{C}$ [J]. *Plant and Soil*, 1996, 183:263-268.
- [17] Balesdent J, Mariotti A, Guillet B. Natural  $^{13}\text{C}$  abundance as a tracer for studies of soil organic matter dynamics[J]. *Soil Biol&Biochem*, 1987, 19:25-30.
- [18] Fu S, Cheng W, Susfalk R. Rhizosphere respiration varies with plant species and phenology: A greenhouse pot experiment[J]. *Plant and Soil*, 2002, 239:133-140.
- [19] 刘涛泽, 刘丛强, 张 伟. 植被恢复中土壤颗粒有机碳分布特征和  $\delta^{13}\text{C}$  值组成[J]. 生态环境, 2008, 17(5):2031-2036.
- LIU Tao-ze, LIU Cong-qiang, ZHANG Wei. Distribution characteristics of organic carbon and  $\delta^{13}\text{C}$  composition in different soil particle size in the slope of vegetation recovery[J]. *Ecology and Environment*, 2008, 17(5):2031-2036.
- [20] 朱书法, 刘丛强, 陶发祥, 等. 喀斯特地区土壤有机质的稳定碳同位素[J]. 地球与环境, 2006, 34(3):51-58.
- ZHU Shu-fa, LIU Cong-qiang, TAO Fa-xiang, et al. Geochemical characteristics of stable carbon isotopes in soil organic matter from Karst areas[J]. *Earth and Environment*, 2006, 34(3):51-58.
- [21] 孟 磊, 丁维新, 蔡祖聪, 等. 长期定量施肥对土壤有机碳储量和土壤呼吸影响[J]. 地球科学进展, 2005, 20(6):687-692.
- MENG Lei, DING Wei-xin, CAI Zu-cong, et al. Storage of soil organic C and soil respiration on as effected by long-term quantitative fertilization[J]. *Advances in Earth Science*, 2005, 20(6):687-692.
- [22] 王旭东, 张一平, 吕家珑, 等. 不同施肥条件对土壤有机质及胡敏酸特性的影响[J]. 中国农业科学, 2000, 33(2):75-81.
- WANG Xu-dong, ZHANG Yi-ping, LÜ Jia-long, et al. Effect of long term different fertilization on properties of soil organic matter and humic acids[J]. *Scientia Agricultura Sinica*, 2000, 33(2):75-81.
- [23] Havlin J L, Kissel D E, Maddux LD, et al. Crop rotation and tillage effects on soil organic carbon and nitrogen[J]. *Soil Science Society of America Journal*, 1990(54):448-452.
- [24] Huggins D R, Buyanovsky G A, Wanger G H, et al. Soil organic C in the tallgrass prairie-derived region of the corn belt: Effects of long-term crop management[J]. *Soil & Tillage Research*, 1998(47):219-234.
- [25] Potter K N, Torbert H A, Jones O R, et al. Distribution and amount of soil organic C in long-term management systems in Texas[J]. *Soil & Tillage Research*, 1998(47):309-321.
- [26] 于贵瑞, 王绍强, 陈泮勤, 等. 碳同位素技术在土壤碳循环研究中的应用[J]. 地球科学进展, 2005, 20(5):568-577.
- YU Gui-rui, WANG Shao-qiang, CHEN Pan-qin, et al. Isotope tracer approaches in soil organic carbon cycle research[J]. *Advances in Earth Science*, 2005, 20(5):568-577.
- [27] 沈承德, 易惟熙, 孙彦敏, 等. 鼎湖山森林土壤  $^{14}\text{C}$  表观年龄及  $\delta^{13}\text{C}$  分布特征[J]. 第四纪研究, 2000, 20(4):335-344.
- SHEN C D, YI W X, SUN Y M, et al.  $^{14}\text{C}$  apparent ages and  $\delta^{13}\text{C}$  distribution of forest soils in Dinghu Shan Natural Reserve[J]. *Quaternary Sciences*, 2000, 20(4):335-344.
- [28] Del Galdo I, Six J, Peressotti A, et al. Assessing the impact of land-use change on soil C sequestration in agricultural soils by means of organic matter fractionation and stable C isotopes[J]. *Global Change Biology*, 2003, 9:1204-1213.