

黄土丘陵区不同种植类型梯田2 m土层有机碳的分布特征

赵俊峰, 肖礼, 黄懿梅, 周俊英, 刘洋

(西北农林科技大学资源环境学院, 农业部西北植物营养与农业环境重点实验室, 陕西 杨凌 712100)

摘要: 为了明确黄土丘陵区梯田种植类型对0—200 cm有机碳垂直分布的影响, 以甘肃庄浪县堡子沟流域玉米、小麦、土豆、苹果和间作(苹果+土豆)5种典型种植类型梯田的土壤为研究对象, 分析土壤有机碳含量、储量在0—200 cm的垂直分布特征及影响因素, 探讨种植类型对0—200 cm土层有机碳分布稳定性的影响。结果表明: (1) 5种植类型梯田的0—200 cm土层中, 有机碳含量平均为3.33~4.86 g/kg, 储量平均为8.0~11.69 t/hm²; 含量和储量均在间作和苹果地显著高于玉米地、小麦地($P < 0.05$); 各样地有机碳含量均表现出明显的层次性, 0—20 cm显著高于其他各层($P < 0.05$), 20 cm以下的各层中的变异较小, 有机碳储量的垂直分布特征与含量相同, 且层次间差异更为显著。 (2) 土壤有机碳分配比例在0—20 cm为17.57%, 20—100 cm为41.21%, 100—200 cm为41.22%, 种植类型对0—200 cm土层有机碳分布稳定性影响较小。有机碳分层比例SR(0—20 cm/20—40 cm)为1.51~1.78, SR(0—20 cm/40—60 cm)为1.78~2.02, 表明土壤正向发育熟化, 土壤质量明显提高。 (3) 水分能够影响有机碳垂直分布, 种植类型对土壤有机碳的深层分布和固存有一定影响, 苹果园的发展有利于梯田土壤有机碳的提高。

关键词: 黄土丘陵区; 梯田; 种植类型; 土壤剖面; 有机碳

中图分类号: S153.6⁺2

文献标识码: A

文章编号: 1009-2242(2017)05-0253-07

DOI: 10.13870/j.cnki.stbcbxb.2017.05.039

Distribution Characteristics of Organic Carbon in 2 m Soil Layers Under Difference Planting Types in Terraced Fields on Loess Hilly Region

ZHAO Junfeng, XIAO Li, HUANG Yimei, ZHOU Junying, LIU Yang

(Key Laboratory of Plant Nutrition and the Agri-environment in Northwest China, Ministry of Agriculture, College of Natural Resources and Environment, Northwest A&F University, Yangling, Shaanxi 712100)

Abstract: In order to confirm the effects of planting types on the vertical distribution of soil organic carbon (SOC), five typical planting types of terraces in the Baozigou basin located in Gansu province were studied, which included maize, wheat, potato, apple and intercropping (apple+potato). SOC content, storage and the controls were studied to investigate the effects of planting types on the stability of SOC in 0—200 cm soil layer. The results showed that: (1) The content of SOC in 0—200 cm ranged from 3.33~4.86 g/kg, and the differences among different planting types were significant; SOC in intercropping and apple were significantly higher than those in maize and wheat ($P < 0.05$); SOC was significant different in different soil layers, and the content of SOC in 0—20 cm soil layer were significantly higher than other layers and the difference were slightly with the soil depth increased. The storage of SOC ranged from 8.0 t/hm² to 11.69 t/hm², and the difference was more outstanding among different planting types; specifically, SOC storages in intercropping and apple were significantly higher than those in maize and wheat. (2) The distribution ratio of SOC in 0—20, 20—100 and 100—200 cm accounted for 17.57%, 41.21%, and 41.22%, respectively. The influences of different planting types on the stability of SOC distribution were small. Among different planting types, the ratio of the SOC storage in 0—20 cm to 20—40 cm soil layer were 1.51~1.78, 0—20 cm to 40—60 cm soil layer were 1.78~2.02, which indicates that soil is developing to maturation and soil quality is significantly improved. (3) Moisture has an effect on the vertical distribution of SOC; planting types had certain influences on the distribution and the storage of SOC, the apple orchard of terraced fields in the loess hilly region had a good advantage on the improvement of soil organic carbon in the Loess Plateau.

Keywords: loess hilly region; terraces; planting type; soil profile; organic carbon

收稿日期: 2017-04-17

资助项目: 水利部公益性行业专项(201501045)

第一作者: 赵俊峰(1990—), 男, 硕士研究生, 主要从事生态环境工程方面研究。E-mail: jfzhao2014@nwsuaf.edu.cn

通信作者: 黄懿梅(1971—), 女, 博士, 副教授, 主要从事生态环境工程和固体废弃物处理方面研究。E-mail: ymhuang1971@nwsuaf.edu.cn

土壤有机碳(SOC)是大气和生物碳储量的 2 倍以上,在全球碳循环中具有重要作用^[1]。深层土壤有机碳的变化是陆地碳循环的一个关键组成部分^[2],存储在土层中的有机碳通过改变植物根系的生物地球化学过程从而影响碳循环,但影响深层土壤有机碳差异的因素还不十分清楚^[3]。目前,大部分关于土壤有机碳储存的理解来自于土壤表层(0—30 cm)^[4]。对于给定的研究区域或土地利用类型中,SOC 储量的大小在很大程度上取决于采样深度^[5],当以 200 cm 土体作为计算范围时,全球土壤有机碳储量会提高 60%,因此在研究土壤有机碳时,对 100 cm 以下深层土壤有机碳的研究不容忽视^[6],了解深层有机碳储量变化及影响因素有助于避免低估土壤固碳潜力的可能性^[7]。同时深层土壤有机碳的稳定性是影响土壤有机碳固存的重要因素,对评价土壤固碳效应有重要意义^[8]。

梯田是黄土高原水土流失治理中广泛采用的一项主要工程措施,在减少水土流失、改善生态环境和提高农业生产水平等方面发挥着重要的作用^[9]。而目前梯田有机碳的研究主要集中在南方水田^[10-11],对北方旱作梯田的关注较少^[12],鲜见关于黄土高原梯田深层有机碳的具体研究,截至 2012 年底,黄土高原地区现有水平梯田 371.29 万 hm^2 ^[13],研究黄土高原梯田土壤深层有机碳分布及其影响因素,对提高黄土丘陵区梯田土壤固碳能力,明确其生态环境效应,评估其有机碳碳储量具有重要指导意义。在流域尺度,不同种植类型是影响土壤表层有机碳含量的重要因素,其表层土壤有机碳含量具有差异性^[14]而梯田不同种植类型土壤深层有机碳的分布特征、储量及其关键影响因素尚不清楚。因此,本文以黄土高原典型种植类型梯田 0—200 cm 土壤剖面有机碳作为研究对象,分析有机碳的垂直分布特征以及各

层中碳储量,探究有机碳差异的影响因素,旨在为科学利用和保护梯田资源,提高土壤固碳能力,评估梯田碳储量,揭示梯田土壤在发育过程中深层土壤有机碳的稳定性提供理论依据。

1 材料与方法

1.1 研究区概况

甘肃省平凉市庄浪县位于甘肃省东部、六盘山西麓,陇西黄土高原东缘,是黄土丘陵沟壑区地貌的典型代表。全县土地面积 1 553 km^2 ,自 20 世纪 60 年代中期以来进行梯田建设,到 2011 年,已建成水平梯田 5.69 万 hm^2 ,约占总耕地的 93.16%,基本上把坡耕地都修成了梯田。1998 年被国家命名为“中国第一个梯田化模范县”。

堡子沟流域($105^{\circ}46'15''$ — $106^{\circ}23'45''$ E, $35^{\circ}03'23''$ — $35^{\circ}28'26''$ N),位于庄浪县西北部,属丘陵沟壑河谷区,丘陵平缓,地形复杂,海拔 1 700~1 900 m,气温干燥温凉,热量较低,年平均气温 $7.2\sim 7.4\text{ }^{\circ}\text{C}$,5—9 月降水较多,年降雨量 500~550 mm,无霜期 159 d,年均日照时数为 2 179 h,属半干旱温凉气候类型,主要土壤类型为黄绵土,主要种植作物为小麦和玉米,还有少量的土豆以及近年来在庄浪县重点发展的苹果园,在苹果挂果前(树龄 5 a),常常与土豆间作。水分来源主要依靠天然降雨,耕作方式主要靠人畜,作物还田方式为根部留茬,秸秆主要用来作为燃料燃烧与饲料喂养^[15]。在农作物播种时,施有机肥,苹果树幼苗一般有机肥施肥量为 $26.25\text{ t}/\text{hm}^2$ 左右,5 a 树龄为 $45\text{ t}/\text{hm}^2$,生长季期间追施尿素($0.15\sim 0.45\text{ t}/\text{hm}^2$)。采样时流域内主要种植类型的生长特性及有机肥施加情况如表 1 所示。

表 1 流域内种植类型生长特性及施加有机肥情况

项 目	小麦	玉米	间作(土豆+苹果)	苹果	土豆
生长特性	一年生禾本科	一年生草本		多年生乔木	一年生草本
施肥量/ $(\text{t}\cdot\text{hm}^{-2})$	0~22.5	0~22.5	52.5~75.0	0~75.0	0~30.0
平均施肥量/ $(\text{t}\cdot\text{hm}^{-2})$	7.5	3.5	60.0	27.7	10.5

1.2 样地布设与样品采集

2015 年 9 月,在堡子沟流域(主沟为南北走向)选取 6 个坡,东向坡 3 个,西向坡 3 个作为研究样坡。在每个坡分别选择 5 种植类型:玉米、小麦、土豆、果园(挂果 5 a)和间作(土豆+苹果)作为研究样地,则每个坡向就有 3 个野外重复样地,样地的具体分布如图 1 所示。

除小麦地外,其他样地都覆有地膜。在每个样地用土钻分层采样,每层 20 cm,每个样点共采集土样 10 个。同时在每个样地挖剖面,分层用环刀采样测定土壤容重。详细记录样品编号、作物种类、坡位、坡度等信息(图 1)。

1.3 测定指标及其方法

土壤容重采用环刀法测定;土壤含水率采用烘干法测定;土壤总有机碳采用重铬酸钾外加热法测定。有机碳储量采用分层算法,公式为:

$$\text{SOCs}=\text{SOC}\times\rho\times H\times(1-\delta_{2\text{ mm}}/100)\times 0.1$$

式中:SOCs 为土壤有机碳储量(t/hm^2);SOC 为土壤有机碳含量(g/kg); ρ 为土壤容重(g/cm^3); H 为土层厚度(cm); $\delta_{2\text{ mm}}$ 为粒径 $\geq 2\text{ mm}$ 的砾石含量,由于黄绵土砾石含量极低,该值忽略未计。

分层比例(SR)定义为表层的土壤性质与更深土层的比率。分层比例(SR)作为一个评价农田土壤质量的指标被广泛应用,较高的 SR 值(通常 >2),表明

良好的土壤环境质量。

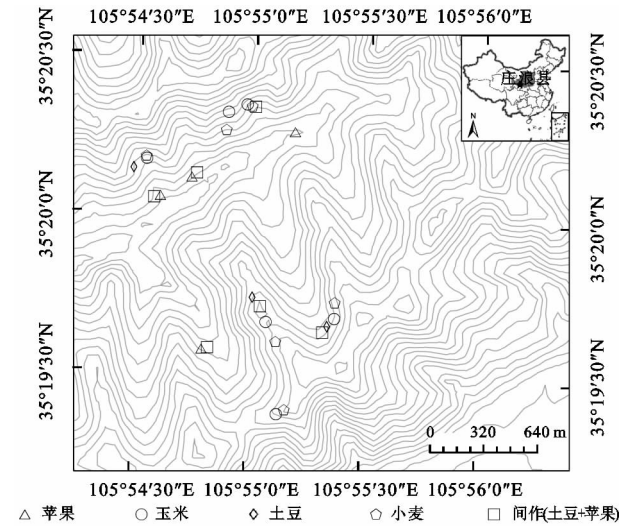


图 1 采样点分布示意

1.4 数据处理方法

采用 SPSS 20.0 统计分析软件对有机碳含量与水分、坡度进行 Pearson 相关性分析,采用单因素方差分析(One-Way ANOVA)进行差异显著性检验,运用 Excel 2013、Origin 9.0 进行数据处理和作图。

2 结果与分析

2.1 黄土丘陵区典型种植类型梯田有机碳含量变化特征

由图 2 可知,0—200 cm 土壤有机碳含量在玉米地为 2.80~6.03 g/kg,平均值为 3.49 g/kg;在小麦地为 2.43~6.39 g/kg,平均值为 3.33 g/kg;在间作地为 3.56~8.02 g/kg,平均值为 4.65 g/kg;在苹果地为 3.72~8.36 g/kg,平均值为 4.86 g/kg;在土豆地为 2.93~8.21 g/kg,平均值为 3.95 g/kg。可见,苹果和间作地明显高于玉米和小麦地。

不同种植类型 0—200 cm 土壤有机碳变化趋势表现为,同种植植类型不同土层土壤有机碳含量随土层深度增加先下降后趋于稳定,玉米、小麦趋势较为相似,间作、苹果趋势较为一致,且间作和苹果地在各个层次都显著高于玉米、小麦($P<0.05$)。

由图 3 可知,有机碳含量在 0—20, 20—100, 100—200 cm 变化明显,5 种梯田种植类型土壤有机碳含量在 0—20 cm 土层均显著高于其他土层($P<0.05$),平均值分别是 20—100 cm 的 1.89 倍,100—200 cm 的 2.22 倍。除玉米地差异不显著外,其余梯田有机碳含量在 20—100 cm 均显著高于 100—200 cm($P<0.05$),20—100 cm 土层有机碳平均含量高出 100—200 cm 土层 1.24 倍。

在 0—20 cm 土层,有机碳含量为苹果地>土豆地>间作地>坡耕地>小麦地>玉米地>新修梯田,间作、苹果、土豆地显著高于玉米、小麦地、新修梯田($P<$

0.05);在 20—100 cm 土层,有机碳含量为间作地>苹果地>新修梯田>坡耕地>土豆地>玉米地>小麦地,苹果、间作地显著高于玉米、小麦、土豆地($P<0.05$);在 100—200 cm 土层,有机碳含量为苹果地>间作地>土豆地>玉米地>小麦,间作、苹果地显著高于玉米、土豆地($P<0.05$),同时玉米、土豆地显著高于小麦地($P<0.05$);整体上在 20—200 cm 土层,苹果、间作地有机碳含量明显高于其他种植类型($P<0.05$)。

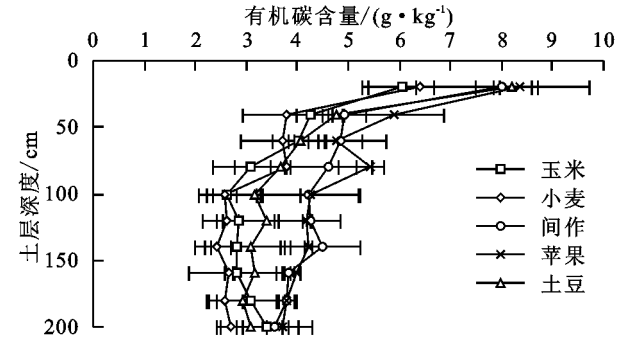
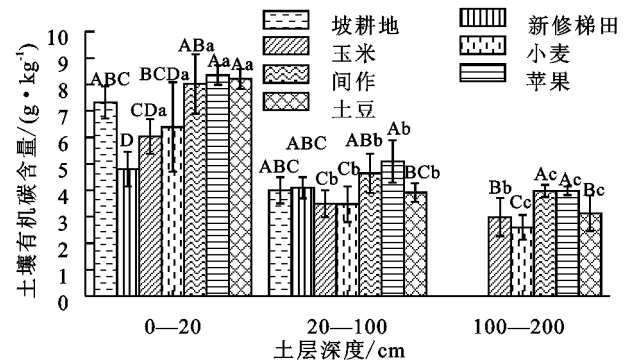


图 2 0—200 cm 土壤有机碳含量变化特征



注:不同的大写字母表示有机碳含量在相同土层不同种植类型之间存在显著差异($P<0.05$);不同的小写字母表示有机碳含量在相同种植类型不同土层之间存在显著差异($P<0.05$);坡耕地、新修梯田数据引自文献[16]。

图 3 有机碳含量在 3 个变化明显的土层中的分布特征

2.2 黄土丘陵区典型种植类型梯田有机碳储量变化特征

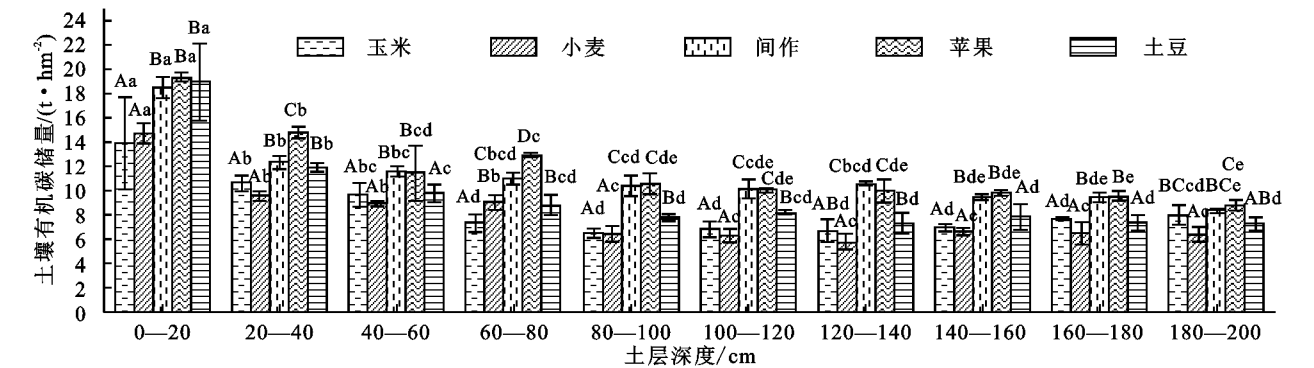
0—200 cm 各土层土壤有机碳储量在玉米地为 6.49~13.91 t/hm²,平均 8.4 t/hm²;在小麦地为 5.74~14.72 t/hm²,平均 8 t/hm²;在间作地为 8.39~18.47 t/hm²,平均 11.16 t/hm²;在苹果地为 8.78~19.25 t/hm²,平均 11.69 t/hm²;在土豆地为 7.28~18.91 t/hm²,平均 9.49 t/hm²。

由图 4 可知,5 种植植类型梯田有机碳储量在 0—200 cm 剖面变化较大,0—20 cm 土层有机碳储量显著高于其他土层($P<0.05$),除玉米地差异不显著外,其余梯田 20—100 cm 土层有机碳储量显著高于 100—200 cm 土层($P<0.05$)。同种植植类型不同土层土壤有机碳储量随土层深度增加先下降后趋于稳定,其中,玉米、小麦、土豆地 0—200 cm 有机碳储量均在 0—100 cm 不断下降,在 100—200 cm 缓慢升高;间作、苹果地均在 0—

100 cm 有机碳储量不断下降,100—200 cm 缓慢降低。

不同种植类型相同土层有机碳储量在 0—20 cm 表现为间作、苹果、土豆地显著高于玉米、小麦地 ($P<0.05$);在 20—100 cm 土层表现为间作地>苹果地

>土豆地>玉米地>小麦地;在 100—200 cm 土层,间作、苹果地显著高于玉米、土豆地,同时玉米、土豆地显著高于小麦地 ($P<0.05$);整体上 20—200 cm 有机碳储量在不同种植类型间的差异较有机碳含量更明显。



注:不同的大写字母表示有机碳储量在相同土层不同种植类型之间存在显著差异 ($P<0.05$);不同的小写字母表示有机碳储量在相同种植类型不同土层之间存在显著差异 ($P<0.05$)。

图 4 0—200 cm 各土层土壤有机碳储量

2.3 土壤有机碳储量在不同土层的分配比例和分层比例

用 SOC_s 代替 1 m² 面积上的各土层有机碳储量,从而计算出该层有机碳储量占 0—200 cm 土层有机碳储量的比例。由图 5 可知,不同种植类型土壤有机碳分配比例在 0—20 cm 土层为 16.46%~19.92%,均值为 17.57%;在 20—100 cm 土层为 40.25%~42.47%,均值为 41.21%;在 100—200 cm 土层为 39.32%~42.94%,均值为 41.22%。

土壤有机碳分配比例在 0—20 cm 土层表现为土豆地最大,苹果地最小,各种种植类型之间有机碳差异不显著 ($P<0.05$);在 20—100 cm 土层表现为苹果地最大,土豆地最小,各种种植类型之间差异不显著 ($P<0.05$);100—200 cm 土层表现为间作地最大,小麦地最小,各种种植类型之间差异不显著 ($P<0.05$)。总体上各土层土壤有机碳分配比例在玉米、苹果地较为相似,在土豆、麦地较为相似,不同种植类型在 0—200 cm 土层中的碳储量分配比例差异不显著 ($P<0.05$)。

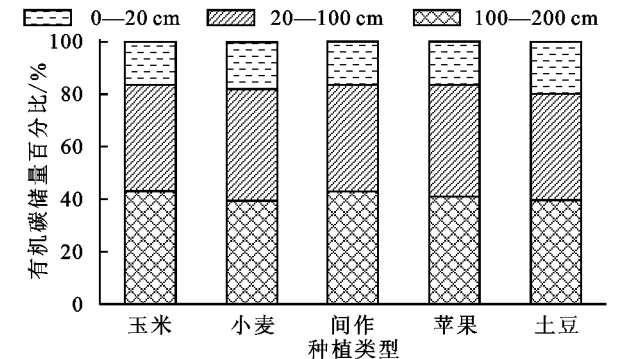


图 5 各土层土壤有机碳分配比例

由表 2 可知,本研究中不同种植类型有机碳储量 $SR(0-20\text{ cm}/20-40\text{ cm})$ 为 1.51~1.78,表现为小麦地最大,苹果地最小; $SR(0-20\text{ cm}/40-60\text{ cm})$ 为 1.78~

2.02,苹果地最大,土豆地最小;各种种植类型有机碳 $SR(0-20\text{ cm}/40-60\text{ cm})$ 大于 $SR(0-20\text{ cm}/20-40\text{ cm})$ 。

表 2 不同种植类型不同土层分层比例

土层分层	玉米	小麦	间作	苹果	土豆
0—20 cm/20—40 cm	1.63	1.78	1.66	1.51	1.60
0—20 cm/40—60 cm	1.89	1.90	1.79	2.02	1.78
0—20 cm/80—100 cm	2.14	2.30	1.78	1.83	2.44
0—20 cm/180—200 cm	1.74	2.30	2.20	2.19	2.60

2.4 有机碳分布与相关因素的关系

2.4.1 有机碳分布与水分的关系 由图 6 可知,0—200 cm 土壤水分(干基)在玉米地先降低后升高,在 60—80 cm 最小,180—200 cm 最大;在间作、苹果、土豆地先降低后升高,在 40—60 cm 最小,180—200 cm 最大;在小麦地先降低后升高再降低,60—80 cm 最小,140—160 cm 最大;从整体来看,土豆地水分含量波动最大;土豆、间作、小麦地均先降低后升高又降低;不同种植类型土壤含水率表现为玉米、小麦较为相似,间作、苹果、土豆较为相似。由图 7 可知,有机碳含量与土壤含水量呈显著正相关 ($P=0.005, R^2=0.15$),符合线性方程 $y=1.73+16.96x$ 。

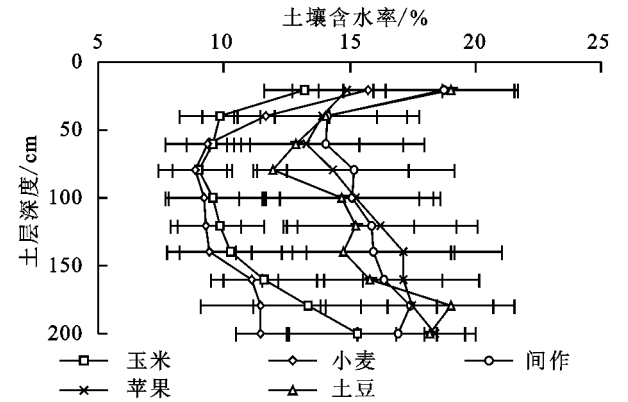


图 6 0—200 cm 各土层含水率的分布特征

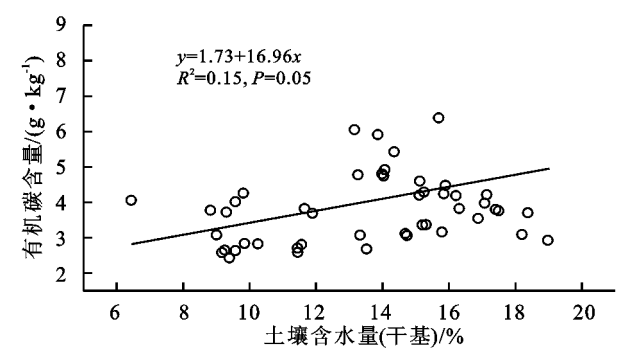
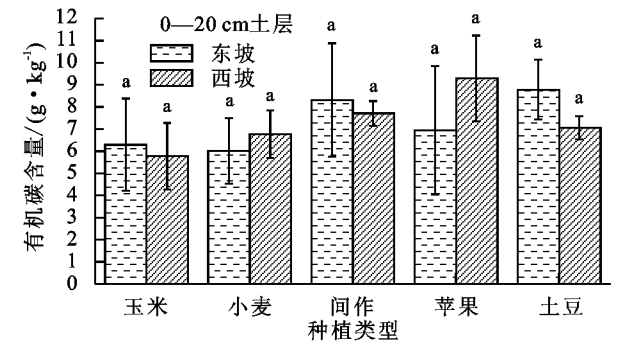


图 7 土壤含水量与有机碳含量相关性分析



注:不同的小写字母表示不同坡向之间存在显著差异($P<0.05$)。

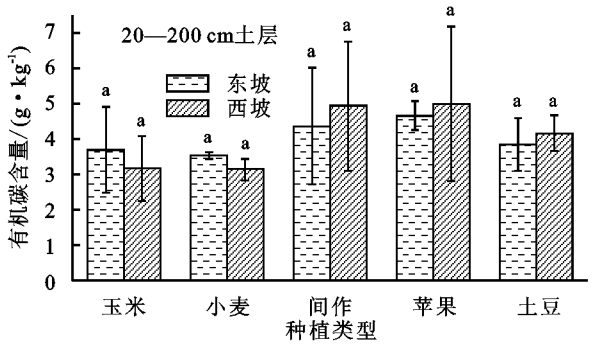


图 8 不同坡向土壤有机碳含量

3 讨论

3.1 种植类型对梯田土壤有机碳含量分布的影响

本研究中 5 种植类型梯田 2 m 土层内土壤有机碳含量最低值为 2.43 g/kg,最高值为 8.36 g/kg,平均值为 3.33~4.86 g/kg,低于全国耕地平均水平(13.32 g/kg)。2 m 土层内有机碳储量最低为 5.74 t/hm²,最高为 19.25 t/hm²,平均值为 8.0~11.69 t/hm²,也低于已有的自然生态系统的研究结果。这与黄土丘陵区绝大多数梯田土壤是从结构差、养分贫瘠的黄土母质上开始耕作熟化^[15]有关,也可能与梯田和自然生态系统中植物种类及人为影响不同有关。

有机碳含量在 0—200 cm 土层中表现出明显的层次性,在 0—20 cm 显著高于其他各层,呈现出一定程度的表聚性;随土层深度增加先下降后趋于稳定,20 cm 以下的各层中的变异较小。有机碳储量和密度在土壤剖面中的分布规律与有机碳含量相似,因为土壤有机碳密度大小主要取决于土壤有机碳含量和土壤容重两个重要参数^[17],而本研究区域的土壤容重变化不大。这种表聚性的产生是因为土壤剖面上有机碳的变化主要取决于地表植被状况、有机物质进入土壤的量和进入方式以及土壤淋溶状况等因素^[18]的影响,梯田的表层土壤不仅由种植植被的枯枝落叶和大量死根腐解不断获得碳源,同时还受到农业措施(如施肥、秸秆收割等)的影响^[11],植物根系、枯枝落叶腐解、施肥等有机碳输入主要作用于地表,且随土壤深度的增加而减弱^[19],所以,表层有大量有机物料的补充而较高,而黄土丘陵区的雨水较少,

2.4.2 有机碳分布与坡向、坡度的关系 由图 8 可知,0—20 cm 土层土壤有机碳含量在玉米地为东坡小于西坡;在小麦、苹果、间作表现为东坡大于西坡。20—200 cm 土层土壤有机碳含量在玉米、小麦地都表现出东坡大于西坡;在间作、苹果、土豆地则为东坡小于西坡。整体上东西坡向对各作物土壤有机碳影响不显著($P<0.05$)。0—20,20—200 cm 有机碳含量与坡度的相关系数为 0.865 和 0.561,可以看出庄浪梯田土层土壤有机碳含量与坡度没有相关性,这表明坡度不是影响梯田土壤有机碳含量的关键因素。

向下淋溶较慢,下层有机碳含量增加较慢,所以较低。这种分布特征与已有黄土高原农田生态系统深层土壤有机碳的研究^[3]较为相似。

本研究梯田土壤有机碳含量在各种种植类型间的分布有差异,表层有机碳含量在玉米、小麦地远低于间作、苹果和土豆地,在 20—100,100—200 cm 土层,则是间作和苹果显著高于玉米和小麦($P<0.05$),这与不同作物对有机碳分布有影响的结果^[14]类似,因为植物根系是深层土壤有机碳的主要来源,控制着深层土壤有机碳的循环和分布^[20],一方面影响土壤呼吸和土壤含水量,另一方面通过作物类型和植被生产力的变化影响土壤有机物质的投入^[21]。小麦、土豆、玉米根系主要分布在 0—30 cm 的土壤表层,而苹果根系要相对深很多。另外还与当地施肥习惯和不同类型植被的生长方式、光合产物分配模式的不同有关。0—200 cm 各土层间作、苹果有机碳储量显著高于玉米、小麦($P<0.05$),而不同种植类型在 0—200 cm 土层中的碳储量分配比例差异不显著($P<0.05$),说明种植类型对土壤有机碳储量分配比例影响不显著,对 0—200 cm 土层有机碳分布稳定性影响较小。

由于表土层对于控制水土流失,提高土壤导水性和养分保存与供给有重要作用,一个更高的 SR 值指示水土保持更好的能力^[22]。本研究中除苹果地外,有机碳 SR(0—20 cm/20—40 cm)和 SR(0—20 cm/40—60 cm)均 <2 ,与已有黄土高原农田研究结果^[22]类似,同时各种种植类型 0—200 cm 土层有机碳平均含

量高于坡耕地(图 2),且 0—20 cm 土层各种植类型土壤有机碳含量都显著高于新修梯田($P < 0.05$),表明研究区域梯田经过 50~60 年耕种,土壤正向发育熟化,土壤质量明显提高,有效地控制了水土流失。由表 1 可知,苹果间作施肥量最大,其中苹果地有机碳 SR(0—20 cm/40—60 cm)为 2.02,是由于当地苹果园施有机肥的量较高,说明施有机肥有利于提高土壤表层有机碳含量,能改善土壤质量。

3.2 影响梯田土壤有机碳垂直分布的其他因素

在小流域规模,气候和土壤类型可以被认为是空间均匀^[23],影响 SOC 的变化的关键因素是地形,土壤和水的再分配过程^[24]。本研究中有有机碳含量与土壤含水量呈显著正相关,与已有研究^[25]结果相同,由于在半干旱地区,水分是限制植被生长和有机物归还量的重要影响因素,因而 SOC 随土壤水分增加而升高^[25]一方面地上植被和根系生物量随着土壤含水量的增加而增多,另一方面枯落物和根系分解速率也随着土壤含水量的增加而加快。同时,水分控制着有机碳的淋溶,从而影响有机碳在土层垂直分布。

坡向一方面通过影响梯田土壤水热条件而使土壤中有有机碳积累情况不同,由于地面接受太阳辐射量不同,导致土壤温度与蒸发量不同,从而通过影响分状况来影响有机质的分解和微生物碳的矿化^[26];另一方面通过影响植物光合和蒸腾作用,控制作物水、碳间的平衡,从而影响植物对土壤的有机碳输入量^[14]。本研究中,坡向对各作物土壤有机碳影响不显著,可能是由于采样小流域坡位分布为东西坡,光照相对于阴阳坡差异较小。梯田土层土壤有机碳含量与坡度没有相关性,和梯田坡度($2^{\circ} \sim 25^{\circ}$)对有机碳影响不显著^[11]的研究结果相同,可能是由于本研究中梯田坡度($4^{\circ} \sim 16^{\circ}$)变化不大引起的。

农田有机碳变化同时受到自然环境(如气候、地形等)和农田管理活动的影响^[27]。外源碳投入量差异直接影响土壤有机碳含量变化,施用有机肥能显著提高土壤有机碳(0—20 cm 土层)的含量^[11]。已有研究表明在当前有机肥用量下,土壤有机碳增量随有机肥用量线性增加^[12],根据本研究中分层比例(SR)的结果说明本研究区域梯田土壤质量仍有改善的空间,建议施加有机肥进行改良。另外,还可以通过免耕、投入秸秆等措施^[11]来提高土壤有机碳含量和肥力,从而提高黄土丘陵区梯田土壤固碳能力。不同种植类型(特别是农作物和果树)施肥情况、翻耕、秸秆还田等情况差异较大,导致剖面有机碳含量和储量差异显著(图 2,图 4),说明近年来黄土丘陵区重点发展的苹果园相较于农作物有利于梯田土壤有机碳的提高。不同种植类型 0—200 cm 土层有机碳含量和储量差异显著是人为因素对有机碳

分布和固存影响的直观表现。

4 结论

(1)5 种梯田 0—200 cm 土层土壤有机碳含量平均为 3.33~4.86 g/kg、储量平均为 8.0~11.69 t/hm²,处于较低水平;含量和储量均表现为间作和苹果显著高于玉米小麦($P < 0.05$);土壤有机碳含量在 0—200 cm 土层表现出明显的层次性,随土层深度增加先下降后趋于稳定,其中 0—40 cm 有机碳含量降低明显,100—200 cm 含量差异不显著。

(2)不同种植类型在 0—200 cm 土层中的碳储量分配比例差异不显著($P < 0.05$),即种植类型对 0—200 cm 土层有机碳稳定性影响较小。有机碳分层比例 SR(0—20 cm/20—40 cm)为 1.51~1.78,SR(0—20 cm/40—60 cm)为 1.78~2.02,表明研究区域土壤正向发育熟化,土壤质量明显提高。

(3)水分对有机碳垂直分布有影响,东西坡向和坡度对土壤有机碳影响不显著,种植类型对土壤有机碳的深层分布和储量有一定影响,苹果园相较于农作物有利于梯田土壤有机碳的提高。

参考文献:

- [1] Smith P, Fang C, Dawson J J C, et al. Impact of global warming on soil organic carbon[J]. *Advances in Agronomy*, 2008, 97(7): 1-43.
- [2] Rumpel C, Kögel-Knabner I. Deep soil organic matter: A key but poorly understood component of terrestrial C cycle[J]. *Plant and Soil*, 2011, 338(1/2): 143-158.
- [3] Wang Y, Shao M, Zhang C, et al. Soil organic carbon in deep profiles under Chinese continental monsoon climate and its relations with land uses[J]. *Ecological Engineering*, 2015, 82(9): 361-367.
- [4] Mobley M L, Lajtha K, Kramer M G, et al. Surficial gains and subsoil losses of soil carbon and nitrogen during secondary forest development[J]. *Global Change Biology*, 2015, 21(2): 986.
- [5] Harrison R B, Footen P W, Strahm B D. Deep soil horizons: Contribution and importance to soil carbon pools and in assessing whole-ecosystem response to management and global change[J]. *Forest Science*, 2011, 57(1): 67-76.
- [6] 张帅,许明祥,张亚锋,等. 黄土丘陵区土地利用变化对深层土壤有机碳储量的影响[J]. *环境科学学报*, 2014, 34(12): 3094-3101.
- [7] 车升国,郭胜利. 黄土塬区小流域深层土壤有机碳变化的影响因素[J]. *环境科学*, 2010, 31(5): 1372-1378.
- [8] 马昕昕,许明祥,张金,等. 黄土丘陵区不同土地利用类型下深层土壤轻组有机碳剖面分布特征[J]. *植物营养与肥料学报*, 2013, 19(6): 1366-1375.
- [9] 吴发启,张玉斌,宋娟丽,等. 水平梯田环境效应的研究现状及其发展趋势[J]. *水土保持学报*, 2003, 17(5): 28-31.
- [10] 唐国勇,黄道友,黄敏,等. 红壤丘陵景观表层土壤有机

- 碳空间变异特点及其影响因子[J]. 土壤学报, 2010, 47(4): 753-759.
- [11] 李凤博, 蓝月相, 徐春春, 等. 梯田土壤有机碳密度分布及影响因素[J]. 水土保持学报, 2012, 26(1): 179-183.
- [12] 师晨迪, 许明祥, 邱宇洁, 等. 黄土丘陵区县域农田土壤近30年有机碳变化及影响因素研究: 以甘肃庄浪县为例[J]. 环境科学, 2014, 35(3): 1098-1104.
- [13] 马红斌, 李晶晶, 何兴照, 等. 黄土高原水平梯田现状及减沙作用分析[J]. 人民黄河, 2015, 37(2): 89-93.
- [14] 张美丽, 姚云峰, 李龙, 等. 梯田不同作物土壤有机碳含量及其影响因素分析[J]. 中国土壤与肥料, 2017(1): 14-20.
- [15] 刘思涵. 黄土丘陵区梯田土壤质量演变及培肥效应研究[D]. 陕西 杨凌: 西北农林科技大学, 2015.
- [16] 邱宇洁. 黄土丘陵区梯田土壤有机碳演变规律及影响因素研究[D]. 陕西 杨凌: 西北农林科技大学, 2014.
- [17] 丁访军, 高艳平, 周凤娇, 等. 贵州西部4种林型土壤有机碳及其剖面分布特征[J]. 生态环境学报, 2012, 21(1): 38-43.
- [18] 王海燕, 雷相东, 张会儒, 等. 近天然落叶松云冷杉林土壤有机碳研究[J]. 北京林业大学学报, 2009, 31(3): 11-16.
- [19] 黄从德, 张健, 杨万勤, 等. 四川森林土壤有机碳储量的空间分布特征[J]. 生态学报, 2009, 29(3): 1217-1225.
- [20] 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.
- [21] Zhao W, Zhang R, Huang C, et al. Effect of different vegetation cover on the vertical distribution of soil organic and inorganic carbon in the Zhifanggou Watershed on the loess plateau[J]. Catena, 2016, 139(3): 191-198.
- [21] Jian D, Sun P, Zhao F, et al. Soil C, N, P and its stratification ratio affected by artificial vegetation in subsoil, loess plateau China[J]. PLoS One, 2016, 11(3): e0151446.
- [23] Chai H, Yu G, He N, et al. Vertical distribution of soil carbon, nitrogen, and phosphorus in typical Chinese terrestrial ecosystems[J]. Chinese Geographical Science, 2015, 25(5): 549-560.
- [24] Jague E A, Sommer M, Saby N P A, et al. High resolution characterization of the soil organic carbon depth profile in a soil landscape affected by erosion[J]. Soil and Tillage Research, 2016, 156(3): 185-193.
- [25] 邹俊亮, 郭胜利, 李泽, 等. 小流域土壤有机碳的分布和积累及土壤水分的影响[J]. 自然资源学报, 2012, 27(3): 430-439.
- [26] 南雅芳, 郭胜利, 张彦军, 等. 坡向和坡位对小流域梯田土壤有机碳、氮变化的影响[J]. 植物营养与肥料学报, 2012, 18(3): 595-601.
- [27] Sattler D, Murray L T, Kirchner A, et al. Influence of soil and topography on aboveground biomass accumulation and carbon stocks of afforested pastures in South East Brazil[J]. Ecological Engineering, 2014, 73(11): 126-131.
- (上接第252页)
- [20] 刘月梅. EN-1 固化剂对黄土性土壤与黑麦草的效应研究[D]. 陕西 杨凌: 西北农林科技大学, 2014.
- [21] 王其东, 高海鹰, 梁止水, 等. 新型亲水性聚氨酯对砒砂岩边坡抗降雨侵蚀的影响[J]. 水土保持学报, 2016, 30(3): 29-33.
- [22] Wu Z R, Gao W M, Wu Z S, et al. Synthesis and characterization of a novel chemical sand-fixing material of Hydrophilic polyurethane[J]. Journal of The Japan Society of Material Science, 2011, 60(7): 674-679.
- [23] 姚文艺, 吴智仁, 刘慧, 等. 黄河流域砒砂岩区抗蚀促生技术试验研究[J]. 人民黄河, 2015, 37(1): 6-10.
- [24] 沈鑫. 一种砒砂岩固结促生自然边坡治理技术[J]. 人民黄河, 2015, 37(8): 90-93.
- [25] 梁止水, 吴智仁, 杨才千, 等. 砒砂岩固结体防水抗蚀及紫外耐久性能研究[J]. 人民黄河, 2016, 38(6): 46-49.
- [26] 肖培青, 姚文艺, 申震洲, 等. 黄河中游砒砂岩区抗蚀促生技术研究[J]. 中国水土保持, 2016, 9: 73-76.
- [27] 郭凯先, 孙广春, 刘得俊, 等. 青海湖周边流动沙丘化学治沙效果初探[J]. 青海大学学报(自然科学版), 2011, 29(5): 21-23.
- [28] 李润杰, 郜志勇, 李添萍, 等. 生态恢复新材料特性及在三江源地区沙化地植被修复中的应用[C]// 西安理工大学. 全国水土保持生态修复学术研讨会论文集. 西安: 西安理工大学, 2009: 36-42.
- [29] 余莹莹, 汪永进, 范敬兰, 等. W-OH 生态护坡技术在沙土区河道坡面上的应用[J]. 治淮, 2014(8): 31-32.
- [30] 王黎军. W-OH 新型防渗材料在高寒干旱区渠道中的应用研究[J]. 节水灌溉, 2011(4): 28-31.
- [31] 梁止水, 杨才千, 吴智仁. W-OH 与砒砂岩固结体力学性能研究[J]. 人民黄河, 2016, 38(6): 30-34.
- [32] 高卫民, 吴智仁, 吴智深, 等. 荒漠化防治新材料 W-OH 的力学性能研究[J]. 水土保持学报, 2010, 24(5): 1-6.
- [33] Wu Z R, Wu Z S. Experimental study on evaluation and control of ultraviolet resistance of sand stabilized with organic slurry containing hydrophilic polyurethane [J] Journal of The Society of Materials Science, 2008, 57(11): 1167-1172.
- [34] 林超文, 庞良玉, 陈一兵, 等. 四川盆地紫色土 N, P 损失载体及其影响因子[J]. 水土保持学报, 2008, 22(2): 20-24.
- [35] 刘京. 三峡紫色土坡耕地小流域氮磷收支及流失风险研究[D]. 重庆: 重庆大学, 2011.