

黄土塬区小流域深层土壤有机碳变化的影响因素

车升国¹, 郭胜利^{1, 2*}

(1. 西北农林科技大学资源与环境学院, 杨凌 712100; 2. 中国科学院水利部水土保持研究所, 杨凌 712100)

摘要:以黄土高原沟壑区王东沟小流域为对象,研究了地形(塬面、塬坡和沟道)、土地利用(自然草地、人工草地、人工林地、农地和果园)对 0~200 cm 土层内土壤有机碳(soil organic carbon, SOC)垂直分布特征的影响,以揭示黄土高原小流域深层 SOC 储量及其影响因素.结果表明, SOC 含量除表层(0~20 cm)沟道($10.0 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$)大于塬面($7.8 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$)和塬坡($8.2 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$)外,塬面底层 SOC 均显著高于塬坡和沟道;塬坡和沟道 SOC 含量随深度增加而降低,而塬面上呈现 SOC 随深度增加降低-升高-降低的变化趋势.塬面上, SOC 含量呈现人工草地($5.4 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$) > 农田($5.2 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$)和果园($5.1 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$)的趋势,影响深度为表层 40 cm;塬坡上,呈现自然草地($4.3 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$) > 人工林地($3.8 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$) > 人工草地($3.3 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$)和果园($3.3 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$)的趋势,影响深度达到 100 cm;而沟道内,林草地利用方式对整个垂直剖面分布的差异无显著影响.20~100 cm 土层 SOC 储量占 0~100 cm 储量的 67.6%;100~200 cm 土层 SOC 储量占 0~200 cm 储量的 37.3%,相当于 0~100 cm 的 63.8%.研究结果表明地形、土地利用显著($p < 0.05$)影响 SOC 垂直分布特征;黄土高原沟壑区深层 SOC 储量巨大,不容忽视.

关键词:土壤有机碳;影响因素;垂直分布;黄土高原沟壑区;小流域

中图分类号:X144 文献标识码:A 文章编号:0250-3301(2010)05-1372-07

Influencing Factors of Soil Organic Carbon in Deeper Soil Layers at a Small Watershed on Tableland Region of the Loess Plateau, China

CHE Sheng-guo¹, GUO Sheng-li^{1, 2}

(1. College of Resource and Environment, Northwest A&F University, Yangling 712100, China; 2. Institute of Soil and Water Conservation, Chinese Academy of Sciences and Ministry of Water Resource, Yangling 712100, China)

Abstract: Analyzing and estimating soil organic carbon (SOC) storage and changes in deep layers under different land uses and landforms may play a pivotal role in comprehending the balance and cycle mechanisms of C cycling, and comprehending the capacity of C sequestration in the terrestrial ecosystem. The study mainly emphasized on effects of landforms and land uses on vertical distribution characteristic of SOC sampled to a depth of 200 cm at the Wangdonggou watershed on the tableland region of Loess Plateau, China. For the top soil of 0-20 cm, the order of SOC contents was gully ($10.0 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$) > tableland ($7.8 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$) and slopeland ($8.2 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$). For the subsoil, SOC in tableland was higher than that in gully and slopeland. For slopeland and gully, SOC decreased with increasing depth, while for tableland, SOC decreased initially, then increased, lastly decreased. Meanwhile, for tableland, the order of SOC appeared approximately manmade grassland > cropland > orchard with the effecting depth of land uses for 40 cm, and for slopeland the order was native grassland ($4.3 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$) > manmade woodland ($3.8 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$) > manmade grassland ($3.3 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$) > orchard ($3.3 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$) with the depth for 100 cm, while for gully, there was no significantly difference ($p > 0.05$) among different land uses. SOC storage in the profile of 20-200 cm accounted for 67.6% sampled to a depth of 100 cm, while for 100-200 cm, SOC storage accounted 37.3% in 0-200 cm equaled to 63.8% of the SOC storage in 0-100 cm. The results revealed that landforms and land uses highly significantly ($p < 0.05$) affected the vertical distribution of SOC at a small watershed scale and considerable amounts of C were stored at deeper depths.

Key words: soil organic carbon (SOC); influencing factors; vertical distribution; Loess Plateau; small watershed

深层 SOC 储量及其变化是影响陆地生态系统碳循环的重要影响因素^[1]. 在全球尺度上, 20~100 cm 土层的 SOC 储量占 100 cm 土层 SOC 储量的 50% 以上^[2]; 100~200 cm 土层和 200~300 cm 土层中 SOC 储量为 0~100 m 土层 SOC 储量(1 550 Pg C)的 32% 和 23%^[3]. 在我国, 0~100 m 土层中 SOC 储量的 59% 位于 20 cm 以下土层^[4]. 了解深层 SOC 储量变化及其影响因素有助于避免低估土壤固碳潜力的可能性. 地形和地貌是导致 SOC 空间变异的重

要因素^[5-8]. 在德黑兰(Tehran)阿莫尔地区(Amol), SOC 以低地最高, 防堤带次之, 山麓地带最低^[9]. 在明尼苏达州(Minnesota)土壤侵蚀地区, 0~

收稿日期:2009-07-05; 修订日期:2009-08-07

基金项目:国家自然科学基金项目(40771125); 中国科学院知识创新工程方向项目(KZCX2-YW-424); 中国科学院“西部之光”项目

作者简介:车升国(1983~), 男, 硕士, 主要研究方向为土壤与环境生态, E-mail: cheshg1983@nwsuaf.edu.cn

* 通讯联系人, E-mail: slguo@ms.iswc.ac.cn

15 cm 土层 SOC 分布特征大致呈现上背坡 (upper backslope) > 梁 (shoulder) > 峰顶 (summit) > 麓坡 (footslope) > 低背坡 (lowerslope) > 趾坡 (toeslope) 的趋势^[10]. 在黄土高原沟壑区, 塬面上由于侵蚀微弱, SOC 含量较高的“黑垆土”发育成熟, 但在侵蚀强烈的塬坡, SOC 含量较低的黄绵土是其主要发育的土壤, 在黑垆土的剖面有垆土层的存在, 而黄绵土中剖面上下相对较低. 但不同地形地貌条件下, 深层 SOC 含量变化机制了解相对较少. 土地利用和管理变化也是影响深层 SOC 储量的重要因素^[11-15], 是目前广泛关注的研究领域. 但关于 SOC 储量变化的研究集中于 20 cm 以上的表层^[16, 17], 深层 SOC 的储量分布及其影响因素的研究报道较少^[18, 19]. 已有研究发现, 免耕条件下, 从表层到 55 cm 土层都可以观察到 SOC 含量高于常规耕作土壤^[20]. 在美国佐治亚州 (Georgia) 草原上土壤的固碳效应一直延伸到地面下 90 cm^[21]. 全球 2700 个土壤剖面的信息统计结果显示, 灌木、草地和森林群落条件下, 表层 20 cm 土壤中的 SOC 含量占 1 m 土层中 SOC 总量的比例依次为 33%、42% 和 50%^[3]. 这些结果显示, 地形地貌和土地利用有可能是影响深层 SOC 的重要因素. 地处西北的黄土高原地区, 土层深厚, 地形破碎、土地利用类型复杂. 研究黄土高原地区地形和土地利用对 SOC 垂直分布特征的影响对了解深层 SOC 变化机制, 准确估算大尺度 SOC 储量, 空间变异的影响因素等具有重要意义.

1 材料与方法

1.1 流域概况

王东沟小流域位于陕西省西部长武县 (东经 107°40′~107°42′, 北纬 35°12′~35°16′). 为“中国科学院长武黄土高原农业生态试验站”和“长武农田生态系统国家野外研究站”的所在地. 流域土地面积 8.3 km², 塬面、塬坡、沟道约各占土地面积的 1/3, 沟壑密度为 2.78 条·km⁻², 属典型的黄土高原沟壑类型区. 塬面海拔 1 220 m, 流域内从塬面到沟底的最大高差为 280 m. 大陆季风气候, 年均气温 9.1℃, ≥10℃积温 3 029℃, 多年平均雨量 584 mm. 季节性分布不均, 7~9 月份降水占总量的 55%. 主要土壤类型为黑垆土 (分布于塬面) 和黄绵土 (分布于塬坡和沟道), 母质为深厚的中壤质马兰黄土. 塬面地势平坦, 为粮果主要种植区; 塬坡土壤侵蚀严重, 为水土流失的主要治理地段. 经过“六五”、“七五”期间大规模综合治理, 土壤侵蚀模数已由治理

前的 1 860 t·km⁻² 下降至目前的 895 t·km⁻² 以下. 流域内土地利用类型因不同地形而不同, 其中塬面主要分布农田, 果园和人工林地, 塬坡主要分布人工草地、果园、人工林地和自然草地, 而沟道主要分布自然荒草地和人工林地等.

1.2 采样与分析方法

样品采集: 根据小流域塬面、塬坡和沟道特征, 同时考虑不同地形上土地利用方式的影响, 于 2004 年采集 0~200 cm 土壤剖面样品 27 个. 其中, 塬面选取土地利用类型农田、人工草地和果园剖面, 重复 3 次, 共计 9 个剖面样品; 塬坡选取土地利用类型人工草地、自然草地、果园和人工林地剖面, 重复 3 次, 共计 12 个剖面; 沟道选取自然草地和人工林地剖面, 共计 6 个剖面. 每个剖面样品采用直径为 3 cm 的土钻, 间隔 20 cm 保存, 共计 270 个土壤样品.

分析方法: 土样风干, 磨细过 0.25 mm 筛后, 测定 SOC (H₂SO₄-K₂Cr₂O₇ 外加热法)^[22] 含量. 环刀法测定 0~200 cm 土层的容重. 不同地形条件下, 计算 SOC 储量所取剖面土壤容重采用环刀法测定, 见表 1.

表 1 黄土高原沟壑区王东沟流域不同地形上 0~200 cm 土壤容重

土层深度/cm	土壤容重/g·cm ⁻³		
	塬面	塬坡	沟道
0~20	1.25	1.27	1.21
20~40	1.30	1.27	1.30
40~60	1.35	1.30	1.31
60~80	1.36	1.21	1.30
80~100	1.25	1.30	1.27
100~120	1.25	1.31	1.25
120~140	1.25	1.30	1.26
140~160	1.26	1.27	1.27
160~180	1.30	1.25	1.27
180~200	1.31	1.26	1.30

1.3 SOC 储量计算

$$\text{SOC}_i = \text{BD}_i \times \text{SOC}_i \times H_i \times (1 - \theta_i) / 100 \quad (1)$$

$$\text{SOC} = \sum_{i=1}^n \text{SOC}_i \quad (2)$$

式中, SOC 为 SOC 总储量, 单位 kg·cm⁻²; SOC_i 为 i 层 SOC 储量, 单位 kg·cm⁻²; BD_i 为 i 层平均土壤容重, 单位 g·cm⁻³; SOC_i 为 i 层 SOC 含量, 单位 g·kg⁻¹; H_i 为 i 层土层厚度, 单位 cm; θ_i 为 i 层石砾含量, 因黄土区石砾含量极低, θ_i = 0.

1.4 数据处理

测定数据利用 Microsoft Excel 2003 进行数据初步处理及作图; 利用 SAS6. 12^[23] 软件包统计分析了地貌单元、土地利用对流域 SOC 变异性的影响. 当方差分析 (F 检验) 显著时, 再进行 3 种地貌单元、4 种土地利用方式间多重比较.

2 结果与分析

2.1 地形对 SOC 垂直分布的影响

地形显著影响 SOC 含量与剖面分布 (图 1). SOC 随土层深度增加而递减, 但不同地形对 SOC 含量影响存在显著差异. 在 0~200 cm 土层内, SOC 平均含量, 塬面 ($5.4 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$) 较塬坡 ($3.6 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$) 和沟道 ($3.7 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$) 高 40% 以上 ($p < 0.05$). 0~20 cm 土层, SOC 含量则以沟道最高为 $10.0 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$, 塬坡次之为 $8.2 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$, 塬面最低为 $7.8 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$; 从表层 20~60 cm 土层, 塬坡和沟道上 SOC 含量分别降低 57.3% 和 65.2%, 塬面则仅降低 33.6%; 60~120 cm 土层, 塬坡和沟道上 SOC 基本保持稳定, 但塬面上 SOC 却随深度增加而提高; 120 cm 以下土层, 塬坡和沟道呈低水平稳定状态, 而塬面则呈现出缓慢降低趋势. 因此, 整个剖面, 除 0~20 cm 土层沟道大于塬面和塬坡外, 塬面 SOC 含量均显著高于塬坡和沟道; 塬坡和沟道 SOC 含量随深度增加而降低, 但塬面上 SOC 随着深度增加呈现降低-升高-降低的变化趋势.

2.2 土地利用方式对 SOC 垂直分布的影响

土地利用方式同样显著 ($p < 0.05$) 影响 SOC 剖面分布特征 (表 2). SOC 基本呈现随土层深度增加而递减的趋势, 但不同土地利用方式对 SOC 影响存在显著差异. 塬面上, 0~200 cm 土层平均 SOC 含量, 人工草地、农地、果园地依次为 $5.4 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$ 、 $5.2 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$ 和 $5.1 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$, 三者无显著差异 ($p > 0.05$). 0~40 cm 土层, 人工草地 SOC 含量为 $7.0 \sim 8.6 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$, 显著 ($p < 0.05$) 高于农地 ($6.3 \sim 7.7 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$) 和果园 ($6.2 \sim 7.2 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$), 增幅为 $0.7 \sim 1.0 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$ 和 $0.8 \sim 1.4 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$, 而农地和果园间差异不明显. 40 cm 以下土层, SOC 也基本呈现人工草地 > 农田 > 果园的趋势, 但 3 种土地利用类型间差异未达显著水平 ($p > 0.05$). 塬坡上, 0~200 cm 平均 SOC 含量, 以自然草地最高为 $4.3 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$, 人工林地次之为 $3.8 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$, 人工草地 ($3.3 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$) 和果园 ($3.3 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$) 最低, 差异达显著程度 ($p < 0.05$). 0~20 cm 土层, 自然草地 ($12.8 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$) 和人工林地 ($9.9 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$) 显著 ($p <$

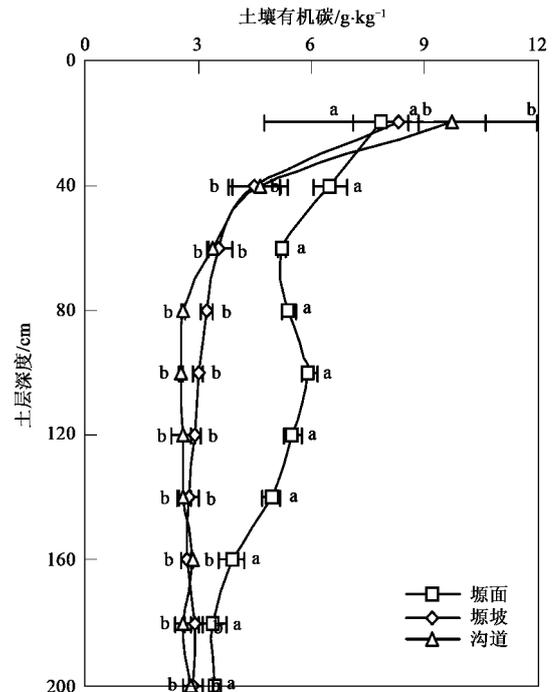


图 1 不同地形对 SOC 含量的影响

Fig. 1 Effects of landform on distribution of SOC at Wangdonggou watershed on Loess Plateau

0.05) 高于果园 ($5.6 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$) 和人工草地 ($5.5 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$). 20~100 cm 土层, 自然草地与人工林地、果园、人工草地基本呈现显著差异 ($p > 0.05$). 100 cm 以下土层, 不同土地利用方式间 SOC 差异不明显, 但有自然草地 > 人工林地 > 人工草地 > 果园的趋势. 沟道内, 整个剖面自然草地和人工林地间差异未达显著水平 ($p > 0.05$).

上述结果表明, 土地利用方式对 SOC 垂直分布的影响存在差异: 塬面上, 土地利用类型对 SOC 影响深度为表层 40 cm; 塬坡影响深度达到 100 cm, 而沟道地区林草地利用方式对整个垂直剖面分布的差异无显著影响.

2.3 SOC 储量垂直分布特征

地形对剖面不同土层 SOC 储量影响不同. 0~20 cm 土层, SOC 储量以沟道最高为 $2.4 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-2}$, 塬坡与塬面稍低为 $2.0 \sim 2.1 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-2}$; 0~100 cm 土层, 塬面最高为 $8.0 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-2}$, 沟道为 $5.8 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-2}$, 塬坡为 $5.6 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-2}$, 二者显著降低; 100~200 cm 土层, 塬面亦最高为 $5.6 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-2}$, 塬坡和沟道为塬面 SOC 储量的 60% 左右. 0~200 cm 土层 SOC 储量以塬面最高, 达 $13.4 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-2}$, 塬坡和沟道仅为 $9.2 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-2}$. 这一结果表明, 小流域内, 除表层土壤外, SOC 储量主要集中于塬面. 此外, 0~20

cm 土层,塬面 SOC 碳储量分别占 0~100 cm 和 0~200 cm 储量的 24.5% 和 14.7%,塬坡和沟道则分别为 36.4%、22.3% 和 40.8%、25.6%; 0~100 cm 土层,塬面 SOC 储量占整个剖面储量的 45.2%,高于塬坡的 39.0% 和沟道的 37.2%; 而 100~200 cm 土层,塬面 SOC 储量占 0~200 cm 储量的 40.1%,为 0~100 cm 的 66.9%,亦明显高于塬坡的 38.7%、63.2% 和沟道的 37.3%、59.4%。这一研究表明,地形显著影响 SOC 储量的垂直分布;与沟道和塬坡 SOC 储量主要集中于表层不同,塬面上深层 SOC 储量大。

土地利用方式显著影响小流域尺度 SOC 储量垂直分布特征(表 3)。塬面,0~100 cm 土层,以人工草地 SOC 储量最高,农地次之,果园最低;100~

200 cm 土层,三者差异不明显。塬坡上,0~20 cm、0~100 cm 和 0~200 cm 土层,自然草地最高,人工林地次之,果园和人工草地最低。沟道内,自然草地与人工林地各层次 SOC 储量差异不明显。此外,塬面上,0~20 cm 和 0~100 cm 土层 SOC 储量占 0~200 cm 储量百分比以人工草地最高,果园最低;100~200 cm 土层,则以农地最高,人工草地较低。塬坡上,0~20 cm 和 0~100 cm 土层 SOC 储量占 0~200 cm 储量百分比以自然草地最高,人工林地次之,人工草地和果园最低;100~200 cm,则以人工草地和果园最高,自然草地和林地较低。沟道内,自然草地与人工林地各层次 SOC 储量百分比差异不明显。这一结果表明,土地利用方式对 SOC 储量垂直分布的影响因地貌产生分异。

表 2 不同地形不同土地利用方式 SOC 垂直分布特征

Table 2 Vertical distribution of SOC under different landforms and land uses at Wangdonggou watershed on Loess Plateau, China

土层深度/cm	塬面/ $g \cdot kg^{-1}$			塬坡/ $g \cdot kg^{-1}$			沟道/ $g \cdot kg^{-1}$		
	农田	人工草地	果园	人工草地	自然草地	果园	人工林地	自然草地	人工林地
0~20	7.66 ab	8.64 a	7.20 b	5.51 c	12.84 a	5.62 c	9.94 b	9.08 a	10.33 a
20~40	6.29 b	7.01 a	6.24 b	3.87 c	5.36 a	4.54 b	4.38 bc	5.15 a	4.13 a
40~60	5.10 a	5.25 a	5.25 a	2.85 b	3.27 a	3.25 a	3.36 a	3.29 a	3.46 a
60~80	5.21 a	5.56 a	5.29 a	3.00 a	3.20 a	3.10 a	3.14 a	2.62 a	2.56 a
80~100	5.63 a	6.69 a	5.51 a	3.00ab	3.22 a	2.83 ab	2.89 b	2.59 a	2.51 a
100~120	5.62 a	5.63 a	5.19 a	2.93 a	3.10 a	2.87a	2.94 a	2.39 a	2.80 a
120~140	5.10 a	5.00 a	4.63 a	2.91 a	2.97 a	2.64 a	2.64 a	2.48 a	2.74 a
140~160	4.13 a	3.49 a	4.00 a	2.90 a	2.90 a	2.65 a	2.66 a	2.87 a	2.80 a
160~180	3.40 a	3.00 a	3.76 a	2.78 a	2.79 a	2.73 a	2.85 a	2.46 a	2.75 a
180~200	3.38 a	3.28 a	3.60 a	2.71 a	2.82 a	2.68 a	2.78 a	2.76 a	2.86 a
平均值	5.15 a	5.36 a	5.07 a	3.25 c	4.25 a	3.28 bc	3.76 b	3.57 a	3.69 a

1) 数字后字母为同一地形不同土地利用方式间多重比较的结果,不同字母表示差异显著($p < 0.05$)

表 3 不同地形不同土地利用方式 SOC 储量垂直分布特征

Table 3 Vertical distribution of SOC stocks under different landforms and land uses at Wangdonggou watershed

地形	土地利用	SOC 储量($kg \cdot m^{-2}$)/土层(cm)				百分含量/%			
		A(0~20)	B(0~100)	C(100~200)	D(0~200)	A/B	A/D	B/D	C/D
塬面	农地	1.92	7.75	5.49	13.24	24.7	14.5	58.5	41.5
	果园	1.80	7.66	5.39	13.04	23.5	13.8	58.7	41.3
	人工草地	2.16	8.59	5.18	13.77	25.2	15.7	62.4	37.6
平均值		1.96	8.00	5.35	13.35	24.5	14.7	59.9	40.1
塬坡	人工草地	1.33	4.63	3.61	8.24	28.8	16.2	56.1	43.9
	自然草地	3.11	7.01	3.70	10.71	44.3	29.0	65.5	34.5
	果园	1.36	4.92	3.40	8.31	27.6	16.3	59.1	40.9
平均值		2.40	5.98	3.52	9.50	40.2	25.3	62.9	37.1
平均值		2.05	5.63	3.56	9.19	36.4	22.3	61.3	38.7
沟道	人工林地	2.50	5.78	3.54	9.33	43.2	26.8	62.0	38.0
	自然草地	2.20	5.74	3.29	9.03	38.3	24.3	63.5	36.5
平均值		2.35	5.76	3.42	9.18	40.8	25.6	62.7	37.3
流域		2.09	6.45	4.12	10.57	32.3	19.7	61.0	39.0

3 讨论

地形影响土壤发育、迁移、沉积、风化、分解等物理化学过程^[24],从而造成土壤理化性质和土壤养分含量的空间分异. Ritchie 等^[8]在 Maryland 和 Iowa 研究发现,土地管理方式和坡度显著影响 SOC 含量;De Gryze 等^[6]在 Belgium 同样指出地形起伏显著影响土壤养分的空间分布特征. 地形对表层 SOC 的影响已有大量研究,而地形对深层 SOC 的影响报道较少,特别是在地形破碎、沟壑纵横的黄土高原. 在黄土高原地区, SOC 含量与不同地貌条件下土壤发育、水土流失导致的泥沙重新分配等因素密切相关. 对表层土壤而言,塬坡区是水土流失的主要区域,而沟道地势低洼,承接了来自塬坡泥沙中 SOC 含量较高土壤颗粒,这些因素促进了沟道表层 SOC 的积累,致使 0~20 cm 沟道 SOC 含量明显高于塬坡和塬面;而 20 cm 以下土层,由于塬面地势平坦,水土流失较弱,土壤发育相对成熟,保存着较为完整的“护土层”^[25],而塬坡和沟道,水土流失强烈, SOC 积累十分缓慢,一些部位因水土流失处在不断耗竭状态,致使塬坡和沟道 SOC 含量和储量较低. 本研究结果显示,王东沟小流域深层 SOC 含量塬面显著 ($p < 0.05$) 高于塬坡和沟道,而塬坡和沟道则差异不显著(图 1). 水土流失可能是地貌导致表层和深层 SOC 在王东沟小流域内发生变异的主要因素.

土地利用方式对 SOC 影响的研究较为广泛. 研究结果普遍认为,农地 SOC 含量普遍低于草地和林地;草地和林地开垦为农田后引起 SOC 降低,相反,可增加 SOC 固存量. 本研究表明,不同地貌单元条件下土地利用方式不仅显著影响表层 SOC 含量,而且深层 SOC 含量的分布也存在明显差异. 塬面区, 0~200 cm 各土层 SOC 含量,以人工草地最高,农田次之,果园最低. 造成这种现象可能与草地、农田和果园管理方式有关,草地耕作减少,根系庞大. 农田和果园每年深翻耕种,土壤疏松, SOC 易于矿化分解;其次,农作物及果品和果树修剪的大量枝叶被移出导致向土壤输入的有机物质减少. 在塬坡上, 0~200 cm 各土层也基本呈现自然草地 > 人工林地 > 人工草地 > 果园的趋势. 这主要由于自然草地和人工林地人为干扰相对较少,侵蚀降低,利于 SOC 累积. 沟道内林草条件下 SOC 含量没有明显差异,这主要与二者有机物质输入差异不明显有关. 研究发现,塬面区,土地利用类型对 SOC 影响显著深度约为 40 cm;塬坡显著影响深度达到为 100 cm,而沟

道地区土地利用类型对垂直剖面分布的影响并不显著(表 3). Kirschbaum 等^[27]研究表明草地和林地同样发现 SOC 含量显著性差异深度达 100 cm; Potter 等^[28]研究发现草地和农地 SOC 含量显著差异土层达 60 cm. 但也有研究发现土地利用类型对 SOC 的影响仅限于表层,而对深层 SOC 影响较小. Gebhart 等^[29]发现仅 40 cm 以上土层草地和农田 SOC 显著差异; Kucharik 等^[30]研究表明草地和农田仅表层 5 cm SOC 存在差异. 土地利用对 SOC 的影响深度可能由区域环境、植被年限、人为活动、地形以及新鲜 SOC 的输入^[26]等因子决定.

地形和土地利用是影响 SOC 储量变化的重要因素. 本研究所在的高原沟壑区占黄土高原地区面积的 8.3%, 塬面、塬坡、沟道地形分明, 大约各占 1/3, 而且不同地形上土壤类型和土地利用又有差异. 在本研究的小流域内(面积 8.3 km²) 地形和土地利用是影响 SOC 储量变异的主要因素. 准确地获取局域尺度内 SOC 变异因素是准确估算黄土区 SOC 储量的基础. 全国 SOC 密度平均值集中在 9.17~10.53 kg·m⁻²^[31-33], 全球 SOC 密度平均值位于 11.7~12.4 kg·m⁻² 之间^[2,3,34]. 本研究结果显示, 在黄土高原沟壑区, 塬面黑垆土 100 cm 土层内 SOC 密度约为全国和全球平均值的 80% 和 66% 左右, 而塬坡和沟道黄绵土仅有全国和全球平均值的 57% 和 47% 左右. 按 Cerri 等^[35]和 Fearnside 等^[36]在亚马孙地区(Amazonas)研究结果, 100~500 cm 和 100~800 cm 固碳量分别为 0~100 cm 的 0.9 倍和 1.7 倍的比率估算, 黄土高原地区土壤固碳潜力将十分巨大. 而鉴于当前的人口压力(258 人·km⁻², 人均耕地面积已不足 0.10 hm²), 未来该流域通过退耕还林还草实现土壤蓄存碳的潜力变缓, 但采用保护性耕作, 推广秸秆还田和加强林草地的抚育管理等措施, 增加深层土壤的固碳效益, 将是实现流域土壤固碳潜力的重要途径.

4 结论

(1) 在黄土高原沟壑区, 地貌显著影响 SOC 垂直分布特征. 除表层 SOC 含量沟道大于塬面和塬坡外, 塬面均显著高于塬坡和沟道; 塬坡和沟道 SOC 含量随深度增加而降低, 而塬面上呈现 SOC 随深度增加降低-升高-降低的变化趋势.

(2) 土地利用方式对 SOC 垂直分布的影响存在显著差异: 塬面上, SOC 含量基本呈现人工草地 > 农田 > 果园的趋势, 影响深度为表层 40 cm; 塬坡

上,呈现自然草地 > 人工林地 > 人工草地 > 果园的趋势,影响深度达到 100 cm;而沟道地区林草地利用方式对整个垂直剖面分布的差异无显著影响。

(3)黄土高原沟壑区深层 SOC 储量巨大,20 ~ 100 cm 土层 SOC 储量占 0 ~ 100 cm 储量的 67.6%; 100 cm ~ 200 cm 土层 SOC 储量占 0 ~ 200 cm 储量的 37.3%,相当于 0 ~ 100 cm 的 63.8%。

参考文献:

- [1] Lorenz K, Lal R. The depth distribution of soil organic carbon in relation to land use and management and the potential of carbon sequestration in subsoil horizons [J]. *Advan Agron*, 2005, **88**: 35-66.
- [2] Batjes N H. Total carbon and nitrogen in the soil of the world [J]. *Eur J Soil Sci*, 1996, **47**(22/23): 151-163.
- [3] Jobbagy E G, Jackson R B. The vertical distribution of soil organic carbon and its relation to climate and vegetation [J]. *Ecol Appl*, 2000, **10**(2): 423-436.
- [4] Wang S Q, Huang M, Shao X M, *et al.* Vertical distribution of soil organic carbon in China [J]. *Environ Manage*, 2004, **33**: 200-209.
- [5] Berhe A A, Harden J W, Torn M S, *et al.* Linking soil organic matter dynamics and erosion-induced terrestrial carbon sequestration at different landform positions [J]. *J Geophys Res-Biogeosci*, 2008, **113**: G04039.
- [6] De Gryze S, Six J, Bossuyt H, *et al.* The relationship between landform and the distribution of soil C, N and P under conventional and minimum tillage [J]. *Geoderma*, 2008, **144**(1/2):180-188.
- [7] Dipak D, Sah K D, Reddy R S, *et al.* Soil organic carbon storage in different landforms of South Deccan Plateau of Andhra Pradesh [J]. *J Indian Soc Soil Sci*, 2000, **48**(3): 447-450.
- [8] Ritchie J C, McCarty G W, Venteris E R, *et al.* Soil and soil organic carbon redistribution on the landscape [J]. *Geomorphology*, 2007, **89**(1/2):163-171.
- [9] Momtaz H R, Jafarzadeh A A, Torabi H, *et al.* An assessment of the variation in soil properties within and between landform in the Amol region, Iran [J]. *Geoderma*, 2009, **102**(1): 67-77.
- [10] Papiernik S K, Schumacher T E, Lobb D A, *et al.* Soil properties and productivity as affected by topsoil movement within an eroded landform [J]. *Soil Till Res*, 2009, **102**(1): 67-77.
- [11] He N P, Yu Q, Wu L, *et al.* Carbon and nitrogen store and storage potential as affected by land-use in a *Leymus chinensis* grassland of northern China [J]. *Soil Biol Biochem*, 2008, **40**(12): 2952-2959.
- [12] Wang J, Fu B J, Qiu Y, *et al.* Soil nutrients in relation to land use and landscape position in the semi-arid small catchment on the Loess plateau in China [J]. *J Arid Environ*, 2001, **48**: 537-550.
- [13] Chen L D, Gong J, Fu B J, *et al.* Effect of land use conversion on soil organic carbon sequestration in the Loess hilly area, Loess Plateau of China [J]. *Ecol Res*, 2007, **22**(4): 641-648.
- [14] 刘畅, 唐国勇, 童成立, 等. 长期施肥措施下亚热带稻田土壤碳、氮演变特征及其耦合关系 [J]. *应用生态学报*, 2008, **19**(7): 1489-1493.
- [15] Yang Y S, Xie J S, Sheng H, *et al.* The impact of land use/cover change on storage and quality of soil organic carbon in mid-subtropical mountainous area of southern China [J]. *J Geogr Sci*, 2009, **19**(1): 49-57.
- [16] Davidson E A, Ackerman I L. Changes in soil carbon inventories following cultivation of previously untilled soils [J]. *Biogeochem*, 1993, **20**(3): 161-193.
- [17] Post W M, Kwon K C. Soil carbon sequestration and land-use change: processes and potential [J]. *Glob Change Biol*, 2000, **6**(3): 317-327.
- [18] 张文菊, 彭佩钦, 童成立, 等. 洞庭湖湿地有机碳垂直分布与组成特征 [J]. *环境科学*, 2005, **26**(5): 56-60.
- [19] 吴雅琼, 刘国华, 傅伯杰, 等. 青藏高原土壤有机碳密度垂直分布研究 [J]. *环境科学学报*, 2008, **28**(2): 362-367.
- [20] Piovaneli C, Gamba C, Brandi G, *et al.* Tillage choices affect biochemical properties in the soil profile [J]. *Soil Till Res*, 2006, **90**(1/2): 84-92.
- [21] Franzluebbers A J, Stuedemann J A. Soil-profile organic carbon and total nitrogen during 12 years of pasture management in the Southern Piedmont USA [J]. *Agr Ecosyst Environ*, 2009, **129**(1/3): 28-36.
- [22] Nelson D W, Sommers L E. Total carbon, organic carbon, and organic matter [A]. In: Page A L, Miller R H, Keeney D R (eds). *Methods of soil analysis, part 2 chemical and microbiological properties (second edition)* [C]. Madison, Wisconsin, USA: 1992. 562-564.
- [23] SAS Institute Inc. SAS Release(6.12)[R]. USA: Cary. 1998.
- [24] Brubaker S C, Jones A J, Lewis D T, *et al.* Soil properties associated with landscape position [J]. *Soil Sci Soc Am J*, 1993, **57**(1):235-239.
- [25] 张淑光. 黄土侵蚀地区黑垆土的形成、分布和利用 [J]. *水土保持学报*, 1988, **2**(3):65-73.
- [26] Fontaine S, Barot S, Barre P, *et al.* Stability of organic carbon in deep soil layers controlled by fresh carbon supply [J]. *Nature*, 2007, **450**: 277-280.
- [27] Kirschbaum M U F, Harms B, Mathers N J, *et al.* Soil carbon and nitrogen changes after clearing mulga (*Acacia aneura*) vegetation in Queensland, Australia: Observations, simulations and Scenario analysis [J]. *Soil Biol Biochem*, 2008, **40**(2): 392-405.
- [28] Potter K N, Tobert H A, Johnson H B, *et al.* Carbon storage after long term grass establishment on degraded soils [J]. *Soil Sci*, 1999, **164**(10): 718-725.
- [29] Gebhart D L, Johnson H B, Mayeux H S, *et al.* The CRP increases soil organic carbon [J]. *J Soil Water Conserv*, 1994, **49**(5): 488-492.
- [30] Kucharik C J, Brye K R, Norman J M, *et al.* Measurements and

- modeling of carbon and nitrogen cycling in agro-ecosystems of southern Wisconsin: potential for SOC sequestration during next 50 years [J]. *Ecosystems*, 2001, **4**: 237-258.
- [31] 王绍强, 周成虎, 李克让, 等. 中国土壤有机碳库及空间分布特征分析[J]. *地理学报*, 2000, **55**(5): 533-544.
- [32] 李克让, 王绍强, 曹明奎. 中国植被和土壤碳贮量[J]. *中国科学*, 2003, **33**(1): 72-80.
- [33] 于东升, 史学正, 孙维侠, 等. 基于 1:100 万土壤数据库的中国土壤有机碳密度及储量研究[J]. *应用生态学报*, 2005, **16**(12): 2279-2283.
- [34] Eswaram H, Van Den B E, Reich P. Organic carbon in soils of the world [J]. *Soil Sci Soc Am J*, 1993, **57**(1): 192-194.
- [35] Cerri C C, Volkoff B. Carbon content in a yellow latosol of central Amazon rain forests [J]. *Acta Oecol*, 1987, **81**(1): 29-42.
- [36] Fearnside P M, Barbosa R I. Soil organic carbon changes from conversion of forest to pasture in Brazilian Amazonia [J]. *Forest Ecol Manage*, 1998, **108**(1/2): 147-166.