

黄土丘陵沟壑区地形和土地利用对深层土壤有机碳的影响

孙文义^{1,3}, 郭胜利^{1,2*}, 周小刚¹

(1. 中国科学院水利部水土保持研究所, 杨凌 712100; 2. 西北农林科技大学水土保持研究所, 杨凌 712100; 3. 中国科学院地理科学与资源研究所, 北京 100101)

摘要:研究地形和土地利用对深层土壤有机碳(soil organic carbon, SOC)的影响,对准确评估土壤固碳潜力和土壤碳循环具有重要意义.以 3 种地形(峁顶、峁坡、沟底)和 7 种土地利用类型(农田、果园、天然草地、人工与天然灌木林、人工与天然乔木林)为对象,在黄土丘陵沟壑区燕沟流域采集 53 个 0~1 m 土壤剖面中 6 个层次,898 个土壤样品,研究了地形和土地利用方式对黄土丘陵沟壑区小流域深层 SOC 含量和分布影响.结果表明,地形、土地利用方式、土层深度及其两两交互作用对流域深层 SOC 空间分布有极显著影响($p < 0.01$).深层(10~100 cm)与表层(0~10 cm)SOC 在 3 种地形的分布不同.对于表层土壤(0~10 cm),峁坡 SOC 含量($10.7 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$)最高,其次是沟底($8.9 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$),峁顶最低($4.4 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$);对深层土壤有机碳,沟底最高($5.6 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$),峁坡次之($4.5 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$),峁顶最低($3.2 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$).深层 SOC 空间分布因土地利用方式存在显著差异.与农田相比,果园 0~40 cm 土层 SOC 含量降低 21%,但 80~100 cm 土层 SOC 含量提高 13%;天然灌木林 40~100 cm 平均含量($5.3 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$)较农田高 66%($p < 0.05$);但天然乔木林 40~100 cm 与其它土地利用方式差异较小.沟底深层(20~100 cm)SOC 储量($5.04 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-2}$)最大,占 1 m 剖面 SOC 储量的 71.4%;峁坡占 63.6%;峁顶占 72.3%.深层(20~100 cm)SOC 储量天然灌木林最高,为 $6.01 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-2}$,占 1 m 剖面 SOC 储量的 64.7%,天然乔木林深层相对储量最小,仅占 49.7%;农田和果园深层相对储量均达到 70% 以上.

关键词:地形;土地利用;深层;土壤有机碳;黄土

中图分类号:X825 文献标识码:A 文章编号:0250-3301(2010)11-2740-08

Effects of Topographies and Land Uses on Soil Organic Carbon in Subsurface in Hilly Region of Loess Plateau

SUN Wen-yi^{1,3}, GUO Sheng-li^{1,2}, ZHOU Xiao-gang¹

(1. Institute of Soil and Water Conservation, Chinese Academy of Sciences and Ministry of Water Resource; Yangling 712100, China;
2. Institute of Soil and Water Conservation, Northwest Sci-Tech University of Agriculture and Forestry, Yangling 712100, China;
3. Institute of Geographic Science and Natural Resources Research, Chinese Academy Sciences, Beijing 100101, China)

Abstract:It is important to accurately assess soil carbon sequestration potential and the global carbon cycle to study effects of topographies and land uses on soil profile organic carbon in subsurface. In Yangou watershed of hilly region of Loess Plateau, based on three topographies (tableland, slopeland, gullyland) and seven land uses (farmland, orchard, secondary grassland, manmade and secondary shrubland and manmade and secondary woodland), 53 soil profiles (0-100 cm) in six soil depths up to 898 samples were collected to investigate effects of topographies and land uses on contents and spatial distribution of soil organic carbon in subsurface. Topographies, land uses, depths and interaction of them significantly ($p < 0.01$) affected spatial distribution of soil organic carbon in subsurface in Yangou watershed. SOC had different spatial distribution in topographies between subsurface (10-100 cm) and surface (0-10 cm). In 0-10 cm soil layer, the content of soil organic carbon of slopeland ($10.7 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$) was the highest, followed by gullyland ($8.9 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$), the content of SOC of tableland ($4.4 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$) was the lowest. But the contents of SOC every layer in 10-100 cm expressed as gullyland > slopeland > tableland trends, the average contents of SOC were $5.6 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$, $4.5 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$ and $3.2 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$. Land uses significantly ($p < 0.05$) affected spatial distribution of SOC in subsurface in Yangou watershed. Compared with farmland, the content of SOC of orchard in 0-40 cm decreased by 21%, yet increased by 13% in 80-100 cm. The content of SOC of manmade shrubland ($2.6 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$) was 19% lower than that of farmland, while SOC content of manmade woodland ($3.4 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$) was 6% higher than that of farmland. The content of SOC of secondary shrubland was higher than that of any other land uses in 20-100 cm, but it is significantly ($p < 0.05$) different from other land uses in 40-100 cm, the average contents was $5.3 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$, which was 66% higher than that of farmland. The content of SOC of secondary woodland was higher than that of any other land uses in 0-20 cm, but it was less differences from other land uses in 40-100 cm. The storage of SOC of gullyland ($5.04 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-2}$) in subsurface (20-100 cm)

收稿日期:2009-11-17;修订日期:2010-05-04

基金项目:国家自然科学基金项目(40771125);西北农林科技大学基本科研业务费青年项目(Z109021003)

作者简介:孙文义(1983~),男,博士研究生,主要研究方向为GIS应用和土壤生态研究学, E-mail: sunwy0715@126.com

* 通讯联系人, E-mail: slguo@ms.iswc.ac.cn

was the highest, accounted for 71.4% in 1m profile, the relative storage of SOC of slopeland and tableland accounted for 63.6% and 72.3% respectively. The storages of SOC of secondary shrubland in subsurface (20-100 cm) were the highest, it was $6.01 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-2}$, accounted for 64.7% in 1m profile, while the relative storage of secondary woodland was the lowest, only accounted for 49.7%. The storages of SOC of farmland and orchard both accounted for more than 70% of 1m profile.

Key words: topography; land use; subsurface; soil organic carbon; loess

地形和土地利用方式是影响土壤有机碳库变化的重要因素^[1-4]。地形因子一方面通过侵蚀和水土流失影响土壤有机碳空间分布^[5-7];另一方面地形支配着水、热资源的分配,影响植被和土地利用方式在空间上的配置,进而影响到土壤有机碳的输入^[8,9]。黄土高原地区地形破碎,土地利用类型复杂多样。在局域尺度上,形成了典型的黄土高原沟壑(塬面、梁峁坡、沟谷)和黄土丘陵沟壑(梁峁顶、梁峁坡、沟谷地)等流域侵蚀地貌特征。不同地形之上因水热等差异其土地利用方式又具有显著地分异性^[3,10],进而影响了土壤有机碳含量在空间上迁移和分布。目前已有的研究表明,以退耕还林还草为主的土地利用方式变化使得表层土壤有机碳具有显著地碳汇效应。黄土高原北部草地恢复与重建研究表明,其增幅效应达 36%~39%^[11];黄土高原地区退耕还林后,其碳含量增幅可达 1.08~3.83 倍^[12];王东沟流域研究表明还林还草增幅可达 11.6%~25.3%^[13];在燕沟流域研究表明增幅为 39.4%~117.7%^[14],而其它研究表明其增汇效应可达 1.32~5.41 倍^[15]。此外,不同地形对表层土壤有机碳空间分布也有显著影响。因受土壤侵蚀和水土流失影响,表层土壤有机碳含量均呈现沟底富集、坡面流失的变化趋势^[16,17]。但地形与土地利用方式共同作用下,深层土壤有机碳变化报道较少。20cm 以下深层土壤有机碳占 1m 土层有机碳总量的 50% 以上^[18],尽管深层土壤有机碳浓度低于表层,但其储量与变化不容忽视^[18-20]。其次,深层土壤有机物的分解矿化速率较表层土壤显著降低^[21-23],深层土壤有机碳遭受侵蚀流失的潜势降低。因此,研究地形和土地利用对深层土壤有机碳含量影响的深度和程度,对揭示黄土区生态恢复条件下土壤有机碳固碳潜力和影响机制具有重要意义。

1 材料与方法

1.1 流域自然概况

燕沟流域($36^{\circ}28'00'' \sim 36^{\circ}32'00''\text{N}$, $109^{\circ}20'00'' \sim 109^{\circ}35'00''\text{E}$)位于陕西省延安市宝塔区,主沟长 8.6 km,呈东南—西北流向,总面积约 48 km^2 ,海拔 986~1 425 m,以梁峁地貌为主,沟壑密度为 4.8

$\text{km} \cdot \text{km}^{-2}$,属于典型黄土丘陵沟壑区。流域内,峁顶和沟底坡度为 $0^{\circ} \sim 5^{\circ}$,面积占总面积的 8.7%;峁坡坡度为 $5^{\circ} \sim 84^{\circ}$,可采样面积占总面积的 84.5%。研究区气候为暖温带半湿润向半干旱过渡的类型,年平均气温 9.8°C ,多年平均降雨量约 558 mm。土壤为半熟化状态的黄绵土(约占 90% 以上),肥力较低。治理前(1997 年以前)流域水土流失面积 42.55 km^2 ,占总面积的 88.65%,土壤侵蚀模数为 $9\,000 \text{ t} \cdot (\text{km}^2 \cdot \text{a})^{-1}$,属强度水土流失地区^[24]。流域 14 个行政村 2006 年底总人口 3 133 人,人口密度为 $67.8 \text{ 人} \cdot \text{km}^{-2}$ 。

该区植被类型多样,属暖温带阔叶林向温带草原过渡地带。人工草被主要为紫花苜蓿(*Medicago sativa* L.),分布较少;人工灌木林主要为柠条(*Caragana korshinskii*)、沙棘(*Hippophae rhamnoides*)、杠柳(*Periploca sepium* Bge);人工乔木林主要为刺槐(*Robinia pseudoacacia*)、山杨(*Pobulus davidiana*)、油松(*Pinus tabulaeformis*)、任用杏(*Prunus armeniaca* Sibirica)、侧柏(*Biota orientalis*)。天然草被主要为铁杆蒿(*Artemisia gmelinii*)、长芒草(*Stipa bungeana*)、白羊草(*Bothriochloa ischaemum*)、狗尾草(*Setaria viridis* L.)、黄蒿(*Artemisia scoparia*);天然灌木林主要为黄刺玫(*Rosa xanthina*)、狼牙刺(*S. viciifolia*)、虎榛子(*Ostryopsis davidiana* Dcne)、灰栒子(*Cotoneaster acutifolius* Turcz)、北京丁香(*Syringa pekinensis* Rupr);天然乔木林主要为辽东栎(*Quercus liaotungensis*)、白桦(*Betula platyphylla*)、天然小乔木鼠李(*Rhamnus davurica*),其中,灌木林分布最广。1997 年以来,在流域南部、中部、北部配置了不同的水土流失治理措施,南部主要以涵养水源的天然次生林为主,中部以人工水土保持植被为主,北部以农田林果植被为主^[25]。目前流域内,峁顶土地利用类型主要有农田、果园,峁坡土地利用类型有农田、果园、天然草地、人工灌木林、天然灌木林、人工乔木林、天然乔木林,沟底土地利用类型有农田、果园、天然草地、天然灌木林、人工乔木林、天然乔木林。

1.2 测定项目及方法

1.2.1 土样采集

基于小流域内的地形和土地利用两大因素,采用“分层采样的方法”采集土壤样品研究流域 SOC 变异影响因素.将地形(峁顶、峁坡、沟底)作为一级层次,将不同地形部位土地利用方式(农田、果园、草地、灌木林、乔木林)作为二级层次,结合燕沟流域间隔 30 s 生成经纬格网以及当地实际情况于 2009 年 6 月进行采样.地形部位峁顶采样样本数为 8,沟底采样样本数为 10,共占采样样本总数的 34%;峁坡采样样本数为 35,占采样样本总数的 66%.土地利用类型按 2003 年土地利用类型图整理分类(见表 1).在流域尺度上采集不同地形部位、不同土地利用类型土壤样本 53 个,每个样本分别取 0~10、10~20、20~40、40~60、60~80、80~100 cm 共 6 个层次,每个样本 3 次重复,共 898 个土壤样品.采集土钻直径为 3 cm.

表 1 黄土丘陵区燕沟流域土地利用面积、土壤采样数及其与土地利用面积的比例

Table 1 Landuse area, sample size and proportion in Yangou watershed of hilly region, Loess Plateau

土地利用	面积/hm ²	面积比例/%	样本数/个	样本比例/%
农田	925.7	19.3	15	28.3
果园	666.9	13.9	6	11.3
乔木林	1 472.5	30.8	10	18.9
灌木林	783.9	16.4	13	24.5
草地	615.0	12.8	9	17.0
居民地	117.3	2.4		
水域	18.9	0.4		
未利用地	187.9	3.9		
总计	4 788.2	100.0	53	100

在燕沟流域农田、果园、草地、灌木林、乔木林 5

表 2 黄土丘陵区燕沟流域剖面土壤有机碳空间分布影响因子方差分析

Table 2 Variance analysis of spatial distribution of soil profile organic carbon in Yangou watershed of hilly region, Loess Plateau

变异来源	自由度	平方和	均方	F 值	$F > p_{0.05}$	$F > p_{0.01}$
地形	2	748.91	374.46	77.95	<0.000 1	<0.000 1
土地利用	6	2 575.71	429.29	89.37	<0.000 1	<0.000 1
土层	5	4 023.39	804.68	167.51	<0.000 1	<0.000 1
地形×土地利用	4	76.97	19.24	4.01	0.003 2	0.003 2
地形×土层	10	558.88	55.89	11.63	<0.000 1	<0.000 1
土地利用×土层	30	1 560.01	52.00	10.82	<0.000 1	<0.000 1
地形×土地利用×土层	20	81.61	4.08	0.85	0.653 1	0.653 1

2.2 地形对剖面土壤有机碳含量与分布影响

地形显著影响了剖面土壤有机碳(SOC)空间分布(表 3).1 m 土层,沟底 SOC 平均含量(6.2 g·kg⁻¹)分别较峁顶(3.4 g·kg⁻¹)和峁坡(5.8 g·kg⁻¹)高 82%($p < 0.01$)和 7%.土层 0~10 cm,峁坡 SOC 含量(10.7 g·kg⁻¹)最高,分别是沟底

种典型土地利用方式的土壤剖面上,用环刀采集 0~20、20~40、40~60、60~80、80~100 cm 土层原状土壤,各层重复 3 次,烘干称重,获取各土层的土壤容重,采样时间为 2007 年 5 月.

1.2.2 样品处理与分析

新鲜土样混合均匀后,风干,风干样过 0.25 mm 筛后,采用 H₂SO₄-K₂Cr₂O₇ 外加热法测定土壤有机碳(SOC)^[26].

土壤有机碳储量的计算公式为:

$$C_i = d_i \times \rho_i \times O_i / 100$$

式中, i 为土壤不同层次, C 为土壤有机碳密度(kg·m⁻²), d 为土层厚度(cm), ρ 土壤容重(g·cm⁻³), Q 为土壤有机碳含量(g·kg⁻¹).

1.2.3 数据处理与统计分析

用 SAS8.1^[27] 软件对不同地形部位和不同土地利用方式下 SOC 进行了方差分析(GLM),当 F 检验显著时,再进行 3 种地形部位和 7 种土地利用类型间均值进行比较(Duncan)检验.同一地形部位不同土地利用方式下 SOC 进行方差分析(GLM),当 F 检验显著时,进行均值间比较(Duncan)检验.

2 结果与分析

2.1 流域剖面土壤有机碳变异的影响因子

表 2 显示,地形部位、土地利用方式、土层深度、地形部位与土地利用、地形部位与土层深度、土地利用方式与土层深度交互作用对流域剖面土壤有机碳空间分布有极显著影响($p < 0.01$),但地形部位、土地利用方式与土层深度三者交互作用对剖面土壤有机碳空间分布影响不显著.

(8.9 g·kg⁻¹)和峁顶(4.4 g·kg⁻¹)1.2、2.4($p < 0.05$)倍.但 10~100 cm 土层均表现为沟底最高,峁坡次之,峁顶最低变化趋势,其平均含量沟底(5.6 g·kg⁻¹)、峁坡(4.5 g·kg⁻¹)分别是峁顶(3.2 g·kg⁻¹)的 1.8、1.4 倍.不同土层,显著性差异不同.其中,10~40 cm 土层沟底和峁坡差异不显著,

但与峁顶差异显著;平均含量沟底 ($7.0 \text{ g}\cdot\text{kg}^{-1}$) 和峁坡 ($6.1 \text{ g}\cdot\text{kg}^{-1}$) 分别是峁顶 ($3.5 \text{ g}\cdot\text{kg}^{-1}$) 的 2.0、1.7 倍。40~60 cm 土层沟底、峁坡和峁顶之间均存在显著性差异 ($p < 0.05$), 沟底 ($5.0 \text{ g}\cdot\text{kg}^{-1}$) 是峁坡 ($3.9 \text{ g}\cdot\text{kg}^{-1}$) 的 1.3 倍, 峁坡是峁顶 ($3.0 \text{ g}\cdot\text{kg}^{-1}$) 的 1.3 倍。60~100 cm 沟底与峁坡、峁顶差异显著, 但峁坡和峁顶差异不显著。沟底 ($4.5 \text{ g}\cdot\text{kg}^{-1}$) 分别比峁坡 ($3.3 \text{ g}\cdot\text{kg}^{-1}$)、峁顶 ($3.0 \text{ g}\cdot\text{kg}^{-1}$) 高 36%、50%。垂直分布上峁坡 SOC 降低幅度 ($10.7 \sim 3.2 \text{ g}\cdot\text{kg}^{-1}$) 最大, 达 70%; 峁顶降幅最小, 为 33%。

表 3 地形部位对黄土丘陵区燕沟流域剖面土壤有机碳空间分布的影响¹⁾ / $\text{g}\cdot\text{kg}^{-1}$

Table 3 Effects of topographies on spatial distribution of soil profile organic carbon in Yangou watershed of hilly region, Loess Plateau / $\text{g}\cdot\text{kg}^{-1}$

土层/cm	峁顶	峁坡	沟底
0~10	$4.4 \pm 1.15\text{aA}$	$10.7 \pm 6.07\text{aA}$	$8.9 \pm 4.21\text{aA}$
10~20	$3.8 \pm 0.78\text{bAB}$	$7.2 \pm 3.69\text{aB}$	$8.0 \pm 2.97\text{aA}$
20~40	$3.2 \pm 0.69\text{bBC}$	$5.0 \pm 2.59\text{aC}$	$6.0 \pm 2.36\text{aB}$
40~60	$3.0 \pm 1.38\text{cC}$	$3.9 \pm 1.81\text{bD}$	$5.0 \pm 1.86\text{aBC}$
60~80	$3.0 \pm 1.59\text{bC}$	$3.3 \pm 1.96\text{bD}$	$4.6 \pm 1.46\text{aBC}$
80~100	$3.0 \pm 1.53\text{bC}$	$3.2 \pm 1.39\text{bD}$	$4.4 \pm 1.46\text{aC}$
平均值	$3.4 \pm 1.34\text{b}$	$5.8 \pm 4.39\text{a}$	$6.2 \pm 3.06\text{a}$

1) 小写字母表示同层不同地形部位 0.05 水平显著性差异; 大写字母表示同一地形部位不同土层 0.01 水平显著性差异, 下同

结果表明, 地形部位对剖面土壤 SOC 含量空间分布存在显著差异。土层 0~10 cm 与 10~100 cm 空间分布规律不一致, 10~100 cm 尽管分布规律一致, 但差异显著性不同, 其中 40~60 cm 层为转折层, 10~40 cm 表现为沟底与峁坡差异不显著, 但与峁顶差异显著, 60~100 cm 表现为峁坡与峁顶差异不显著, 但与沟底差异显著。

2.3 土地利用方式对剖面土壤有机碳含量与分布影响

土地利用方式对剖面土壤有机碳 (SOC) 含量的空间分布也存在显著差异 ($p < 0.05$)。1 m 土层, 果

园 SOC 的平均含量最低, 为 $3.7 \text{ g}\cdot\text{kg}^{-1}$, 天然乔木林平均含量 ($10.6 \text{ g}\cdot\text{kg}^{-1}$)、天然灌木林 ($8.7 \text{ g}\cdot\text{kg}^{-1}$)、天然草地 ($5.9 \text{ g}\cdot\text{kg}^{-1}$)、人工乔木林 ($4.7 \text{ g}\cdot\text{kg}^{-1}$)、人工灌木林 ($4.3 \text{ g}\cdot\text{kg}^{-1}$)、农田 ($4.3 \text{ g}\cdot\text{kg}^{-1}$) 分别是果园的 2.9、2.4、1.6、1.3、1.2、1.2 倍 (表 4)。天然乔木林、天然灌木林、天然草地与其它利用方式 (人工乔木林、人工灌木林、农田、果园) 之间存在显著差异。不同土层有机碳 (SOC) 含量也存在显著差异 ($p < 0.05$)。果园 (0~40 cm) 有机碳含量 ($4.2 \text{ g}\cdot\text{kg}^{-1}$) 比农田 ($5.3 \text{ g}\cdot\text{kg}^{-1}$) 低 21%; 果园 40~80 cm 尽管低于农田, 但差异较小, 果园 80~100 cm 却高于农田 13%。人工灌木林、人工乔木林 0~10 cm 有机碳含量显著 ($p < 0.05$) 高于农田, 但 10~40 cm 却分别低于农田 12%、6%; 40~100 cm 人工灌木林 ($2.6 \text{ g}\cdot\text{kg}^{-1}$) 低于农田 19%, 人工乔木林 ($3.4 \text{ g}\cdot\text{kg}^{-1}$) 高于农田 6%。0~20 cm 土层天然乔木林有机碳含量最高, 其含量 (25.1 、 $12.3 \text{ g}\cdot\text{kg}^{-1}$) 分别是农田的 4.2、2.2 倍 ($p < 0.05$), 天然灌木林次之; 20~100 cm 天然灌木林各层含量均最高, 其中 40~100 cm 天然灌木林各层含量与其它利用方式均呈显著性差异 ($p < 0.05$), 其 40~100 cm 平均含量 ($5.3 \text{ g}\cdot\text{kg}^{-1}$) 较农田高 66%; 垂直分布上 0~60 cm 各土地利用类型土壤有机碳含量均表现出较大降幅, 天然乔木林最高为 83%, 果园最低为 36%; 60~100 cm 表现相对稳定, 天然草地降幅为 10%, 农田最低为 4%。

结果表明, 不同土地利用方式在深层土壤 SOC 含量分布特征上体现出较大差异。80~100 cm 是农田和果园土壤有机碳含量发生变化层次; 人工灌木林和人工乔木林较大差异体现在 40~100 cm; 尽管天然乔木林 0~20 cm 土层碳含量最高, 天然灌木林在 20~100 cm 土层含量最高, 但 40~100 cm 天然灌木林体现出与其它土地利用方式显著差异性, 天然乔木林与其它土地利用方式差异较小。土层 0~60 cm 是含量分布变化最活跃的层次, 土层 60~100 cm 是含量分布相对稳定的区域。

表 4 土地利用对黄土丘陵区燕沟流域剖面土壤有机碳空间分布的影响 / $\text{g}\cdot\text{kg}^{-1}$

Table 4 Effect of landuses on spatial distribution of soil profile organic carbon in in Yangou watershed of hilly region, Loess Plateau / $\text{g}\cdot\text{kg}^{-1}$

土层/cm	果园	农田	人工灌木林	人工乔木林	天然草地	天然灌木林	天然乔木林
0~10	$5.0 \pm 1.17\text{eA}$	$6.0 \pm 2.69\text{deA}$	$8.5 \pm 2.54\text{eA}$	$8.2 \pm 2.90\text{edA}$	$10.0 \pm 2.94\text{eA}$	$15.4 \pm 5.54\text{bA}$	$25.1 \pm 5.33\text{aA}$
10~20	$4.3 \pm 1.21\text{eA}$	$5.6 \pm 2.62\text{eA}$	$5.0 \pm 1.55\text{eB}$	$5.0 \pm 1.20\text{eB}$	$7.7 \pm 2.40\text{bB}$	$11.1 \pm 3.88\text{aB}$	$12.3 \pm 2.37\text{aB}$
20~40	$3.4 \pm 0.80\text{eB}$	$4.3 \pm 2.14\text{bcB}$	$3.6 \pm 1.74\text{bcC}$	$4.1 \pm 1.09\text{bcBC}$	$5.2 \pm 2.52\text{bC}$	$7.9 \pm 2.58\text{aC}$	$7.0 \pm 1.98\text{aC}$
40~60	$3.2 \pm 1.54\text{bB}$	$3.5 \pm 1.67\text{bBC}$	$3.0 \pm 0.62\text{bC}$	$3.6 \pm 0.93\text{bC}$	$4.1 \pm 1.82\text{bCD}$	$5.9 \pm 2.20\text{aCD}$	$4.3 \pm 1.54\text{bC}$
60~80	$3.1 \pm 1.77\text{bB}$	$3.1 \pm 1.16\text{bC}$	$2.3 \pm 0.51\text{bC}$	$3.2 \pm 0.87\text{bC}$	$3.7 \pm 1.90\text{bD}$	$5.3 \pm 2.96\text{aD}$	$3.6 \pm 1.30\text{bC}$
80~100	$3.4 \pm 1.64\text{bB}$	$3.0 \pm 1.36\text{bC}$	$2.5 \pm 0.77\text{bC}$	$3.5 \pm 1.07\text{bC}$	$3.3 \pm 1.37\text{bD}$	$4.8 \pm 1.72\text{aD}$	$3.3 \pm 0.97\text{bC}$
平均值	$3.7 \pm 1.52\text{d}$	$4.3 \pm 2.31\text{d}$	$4.3 \pm 2.61\text{d}$	$4.7 \pm 2.36\text{d}$	$5.9 \pm 3.31\text{c}$	$8.7 \pm 5.18\text{b}$	$10.6 \pm 8.81\text{a}$

2.4 地形和土地利用方式交互作用对剖面土壤有机碳含量与分布影响

地形和土地利用方式交互作用极显著 ($p < 0.01$) 影响剖面土壤有机碳 (SOC) 分布特征 (表 5). 峁顶果园 SOC 平均含量 ($3.7 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$) 是农田 ($3.1 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$) 1.2 倍, 不同土层 SOC 含量果园均高于农田, 但差异不显著. 峁坡 SOC 平均含量表现为天然乔木林 > 天然灌木林 > 天然草地 > 人工乔木林 = 农田 > 人工灌木林 > 果园. 其 SOC 平均含量分别为果园 ($3.8 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$) 的 2.4、2.2、1.4、1.2、1.2、1.1 倍. 农田 (0 ~ 60 cm) 各土层 SOC 均高于果园, 但 60 ~ 100 cm 却分别低于果园 0.3%、14.6%. 天然林 (乔木林、灌木林) 各层 SOC 均高于天然草地和人工林 (乔木林、灌木林). 天然乔木林在土层 0 ~ 20 cm

分别高于天然灌木林 60.5%、14.7%, 但 20 ~ 100 cm 土层分别低于天然灌木林 4.6%、26.3%、34.5%、33.8%. 人工乔木林在土层 0 ~ 20 cm 分别低于人工灌木林 1.7%、5.1%, 但 20 ~ 100 cm 土层分别高于人工灌木林 13.3%、15.2%、26.5%、28.9%. 沟底农田 SOC 平均含量最低, 为 $4.9 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$, 天然灌木林、天然草地、人工乔木林分别是农田的 1.8、1.5、1.1 倍. 农田在不同地形部位上均有分布, 且差异显著 ($p < 0.05$), 土壤有机碳平均含量峁顶 ($3.1 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$) 最低, 沟底和峁坡土壤有机碳含量分别是峁顶 1.6、1.5 倍; 峁顶农田各层 (0 ~ 100 cm) 土壤有机碳含量均最低, 0 ~ 40 cm 峁坡各层有机碳含量高于沟底, 但 40 ~ 100 cm 峁坡各层有机碳含量低于沟底.

表 5 同一地形部位不同土地利用对黄土丘陵区燕沟流域剖面土壤有机碳空间分布的影响/ $\text{g} \cdot \text{kg}^{-1}$

Table 5 Effects of landuses in the same topography on spatial distribution of soil profile organic carbon in Yangou watershed

		of hilly region, Loess Plateau/ $\text{g} \cdot \text{kg}^{-1}$						
地形部位	土地利用	0 ~ 10	10 ~ 20	20 ~ 40	40 ~ 60	60 ~ 80	80 ~ 100	平均值
峁顶	果园	$5.0 \pm 1.04\text{aA}$	$4.0 \pm 0.78\text{aAB}$	$3.2 \pm 0.72\text{aB}$	$3.2 \pm 1.89\text{aB}$	$3.3 \pm 2.18\text{aB}$	$3.6 \pm 2.00\text{aB}$	3.7 ± 1.63
	农田	$3.9 \pm 1.00\text{bA}$	$3.6 \pm 0.76\text{aAB}$	$3.1 \pm 0.68\text{aBC}$	$2.8 \pm 0.59\text{aCD}$	$2.7 \pm 0.62\text{aCD}$	$2.4 \pm 0.33\text{aD}$	3.1 ± 0.85
	平均值	4.4 ± 1.15	3.8 ± 0.78	3.2 ± 0.69	3.0 ± 1.38	3.0 ± 1.59	3.0 ± 1.53	
峁坡	果园	$5.4 \pm 1.41\text{dA}$	$5.1 \pm 1.57\text{bcA}$	$3.6 \pm 0.97\text{bB}$	$3.2 \pm 0.50\text{bB}$	$2.8 \pm 0.25\text{bB}$	$3.1 \pm 0.40\text{bB}$	3.8 ± 1.28
	农田	$6.8 \pm 3.56\text{cdA}$	$6.4 \pm 3.54\text{bcAB}$	$4.8 \pm 2.86\text{bBC}$	$3.5 \pm 1.77\text{bCD}$	$2.8 \pm 1.17\text{bD}$	$2.6 \pm 1.03\text{bD}$	4.5 ± 2.99
	人工灌木林	$8.5 \pm 2.54\text{cdA}$	$5.0 \pm 1.55\text{bcB}$	$3.6 \pm 1.74\text{bC}$	$3.0 \pm 0.62\text{bC}$	$2.3 \pm 0.51\text{bC}$	$2.5 \pm 0.77\text{bC}$	4.3 ± 2.61
	人工乔木林	$8.4 \pm 3.07\text{cdA}$	$4.8 \pm 1.05\text{cB}$	$4.1 \pm 1.13\text{bBC}$	$3.5 \pm 0.94\text{bCD}$	$3.0 \pm 0.69\text{bD}$	$3.2 \pm 0.79\text{bCD}$	4.6 ± 2.47
	天然草地	$10.1 \pm 3.12\text{cA}$	$7.3 \pm 2.49\text{bB}$	$4.8 \pm 2.66\text{bC}$	$3.4 \pm 1.49\text{bCD}$	$2.8 \pm 1.08\text{bD}$	$2.7 \pm 0.81\text{bD}$	5.4 ± 3.50
	天然灌木林	$15.6 \pm 5.52\text{bA}$	$10.8 \pm 4.15\text{aB}$	$7.3 \pm 2.71\text{aC}$	$5.8 \pm 2.41\text{aC}$	$5.4 \pm 3.41\text{aC}$	$5.0 \pm 1.89\text{aC}$	8.8 ± 5.34
	天然乔木林	$25.1 \pm 5.33\text{aA}$	$12.3 \pm 2.37\text{aB}$	$7.0 \pm 1.98\text{aC}$	$4.3 \pm 1.54\text{bC}$	$3.6 \pm 1.30\text{bC}$	$3.3 \pm 0.97\text{bC}$	10.6 ± 8.81
	平均值	10.7 ± 6.07	7.2 ± 3.69	5.0 ± 2.59	3.9 ± 1.81	3.3 ± 1.96	3.2 ± 1.39	
沟底	农田	$6.7 \pm 0.98\text{bA}$	$6.1 \pm 1.11\text{cA}$	$4.6 \pm 1.56\text{cB}$	$4.2 \pm 1.94\text{aB}$	$3.8 \pm 1.22\text{bB}$	$4.0 \pm 1.71\text{aB}$	4.9 ± 1.79
	人工乔木林	$7.2 \pm 0.71\text{bA}$	$6.5 \pm 1.19\text{cAB}$	$4.2 \pm 1.05\text{cC}$	$4.0 \pm 0.83\text{aC}$	$4.6 \pm 0.08\text{bC}$	$5.1 \pm 1.08\text{aBC}$	5.3 ± 1.42
	天然草地	$9.6 \pm 2.37\text{bA}$	$9.1 \pm 1.46\text{bA}$	$6.8 \pm 1.13\text{bB}$	$6.2 \pm 0.84\text{aB}$	$6.4 \pm 1.03\text{aB}$	$5.2 \pm 0.84\text{aB}$	7.3 ± 2.05
	天然灌木林	$14.5 \pm 6.04\text{aA}$	$12.5 \pm 2.57\text{aAB}$	$9.3 \pm 1.57\text{aBC}$	$6.2 \pm 1.62\text{aCD}$	$5.0 \pm 1.10\text{bD}$	$4.3 \pm 1.20\text{aD}$	8.6 ± 4.72
	平均值	8.9 ± 4.21	8.1 ± 2.97	6.0 ± 2.36	5.0 ± 1.86	4.6 ± 1.46	4.4 ± 1.46	

2.5 土壤有机碳储量空间分布特征

地形部位显著影响了剖面土壤有机碳储量 (表 6). 1 m 土层剖面土壤有机碳储量沟底最高, 为 $7.06 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-2}$, 是峁坡 ($5.77 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-2}$)、峁顶 ($4.17 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-2}$) 的 1.2、1.7 倍. 0 ~ 10 cm 土层峁坡有机碳储量最高, 为 $1.27 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-2}$, 沟底次之, 峁顶最小; 10 ~ 100 cm 各层有机碳储量沟底最高, 峁坡次之, 峁顶最小. 沟底深层 (20 ~ 100 cm) 有机碳储量 ($5.04 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-2}$) 最大, 其相对 (1 m) 储量占 71.4%; 峁顶深层有机碳储量最低, 为 $3.01 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-2}$, 但其相对储量最大, 为 72.3%.

土地利用方式也显著影响了剖面土壤有机碳储量分布 (表 2). 1 m 土层剖面有机碳储量表现为天然灌木林 > 天然乔木林 > 天然草地 > 农田 > 人工乔木林 = 果园 > 人工灌木林, 其储量分别是人工灌木林 ($4.37 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-2}$) 的 2.0、1.8、1.3、1.2、1.0、1.0 倍. 深层 (20 ~ 100 cm) 土壤有机碳储量天然灌木林最高, 为 $6.01 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-2}$, 其相对 (1 m) 储量占 67.4%, 天然乔木林深层储量次之, 为 $3.96 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-2}$, 但其相对储量最小, 仅占 49.7%; 人工灌木林深层储量最小, 为 $2.89 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-2}$; 果园深层相对储量最大, 为 73.1%.

表 6 黄土丘陵区燕沟流域剖面土壤有机碳空间储量分布 /kg·m⁻²

Table 6 Storage of spatial distribution of soil profile organic carbon in Yangou watershed of hilly region ,Loess Plateau/kg·m⁻²

影响因子		土层剖面 /cm						所占质量分数 /%	
		0 ~ 10	10 ~ 20	20 ~ 40	40 ~ 60	60 ~ 80	80 ~ 100	0 ~ 100	[(20 ~ 100 cm) / 100 cm]
地形部位	峁顶	0.59	0.56	0.86	0.75	0.71	0.70	4.17	72.3
	峁坡	1.27	0.83	1.19	0.90	0.80	0.79	5.77	63.6
	沟底	1.06	0.96	1.46	1.21	1.21	1.15	7.06	71.4
土地利用	果园	0.66	0.57	0.86	0.80	0.80	0.87	4.56	73.1
	农田	0.76	0.71	1.11	0.89	0.80	0.77	5.04	70.7
	人工灌木林	0.93	0.55	0.91	0.75	0.60	0.63	4.37	66.1
	人工乔木林	0.88	0.53	0.89	0.77	0.70	0.79	4.56	69.0
	天然草地	1.08	0.84	1.10	0.92	0.91	0.85	5.71	66.4
	天然灌木林	1.68	1.22	1.96	1.46	1.37	1.22	8.91	67.4
	天然乔木林	2.68	1.32	1.51	0.92	0.78	0.75	7.96	49.7

3 讨论

地形是造成流域深层土壤有机碳含量空间分异的重要原因. 本研究显示,除 0 ~ 10 cm 土层峁坡土壤有机碳含量高于沟底外,其余土层均表现为沟底 > 峁坡 > 峁顶. 这表明土层 0 ~ 10 cm 土壤有机碳含量在坡面土壤侵蚀和水土流失规律下未表现出向沟底富集分布特征,而剖面 10cm 以下土层有机碳却表现出向沟底富集分布特征. 该流域峁坡植被类型最完整且具有多样性,表层有机碳输入较多,且控制土壤侵蚀和水土流失能力较强,而峁顶土地利用方式相对单一,农田和果园是其主要的植被类型,沟底尽管有来自峁坡侵蚀泥沙的碳输入,但表层碳输入相比峁坡较少,这可能是该流域 0 ~ 10 cm 峁坡土壤有机碳显著较高原因. 尽管 10 cm 以下土层有机碳含量表现出向沟底富集分布特征,但不同层次其富集显著性差异不同. 本研究显示,峁坡上层(10 ~ 40 cm)与沟底未表现出显著性差异,但 40 ~ 60 cm 是出现显著变化的过渡层,既表现出沟底显著差异,又表现出与峁顶显著性差异,下层(60 ~ 100 cm)与沟底呈显著差异,但与峁顶未表现出显著差异性,反映出峁坡土壤有机碳含量在剖面土体内急剧衰减变化规律,这是该区域地形影响下深层土壤有机碳含量分布重要特征. 这与燕沟流域地形影响下土地利用方式配置和剖面水土流失密切相关. 燕沟流域坡度 10° ~ 45°的面积占整个流域的 82.1%,峁坡占整个流域的绝大部分,该地形部位自 1997 以来进行大规模的基本农田建设,退耕还林还草以及封山育林为主的综合治理措施^[25],因此 10 年来使得峁坡剖面上层(40 cm 以上)土壤有机碳含量急剧提高,而下层(60 ~ 100 cm)尽管相比峁顶有所提高,但幅度仍

然有限. 沟底农田以坝地为主,有来自峁坡和上游侵蚀泥沙带来土壤有机碳,该地形部位还配置有大面积天然草地和天然灌木林,加之有充足的水分,因此该地形部位上下层土壤有机碳含量都保持了较高水平.

深层土壤有机碳含量与土地利用方式和植被恢复类型(天然与人工)密切相关^[15,28]. 本研究显示,农田(0 ~ 40 cm)有机碳含量比果园高 26%,但不显著;农田 40 ~ 80 cm 尽管高于果园,但差异很小,农田 80 ~ 100 cm 却低于果园 12%. 这表明农田退耕还果后,40 cm 以上土壤有机碳含量急剧下降,80 ~ 100 cm 却有所提高,这与果园的管理方式有关,果园土壤每年深耕,土地疏松,有机碳易于矿化,且有机物输入较少,造成了 40 cm 以上土壤有机碳含量减少;40 ~ 80 cm 是细根系主要分布区^[29],一方面根系衰老腐化向土壤内输入一定量有机碳,另一方面用于维持果树生长消耗一定量有机碳,消耗大于输入,是该层有机碳含量低于农田的一个主要原因,80 cm 以下果树的消耗降低,因此有机碳含量有所提高. 本研究还显示,0 ~ 60 cm 土层是土壤有机碳含量剖面分布变化最活跃的层次,尤其表现在天然植被类型;60 ~ 100 cm 土层是分布相对稳定的区域. 这说明 0 ~ 60 cm 是地表凋落物分解转化和植被根系(尤其是细根)分布影响最活跃的层次^[30~32]. 该流域尽管天然乔木林 0 ~ 20 cm 土层碳含量最高,天然灌木林在 20 ~ 100 cm 土层含量最高,但 40 ~ 100 cm 天然灌木林体现出与其它土地利用方式显著差异性,天然乔木林与其它土地利用方式差异较小. 这反映了不同土地利用方式在剖面上对土壤有机碳影响深度和程度,天然乔木林大量凋落物在地表累积^[33,34],是造成其表层土壤有机碳急剧升高的

重要原因,天然灌木林是该区域典型植被类型,分布较广且相对成熟,对土壤有机碳在剖面上影响更为深厚。

土壤有机碳库是全球碳循环的重要组成部分,其积累和分解变化对全球碳平衡有着直接影响。把握影响土壤有机碳储量变化的关键因子是准确预测土壤有机碳在全球变化背景下大气 CO₂ 源与汇方向的关键^[35,36]。地形和土地利用是影响土壤有机碳储量变化的重要因子。准确地获取局域尺度内 SOC 变异因子是准确估算黄土区有机碳储量的基础。本研究结果表明,在黄土丘陵沟壑区,在地形部位上,沟底是土壤有机碳蓄存的重要场所,其蓄存能力分别是峁坡和峁顶的 1.2、1.7 倍。在土地利用方式上,天然灌木林和天然乔木林表现出更强土壤有机碳蓄存能力,天然草地和农田次之。尽管表层(0~20 cm)土壤有机碳蓄存能力较大,但深层(20~100 cm)土壤有机碳蓄存能力也不容忽视。本研究中,不同地形部位 20~100 cm 土层有机碳密度约占 1 m 剖面的 63.6%~72.3%(表 6);不同土地利用类型 20~100 cm 土层有机碳密度约占 1 m 剖面的 49.7%~73.1%(表 6),尤其是农田、果园土壤,深层更是其碳蓄存的重要场所,其蓄存量占 1 m 剖面的 70% 以上。

4 结论

(1) 地形部位、土地利用方式、土层深度及其两者交互作用对燕沟流域深层土壤有机碳空间分布有极显著影响($p < 0.01$)。

(2) 地形对深层(10~100 cm)SOC 空间分布规律与表层(0~10 cm)不同。0~10 cm 土层, SOC 表现为峁坡 > 沟底 > 峁顶,但 10~100 cm 土层表现为沟底最高($5.6 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$) > 峁坡($4.5 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$) > 峁顶($3.2 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$)。峁坡上层(10~40 cm)与沟底未表现出显著性差异,40~60 cm 既表现出沟底显著差异,又表现出与峁顶显著性差异,下层(60~100 cm)与沟底差异显著。

(3) 土地利用方式不同,深层 SOC 含量分布差异显著($p < 0.05$)。与耕地相比,果园 0~40 cm SOC 含量降低 21%,但 80~100 cm SOC 含量提高了 13%;天然灌木林 40~100 cm 体现出与其它土地利用方式显著($p < 0.05$)差异性,平均含量($5.3 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$)较农田高 66%;但天然乔木林 40~100 cm 与其它土地利用方式差异较小。

(4) 地形上深层(20~100 cm)沟底是 SOC 重要

碳汇区,储量($5.04 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-2}$)最大,占 1 m 剖面 SOC 储量的 71.4%。深层(20~100 cm)SOC 储量天然灌木林最高,占 1 m 剖面 SOC 储量的 64.7%,天然乔木林深层相对储量最小,仅占 49.7%;农田和果园深层相对储量均达到 70% 以上。

参考文献:

- [1] Batjes N H. Soil carbon stocks and projected changes according to land use and management: a case study for Kenya [J]. Soil Use and Management, 2004, 20(3): 350-356.
- [2] 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.
- [3] 傅伯杰, 陈利顶, 马克明. 黄土丘陵区小流域土地利用变化对生态环境的影响——以延安市羊圈沟流域为例 [J]. 地理学报, 1999, 54(3): 241-246.
- [4] 郭胜利, 刘文兆, 史竹叶, 等. 半干旱区流域土壤养分分布特征及其与地形、植被的关系 [J]. 干旱地区农业研究, 2003, 21(4): 40-43.
- [5] Zheng F, He X, Gao X, et al. Effects of erosion patterns on nutrient loss following deforestation on the Loess Plateau of China [J]. Agriculture, Ecosystems & Environment, 2005, 108(1): 85-97.
- [6] Brubaker S C, Jones A J, Lewis D T, et al. Soil properties associated with landscape position [J]. Soil Science Society of America Journal, 1993, 57(1): 235-239.
- [7] Zhong B, Xu Y J. Topographic effects on soil organic carbon in Louisiana Watersheds [J]. Environmental Management, 2009, 43(4): 662-672.
- [8] Batjes N. Management options for reducing CO₂ concentrations in the atmosphere by increasing carbon sequestration in the soil [M]. International Soil Reference and Information Centre, 1999.
- [9] Lal R. Soil carbon sequestration to mitigate climate change [J]. Geoderma, 2004, 123(1-2): 1-22.
- [10] 陈利顶, 张淑荣, 傅伯杰, 等. 流域尺度土地利用与土壤类型空间分布的相关性研究 [J]. 生态学报, 2003, 23(12): 2497-2505.
- [11] 李裕元, 邵明安, 郑纪勇, 等. 黄土高原北部草地的恢复与重建对土壤有机碳的影响 [J]. 生态学报, 2007, 27(6): 2279-2287.
- [12] 彭文英, 张科利, 杨勤科. 退耕还林对黄土高原地区土壤有机碳影响预测 [J]. 地域研究与开发, 2006, 25(3): 94-99.
- [13] 刘守赞, 郭胜利, 白岩. 黄土高原沟壑区梁坡地土壤有机碳质量分数与土地利用方式的响应 [J]. 浙江林学院学报, 2005, 22(5): 490-494.
- [14] 王小利, 段建军, 郭胜利. 黄土丘陵区小流域表层土壤的有机碳密度及其空间分布 [J]. 西北农林科技大学学报, 2007, 35(10): 98-102.
- [15] 马玉红, 郭胜利, 杨雨林, 等. 植被类型对黄土丘陵区流域土壤有机碳氮的影响 [J]. 自然资源学报, 2007, 22(1): 97-105.

- [16] 郭胜利,刘文兆,史竹叶,等. 半干旱区流域土壤养分分布特征及其与地形、植被的关系[J]. 干旱地区农业研究, 2003, **21**(4): 40-43.
- [17] 方华军,杨学明,张晓平,等. 东北黑土区坡耕地表层土壤颗粒有机碳和团聚体结合碳的空间分布[J]. 生态学报, 2006, **26**(9): 2847-2854.
- [18] Jobbagy E G, Jackson R B. The vertical distribution of soil organic carbon and its relation to climate and vegetation[J]. Ecological Applications, 2000, **10**(2): 423-436.
- [19] Wang S L, Huang M, Shao X M, et al. Vertical distribution of soil organic carbon in China[J]. Environment Management, 2004, **33**(1): 200-209.
- [20] Wu Y Q, Hua L G, Fu B J, et al. Study on the vertical distribution of soil organic carbon density in the Tibetan Plateau[J]. Acta Scientiae Circumstantiae, 2008, **28**(2): 362-367.
- [21] Franzluebbers A J, Hons F M, Zubere D A. Seasonal changes in soil microbial biomass and mineralizable C and N in wheat management systems[J]. Soil Biology and Biochemistry, 1994, **26**(11): 1469-1475.
- [22] Gill R A, Burke I C. Influence of soil depth on the decomposition of *Bouteloua gracilis* roots in the shortgrass steppe[J]. Plant and Soil, 2002, **241**(2): 233-242.
- [23] 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]. Advances in Agronomy, 2005, **88**: 35-66.
- [24] 徐勇, Sidle R. 黄土丘陵区燕沟流域土地利用变化与优化调控[J]. 地理学报, 2001, **56**(6): 657-666.
- [25] 杨光, 薛智德. 陕北黄土丘陵区植被建设中的空间配置及其主要建造技术[J]. 水土保持研究, 2000, **7**(2): 136-139.
- [26] 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: 1982. 562-564.
- [27] SAS Institute Inc. SAS Release(8.1) [R]. Cary, USA: 1999.
- [28] 张希彪,上官周平. 黄土丘陵区油松人工林与天然林养分分布和生物循环比较[J]. 生态学报, 2006, **26**(2): 373-382.
- [29] 赵忠, 李鹏, 王乃江. 渭北黄土高原主要造林树种根系分布特征的研究[J]. 应用生态学报, 2000, **11**(1): 37-39.
- [30] 杨玉盛, 郭剑芬, 李鹏, 等. 格氏栲天然林与人工林枯枝落叶层碳库及养分库[J]. 生态学报, 2004, **24**(2): 359-367.
- [31] 安慧, 韦兰英, 刘勇, 等. 黄土丘陵区油松人工林和白桦天然林细根垂直分布及其与土壤养分的关系[J]. 植物营养与肥料学报, 2007, **13**(4): 611-619.
- [32] 赵忠, 李鹏. 渭北黄土高原主要造林树种根系分布特征及抗旱性研究[J]. 水土保持学报, 2002, **16**(1): 96-99.
- [33] Laskowski R, Berg B, Caswell H. Litter Decomposition: A Guide to Carbon and Nutrient Turnover [M]. New Jersey: Academic Press, 2006.
- [34] Sauer T, Cambardella C, Brandle J. Soil carbon and tree litter dynamics in a red cedar-scotch pine shelterbelt[J]. Agroforestry Systems, 2007, **71**(3): 163-174.
- [35] Eswaran H, Berg V D, Reich E V. Organic carbon in soil of world[J]. Soil Science Society of America Journal, 1993, **57**(1): 192-194.
- [36] Ahn M Y, Zimmerman A R, Comerford N B, et al. Carbon mineralization and labile organic carbon pools in the sandy soils of a north florida watershed[J]. Ecosystems, 2009, **12**(4): 672-685.