

DOI: 10.5846/stxb201112312027

许明祥,王征,张金,刘国彬.黄土丘陵区土壤有机碳固存对退耕还林草的时空响应.生态学报,2012,32(17):5405-5415.

Xu M X, Wang Z, Zhang J, Liu G B. Response of soil organic carbon sequestration to the "Grain for Green Project" in the hilly Loess Plateau region. Acta Ecologica Sinica 2012, 32(17): 5405-5415.

## 黄土丘陵区土壤有机碳固存对 退耕还林草的时空响应

许明祥<sup>1,2</sup>,王征<sup>2</sup>,张金<sup>2</sup>,刘国彬<sup>2,\*</sup>

(1. 西北农林科技大学黄土高原土壤侵蚀与旱地农业国家重点实验室,杨凌 712100;

2. 中国科学院水利部水土保持研究所,杨凌 712100)

**摘要:**研究了黄土丘陵区土壤有机碳固存对退耕还林草的时空响应特征,分析了退耕还林草对土壤有机碳的近期影响和长期效应。结果表明:1)从黄土丘陵区退耕还林草的土壤固碳效应整体而言,相对于坡耕地,退耕还林和退耕撂荒具有显著的土壤碳增汇效应,而退耕还草、退耕还果没有明显土壤碳增汇效应。以天然草地土壤有机碳密度为目标,撂荒地表层土壤有机碳增汇潜力可达 8.3 t/hm<sup>2</sup>。2)以 10a 为界,退耕还林草的近期土壤碳增汇效应不明显,而 10a 后土壤碳增汇效应逐渐明显,退耕还林、还灌、撂荒和坡耕地的固碳效应差异显著。3)在评估黄土丘陵区退耕还林草的土壤固碳效应时应当注重长期固碳效应。4)退耕还林草的土壤固碳效应主要受还林草方式及年限的影响,二者分别可解释 55.6% 和 24.1% 的有机碳变异性;地形因子可解释 8.5% 的有机碳变异性。在评估该区退耕还林的土壤固碳效应时应当充分考虑退耕年限和地形因子的影响。5)人工刺槐林地、人工柠条林地以及撂荒地深层土壤(100—200 cm)有机碳密度占 2 m 土体有机碳密度的 35%—40%,而且随着植被恢复深层土壤有机碳密度显著增加。6)在估算黄土丘陵区退耕还林土壤固碳效应时应该考虑深层碳累积。如果按 1 m 土层的土壤有机碳密度计算,会严重低估退耕还林草的土壤固碳量。

**关键词:**土壤有机碳;固碳效应;退耕还林草;黄土丘陵区

## Response of soil organic carbon sequestration to the "Grain for Green Project" in the hilly Loess Plateau region

XU Mingxiang<sup>1,2</sup>, WANG Zheng<sup>2</sup>, ZHANG Jin<sup>2</sup>, LIU Guobing<sup>2,\*</sup>

1 State Key Laboratory of Soil Erosion and Dryland Farming on the Loess Plateau, Northwest Agriculture and Forestry University, Yangling, Shaanxi 712100, China

2 Institute of Soil and Water Conservation, Chinese Academy of Sciences and Ministry of Water Resources, Yangling, Shaanxi 712100, China

**Abstract:** Land use change is one of the major factors affecting soil organic carbon (SOC) and global carbon balance. The Grain for Green Project, implemented in the hilly Loess Plateau region, has remarkably changed the land use types in this region. However, it is not clear how this has affected SOC sequestration. Our objectives were (I) to determine the temporal and spatial response of SOC sequestration to the land use changes, (II) to understand the critical factors impacting the SOC sequestration. The research was conducted on the central of the hilly Loess Plateau region, which covered an area of 707 km<sup>2</sup>. Soil samples were taken in five catchments with different revegetation types and revegetation chronosequence. The results showed that at the regional scale, natural grasslands, planted shrub lands, planted wood lands and naturally revegetated grasslands showed remarkable SOC sequestration compared with slope croplands. However, no

基金项目:中国科学院知识创新重要方向项目(KZCX2-YW-443);国家自然科学基金项目(41171422);中国科学院战略性先导科技专项子课题(XDA05050504)

收稿日期:2011-12-31; 修订日期:2012-05-08

\* 通讯作者 Corresponding author. E-mail: gbliu@ms.iswc.ac.cn

<http://www.ecologica.cn>

significant increase in SOC sequestration was found in planted grasslands and orchards compared with slope croplands. Setting the SOC density in natural grassland as the target, the naturally revegetated grassland had a SOC sequestration potential of  $8.3\text{t}/\text{hm}^2$  in top soil (0—20cm). We found no increase in SOC sequestration in the first 10 years after the Grain for Green Project implemented. However, after 10 years, we saw a significant increase in SOC sequestration in planted woodlands, planted shrub lands, revegetated grasslands and slope croplands. The effect of the Grain for Green project on SOC sequestration was mainly influenced by land use type and age, which explained 55.6% and 24.1% of the variation of SOC. Topographic factors, including slope aspect and slope position explained 8.5% of the variation in SOC. The SOC density in the deep soil layer (100—200 cm) in the planted woodland (dominated by *Robinia pseudoacacia*), planted shrub land (dominated by *Caragana Korshinskii*) and revegetated grassland was about 35%—40% of that in the 0—200 cm soil profile. The SOC sequestration in deep soil layer (100—200cm) was significantly increased after revegetation. Therefore, our study showed that evaluation of the Grain for Green project needs to account for 1) land use type and age, 2) SOC sequestration in the deep soil layer and 3) long-term effects (>10 years) rather than short-term effects. Otherwise, the effect of this program on SOC sequestration will be significantly under-estimated.

**Key Words:** soil organic carbon; carbon sequestration; grain for green project; hilly Loess Plateau

退耕还林工程是近年来我国实施的规模最大的生态工程之一,1999—2008 年全国累计实施退耕还林 0.27 亿  $\text{hm}^2$ ,其中黄土高原约 520 万  $\text{hm}^2$ ,是国家退耕还林草的核心区。如此规模的生态恢复工程对区域土地利用/覆盖变化产生了重大影响,进而必将对土壤有机碳固存产生影响。回答黄土高原近 10a 来退耕还林还草的土壤固碳效应是黄土高原地区生态效应评估的基本需求。黄土高原复杂地形及复合生态系统进一步增加了评估退耕还林还草工程固碳效应的挑战性。

目前土壤固碳研究已在不同尺度上开展的较多,但大尺度土壤碳储量估算仍然存在较大的不确定性<sup>[1-2]</sup>。这除了与某些区域相关数据资料不足有关,还与小尺度上土壤固碳过程及其影响因素不甚清楚有关。在黄土高原地块尺度上,退耕还林草引起土壤有机碳时空变化的研究结果也表现出较大的差异。比如有些研究认为退耕还林中后期土壤有机碳增长速率最高,后期增长较平稳<sup>[3-4]</sup>;而另外一些研究认为土壤有机碳在林木生长后期仍有显著的提高<sup>[5-6]</sup>。有些研究认为退耕还林后乔木的土壤固碳效应大于灌木<sup>[7-8]</sup>,有些研究则得出相反的结论<sup>[9-10]</sup>。这些结论的差异性与黄土丘陵区自然环境条件复杂,土壤有机碳受环境因素影响较大有关<sup>[11-12]</sup>。因此,开展小尺度土壤固碳过程及其影响因素研究,将为准确估算区域土壤碳储量提供科学依据。

针对黄土高原退耕还林草的土壤固碳效应评估需求,本研究主要回答以下 3 个问题:不同还林草方式的土壤固碳效果如何?退耕还林草的土壤固碳效应主要受那些因素影响?黄土区土层深厚,深根系植被恢复对深层土壤碳累积有何影响?为此,以黄土丘陵区为例,开展了土壤有机碳固存对退耕还林草的时空响应特征研究,分析了退耕还林草对土壤有机碳的近期影响和长期效应。以期为区域土壤有机碳固存的定量评估和认证提供依据,为我国政府制定减缓全球变暖的可持续发展战略,履行国际环境公约提供理论基础。

## 1 材料与方法

### 1.1 研究区概况

研究样地选择在陕北黄土丘陵沟壑区安塞县中部和南部的县南沟、纸坊沟、北宋塔、桥庄村陀山、坊塔以及延安市附近的燕沟等小流域(图 1),可代表黄土丘陵区中部  $700\text{ km}^2$  区域的土壤、地形和气候环境。研究区属暖温带半干旱季风气候。平均海拔 1200 m,相对高差 100—300 m,年均气温  $8.8\text{ }^\circ\text{C}$ ,年均降水量 505 mm,无霜期 160 d 左右。土壤以黄土母质上发育来的黄绵土(钙质干润锥形土)为主。

纸坊沟流域(北纬  $36^\circ51'30''$ ,东经  $109^\circ19'30''$ )面积  $8.27\text{ km}^2$ 。年日照总时数为 2415 h,年均气温  $8.8\text{ }^\circ\text{C}$ , $\geq 10\text{ }^\circ\text{C}$  的积温  $3160\text{ }^\circ\text{C}$ ;年均降水量为 549 mm。该流域经过 30 多年水土保持综合治理,林地面积从 1980

年的不足 5% 增加到 40% 以上, 流域生态经济系统进入良性循环阶段。

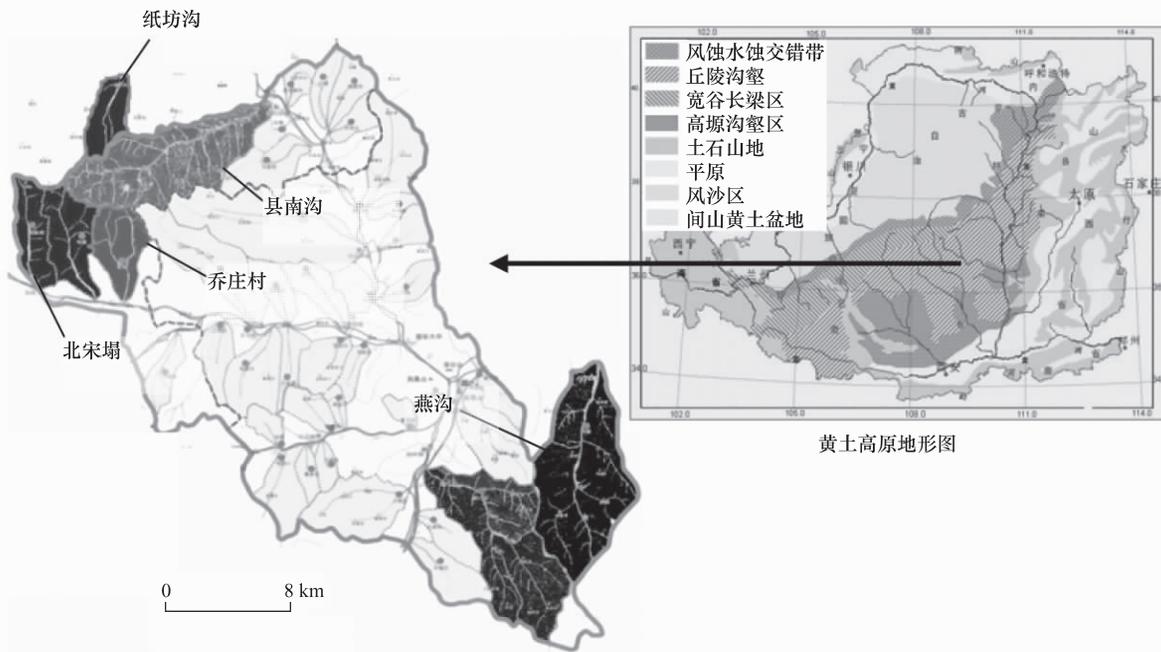


图 1 研究区位置图

Fig. 1 Location of the research region

## 1.2 样品采集

在黄土丘陵沟壑区中部的县南沟、纸坊沟、燕沟等小流域, 选取不同土地利用类型(人工乔木林、人工灌木林、天然草地、人工草地、撂荒地、果园和农地) 样地 303 个, 走访调查样地利用年限, 记录取样点的坡度、坡位、坡向等环境因子特征(表 1)。在取样点周围随机选择 5 个点, 用土钻取 0—20 cm 土壤混合样, 并测定土壤容重。分析不同退耕还林草方式的土壤固碳效应。

在纸坊沟小流域, 根据不同的土地利用类型、植被恢复年限、地形差异选择样地 85 个。在乔灌木林样地内设置 10 m×10 m 的样方调查植物生长状况, 并选取生长状况中等的相邻植株, 在其间设定 3 个 0.5 m×0.5 m 的小样方; 撂荒地随机设定 3 个 0.5 m×0.5 m 的小样方。在设定的小样方内调查草本群落, 收集凋落物。记录样地立地条件: 坡向偏北的(NE45°—NW45°) 划分为半阴坡, 坡向偏南的(SE35°—SW25°) 划分为半阳坡; 坡度小于 25° 划分为缓坡, 大于 25° 划分为陡坡; 坡位分为坡上、坡中、坡下。在取样点周围随机选择 5 个点, 用土钻分 4 层取 0—5 cm、5—10 cm、10—20 cm、20—30 cm 土样, 同层 5 点混合为一个样品。分析土壤有机碳的空间分布特征。

在纸坊沟及其相邻流域, 选取不同年限的刺槐林、柠条林、撂荒地和坡耕地, 每种类型 6 块样地, 采集 0—400 cm 剖面土样 0—200 cm 每 20 cm 一层样, 200 cm 以下每 40 cm 一层样。同时测定各层土壤容重。分析深层土壤有机碳累积动态。

土壤样品经风干, 剔除其中的根系、石块等杂物, 用重铬酸钾外加热法测定土壤有机碳含量。

## 1.3 数据处理

土壤有机碳密度(SOCD) 的计算:

$$SOCD = SOC \times \rho \times H \times (1 - \delta_{2mm}/100) \times 10^{-1}$$

式中, SOCD 为 SOC 密度( $t/hm^2$ ); SOC 为 SOC 含量( $g/kg$ );  $\rho$  为平均土壤容重( $g/cm^3$ ), 不同土地利用的土壤容重见表 2;  $H$  为土层厚度( $cm$ );  $\delta_{2mm}$  为粒径 > 2 mm 的砾石体积含量。

数据处理采用 SPSS 18.0 软件, LSD 法进行差异显著性检验。

<http://www.ecologica.cn>

表1 研究样地的基本情况  
Table 1 Basic status of the studied sites

土地利用类型 Land use type	样点数 Sample number	利用年限/a Land use ages	海拔/m Altitude	坡度/(°) Gradient	坡位 Position	坡向 Aspect	0—20 cm 土壤 容重/(g/cm <sup>3</sup> ) Soil bulk density	植被 Vegetation
坡耕地 Slope cropland	86	—	1024—1386	3—30	U6 ,L5 ,M77	A7 ,U40 , SA43 ,SU7	1.18±0.04	谷子 <i>Setaria italica</i> Beauv. , 玉米 <i>Zea mays</i> L. , 荞麦 <i>Fagopyrum esculentum</i> Moench.
撂荒地 Abandoned land	81	1—10 , 12 ,15 ,17 ,20 , 25 ,30 ,35	1122—1397	7—36	U24 ,M42 ,L15	A12 ,U11 , SA30 ,SU28	1.17±0.09	黄花蒿 <i>Artemisia annua</i> L. , 茵陈蒿 <i>Artemisiacapillaris</i> Thunb. , 长芒草 <i>Stipa bungeana</i> Trin. , 铁杆蒿 <i>Artemisia sacrorum</i> Ledeb.
人工草地 Planted grassland	14	1—10	1226—1428	7—34	U8 ,M6	A2 ,U1 ,SA9 , SU2	1.17±0.01	草木樨 <i>Melilotus suaveolens</i> Ledeb. , 苜蓿 <i>Medicago sativa</i> Linn.
果园 Orchard	10	4 ,7 ,10 ,13 , 14 ,15 ,20 ,23	1211—1374	20—32	U3 ,M3 ,L4	A4 ,SA2 ,SU2	1.17±0.01	苹果 <i>Malus pumila</i> Mill.
人工灌木林 Planted shrub land	35	8 ,10 ,15 ,17 ,20 , 24 ,26 ,30 ,33	1156—1341	5—34	U8 ,M20 ,L7	A8 ,U17 , SA4 ,SU6	1.24±0.05	柠条 <i>Caragana Korshinskii</i> Kom. , 铁杆蒿 <i>Artemisia sacrorum</i> Ledeb. , 长芒草 <i>Stipa bungeana</i> Trin.
人工乔木林 Planted woodland	56	3 ,5 ,8 ,9 ,10 , 12 ,15 ,17 ,20 , 22 ,25 ,27 ,30 , 37 ,43	1101—1373	15—35	U17 ,M31 ,L8	A19 ,U6 , SA17 ,SU14	1.20±0.08	刺槐 <i>Robinia pseudoacacia</i> Linn. , 铁杆蒿 <i>Artemisia sacrorum</i> Ledeb. , 茭蒿 <i>Artemisia giraldii</i> Pamp.
天然草地 Natural grassland	21	—	1081—1297	12—40	U6 ,M9 ,L6	SA7 ,SU7 , U4 ,A3	1.19±0.09	铁杆蒿 <i>Artemisia sacrorum</i> Ledeb. , 长芒草 <i>Stipa bungeana</i> Trin.

U、M、L 分别表示上、中、下坡位; 坡向一栏中 A、U、SA、SU 分别表示阳坡、阴坡、半阳坡及半阴坡; 坡度、坡向、地形中的数字代表样点数

为了辨析退耕还林草方式、年限及地形因子等对土壤有机碳密度的影响程度,用 SPSS 18.0 统计软件中一般线性模型 GLM 的方差成分估计模块计算了土地利用及地形因子等在土壤有机碳密度变异(方差)中所占的百分比,并对其影响的显著性程度进行了检验。百分比的大小反映了各因子对土壤有机碳密度的影响程度。采取将定性的土地利用类型、坡位、坡向因子赋以不同的编码的方法,使其定量化。以土地利用类型、利用年限、坡度、坡位、坡向、地表凋落物量为随机因子,用最大似然法计算土壤有机碳密度的方差<sup>[13]</sup>。

## 2 结果与分析

### 2.1 不同退耕方式土壤有机碳累积量

黄土丘陵区不同利用类型下土壤有机碳密度(SOCD)差异较大(图2),天然草地 SOCD 最高,其次是人工灌乔林地,再次是撂荒地,而人工草地、果园和坡耕地 SOCD 最低。天然草地 SOCD 约为人工乔灌林地的 1.2—1.5 倍,人工灌木林地和人工乔木林地 SOCD 分别是撂荒地的 1.5 倍和 1.3 倍。天然草地、人工灌木林地、人工乔木林地、撂荒地 SOCD 差异显著,而人工草地、果园和坡耕地之间 SOCD 差异不显著。

以上结果表明,从黄土丘陵区退耕还林草对表层(0—20 cm)土壤有机碳累积的整体效应而言,退耕还林(乔木、灌木)的土壤固碳效益>退耕撂荒>退耕还草、退耕还果。退耕还灌的土壤固碳效益大于退耕还乔( $P<0.05$ )。与坡耕地相比,退耕还灌、退耕还乔、退耕撂荒有显著的碳增汇效应,分别较坡耕地增汇 7.8、4.1 和 2.1 t/hm<sup>2</sup>,增幅分别为 90.6%、61% 和 27.5%。而退耕还草、退耕还果碳增汇效应不显著。以天然草地

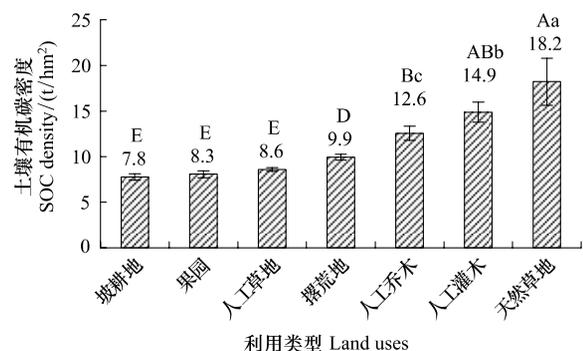


图2 不同利用类型土壤有机碳密度(0—20 cm, n=303)  
Fig.2 SOC density in different landuse types (0—20 cm, n=303)

SOCD 为目标, 撂荒地表层土壤有机碳增汇潜力可达  $8.3 \text{ t/hm}^2$ , 增幅 83.6%。

### 2.2 不同退耕方式土壤有机碳累积动态

从土壤有机碳密度(SOCD)随退耕年限变化的动态曲线可以看出(图3), 随着退耕还林和退耕撂荒年限的增加, SOCD 逐渐增加, 二者具有显著的相关关系, 可以用指数函数  $y = ae^{bx}$  来表示。退耕初期 SOCD 增加不明显甚至较坡耕地有所降低, 退耕 10a SOCD ( $8.26\text{--}8.79 \text{ t/hm}^2$ ) 较坡耕地提高了 6%—12%。退耕 10a 后 SOCD 显著增加 ( $P < 0.05$ ), 退耕 35a SOCD ( $14.31\text{--}26.21 \text{ t/hm}^2$ ) 比坡耕地提高了 84%—238%。表明退耕还林草的土壤固碳效应在退耕后期才体现出来。

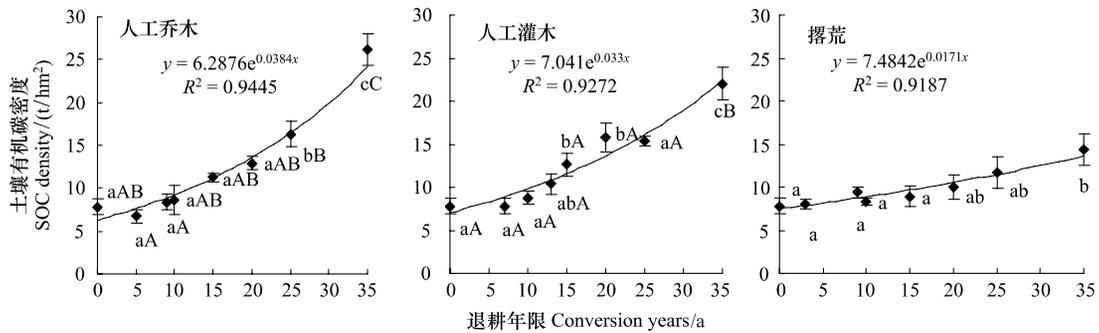


图3 不同退耕方式土壤有机碳累积动态(0—20 cm)

Fig. 3 Dynamics of SOC accumulation in different revegetation types(0—20 cm)

不同退耕还林草类型的 SOCD 累积速率差异较大。退耕初期(0—10a), 人工乔木林地、灌木林地、撂荒地 SOCD 累积速率差异不大, 分别为  $0.08$ 、 $0.09 \text{ t}\cdot\text{hm}^{-2}\cdot\text{a}^{-1}$  和  $0.05 \text{ t}\cdot\text{hm}^{-2}\cdot\text{a}^{-1}$ ; 退耕 10a 后, 人工乔灌林地 SOCD 累积速率 ( $0.70 \text{ t}\cdot\text{hm}^{-2}\cdot\text{a}^{-1}$ 、 $0.53 \text{ t}\cdot\text{hm}^{-2}\cdot\text{a}^{-1}$ ) 明显高于撂荒地 ( $0.24 \text{ t}\cdot\text{hm}^{-2}\cdot\text{a}^{-1}$ )。以上结果表明, 在退耕后期, 退耕还林(乔木、灌木林)较退耕撂荒具有更快的土壤固碳速率。

以退耕 10a 为界, 分析了不同退耕还林草方式对土壤碳固存的近期影响和长期效应(图4), 结果表明, 退耕还林草的近期土壤固碳效应(<10a)不明显, 不同退耕方式的固碳量差异不显著。退耕还林草的长期固碳效应(35a)相当可观, 不同方式的固碳量有显著差异。退耕 35a 时, 退耕还林、退耕撂荒的碳增汇分别为  $16 \text{ t/hm}^2$  和  $6 \text{ t/hm}^2$ , 较坡耕地增加了 2—3 倍。

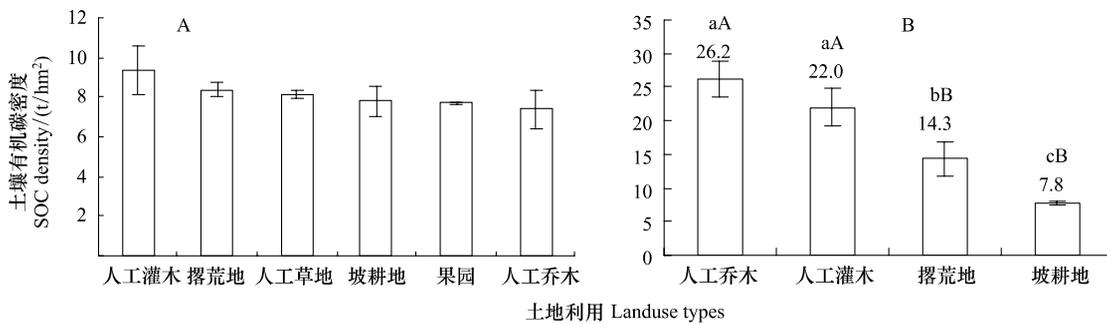


图4 不同退耕方式及退耕年限对表层土壤(0—20cm)有机碳累积的影响

Fig. 4 Soil organic carbon accumulation in topsoil (0—20cm) of different revegetation types and revegetation years

A. 退耕年限<10a; B. 退耕 35a, 人工乔木和灌木分别为刺槐和柠条

### 2.3 不同退耕方式土壤有机碳空间变化

土壤有机碳在 0—30 cm 土层表现出明显的表聚现象(图5)。不同退耕方式土壤有机碳表聚性有明显差别: 人工乔木林地>灌木林地>撂荒地>坡耕地。随退耕年限增加, 表聚性更加明显。退耕 9、15、25 和 35a 后, 各退耕类型 0—5 cm 土层有机碳平均含量分别占 0—30 cm 土层有机碳含量的 1.6、1.8、2.0 倍和 2.5 倍; 0—5 cm 土层有机碳密度分别占 0—30 cm 土层的 25%、29%、31% 和 39%。表明 0—5 cm 表层土壤是退耕后土

壤有机碳累积效果最明显的层次,也是对退耕还林后土壤有机碳响应最敏感的层次。

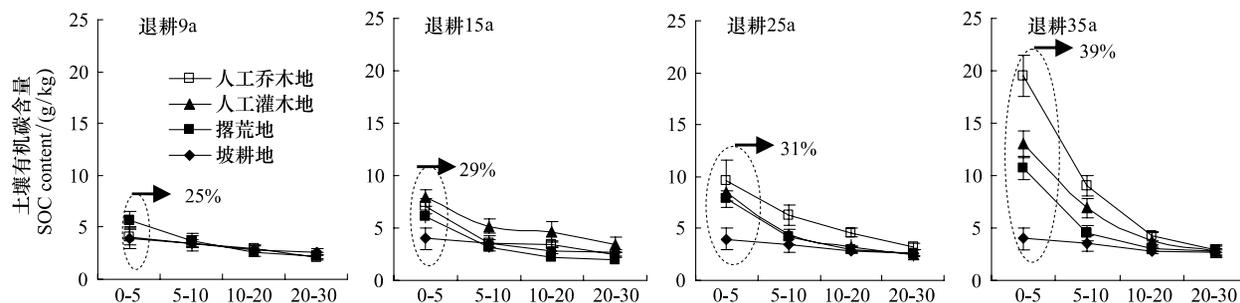


图5 不同退耕方式及退耕年限下有机碳在土壤剖面(0—30cm)的分布特征

Fig. 5 Soil organic carbon distribution in profile (0—30cm) of different revegetation types and revegetation years

从表2可见,地形对退耕还林草的土壤固碳效应影响显著。阴坡比阳坡更利于SOC积累,重建9a人工乔木林地出现显著( $P < 0.05$ )差异。缓坡植被恢复和重建后的SOC积累稍好于陡坡,但差异不明显,9a撂荒地和35a人工灌木林地的陡坡、缓坡SOCD均无显著( $P > 0.05$ )差异。植被恢复和重建后,形成了较好的保持水土作用,可能因此陡坡、缓坡SOC积累差异较小;而本区域水分一直是植被生长的主要限制因素,光照的影响相对较小,阴坡水分、土壤条件要好于阳坡,更有利于植被生长和SOC积累。沟坡具有汇土汇水作用,植被恢复和重建后SOCD也显著( $P < 0.05$ )高于梁峁坡(9年生人工乔木)。峁顶植被恢复后SOCD显著( $P < 0.05$ )高于梁峁坡(35a人工灌木),可能是由于本研究选用的样地植被群落已趋于成熟,抵御风蚀水蚀的能力较强,加之峁顶地势较平坦,反而比坡面能更好的积累SOC。综上所述,本区域植被恢复后,在坡向、坡度、坡位3种地形因子中,坡向对SOC截流影响最大,其次是坡位,而坡度的影响在变小。总体而言,地形条件对土壤有机碳空间分布的影响符合常规认识,即:阴坡SOC积累好于阳坡,缓坡好于陡坡,沟坡较梁峁坡有利于SOC积累。

表2 不同地形条件下退耕还林草对土壤有机碳密度( $t/hm^2$ )的影响(0—20 cm)

Table 2 SOC density (0—20 cm) in different landforms of different land uses on the hilly Loss Plateau ( $t/hm^2$ )

退耕类型	坡向 Slope aspect		坡度 Slope gradient		坡位 Slope position	
	阴坡	阳坡	阴坡	阳坡	阴坡	阳坡
人工乔木	① $10.74 \pm 0.83a$	① $7.64 \pm 0.61b$	② $8.80 \pm 0.98$	② $10.41 \pm 0.84$	—	① $7.64 \pm 0.61a$ ① $8.62 \pm 0.58b$
人工灌木	③ $13.02 \pm 1.23a$	③ $8.65 \pm 0.83b$	③ $20.29 \pm 0.76$	④ $21.57 \pm 2.13$	④ $23.68 \pm 1.23$	④ $21.57 \pm 2.13$ —
撂荒	⑤ $9.42 \pm 0.43$	⑤ $9.27 \pm 0.41$	⑤ $8.12 \pm 0.95$	⑤ $9.27 \pm 0.41$	—	⑥ $10.28 \pm 1.03$ ⑥ $10.88 \pm 1.57$

①. 9a人工乔木林地; ②. 15a人工乔木林地; ③. 20a人工灌木林; ④. 35a人工灌木林地; ⑤. 9a撂荒地; ⑥. 35a撂荒地

## 2.4 土壤有机碳累积的影响因素

用通用线性回归模型中的方差成分估计模块,计算了利用类型(人工乔木、人工灌木、果园、人工草地、天然草地、撂荒地)、年限、地形(坡向、坡位、坡度)等因子对黄土丘陵区土壤有机碳密度变异性的贡献(表3)。结果表明,在黄土丘陵区区域尺度上,土壤有机碳密度主要受利用类型及年限的影响,二者可解释79.7%的有机碳变异性;地形因子可解释8.5%的有机碳变异性,其中坡向的影响大于坡位和坡度的影响。凋落物量对土壤有机碳密度的影响也较大,可解释11.8%的有机碳变异性。因此,在估算退耕还林草的土壤固碳效应时,应当充分考虑退耕年限、退耕类型和地形等因素的影响,否则会严重降低估算结果的准确性和可靠性。

## 2.5 深层土壤有机碳累积

在考虑了退耕方式、退耕年限、地形等因素后,还需要确定土层深度。按照国际惯例,以1 m土层为准。但对黄土高原地区,由于其深厚的黄土层以及深根系植被的影响,1 m土层可能会低估退耕还林的土壤固碳量。为此,以坡耕地为对照,对退耕还林和撂荒方式下0—400 cm剖面土壤有机碳累积状况进行了研究。从图6可以看出,60 cm以上各层SOCD较大,且层次间差异显著,60 cm以下土层SOCD较低且各层差异不显

著。植被恢复主要增加了 60 cm 以上 SOCD。与坡耕地相比,退耕还林后深层土壤碳密度有所增加(大约 0.5 t/hm<sup>2</sup>)。

表 3 不同因子在土壤有机碳密度变异(方差)中的贡献(GLM 模型,方差成分估计, n=221)

Table 3 Contribution of different factors to the variation of SOC density (GLM model, variance components, n=221)

有机碳密度 SOC density	方差来源 Variance source					
	利用类型 Land use types	利用年限 Land use ages	凋落物量 Litter amount	坡位 Slope position	坡向 Slope aspect	坡度 Slope gradient
方差 Variance	20.9	9.1	4.5	2.1	1.1	0
占总方差的比例 Variance percentage to total variance	55.6	24.1	11.8	5.7	2.8	0

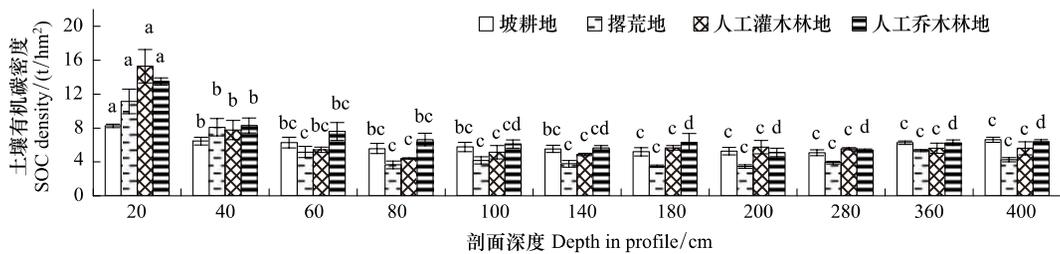


图 6 不同退耕方式剖面(0—400cm)土壤有机碳累积量(撂荒地退耕年限 20a、人工灌木林地(柠条)和人工乔木林地(刺槐)退耕年限 28a)

Fig. 6 Soil organic carbon accumulation in profile (0—400cm) of different revegetation types (revegetation years for abandoned cropland was 20a, for planted shrubland (Caragana) and planted woodland( Robinia) was 28a)

从深层土壤有机碳累积动态(图 7)可见,土壤有机碳累积表现出一定的阶段性。随退耕年限延长,浅层(0—100 cm) SOCD 先显著增加,而后维持稳定水平;深层(100—200 cm、200—400 cm) SOCD 先显著增加,而后则明显降低。刺槐林成熟期(10—28a),浅层 SOCD 累积速率(1.1 t/hm<sup>2</sup>) > 深层(0.5 t/hm<sup>2</sup>)。柠条林浅层和深层 SOCD 累积速率相当(约为 1.1 t/hm<sup>2</sup>)。

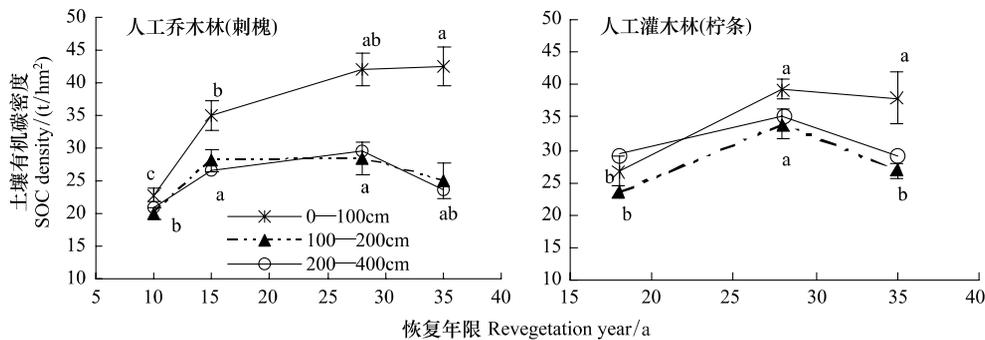


图 7 不同退耕方式剖面(0—400cm)土壤有机碳累积动态

Fig. 7 Soil organic carbon dynamics in profile (0—400cm) of different revegetation types

不同退耕类型下浅层(0—100 cm)和深层(100—200 cm、200—400 cm) SOCD 见图 8。对于浅层 SOCD,人工乔木林(42.1 t/hm<sup>2</sup>)显著高于撂荒地(32.2 t/hm<sup>2</sup>) (P<0.05);对于深层(100—200 cm、200—400 cm) SOCD,人工林地(乔木、灌木)显著高于撂荒地。值得注意的是,与人工乔木和灌木林地不同,撂荒地 200—400 cm 土层 SOCD 显著高于 100—200 cm 土层 SOCD。

以 0—200 cm 深度进行计算,撂荒地浅层(0—100 cm)和深层(100—200 cm) SOCD 分别占 0—200 cm 土层有机碳储量的 64.6% 和 35.4%。人工林地(灌木、乔木)浅层(0—100 cm)和深层(100—200 cm) SOCD 所

占比例约为 60% 和 40% (图 9)。

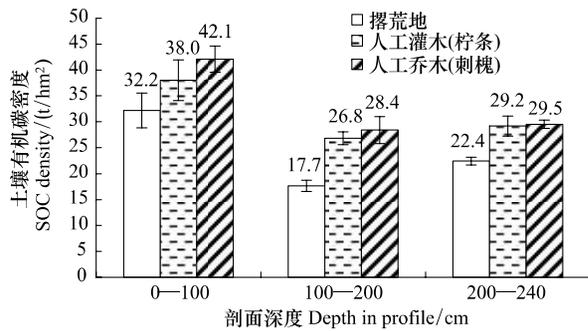


图 8 不同退耕方式浅层和深层土壤有机碳密度

Fig. 8 SOC density in shallow layer and deep layer

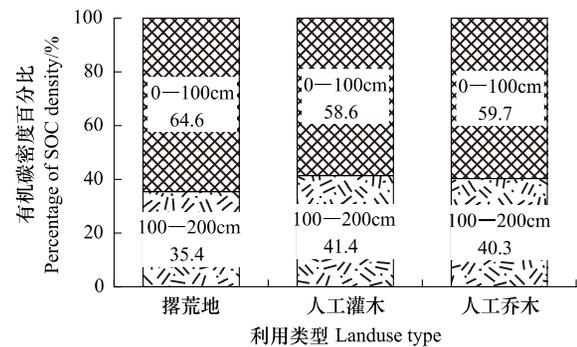


图 9 不同退耕方式浅层和深层土壤有机碳分配比例

Fig. 9 Percentage of SOC density in shallow layer and deep layer

### 3 讨论

土地利用变化是土壤有机碳变动的重要影响因素<sup>[14-15]</sup>。在过去的 10 多年,黄土高原大规模退耕还林草工程带动土地利用类型发生重大转变<sup>[16-17]</sup>,对土壤有机碳的积累及分布产生了深刻影响。有关黄土高原退耕还林草的土壤固碳研究表明,不同退耕方式的土壤固碳效应有明显差别。一些研究认为,退耕撂荒的 SOC 积累作用要优于人工乔灌木林<sup>[11, 18]</sup>,有些研究认为退耕还林后乔木的固碳效应大于灌木<sup>[7, 19]</sup>,有些研究则得出相反的结论<sup>[9-10]</sup>。这可能是由于不同退耕类型对比时所选用的退耕年限以及立地条件不同造成的。本研究综合分析了黄土丘陵区 303 个样点的土壤有机碳密度结果表明,退耕还林和退耕撂荒具有显著的碳增汇效应,而退耕还草、退耕还果没有明显的碳增汇效应。天然草地经过长期自然恢复,土壤有机碳累积量可达到坡耕地的 2.3 倍。从长远看,经过长期的自然恢复,撂荒地的土壤固碳潜力十分可观(达 8.3 t/hm<sup>2</sup>),通过自然恢复可以显著增加土壤有机碳储量。退耕还草、退耕还果没有显著的碳增汇效应,这与人工草地、果园的经营管理方式有直接关系。人工草地累积的地上生物量大多被刈割利用,果园累积的地上生物量以果实、修剪枝条等形式携出,归还土壤的有机物量有限,因此土壤有机碳的净累积没有显著增加也就可以理解。因此,面向减排增汇的退耕还林方式应当以退耕还灌、退耕还乔、退耕撂荒较为适宜。

黄土丘陵区人工乔木林、人工灌木林、撂荒 3 种典型退耕还林草方式的土壤有机碳累积动态显示,退耕还林草前期(0—10 a 左右)土壤有机碳增加不明显,退耕 10a 左右有机碳积累速率开始显著提高(图 3)。退耕前期虽然表层 SOC 含量(0—5 cm)有所增加,但土壤下层 SOC 含量提高不明显甚至下降,说明土壤表下层 SOC 得不到新建植被有机物的有效补充,这也正是退耕还林前期土壤有机碳密度增加不明显的原因。在植被建成初期,同化作用较强,有机质被大量消耗,土壤有机碳含量会下降<sup>[20-21]</sup>。而退耕 10 多年后植被形成较稳定群落,随着凋落物量增加,土壤有机碳累积量逐步升高(图 2)。目前黄土丘陵区坡耕地大面积退耕还林草已完成 10a 左右,如果以现阶段的情况来评价坡耕地退耕后的土壤碳截流效应,则形成的是一个不明显的土壤碳汇,甚至是一个碳源。退耕还林草的长期固碳效应相当可观,退耕 35a 时,退耕还林、退耕撂荒的碳增汇分别为 16t/hm<sup>2</sup> 和 6t/hm<sup>2</sup>,较坡耕地增加了 3—2 倍。因此在评价黄土丘陵区退耕还林草的土壤固碳效应时,应着眼于长期效应。

土壤有机碳受土地利用类型、利用年限、地形等因素影响较大<sup>[9, 13]</sup>,表现出复杂的时空分布格局<sup>[15, 19]</sup>,明确土壤有机碳时空分布及对环境因素的响应特征,对于评估退耕还林草的土壤固碳效应十分重要。在黄土丘陵区,退耕还林草的土壤固碳效应主要受还林草方式及年限的影响,二者分别可解释 55.6% 和 24.1% 的有机碳变异性;地表凋落物量反映了地上植被生长发育状况,对表层土壤有机碳积累有显著影响,可解释 11.8% 的土壤有机碳变异性。地形因子对土壤固碳也有显著影响,可解释 8.5% 的有机碳变异性。一般认为,特定小地形的小气候具有一定差异,会影响植被生长、形成特定的土壤环境<sup>[16, 22]</sup>,最终影响 SOC 的积累。随着黄

土丘陵区退耕还林还草工程的实施,尤其是林灌草长期生态效应的发挥,原有小地形环境差异的影响也发生变化,不同地形条件下 SOC 积累表现为:陡坡、缓坡地差异减小;阴坡、阳坡差异明显;峁顶逐渐比梁峁坡有利于 SOC 积累。地形造成的 SOC 积累的差异达到了退耕后年土壤碳汇效应的几倍多(表 2、图 3)。因此,评估该区退耕还林的土壤固碳效应时应当充分考虑退耕年限和地形因子的影响。

土体中的有机碳主要分布于 1 m 以上的土层<sup>[23-24]</sup>,因此,已有的土壤固碳研究主要针对上层( $\leq 1$  m)土壤展开,土壤有机碳储量也多用 1 m 以上土层的碳密度为依据估算<sup>[24-26]</sup>。然而,近期一些研究表明,1 m 以下的深层土壤积聚的有机碳十分可观<sup>[24, 27]</sup>,据估计全球林地 1—3 m 土层有机碳储量约占 0—3 m 土体有机碳储量的 1/3<sup>[24]</sup>。在黄土丘陵区砖窑沟小流域,深层(100—200 cm) SOCD 占 0—200 cm 土层的 48.2%<sup>[28]</sup>。在黄土高原沟壑区,深层(100—200 cm) SOCD 占 0—200 cm 土层的 38%—42%<sup>[8]</sup>;黄土高原区全区 300 多个样点的研究结果显示<sup>[2]</sup>,深层(100—200 cm) SOCD 占 0—200 cm 土层的 37%—40% (图 10),与图 9 显示结果一样。可见,黄土丘陵区深层土壤有机碳储量在土壤碳库中占有较大比例。黄土区土壤常常厚达数十米,尽管深层土壤有机碳密度低于表层,但植被恢复与土壤管理措施对深层土壤有机碳储量的影响不容忽视。但从有机碳累积动态来看,深层土壤有机碳密度随植被恢复而增加,因此,在估算该区退耕还林草的土壤固碳量时,应该考虑深层土壤的有机碳储量,否则会严重低估退耕还林草的土壤固碳效应。

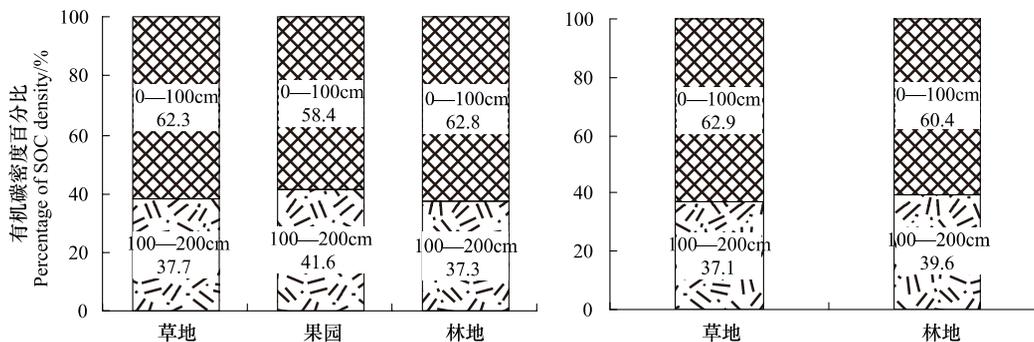


图 10 黄土高原深层土壤有机碳累积量(上左:长武王东沟流域<sup>[8]</sup>;上右:黄土高原地区<sup>[2]</sup>)

Fig. 10 SOC accumulation in deep soil layers on the Loess Plateau (left: results from Wangdonggou watershed<sup>[8]</sup>, Changwu, Shaanxi; right: Loess Plateau region<sup>[2]</sup>)

#### 4 结论

1) 从黄土丘陵区退耕还林草的土壤固碳效应整体而言,相对于坡耕地,退耕还林和退耕撂荒具有显著的土壤碳增汇效应,而退耕还草、退耕还果没有明显土壤碳增汇效应。

2) 以退耕还林工程实施 10a 为界,退耕还林草近期的土壤碳增汇效应不明显,而 10a 后土壤碳增汇效应逐渐明显,退耕还林、退耕还灌、退耕撂荒和坡耕地的固碳效应差异显著。在评估该区退耕还林的土壤固碳效应时应当注重长期固碳效应。

3) 退耕还林草的土壤固碳效应主要受还林草方式及年限的影响,二者分别可解释 55.6% 和 24.1% 的有机碳变异性;地形因子可解释 8.5% 的有机碳变异性。在评估该区退耕还林的土壤固碳效应时应当充分考虑退耕年限和地形因子的影响。

4) 深层(100—200 cm) 土壤有机碳密度占 2 m 土层有机碳密度的 35%—40%,而且随着植被恢复深层土壤有机碳密度显著增加。在估算黄土丘陵区退耕还林土壤固碳效应时应该考虑深层碳累积。如果仅按 0—100 cm 土层深度计算土壤有机碳密度,会严重低估退耕还林草的土壤固碳量。

#### References:

- [1] Zheng J F, Cheng K, Pan G X, Smith P, Li L Q, Zhang X H, Zhen J W, Han X J, Du Y L. Perspectives on studies on soil carbon stocks and the carbon sequestration potential of China. Chinese Science Bulletin, 2011, 56(26): 2162-2173.

- [ 2 ] Liu Z P , Shao M A , Wang Y Q. Effect of environmental factors on regional soil organic carbon stocks across the Loess Plateau region , China. *Agriculture , Ecosystems and Environment* , 2011 , 142( 3/4 ) : 184–194.
- [ 3 ] Xu M X , Liu G B. The characteristics and evolution of soil nutrient in artificial black locust ( *Robinia pseudoacacia* ) forest land in the hilly Loess Plateau. *Plant Nutrition and Fertilizer Science* , 2004 , 10( 1 ) : 40–46.
- [ 4 ] Peng W Y , Zhang K L , Yang Q K. Forecast of Impact of the returning farms to forests on soil organic carbon of Loess Plateau. *Areal Research and Development* , 2006 , 25( 3 ) : 94–99.
- [ 5 ] Xu S , Liu G B , Dai Q H , Li X L , Wu R J. Dynamic changes of soil microbial biomass in the restoration process of shrub plantations in loess hilly area. *Chinese Journal of Applied Ecology* , 2008 , 19( 3 ) : 517–523.
- [ 6 ] Xu S , Liu G B , Dai Q H , Wei W , Hou X L. Evolution of soil microbial biomass in the restoration process of artificial *Robinia pseudoacacia* under erosion environment. *Acta Ecologica Sinica* , 2007 , 27( 3 ) : 909–917.
- [ 7 ] Chang Q R , Yue Q L. Soil fertility quality of artificial forest in the Hilly-gully region of Loess Plateau. *Science of Soil and Water Conservation* , 2008 , 6( 2 ) : 71–74 , 94–94.
- [ 8 ] Guo S L , Che S G , Liang W , Yang Q K. SOC spatial distribution at small Wangdonggou watershed in gully region of the Loess Plateau. *Acta Ecologica Sinica* , 2010 , 30( 1 ) : 52–59.
- [ 9 ] Liu M Y , Chang Q R , Qi Y B , Sun N. Soil organic carbon and particulate organic carbon under different land use types on the Loess Plateau. *Journal of Natural Resources* , 2010 , 25( 2 ) : 218–226.
- [ 10 ] Wang X L , Guo S L , Ma Y H , Huang D Y , Wu J S. Effects of land use type on soil organic C and total N in a small watershed in loess hilly-gully region. *Chinese Journal of Applied Ecology* , 2007 , 18( 6 ) : 1281–1285.
- [ 11 ] Ma Y H , Guo S L , Yang Y L , Wang X L , Yang G. Influence of vegetation types on soil organic C at Yangou catchment in the loess hilly-gully region. *Journal of Natural Resources* , 2007 , 22( 1 ) : 97–105.
- [ 12 ] Wang Y F , Fu B J , Lü Y H , Song C J , Luan Y. Local-scale spatial variability of soil organic carbon and its stock in the hilly area of the Loess Plateau , China. *Quaternary Research* , 2010 , 73( 1 ) : 70–76.
- [ 13 ] Xu M X , Liu G B , Zhao Y G. Effects of land use and environmental factors on the variability of soil quality indicators in hilly Loess Plateau region of China. *Chinese Journal of Applied Ecology* , 2011 , 22( 2 ) : 409–417.
- [ 14 ] Wang S Q , Yu G R , Zhao Q J , Niu D , Chen Q M , Wu Z F. Spatial characteristics of soil organic carbon storage in China's croplands. *Pedosphere* , 2005 , 15( 4 ) : 417–423.
- [ 15 ] Wang Y F , Fu B J , Lü Y H , Song C J , Luan Y. Local-scale spatial variability of soil organic carbon and its stock in the hilly area of the Loess Plateau , China. *Quaternary Research* , 2010 , 73( 1 ) : 70–76.
- [ 16 ] Wang G H. Plant traits and soil chemical variables during a secondary vegetation succession in abandoned fields on the Loess Plateau. *Acta Botanica Sinica* , 2002 , 44( 8 ) : 990–998.
- [ 17 ] Xu Y , Tian J L , Shen H Q , Liu P L. The evaluating method of eco-environment restoration patterns: a case study of the loess hilly-gully region. *Acta Geographica Sinica* , 2004 , 59( 4 ) : 621–628.
- [ 18 ] Liu S Z , Guo S L , Wang X L , Xue B M. Effect of vegetation on soil organic carbon of slope land in gully region of Loess Plateau. *Journal of Natural Resources* , 2005 , 20( 4 ) : 529–536.
- [ 19 ] Song W Y , Guo S L. The spatial distribution of soil organic carbon and its influencing factors in hilly region of the Loess Plateau. *Acta Ecologica Sinica* , 2011 , 31( 6 ) : 1604–1616.
- [ 20 ] Rumpel C , Kögel-Knabner I , Bruhn F. Vertical distribution , age , and chemical composition of organic , carbon in two forest soils of different pedogenesis. *Organic Geochemistry* , 2002 , 33( 10 ) : 1131–1142.
- [ 21 ] Baldock J A , Masiello C A , Gelin Y , Hedges J I. Cycling and composition of organic matter in terrestrial and marine ecosystems. *Marine Chemistry* , 2004 , 92( 1/4 ) : 39–64.
- [ 22 ] Shi H , Shao M G. Soil and water loss from the Loess Plateau in China. *Journal of Arid Environments* , 2000 , 45( 1 ) : 9–20.
- [ 23 ] Eswaran H , van den Berg E , Reich P. Organic carbon in soils of the world. *Soil Science Society of America Journal* , 1993 , 57( 1 ) : 192–194.
- [ 24 ] Jobbágy E G , Jackson R B. The vertical distribution of soil organic carbon and its relation to climate and vegetation. *Ecological Applications* , 2000 , 10( 2 ) : 423–436.
- [ 25 ] Wang Y G , Li Y , Ye X H , Chu Y , Wang X P. Profile storage of organic/inorganic carbon in soil: from forest to desert. *Science of the Total Environment* , 2010 , 408( 8 ) : 1925–1931.
- [ 26 ] Garten C T Jr. Soil carbon storage beneath recently established tree plantations in Tennessee and South Carolina , USA. *Biomass and Bioenergy* , 2002 , 23( 2 ) : 93–102.
- [ 27 ] Fontaine S , Barot S , Barré P , Bdioui N , Mary B , Rumpel C. Stability of organic carbon in deep soil layers controlled by fresh carbon supply.

Nature, 2007, 450(7167): 277-280.

- [28] Jia Y P, Ma Y J. Spatial distribution and reserve of soil total carbon in small watershed in Loess Plateau. Bulletin of Soil and Water Conservation, 2005, 25(5): 17-19, 23-23.

#### 参考文献:

- [1] 郑聚锋, 程琨, 潘根兴, Smith P, 李恋卿, 张旭辉, 郑金伟, 韩晓君, 杜彦玲. 关于中国土壤碳库及固碳潜力研究的若干问题. 科学通报, 2011, 56(26): 2162-2173.
- [3] 许明祥, 刘国彬. 黄土丘陵区刺槐人工林土壤养分特征及演变. 植物营养与肥料学报, 2004, 10(1): 40-46.
- [4] 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. 地域研究与开发, 2006, 25(3): 94-99.
- [5] 薛萑, 刘国彬, 戴全厚, 李小利, 吴瑞俊. 黄土丘陵区人工灌木林恢复过程中的土壤微生物生物量演变. 应用生态学报, 2008, 19(3): 517-523.
- [6] 薛萑, 刘国彬, 戴全厚, 卫伟, 侯喜禄. 侵蚀环境生态恢复过程中人工刺槐林(*Robinia pseudoacacia*)土壤微生物量演变特征. 生态学报, 2007, 27(3): 909-917.
- [7] 常庆瑞, 岳庆玲. 黄土丘陵区人工林地土壤肥力质量. 中国水土保持科学, 2008, 6(2): 71-74, 94-94.
- [8] 郭胜利, 车升国, 梁伟, 杨勤科. 黄土高原沟壑区王东沟小流域土壤有机碳空间分布. 生态学报, 2010, 30(1): 52-59.
- [9] 刘梦云, 常庆瑞, 齐雁冰, 孙宁. 黄土台塬不同土地利用土壤有机碳与颗粒有机碳. 自然资源学报, 2010, 25(2): 218-226.
- [10] 王小利, 郭胜利, 马玉红, 黄道友, 吴金水. 黄土丘陵区小流域土地利用对土壤有机碳和全氮的影响. 应用生态学报, 2007, 18(6): 1281-1285.
- [11] 马玉红, 郭胜利, 杨雨林, 王小利, 杨光. 植被类型对黄土丘陵区流域土壤有机碳氮的影响. 自然资源学报, 2007, 22(1): 97-105.
- [13] 许明祥, 刘国彬, 赵允格. 黄土丘陵区土地利用及环境因子对土壤质量指标变异性的影响. 应用生态学报, 2011, 22(2): 409-417.
- [17] 徐勇, 田均良, 沈洪泉, 刘普灵. 生态重建模式的评价方法——以黄土丘陵区为例. 地理学报, 2004, 59(4): 621-628.
- [18] 刘守赞, 郭胜利, 王小利, 薛宝民. 植被对黄土高原沟壑区坡地土壤有机碳的影响. 自然资源学报, 2005, 20(4): 529-536.
- [19] 孙文义, 郭胜利. 黄土丘陵沟壑区小流域土壤有机碳空间分布及其影响因素. 生态学报, 2011, 31(6): 1604-1616.
- [28] 贾宇平, 马义娟. 黄土高原小流域土壤总碳分布与储量研究. 水土保持通报, 2005, 25(5): 17-19, 23-23.