

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

马昕昕^{1,2}, 许明祥^{2,3*}, 张金³, 邱宇洁², 脱登峰^{2,3}

(1 西北农林科技大学资源环境学院, 陕西杨凌 712100; 2 西北农林科技大学水土保持研究所, 陕西杨凌 712100;

3 中国科学院水利部水土保持研究所, 黄土高原土壤侵蚀与旱地农业国家重点实验室, 陕西杨凌 712100)

摘要: 以黄土丘陵区林地(刺槐和柠条)、撂荒地及坡耕地3种土地利用类型为研究对象, 以浅层土壤(0—100 cm)为对照, 采用有机碳密度分组法对不同利用类型深层土壤(100—400 cm)轻组有机碳含量及其分配比例进行了研究。结果表明, 1) 3种土地利用类型土壤轻组有机碳含量及其分配比例随土壤深度的增加而显著下降, 其含量的变化范围为0.09—1.76 g/kg, 分配比例变化范围为4.19%—32.24%; 各利用类型下亚深层(100—200 cm)、深层(200—400 cm)土壤轻组有机碳含量为浅层的12.4%—39.8%, 分配比例为浅层的28.7%—66.2%; 随土层深度增加, 轻组有机碳含量及其分配比例的降幅在不同土地利用类型下表现为刺槐林地>撂荒地>柠条林地>坡耕地; 2) 各土地利用类型下同一土层轻组有机碳含量及其分配比例不同, 浅层、亚深层和深层土壤轻组有机碳含量及其分配比例表现为林地>撂荒地>坡耕地; 3) 退耕还林还草增加了浅层土壤轻组有机碳含量及其分配比例, 却降低了亚深层、深层土壤轻组有机碳含量及其分配比例, 即与浅层土壤相比, 植被恢复相对增加了深层土壤有机碳的稳定性。

关键词: 黄土丘陵区; 利用类型; 深层土壤; 轻组有机碳

中图分类号: S153.6⁺2

文献标识码: A

文章编号: 1008-505X(2013)04-1366-10

Distribution of light fraction organic carbon under different land use types in the deep soil layer of hilly regions of the Loess Plateau, China

MA Xin-xin^{1,2}, XU Ming-xiang^{2,3*}, ZHANG Jin³, QIU Yu-jie², TUO Deng-feng^{2,3}

(1 College of Resources and Environment, Northwest A&F University, Yangling, Shaanxi 712100, China;

2 Institute of Soil and Water Conservation, Northwest A&F University, Yangling, Shaanxi 712100, China;

3 State Key Laboratory of Soil Erosion and Dry-land Farming on the Loess Plateau/Institute of Soil and Water Conservation, Chinese Academy of Science and Ministry of Water Resource, Yangling, Shaanxi 712100, China)

Abstract: Taking the *Robinia pseudoacacia* woodlands, *Caragana korshinskii* shrublands, abandoned croplands, and slope croplands in hilly regions of the Loess Plateau as study objects, we investigated the contents and distribution ratios of soil light fraction organic carbon (LFOC) in the deep soil layer(100–400 cm) under different land use types by using the method of relative density fractionation with the shallow soil layer(0–100 cm) as the control. The results show that there are significantly declining trends in the content and distribution ratio of soil light fraction organic carbon along with the increase of soil depth under the studied land use types. The contents of soil light fraction organic carbon range from 0.09 to 1.76 g/kg, while the distribution ratios of soil light fraction organic carbon range from 4.19% to 32.24%. Under the three land use types, the contents and distribution ratios of soil light fraction organic carbon in the sub-deep soil(100–200 cm) and deep soil(200–400 cm) of that in the shallow layer(0–100 cm) range from 12.4% to 39.8%, 28.7% to 66.2%, respectively. The declining rates of the soil

收稿日期: 2012-12-10 接受日期: 2013-04-10

基金项目: 国家自然科学基金(41171228, 40971174); 中国科学院战略性先导科技专项(XDA05050504); 中科院知识创新工程重要方向项目(KZCX2-YW-443)资助。

作者简介: 马昕昕(1988—), 女, 河南洛阳人, 硕士研究生, 主要从事土壤质量演变研究。E-mail: maxinxin125@126.com

* 通信作者 Tel: 029-87012411, E-mail: xumx@nwsuaf.edu.cn

light fraction organic carbon contents and distribution ratios are *Robinia pseudoacacia* woodlands > abandoned croplands > *Caragana korshinskii* shrublands > slope croplands. The contents and distribution ratios of soil light fraction organic carbon in the same soil layer among the three land use types are different. The contents and distribution ratios of soil light fraction organic carbon both are forestlands > abandoned croplands > slope lands in these three layers. Both the contents and distribution ratios of soil light fraction organic carbon are increased after the implementation of the Grain for Green project, while those in the sub-deep and deep soils of those in the shallow layer are reduced. Compared with the shallow soil layer, the stability of deep soil organic carbon is enhanced respectively in the process of revegetation.

Key words: hilly regions of the Loess Plateau; land use type; deep soil layer; light fraction organic carbon

土地利用/覆被变化是引起土壤碳通量及储量变化的主要原因之一。黄土高原地区具有疏松深厚的黄土层,加之退耕还林过程中深根性植被的建造,对深层土壤有机碳固存产生了重要影响,人工刺槐林、柠条林地以及撂荒地深层土壤(100—200 cm)有机碳密度占2 m 土体有机碳密度的比例可达35%~40%^[1]。作为影响土壤有机碳固存的重要因素,土壤有机碳的稳定性对评价土壤固碳效应、揭示深层土壤有机碳在生态系统碳循环中的作用尤为重要^[2],研究深层土壤固存有机碳的能力必须要考虑深层土壤有机碳的稳定性。

土壤有机碳的稳定性取决于土壤有机碳不同组分的构成及其与环境的相互作用^[3-4]。物理保护作为土壤有机碳稳定性的重要保护机制,主要通过土壤有机质与土壤中大小粒子结合成复合体或团聚体,使微生物难以靠近有机质进行分解而起到保护作用。因此研究土壤有机碳稳定性,首先要明确土壤有机碳的物理保护作用^[5]。密度分组就是通过物理方法将土壤中与矿质部分结合相对松散的部分,即轻组有机碳(light fraction organic carbon, LFOC)和与表面粘粒矿物相结合、有更好地抵抗微生物降解能力的有机矿物复合物—重组有机碳(heavy fraction organic carbon, HFOC)分离开^[6]。其中,作为与矿质结合相对松散、分解速度相对较快的非保护性组分—轻组有机碳则是研究土地利用变化影响的主要部分^[6]。轻组有机碳含量在土壤总有机碳中所占的比例越大,就意味着有机碳中非保护性的碳越多,土壤有机碳越不稳定,而有利于有机碳的长期积累^[3,6],反之亦然。

国内外对土壤轻组有机碳进行了大量研究^[7-9]。Sollins 等^[10]发现,加利福尼亚森林中,0—10 cm 土层 LFOC 占总有机碳含量的44%~63%,而在10—30 cm 土层降低为28%~46%;吴建国等^[6]研究也显示轻组有机碳分配比例总体随土层

深度增加而降低;在相同土层中,不同土地利用方式轻组有机碳分配比例不同,且差异主要在0—40 cm 土层中。党亚爱等^[11]对黄土高原草地与农田土壤研究结果表明,LFOC 含量及其在土壤有机碳中的分配比例随土层加深而递减,60 cm 以内土层中草地的 LFOC 含量较农田高,60 cm 土层以下差异不显著。尽管黄土高原深根性植被的建造对浅层土壤轻组有机碳产生了较显著的影响,但对深层土壤有机碳组成及其稳定性的影响尚不清楚。

本研究以黄土丘陵区人工林地(刺槐林 *R. pseudoacacia* woodland、柠条林 *C. korshinskii* shrubland)、撂荒地(abandoned cropland)、坡耕地(slope cropland)为研究对象,以0—100 cm 土层作对比,研究各土地利用类型下土壤 LFOC 在下层(100—400 cm)土壤中的分布特征,并对比各利用类型下同一土层 LFOC 占该层有机碳的比例,即 LFOC 的分配比例^[6],揭示植被恢复过程中深层土壤有机碳的稳定性,为区域植被恢复的土壤固碳效应评价提供依据。

1 材料与方法

1.1 研究区概况

研究区位于安塞县纸坊沟(N36°51'30",E109°19'30"),流域面积8.27 km²,年辐射总量492 kJ/cm²,年平均气温8.8℃,≥0℃的积温3733.5℃;年均降水量为549.1 mm,枯水年300 mm左右,丰水年700 mm以上,7~9月的降水量占全年降水量的61.1%,年蒸发量>1463 mm^[5]。该区地形破碎,沟壑纵横,属典型的黄土高原丘陵沟壑区;土壤类型以黄土母质上发育而成的黄绵土为主,抗冲抗蚀能力差^[12],水土流失严重,是生态环境恢复与重建的重点区域^[13-14]。经过30多年水土保持综合治理,有效遏制了该区域水土流失,逐步恢复了退化生态系统,林地面积从1980年的不足5%增加到40%以

上^[5]。该区处于暖温带落叶阔叶林向干草原过渡的森林草原带,常见的植被恢复类型有:以刺槐(*Robinia pseudoacacia*)为主的人工林;以柠条(*Caragana korshinskii*)和沙棘(*Hippophae rhamnoides*)等为主的人工林灌丛以及封禁后形成的黄刺玫(*Rosa xanthina*)、丁香(*Syringa oblata*)、虎棒子(*Ostryopsis davidiana*)和狼牙刺(*Sophora viciifolia*)等天然灌丛;以铁杆蒿(*Artemisia sacrorum*)、芨蒿(*Artemisia giraldii*)、长芒草(*Stipa*

bungeana)、白羊草(*Bothriochloa ischaemum*)、狗尾草(*Setaria viridis*)、披针苔草(*Carex lancoolata*)等为主的撂荒恢复草地^[15]。

1.2 样地选取和土壤样品采集

2011年5月,在纸坊沟流域选择历史背景相同(植被恢复前为坡耕地)、立地条件相似、恢复年限相近、植株长势基本一致的刺槐林、柠条林、撂荒地典型样地及坡耕地各3块,各样地面积约为400~600 m²,记录各样地的植被和地形特征(表1)。

表1 样地概况

Table 1 Characteristics of studied sites

土地利用 Land use	海拔 Altitude (m)	坡位 Slope position	坡度 Slope (°)	坡向 Aspect	主要植被类型 Main plant species	
林地 Woodland woodland	刺槐林 <i>R. pseudoacacia</i>	1195	中 Middle	20	南 South	阿尔泰狗娃花 <i>Heteropappus altaicus</i> , 长芒草 <i>S. bungeana</i> , 铁杆蒿 <i>A. sacrorum</i>
		1202	中下 Lower-middle	35	南偏西 Southwest	阿尔泰狗娃花 <i>H. altaicus</i> , 长芒草 <i>S. bungeana</i> , 益母草 <i>Leonurus japonicu</i> , 茵陈蒿 <i>Artemisia capillaries</i>
		1132	下 Lower	28	南偏西 Southwest	白羊草 <i>Bothriochloa ischaemum</i> , 长芒草 <i>S. bungeana</i>
	柠条林 <i>C. korshinskii</i> shrubland	1232	上 Upper	10	南 South	长芒草 <i>S. bungeana</i> , 铁杆蒿 <i>A. sacrorum</i> , 芦苇 <i>Phragmites australis</i> , 阿尔泰狗娃花 <i>H. altaicus</i>
		1276	中 Middle	25	西 West	铁杆蒿 <i>A. sacrorum</i> , 阿尔泰狗娃花 <i>H. altaicus</i> , 狗尾草 <i>S. viridis</i> , 芨蒿 <i>A. giraldii</i>
撂荒地 Abandoned cropland		1266	中 Middle	20	南偏西 Southwest	铁杆蒿 <i>A. sacrorum</i> , 狗尾草 <i>S. viridis</i>
		1291	中 middle	28	东偏北 Eastwest	茵陈蒿 <i>A. capillaries</i> , 野豌豆 <i>Vicia sepium</i> , 鹅观草 <i>Roegneria kamoji</i> , 早熟禾 <i>Poa pratensis</i>
		1208	中 Middle	30	东 East	铁杆蒿 <i>A. sacrorum</i> , 芨蒿 <i>A. giraldii</i> , 草木樨状黄芪 <i>Astragalus melilotoides</i>
坡耕地 Slope cropland		1278	上 Upper	5	西 West	铁杆蒿 <i>A. sacrorum</i> , 长芒草 <i>S. bungeana</i> , 胡枝子 <i>Lespedeza bicolor</i> , 阿尔泰狗娃花 <i>H. altaicus</i>
		1277	中下 Lower-middle	20	西 West	糜子 <i>Panicum miliaceum</i>
		1226	中上 Upper-middle	30	南 South	黄豆 <i>Glycine max</i>
	1298	中下 Lower-middle	28	南 South	高粱 <i>Sorghum vulgare</i>	

每块样地选 3 个样点,用内径为 5 cm 的土钻分层采 0—400 cm 土样,0—200 cm 每 20 cm 为一层,200—400 cm 每 40 cm 为一层。取样后拣去碎石和根系残体,风干、研磨、过 2 mm 筛。在采样同时,分别

在每个样地挖 400 cm 深的土壤剖面,与土钻取样分层一致,测定每层土壤容重,同时在每层采集 10 cm × 10 cm × 20 cm 大小土体,带回实验室后分拣、清洗植物根系,计算每层土壤的根系生物量(表 2)。

表 2 各样地土壤剖面根系生物量分布特征

Table 2 Characteristics of root biomass in each soil layers in the studied sites

土层 Soil layer (cm)	刺槐林 <i>R. pseudoacacia</i> woodland		柠条林 <i>C. korshinskii</i> shrubland		撂荒地 Abandoned cropland		坡耕地 Slope cropland
	根系生物量 Root biomass (g)	有机碳含量 SOC (g/kg)	根系生物量 Root biomass (g)	有机碳含量 SOC (g/kg)	根系生物量 Root biomass (g)	有机碳含量 SOC (g/kg)	有机碳含量 SOC (g/kg)
0—20	4.30 ± 0.06 ab	5.97 ± 0.63 a	0.82 ± 0.33 ab	6.72 ± 0.45 a	2.61 ± 0.44 a	5.42 ± 1.25 a	3.90 ± 0.28 a
20—40	7.76 ± 7.22 a	3.45 ± 0.49 b	1.15 ± 0.67 ab	2.63 ± 0.28 bcde	0.78 ± 0.00 b	4.14 ± 2.01 b	2.87 ± 0.35 b
40—60	0.44 ± 0.14 b	2.69 ± 0.27 c	0.82 ± 0.52 ab	2.08 ± 0.16 cde	0.60 ± 0.26 b	2.82 ± 0.56 c	2.52 ± 0.44 bc
60—80	7.64 ± 7.38 a	2.41 ± 0.19 cd	0.45 ± 0.47 b	1.99 ± 0.21 de	0.14 ± 0.15 c	2.08 ± 0.68 cd	2.17 ± 0.32 cd
80—100	4.16 ± 3.86 ab	2.26 ± 0.30 cd	0.72 ± 0.37 ab	1.95 ± 0.25 e	0.09 ± 0.02 c	2.19 ± 0.62 cd	2.27 ± 0.38 cd
100—120	0.08 ± 0.00 5 b	2.29 ± 0.07 cd	2.20 ± 3.05 a	2.46 ± 0.21 bcde	0.03 ± 0.009 c	1.77 ± 0.48 cd	2.43 ± 0.46 bed
120—140	0.30 ± 0.20 b	2.15 ± 0.22 cd	0.43 ± 0.31 b	2.43 ± 0.59 bcde	0.04 ± 0.02 c	1.90 ± 0.28 cd	2.09 ± 0.29 cd
140—160	0.30 ± 0.10 b	2.08 ± 0.58 cd	0.22 ± 0.09 b	2.45 ± 0.49 bcde	0.04 ± 0.032 c	1.62 ± 0.23 d	2.04 ± 0.32 cd
160—180	0.19 ± 0.16 b	2.10 ± 0.92 d	0.12 ± 0.09 b	2.64 ± 0.41 bed	0.02 ± 0.00 c	1.46 ± 0.22 d	2.04 ± 0.34 cd
180—200	0.03 ± 0.02 b	1.82 ± 0.41 d	0.87 ± 1.25 ab	2.79 ± 0.19 b	0.07 ± 0.02 c	1.44 ± 0.26 d	2.08 ± 0.31 cd
200—240	0.04 ± 0.01 b	1.81 ± 0.41 d	0.20 ± 0.21 b	3.06 ± 0.10 b	0.03 ± 0.02 c	1.60 ± 0.21 d	1.97 ± 0.15 d
240—280	0.14 ± 0.10 b	1.78 ± 0.17 d	0.14 ± 0.14 b	2.73 ± 0.59 b	0.01 ± 0.007 c	1.59 ± 0.06 d	1.96 ± 0.23 d
280—320	0.14 ± 0.08 b	1.91 ± 0.33 cd	0.15 ± 0.21 b	2.71 ± 0.65 bc	0.01 ± 0.007 c	1.78 ± 0.22 cd	2.02 ± 0.09 cd
320—360	0.04 ± 0.02 b	1.91 ± 0.41 cd	0.31 ± 0.45 b	2.85 ± 0.49 b	0.01 ± 0.007 c	1.90 ± 0.11 cd	2.32 ± 0.13 cd
360—400	0.17 ± 0.13 b	2.03 ± 0.28 d	0.12 ± 0.06 b	2.74 ± 0.22 b	0.01 ± 0.001 c	1.56 ± 0.13 d	2.46 ± 0.20 bed

注(Note): 根系生物量为 10 cm × 10 cm × 20 cm 大小土体中的植物根系量 Root biomass means the amount of plant roots in the soil which size is 10 cm × 10 cm × 20 cm; SOC— Soil organic carbon. 同列不同字母表示不同土层间差异显著($P < 0.05$) Different letters in the same column mean significant differences at the 0.05 level among different soil layers.

1.3 试验方法

土壤有机碳物理分组^[11,16-17]: 称取过 2 mm 筛风干土样 10.0 g 于 100 mL 离心管中,加入 50 mL 比重为 1.7 g/cm³ 的 NaI 溶液,用手轻轻摇动离心管,使土壤与重液混合均匀。混合物在为震速 250 times/min 的往复震荡机上振荡 60 min。分散后的悬浮液在转速 3000 r/min 的离心机上离心 10 min。混合物表面悬浮物倒入 0.45 μm 的微孔滤膜过滤轻组有机质,再向离心管中加入 20 ~ 30 mL NaI 溶液,按同样步骤再次分离、离心和收集重组物质(重复 2 ~ 3 次)。将收集的重组物质用 0.01 mol/L

CaCl₂ 溶液淋洗,再用蒸馏水淋洗直至无 Cl⁻ 反应,并转移到已称重的 25 mL 烧杯中,在 60℃ 下烘干(24 h) 称重。得到重组物质占整个样品质量的比例。研磨过 0.15 mm 筛,重铬酸钾外加热法测定重组土壤有机碳的含量。计算轻组有机碳含量及其分配比例。

土壤有机碳采用重铬酸钾外加热法测定^[18]。

1.4 数据处理

试验数据用 Excel 软件进行预处理,SPSS18.0 统计软件对不同利用类型下不同土层轻组有机碳含量及其分配比例进行 ANOVA 分析,LSD 法进行差异显著性检验。

用 SPSS18.0 统计软件中的线性模型 (general loglinear analysis, GLM) 的方差成分估计模块 (variance components analysis) 计算利用类型、土层、有机碳含量、根系生物量等因子在土壤轻组有机碳含量及其分配比例变异 (方差) 中所占的百分比, 其百分比的大小可反映各因子对土壤轻组有机碳含量及其分配比例的影响程度。将定性的利用类型赋以不同的编码, 使其定量化, 以利用类型、土层、有机碳含量、根系生物量等为随机因子, 用最小二乘无偏估计法计算各因素的方差。

已有的土壤固碳研究主要针对上层 (≤ 100 cm) 土壤展开, 土壤有机碳储量也多用 100 cm 以上土层的碳密度为依据估算, 据此, 本研究将 0—100 cm 作为浅层, 100 cm 以下为深层。另外为了方便研究, 更好地描述结果, 本文将 100—400 cm 土层细分为 100—200 cm、200—400 cm 两个层次, 并定义为亚深层和深层。

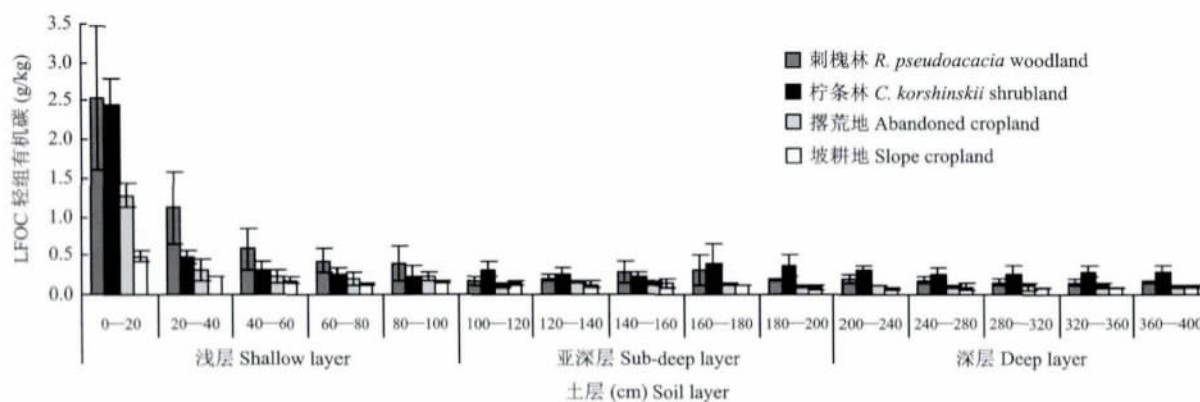


图 1 不同利用类型土壤轻组有机碳 LFOC 含量随土层深度的变化

Fig. 1 The contents of light fraction organic carbon (LFOC) in each soil layer under different land use types

浅土层中, 林地和撂荒地土壤 LFOC 含量 (1.76 g/kg 和 0.86 g/kg) 分别为坡耕地 (0.31 g/kg) 的 5.7 倍、2.8 倍, 三者之间差异显著 ($P < 0.05$, 图 2); 亚深层土壤中, 林地和撂荒地 LFOC 含量分别为坡耕地的 2.4 倍、1.0 倍, 其中柠条的 LFOC 含量 (0.34 g/kg) 与草地 (0.13 g/kg)、农田 (0.12 g/kg) 有显著差异, 而刺槐的 LFOC 含量 (0.25 g/kg) 与撂荒地、坡耕地无显著差异; 深土层中, 林地和撂荒地 LFOC 含量分别为坡耕地的 2.5 倍、1.2 倍, 其中刺槐、柠条 LFOC 含量分别为 0.17 g/kg、0.28 g/kg, 均与撂荒地 (0.10 g/kg)、坡耕地 (0.09 g/kg) 呈显著差异。这表明, 在 0—400 cm 剖面上, 林地、撂荒地土壤的 LFOC 含量整体较坡耕地高, 三种利用类

2 结果与分析

2.1 不同利用类型土壤中轻组有机碳 (LFOC) 含量的剖面分布特征

林地 (刺槐、柠条)、撂荒地、坡耕地三种利用类型下土壤轻组有机碳含量随土层加深呈递减趋势 (图 1), 且亚深层 (100—200 cm)、深层土壤 (200—400 cm) LFOC 含量与浅层土壤有显著差异 ($P < 0.05$, 图 2)。其中, 刺槐林地亚深层和深层土壤 LFOC 含量分别为浅层 (0—100 cm) 土壤的 14.2%、9.7%。柠条林地亚深层和深层土壤 LFOC 含量分别为浅层的 19.7%、16.3%; 撂荒地亚深层和深层土壤 LFOC 含量分别为其浅层的 14.7% 和 12.4%; 坡耕地亚深层和深层土壤 LFOC 含量分别为浅层的 39.8%、29.0%。几种利用类型下亚深层土壤 LFOC 含量与深层之间无显著差异 ($P > 0.05$)。

型土壤的 LFOC 含量在 0—400 cm 剖面上变化为林地 > 撂荒地 > 坡耕地。

2.2 不同利用类型土壤中轻组有机碳 (LFOC) 分配比例的剖面分布

LFOC 分配比例表示轻组有机碳在土壤总有机碳中所占的比例。三种土地利用类型土壤 LFOC 分配比例随土层深度增加而降低 (图 3)。林地、撂荒地、坡耕地亚深层 (100—200 cm)、深层土壤 (200—400 cm) 土壤 LFOC 分配比例与浅层 (0—100 cm) 差异显著, 且坡耕地、撂荒地亚深层、深层之间也达显著差异水平 ($P < 0.05$, 图 4)。其中, 刺槐林地亚深层、深层土壤 LFOC 分配比例分别约为浅层的 36.2%、28.7%; 柠条林地亚深层、深层土壤 LFOC

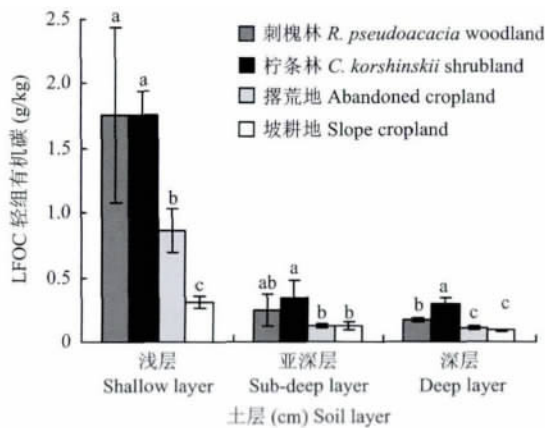


图2 不同利用类型土壤 LFOC 含量的剖面分布

Fig. 2 Distributions of LFOC content in soil profiles under different land use types

[注 (Note): 柱上不同字母表示不同土地利用类型间差异显著 ($P < 0.05$) Different letters above the bars mean significant differences at the 0.05 level among different land use types.]

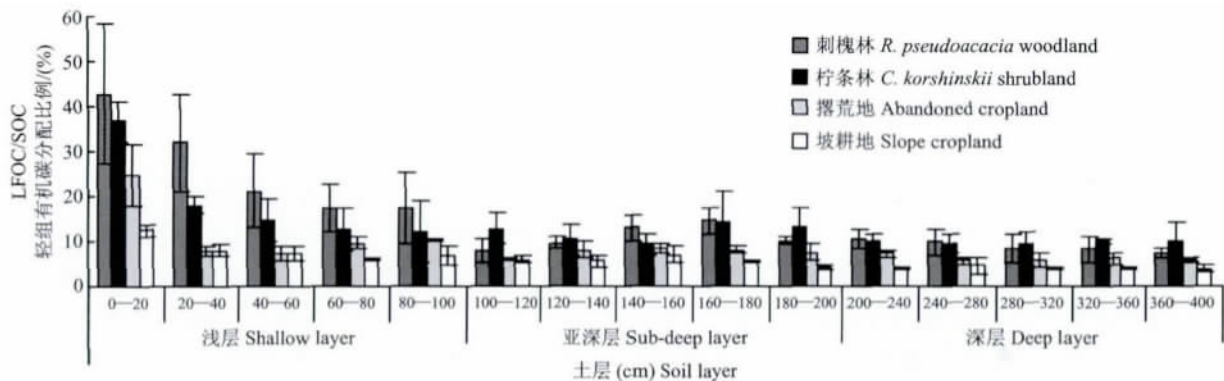


图3 不同利用类型土壤 LFOC 分配比例随土层深度的变化

Fig. 3 The distribution ratio of LFOC in each soil layer under different land use types

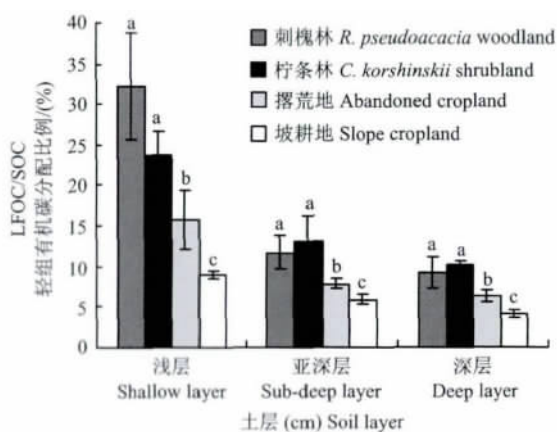


图4 不同利用类型土壤 LFOC 分配比例剖面分布

Fig. 4 LFOC/SOC distribution in soil profiles under different land use types

[注 (Note): 柱上不同字母表示不同利用类型间差异显著 ($P < 0.05$) Different letters above the bars mean significant differences at the 0.05 level among different land use types.]

分配比例分别约为浅层的 54.6%、42.8%; 撂荒地亚深层、深层土壤分别约为浅层的 49.8%、39.5%; 而坡耕地亚深层、深层土壤分别约为浅层的 66.2%、47.1%。可见, 土壤 LFOC 分配比例随土层加深的降幅大小为刺槐 > 撂荒地 > 柠条 > 坡耕地。

从图 4 可以看出, 在浅土层, 林地 LFOC 平均分配比例为 28.0%, 与撂荒地 (15.8%) 和坡耕地 (8.9%) 三者之间差异显著; 亚深层土壤中, 林地 (12.3%)、撂荒地 (7.8%) 和坡耕地 (5.9%) 三者亦差异显著; 与其相似, 深土层中, 林地 (9.7%)、撂荒地 (6.2%) 和坡耕地 (4.2%) 之间 LFOC 分配比例也有显著差异。这表明, 在 0—400 cm 剖面上, 林地、撂荒地土壤 LFOC 分配比例整体较坡耕地高。不同土地利用类型下 LFOC 分配比例与 LFOC 含量的分布规律相似, 即为林地 > 撂荒地 > 坡耕地。

2.3 轻组有机碳 (LFOC) 含量及其分配比例的影响因素

用一般线性模型中的方差成分估计模块, 计算了各因子对土壤轻组有机碳含量及其分配比例变异性的贡献 (表 3)。结果表明, 黄土丘陵区土壤轻组有机碳 (LFOC) 含量及其分配比例主要受土层的影响, 可分别解释 62.7% 和 44.9% 的变异性; 有机碳含量、根系生物量和容重对轻组有机碳含量及其分配比例的影响也较大, 可分别解释 9.3% ~ 13.9% 和 13.1% ~ 17.3% 的变异性; 利用类型对轻组有机碳含量及其分配比例的影响相比较前三个因子较小, 可分别解释 3.3% 和 10.2% 的变异性。可见, 0—400 cm 剖面上, 土层对土壤轻组有机碳的分布具有较大的影响, 估算黄土丘陵区土壤固碳效应时应充分考虑深层土壤碳的稳定性。同时, 根系对土

表 3 不同因子在土壤轻组有机碳含量及其分配比例变异(方差)中的贡献

Table 3 Contribution of different factors in the variation of soil LFOC contents and LFOC/SOC

轻组有机碳含量及其分配比例 Content and distribution ratio of soil LFOC		方差来源 Variance source				
		利用类型 Land use type	土层 Soil layer	有机碳含量 SOC	根系生物量 Root biomass	容重 Soil bulk density
轻组有机碳 LFOC	方差 Variance	0.011	0.208	0.036	0.046	0.031
	占总方差的比例(%) Variance% to total variance	3.3	62.7	10.8	13.9	9.3
轻组有机碳 分配比例 LFOC/SOC	方差 Variance	0.001	0.004	0.001	0.002	0.001
	占总方差的比例(%) Variance% to total variance	10.2	44.9	14.4	17.3	13.1

注(Note): 用 GLM 模型进行方差成分估计 Estimating variance component in GLM model, $n = 180$.

壤轻组有机碳的分布也有较大的影响,尤其是深根性植被深层土壤的固碳效应是不可忽视的一部分。

3 讨论

作为巨大的碳库,土壤积累和稳定有机碳的能力受到极大关注^[19]。近年来的植被恢复对土壤有机碳产生了深刻的影响,本研究探索深层土壤有机碳作为碳汇能力的持续性问题,可为深层土壤作为可认证的“碳汇”提供科学依据。

而解释这些问题的关键在于将不同存在形态的有机碳分开来研究。化学分组方法对土壤有机碳的结构具有破坏性,不能客观地解释土壤有机碳库的稳定性。因此本研究采用了对有机碳原有结构破坏较小的物理分组法,能客观反映土壤有机碳的结构和功能^[21],其中轻组有机碳(LFOC)对气候条件和土地利用较为敏感,可作为评价土壤碳库变化的指标^[22]。

由于植被根系分布、生物活动、人工扰动等影响不同,LFOC在土壤剖面中的分布也存在差异^[6,23],与有关浅层土壤LFOC的研究^[6,11]结果相似,本研究结果显示,林地(刺槐、柠条)、撂荒地、坡耕地三种利用类型下,土壤中的LFOC含量在0—400 cm剖面上随土层深度增加而显著下降,变化范围为0.09 ~ 1.76 g/kg,其中,亚深层(100—200 cm)、深层(200—400 cm)土壤LFOC含量占浅层(0—100) LFOC含量的比值为坡耕地 > 柠条林地 > 撂荒地 > 刺槐林地,即LFOC含量随土层深度的增加其降幅的大小为刺槐林地 > 撂荒地 > 柠条林地 > 坡耕地。可见,三种利用类型下随土层深度的增加,土壤中不稳定、易变化的碳含量逐渐降低。另外,Boone^[24]的研究结果表明,地上凋落物和地下根系

是土壤轻组碳的主要来源,而耕作本身会减少土壤轻组碳含量^[6],本研究也得到相似结果。对比不同利用类型间相同土层,发现浅层(0—100 cm)中,林地(刺槐、柠条)、撂荒地的LFOC含量分别是坡耕地的5.7倍、2.8倍;亚深层(100—200 cm)中,林地、撂荒地分别是坡耕地的2.4倍和1.0倍;深层(200—400 cm)中,林地、撂荒地分别约为坡耕地的2.5倍、1.2倍。说明黄土高原退耕还林还草过程对土壤剖面轻组有机碳的分布产生了显著的影响,深根性植被(刺槐、柠条等)增加了土壤剖面的轻组有机碳含量。由于在亚深层、深层土壤中,柠条的细根较刺槐多(表2),张金等^[25]的研究也表明,与刺槐相比,柠条深层SOC储量随植被恢复年限持续增加,且与其根系生物量的分布相吻合,因此柠条林地中轻组有机碳在剖面上分布的降幅较刺槐林小。撂荒地仅有草本植物,根系较浅,因此较大程度地增加了浅层土壤轻组有机碳含量,而对深层(100—400 cm)土壤则没有显著影响。

不同植被、不同土层深度根系分布的差异,影响了土壤有机碳输入量,使总有机碳含量不同,进而影响了LFOC的分配比例^[26],使LFOC分配比例在土壤剖面上表现出明显的层次性^[27-28]。吴建国等^[6]研究表明,LFOC分配比例随土层深度的增加而递减。本研究也得到相似结果:土层和根系生物量对土壤LFOC含量及其分配比例变异性具有较大影响(表3)。土壤LFOC分配比例变化范围为4.19% ~ 32.24%,亚深层、深层土壤LFOC分配比例(与浅层相比)的大小为坡耕地 > 柠条林地 > 撂荒地 > 刺槐林地,这表明3种利用类型下,与浅层土壤相比,亚深层、深层土壤有机碳较稳定,且亚深层、深层土壤有机碳稳定性表现为刺槐 > 撂荒地 >

柠条 > 坡耕地。

不同利用类型下 LFOC 含量及其分配比例在剖面上的分布受多种因素的影响(表 3),其中土壤深度变化的影响最大,使得 LFOC 含量及其分配比例在土壤剖面上的分布具有显著特点(图 5),因此估算本区域土壤有机碳固存量时有必要将深层土壤有机碳考虑在内。退耕还林还草过程减小了 0—400 cm 剖面土壤容重,增加了土壤有机碳含量,而且也使土壤中根系生物量的分布发生了变化,这三者的变化同样也对轻组有机碳含量及其分配比例产生一定的影响。与轻组有机碳不同,重组有机碳(HFOC)作为被保护的碳而不易变化,更易被固存在土壤中长期积累,其含量及分配比例从另一方面反映了土壤有机碳的稳定性。黄土丘陵区植被恢复过程对浅层、亚深层的 HFOC 含量并没有产生显著

影响,却使深层土壤中柠条林的 HFOC 含量有显著提高($P < 0.05$)、撂荒地显著降低($P > 0.05$) (图 6a)。林地(刺槐、柠条)的亚深层、深层土壤 HFOC 含量分别约为浅层的 78.5%、80.9%,撂荒地亚深层、深层约为浅层的 47.3%、48.9%,坡耕地亚深层、深层约为浅层的 77.5%、79.7%。植被恢复过程使三个层次上的 HFOC 分配比例均显著降低。另外林地亚深层、深层的 HFOC 分配比例分别约为浅层的 1.11、1.13 倍,撂荒地亚深层、深层分别约为浅层的 72.6%、78.5%,坡耕地亚深层、深层分别约为 1.03、1.04 倍(图 6b)。可见,植被恢复相对增加了深根性植被(林地)的深层土壤 HFOC 含量及其分配比例,而对于草本植被(撂荒地),由于其根系集中在浅层土壤,所以还草过程可能对浅层的影响较大,而使其亚深层、深层土壤的 LFOC 含量

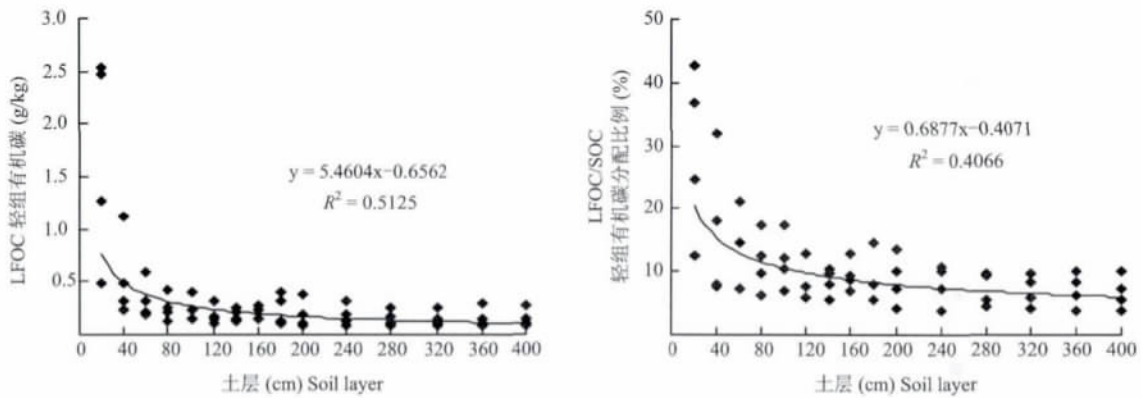


图 5 轻组有机碳(LFOC)及其与土壤有机碳的比例(LFOC/SOC)与土层的相关关系

Fig. 5 Correlations between LFOC, LFOC/SOC and soil layer

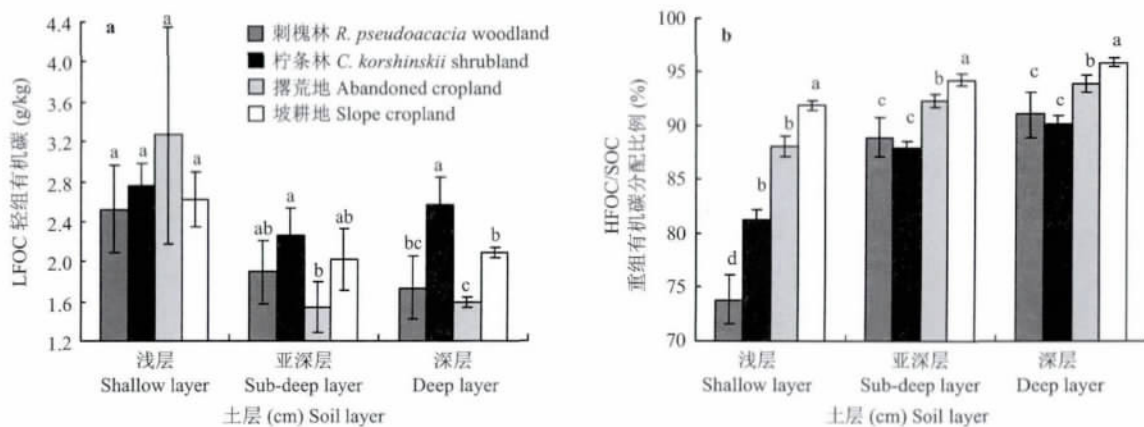


图 6 不同利用类型土壤重组有机碳(HFOC)含量及其与分配比例的剖面分布

Fig. 6 The distributions of soil heavy fraction organic carbon(HFOC) content and HFOC/SOC in soil profiles under different land use types

[注(Note): 柱上不同字母表示不同利用类型间差异显著($P < 0.05$) Different letters above the bars mean significant differences at the 0.05 level among different land use types.]

及其分配比例反而减小。

综上所述,黄土丘陵区退耕还林还草增加了浅层(0—100 cm)土壤轻组有机碳(LFOC)含量及其分配比例,却降低了亚深层、深层土壤 LFOC 的含量及其分配比例,同时也增加了林地亚深层、和深层土壤重组有机碳(HFOC)的含量及其分配比例,即与浅层土壤相比较,退耕还林过程相对增加了深层土壤有机碳的稳定性。

4 结论

1) 黄土丘陵区林地、撂荒地和坡耕地土壤轻组有机碳(LFOC)含量及其分配比例随土壤深度的加深而显著下降,其变化范围分别为 0.09 ~ 1.76 g/kg、4.19% ~ 32.24%,两者随土层深度增加的降幅为刺槐 > 撂荒地 > 柠条 > 坡耕地;各利用类型下亚深层、深层土壤 LFOC 含量及其分配比例分别为浅层的 12.4% ~ 39.8%、28.7% ~ 66.2%。

2) 土地利用类型对不同土层 LFOC 含量及其分配的影响不同。浅层土壤中,林地、撂荒地的 LFOC 含量分别是坡耕地的 5.7 倍、2.8 倍,分配比例约为坡耕地的 3.2 倍、1.8 倍;亚深层中,林地、撂荒地的 LFOC 含量分别是坡耕地的 2.4 倍、1.0 倍,分配比例约为坡耕地的 2.1 倍、1.3 倍;深层土壤中,林地、撂荒地的 LFOC 含量分别约为坡耕地的 2.5 倍、1.2 倍,分配比例约为坡耕地的 2.3 倍、1.5 倍。

3) 黄土丘陵区 LFOC 含量及其分配比例主要受土层的影响,可分别解释 62.7% 和 44.9% 的变异性;其次有机碳含量、根系生物量和容重对 LFOC 含量及其分配比例的影响也较大,而利用类型对 LFOC 含量及其分配比例的影响相对较小。黄土丘陵区退耕还林还草不仅显著增加了浅层(0—100 cm)土壤 LFOC 的含量及其分配比例,同时对深层(>100 cm)土壤的有机碳也产生了深刻的影响。

参考文献:

- [1] 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[J]. 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[J]. Acta Ecol. Sin., 2012, 32(17): 5405-5415.
- [2] Fontaine S, Barot S, Barré P *et al.* Stability of organic carbon in deep soil layers controlled by fresh carbon supply[J]. Nature, 2007, 450(7167): 277-280.
- [3] 吴庆标,王效科,郭然. 土壤有机碳稳定性及其影响因素

[J]. 土壤通报, 2005, 36(5): 743-747.

Wu Q B, Wang X K, Guo R. Soil organic carbon stability and influencing factors[J]. Chin. J. Soil Sci., 2005, 36(5): 743-747.

- [4] 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.
- [5] Zhang J B, Song C C, Wang S M. Dynamic of soil organic carbon and its fractions after abandonment of cultivated wetlands in northeast China[J]. Soil Till. Reas., 2007, 96(1-2): 350-360.
- [6] 吴建国,张小全,王彦辉,徐德应. 土地利用变化对土壤物理组分中有机碳分配的影响[J]. 林业科学, 2002, 38(4): 19-29.
Wu J G, Zhang X Q, Wang Y H, Xu D Y. The effects of land use changes on the distribution of soil organic carbon in physical fraction of soil[J]. Sci. Silvae Sin., 2002, 38(4): 19-29.
- [7] Six J, Elliott E T, Paustian K, Doran J W. Aggregation and soil organic matter accumulation in cultivated and native grassland soils[J]. Soil Sci. Soc. Amer. J., 1998, 62(5): 377-367.
- [8] 韩晓日,苏俊峰,谢芳,等. 长期施肥对棕壤有机碳及各组分的影响[J]. 土壤通报, 2008, 39(4): 730-733.
Han X R, Su J F, Xie F *et al.* Effect of long-term fertilization on organic carbon and the different soil organic fraction of brown earth[J]. Chin. J. Soil Sci., 2008, 39(4): 730-733.
- [9] 武天云, Schoenau J J, 李凤民, 等. 土壤有机质概念和分组技术研究进展[J]. 应用生态学报, 2004, 15(4): 2203-2209.
Wu T Y, Schoenau J J, Li F M *et al.* Concepts and relative analytical techniques of soil organic matter[J]. Chin. J. Appl. Ecol., 2004, 15(4): 2203-2209.
- [10] Sollions P, Spycher G, Glassman C A. Net nitrogen mineralization from light and heavy-fraction forest soil organic matter[J]. Soil Biol. Biochem., 1984, 16(1): 31-37.
- [11] 党亚爱,王国栋,李世清,邵明安. 黄土高原典型土壤剖面有机碳物理组分分布特征[J]. 自然资源学报, 2011, 26(11): 1890-1899.
Dang Y A, Wang G D, Li S Q, Shao M A. Distribution characteristics of soil organic carbon fractions of the typical soil types on the Loess Plateau[J]. J. Nat. Resou., 2011, 26(11): 1890-1899.
- [12] Liu G B. Soil conservation and sustainable agriculture on the Loess Plateau: Challenges and prospects[J]. Ambio, 1999, 28(8): 663-668.
- [13] 徐勇,田均良,沈洪泉,等. 生态重建磨蚀的评价方法—以黄土丘陵区为例[J]. 地理学报, 2004, 59(4): 621-628.
Xu Y, Tian J L, Shen H Q *et al.* The evaluating method of eco-environment restoration patterns: a case study of the Loess Hilly-gully Region[J]. Acta Geogr. Sin., 2004, 59(4): 621-628.
- [14] 侯军岐,张社梅. 黄土高原地区退耕还林还草效果评价[J]. 水土保持通报, 2002, 22(6): 29-31.
Hou J Q, Zhang S M. Effects evaluation of sonversing farmland to forest or grass land in Loess Plateau Area[J]. Bull. Soil Water

- Conserv. ,2002 ,22(6) : 29-31.
- [15] Chen L ,Gong J ,Fu B *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.
- [16] Janzen H H ,Campbell C A ,Brandt S A *et al.* Light-fraction organic matter in soils from long-term crop rotations [J]. Soil Sci. Soc. Am. J. ,1992 ,56(6) : 1799-1806.
- [17] 张文菊,吴金水,肖和艾,童成立. 三江平原典型湿地剖面有机碳分布特征与积累现状[J]. 地球科学进展,2004 ,19(4) : 558-563.
Zhang W J ,Wu J S ,Xiao H A ,Tong C L. Profile distribution characteristic and accumulation of organic carbon in typical wetlands in Sanjiang Plain[J]. Adv. Earth Sci. ,2004 ,19(4) : 558-563.
- [18] 刘光崧,蒋能慧,张连第,等. 土壤理化分析与剖面分布[M]. 北京: 中国标准出版社,1996.
Liu G S ,Jiang N H ,Zhang L D *et al.* Soil physical and chemical analysis & description of soil profiles [M]. Beijing: China Standards Press ,1996.
- [19] Carter M R ,Gregorich E G. Carbon and nitrogen storage by deep-rooted tall fescue (*Lolium arundinaceum*) in the surface and subsurface soil of a fine sandy loam in eastern Canada [J]. Agric. Ecosyst. Environ. ,2010 ,136(1-2) : 125-132.
- [20] 方精云,陈安平. 中国森林植被碳库的动态变化及其意义[J]. 植物学报,2001 ,43(9) : 967-973.
Fang J Y ,Chen A P. Dynamic forest biomass carbon pools in China and their significance[J]. Acta Bot. Sin. ,2001 ,43(9) : 967-973.
- [21] Paul E A ,Collins H P ,Leavitt S W. Dynamics of resistant soil carbon of midwestern agricultural soils measured by naturally occurring ^{14}C abundance [J]. Geoderma ,2001 ,104(3-4) : 239-256.
- [22] 张金波,宋长春. 土地利用对土壤碳库影响的敏感性评价指标[J]. 生态环境,2003 ,12(4) : 500-504.
- Zhang J B ,Song C C. The sensitive evaluation indicators of effects of land-use change on soil carbon pool [J]. Ecol. Environ. ,2003 ,12(4) : 500-504.
- [23] Dalal R C ,Mayer R J. Long-term trends in fertility of soils under conditions cultivation and cereal cropping in southern Queensland VI: Loss of total nitrogen from different particle-size and density fractions[J]. Austr. J. Soil Res. ,1987 ,25(4) : 83-93.
- [24] Boone R D. Light fraction soil organic matter: Origin and contribution to net nitrogen mineralization [J]. Soil Biol. Biochem. ,1994 ,26(11) : 1459-1468.
- [25] 张金,许明祥,王征,等. 黄土丘陵区植被恢复对深层土壤有机碳储量的影响[J]. 应用生态学报,2012 ,23(10) : 2721-2727.
Zhang J ,Xu M X ,Wang Z *et al.* Effects of revegetation on organic carbon storage in deep soils in hilly Loess Plateau region of Northwest China[J]. Chin. J. Appl. Ecol. ,2012 ,23(10) : 2721-2727.
- [26] Cadisch G ,Imhof H ,Urquiaga S *et al.* Carbon turnover (^{13}C) and nitrogen mineralization potential particulate light soil organic matter after rainforest clearing[J]. Soil Biol. Biochem. ,1996 ,28(12) : 1555-1567.
- [27] 谢锦升,杨玉盛,解明曙,等. 植被恢复对退化红壤轻组有机质的影响[J]. 土壤学报,2008 ,45(1) : 170-175.
Xie J S ,Yang Y S ,Xie M S *et al.* Effects of vegetation restoration on soil organic matter of light fraction in eroded degraded red soil in subtropics of China[J]. Acta Pedol. Sin. ,2008 ,45(1) : 170-175.
- [28] 杨玉盛,刘艳丽,陈光水,等. 格氏栲天然林与人工林土壤非保护性有机碳含量及分配[J]. 生态学报,2004 ,24(1) : 1-8.
Yang Y S ,Liu Y L ,Chen G S *et al.* Content and distribution of unprotected soil organic carbon in natural and monoculture plantation forests of *Castanopsis kawakamii* in subtropical China [J]. Acta Ecol. Sin. ,2004 ,24(1) : 1-8.