

# 黄土丘陵区不同退耕还林地土壤有机碳、氮密度变化特征

赵发珠<sup>1,2</sup>, 韩新辉<sup>2,3</sup>, 杨改河<sup>2,3</sup>, 佟小刚<sup>4</sup>, 康乐<sup>1</sup>, 杜约翰<sup>2,3</sup>

(1. 西北农林科技大学 林学院, 陕西 杨凌 712100; 2. 陕西省循环农业工程技术研究中心, 陕西 杨凌 712100;

3. 西北农林科技大学 农学院, 陕西 杨凌 712100; 4. 西北农林科技大学 资源环境学院, 陕西 杨凌 712100)

**摘要:**探讨了黄土丘陵区退耕种植 10~40 a 的柠条、侧柏及刺槐林地 0—60 cm 不同土层有机碳及全氮密度随退耕年限及在土层分布上的变化特征。结果表明:不同土层相比,退耕栽植柠条、侧柏、刺槐 10~40 a 后 0—20 cm 土层有机碳密度平均比 20—60 cm 增加 4.20, 6.87, 4.46 Mg/hm<sup>2</sup>; 0—20 cm 土层的全氮密度比 20—60 cm 平均增加 0.08, 0.02, 0.07 Mg/hm<sup>2</sup>。与坡耕地比较, 0—20 cm 土层在退耕 30 a 中固碳速率为侧柏[0.33 Mg/(hm<sup>2</sup>·a)]>刺槐[0.28 Mg/(hm<sup>2</sup>·a)]>柠条[0.17 Mg/(hm<sup>2</sup>·a)], 固氮速率则为刺槐[0.03 Mg/(hm<sup>2</sup>·a)]>侧柏[0.02 Mg/(hm<sup>2</sup>·a)]>柠条[0.01 Mg/(hm<sup>2</sup>·a)], 且碳氮固定速率均显著高于深层土壤。10~30 a 不同退耕还林地增加的有机碳、氮平均分别有 57% 和 51% 来自 0—20 cm 的土层。不同退耕还林地土壤 C/N 随土层深度的增加而减小。综上, 退耕还林土壤表现出显著的提升土壤碳氮的效应, 且以侧柏林地固碳能力较佳, 刺槐林地固氮效果较好。

**关键词:**退耕还林; 土壤有机碳; 土壤全氮; 黄土丘陵区

中图分类号: Q948.113

文献标识码: A

文章编号: 1005-3409(2012)04-0043-05

## Change Characteristics of Density of Soil Organic Carbon and Nitrogen under Land Shifted into Forestland in Hilly Loess Region

ZHAO Fa-zhu<sup>1,2</sup>, HAN Xin-hui<sup>2,3</sup>, YANG Gai-he<sup>2,3</sup>, TONG Xiao-gang<sup>4</sup>, KANG Le<sup>1</sup>, DU Yue-han<sup>2,3</sup>

(1. College of Forestry, Northwest A&F University, Yangling, Shaanxi 712100, China;

2. The Research Center of Recycle Agricultural Engineering and Technology of Shaanxi Province,

Yangling, Shaanxi 712100, China; 3. College of Agronomy, Northwest A&F University, Yangling, Shaanxi

712100, China; 4. College Resources and Environment, Northwest A&F University, Yangling, Shaanxi 712100, China)

**Abstract:** This study was conducted to determine the change characteristics of the density of soil organic carbon and total nitrogen and distribution in soil layers of 0—60 cm with 10~40 years of conversion of cropland to forest in Hilly Loess Region. The results showed that: compared different soil layers in forestland shifted from cropland for 10~40 years, the average organic carbon density in 0—20 cm soil layer of caragana, orientalis and robinia was 4.20, 6.87, 4.46 Mg/hm<sup>2</sup>, which was higher than that in 20—60 cm soil layer in caragana, orientalis and robinia forest land, respectively, and average nitrogen density was increased 0.08, 0.02, 0.07 Mg/hm<sup>2</sup>, which was higher than that in 20—60 cm soil layer, respectively. Compared with slope farmland, the organic carbon sequestration rate in 0—20 cm soil layer within 30 years of conversion of cropland to forestland follow the order of orientalis (0.33 Mg·hm<sup>-2</sup>·a<sup>-1</sup>)>robinia (0.28 Mg·hm<sup>-2</sup>·a<sup>-1</sup>)>caragana (0.17 Mg·hm<sup>-2</sup>·a<sup>-1</sup>), and nitrogen sequestration rate follow the order of robinia (0.03 Mg·hm<sup>-2</sup>·a<sup>-1</sup>)>orientalis (0.02 Mg·hm<sup>-2</sup>·a<sup>-1</sup>)>caragana (0.01 Mg·hm<sup>-2</sup>·a<sup>-1</sup>). The carbon and nitrogen sequestration rate of 0—20 cm soil layer was higher than that in deep soil layer. Average 57% of increased soil organic carbon and 51% of increased nitrogen were contributed by 0—20 cm soil during 10~30 years of conversion of cropland to forest. The ratio of C/N decreased with soil depth under all lands of conversion of cropland to forest. In conclusion, conversion of cropland to forestland could significantly increase soil carbon and nitrogen stocks, and orientalis was better for carbon sequestration and robinia was better for nitrogen sequestration.

**Key words:** conversion of cropland to forestland; soil organic carbon; soil nitrogen; Hilly Loess Region

收稿日期: 2012-01-15

修回日期: 2012-02-24

资助项目: 国家自然科学基金(30971695); 教育部高等学校博士点基金(20090204120038); 陕西省自然科学基金(2010JQ5001)

作者简介: 赵发珠(1987—), 男, 青海湟源县人, 硕士研究生, 主要从事农业生态研究。E-mail: zhaofazhu@126.com

通信作者: 杨改河(1957—), 男, 陕西铜川人, 教授, 博士生导师, 主要从事生态农业与循环农业技术研究。E-mail: ygh@nwsuaf.edu.cn

土壤有机碳(soil organic carbon, SOC)和氮不仅是土壤肥力的核心物质<sup>[1-3]</sup>,也是生态系统中极其重要的生态因子,二者的长期积累不仅影响整个生态系统的稳定性和持续性,对全球碳氮循环及缓解温室效应也有深远影响<sup>[4-5]</sup>。退耕还林作为我国一项宏伟的生态造林工程,其通过植被恢复改变了土壤内部及与植物群落的养分元素流动状况,必然引起土壤碳氮数量和品质的变化。因此,明确退耕还林下土壤碳氮的动态变化特征及碳氮耦合作用对认知植被恢复下土壤固存碳氮、提升土壤质量及改良生态环境的效应和机制具有重要意义。

目前,我国学者在退耕还林对土壤有机碳和全氮影响方面做了大量研究<sup>[6-9]</sup>,关于人工林地土壤有机碳变化还存在一些分歧<sup>[10-12]</sup>。在土壤氮研究方面,众多学者从土壤可溶性氮的含量特征及氮矿化过程等入手,揭示了不同植被类型土壤对氮累积的差异<sup>[13-14]</sup>,结果显示,植被恢复下土壤氮也会出现明显变化。但这些研究多将植被恢复中土壤碳、氮的数量变化及其空间分布特征分开进行独立研究<sup>[15-16]</sup>,且缺乏对长期植被恢复下土壤碳、氮累积特征的研究。众所周知,土壤碳氮交互作用,特别是 C/N 的变化可以反映植物养分利用效率、控制植物碳生产与养分吸收、植物向土壤归还有机质与养分的过程,对生态系统中碳氮利用、储存和转移起着决定性的作用<sup>[17-18]</sup>。因此,本研究以黄土丘陵区安塞县典型退耕区不同年限退耕还林地研究对象,分析 10~40 a 长期不同退耕还林地土壤有机碳、氮在时间序列和土层空间分布上的变化特征,以明确退耕还林土壤截留碳氮效应。旨在为不同退耕类型土壤碳、氮累积机理研究及生态固定碳、氮措施选择提供依据。

## 1 材料与方法

### 1.1 研究区概况

研究区位于黄土高原腹地安塞县境内(东经

105°05′44″,北纬 36°30′45″),属于暖温带半干旱气候,年均降雨量为 535 mm,干燥度 1.48,年均气温 8.8℃,无霜期 160 d 左右,年总辐射量为 552.6 kJ/cm<sup>2</sup>。地貌类型为典型丘陵沟壑区,土壤以黄土母质发育的黄绵土为主,约占总面积的 95%<sup>[19]</sup>。土壤瘠薄、土质疏松、有机质含量低、抗侵蚀性能差,是我国西北典型的生态环境脆弱区。自 20 世纪 90 年代末开始,以退耕还林还草为核心的生态环境恢复工程在西部大规模展开,安塞县被列为退耕还林的重点示范区域之一,布置有刺槐(*Robinia pseudoacacia*),侧柏(*Platycladus orientalis*),柠条(*Caragana Kintermedia*),沙棘(*Hippophae rhamnoides*)等典型退耕还林模式。同时,该地区早在 70 年代就开始有退耕还林试验区和示范区,这些为本研究提供了良好的平台。

### 1.2 样品采集及测定

2010 年 9 月,于研究区选择退耕还林年限为 30, 20, 10 a 的侧柏林地(PO<sub>30</sub>, PO<sub>20</sub>, PO<sub>10</sub>), 40, 30, 10 a 的刺槐林地(RP<sub>40</sub>, RP<sub>30</sub>, RP<sub>10</sub>)及 40, 30, 10 a 柠条林地(CK<sub>40</sub>, CK<sub>30</sub>, CK<sub>10</sub>)共 3 种退耕还林样地,并以邻近坡耕地(slope farmland, SF)为对照,采样点具体位置以 GPS 定位(表 1)。在每个样地内,设置 20 m×20 m 标准采样区,按照“S”型选 12 点,以达到覆盖还林地内草本及林木下土地,更客观代表退耕还林地土壤。用土钻法取 0—20 cm, 20—40 cm, 40—60 cm 共 3 层土样,每层取样点土样混合后作为该层待测土样,同时挖取剖面,采用环刀法测定各土层容重,以计算土壤有机碳及全氮密度,重复采样 3 次。所取样地土壤均为黄绵土,属于粉粘土,黏粒含量在 7.0% 左右。土壤样品自然风干后研磨过 0.25 mm 筛。采用 H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub>—K<sub>2</sub>Cr<sub>2</sub>O<sub>7</sub> 外加热法测定土壤有机碳(SOC)含量;采用凯氏定氮法测定土壤全氮(TN)含量<sup>[20]</sup>。

表 1 样地基本特征

植被类型	海拔高度/m	坡度/(°)	坡向	郁闭度	林下主要植被类型
RP <sub>40</sub>	1206	18	阳坡	0.75	铁杆蒿( <i>Artemisia gmelinii</i> );角蒿( <i>Incarvillea sinensis</i> )
RP <sub>30</sub>	1209	15	梁峁	0.80	铁杆蒿( <i>Artemisia gmelinii</i> );长芒草( <i>Stipa bungeana</i> )
RP <sub>10</sub>	1258	20	阳坡	0.85	阿尔泰狗娃花( <i>Heteropappus altaicus</i> );抱径苦卖菜( <i>Ixeris chinensis</i> )
PO <sub>30</sub>	1198	25	半阳坡	0.90	达乌里胡枝子( <i>Lespedezadavurica Schindl</i> );茜草( <i>Rubia cordifolia</i> )
PO <sub>20</sub>	1238	17	半阳坡	0.85	铁杆蒿( <i>Artemisia gmelinii</i> );长芒草( <i>Stipa bungeana</i> )
PO <sub>10</sub>	1256	15	阴峁	0.95	达乌里胡枝子( <i>Lespedezadavurica Schindl</i> );中华隐子草( <i>Chinensis Keng</i> )
CK <sub>40</sub>	1259	20	阳坡	0.75	铁杆蒿( <i>Artemisia gmelinii</i> );菊叶委菱菜( <i>Potentilla tanacetifolia</i> )
CK <sub>30</sub>	1214	15	梁峁	0.80	铁杆蒿( <i>Artemisia gmelinii</i> );达乌里胡枝子( <i>Lespedezadavurica Schindl</i> )
CK <sub>10</sub>	1279	25	阳坡	0.70	中华隐子草( <i>Chinensis Keng</i> );角蒿( <i>Incarvillea sinensis</i> )
SF	1214	15	阳坡		荞麦

### 1.3 数据分析

土壤有机碳或全氮密度是指单位面积一定厚度的土层中有机碳或全氮的质量,可以指示土壤有机碳和氮储量。对于分层的土壤剖面而言,土壤有机碳和全氮密度计算公式为:

$$T_j = (1 - \delta_j) \rho_j c_j d_j / 10$$

式中:  $T_j$ ——土壤第  $j$  层土壤有机碳或全氮密度 ( $\text{Mg}/\text{hm}^2$ );  $\delta_j, \rho_j, c_j, d_j$ ——第  $j$  层土中  $>2 \text{ mm}$  砾石的体积分数(%),土壤容重( $\text{g}/\text{cm}^3$ ),有机碳或全氮平均含量( $\text{g}/\text{kg}$ ),土层厚度( $\text{cm}$ )。

本文计算退耕 10~30 a 间各还林地土壤累积增加的有机碳和全氮在不同土层的分配比例,计算公式如下:

$$R_j = \frac{(c_{30j} - c_{10j}) \rho_j \times d_j}{\sum_j (c_{30j} - c_{10j}) \rho_j \times d_j} \times 100\%$$

式中:  $R_j$ ——第  $j$  层土壤中累积的有机碳或全氮的分配比例(%);  $c_{30j}, c_{10j}$ ——退耕还林 30 a 和 10 a 时土壤有机碳或全氮含量( $\text{g}/\text{kg}$ );其它参数意义同上。

以上实验结果的统计与分析采用 Excel 和 SPSS

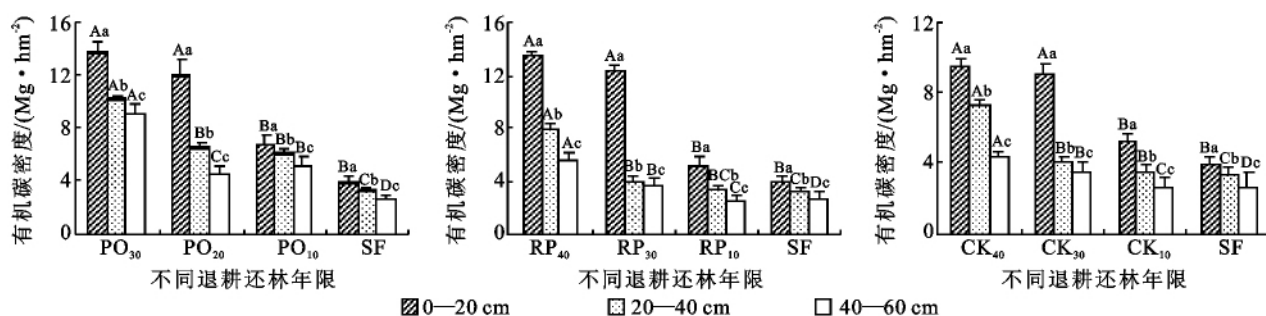


图1 不同退耕还林地土壤有机碳密度

注:不同大写字母表示不同年限还林地差异显著,不同小写字母表示不同土层差异显著( $P < 0.05$ ),下同。

与坡耕地相比,退耕还林显著增加了土壤有机碳密度。特别是在 0—20 cm 土层中,不同退耕还林地土壤有机碳密度增加最明显。其中,退耕还林 30 a 后,0—20 cm 土层有机碳增加量在不同退耕地表现为侧柏( $9.8 \text{ Mg}/\text{hm}^2$ )>刺槐( $8.5 \text{ Mg}/\text{hm}^2$ )>柠条( $5.3 \text{ Mg}/\text{hm}^2$ ),对应的固碳速率分别达到  $0.33, 0.28, 0.17 \text{ Mg}/(\text{hm}^2 \cdot \text{a})$ ;而在 20—40 cm 和 40—60 cm 土层中固碳速率均显著低于 0—20 cm 土层碳累积速率。总之,退耕种植侧柏、刺槐、柠条 10~40 a 后均使 0—20 cm 土层有机碳明显增加,且随着年限增加有机碳累积的越多。但在 20—40 cm 和 40—60 cm 土层仅种植侧柏下有机碳密度增加明显外,刺槐和柠条有机碳密度增加并不明显。

### 2.2 不同退耕还林地土壤全氮密度变化特征

同 SOC 变化趋势相近,随土层深度的增加,各样地土壤全氮密度逐渐降低,且退耕年限越久土壤全氮密度(TN)增加越明显(图 2)。退耕种植侧柏 10,20,

16.0 软件进行。不同退耕还林地及土层中有机碳和全氮的含量、密度、分布比例、C/N 等差异显著性采用邓肯法进行检验分析。

## 2 结果与分析

### 2.1 不同退耕还林地土壤有机碳密度变化特征

由图 1 可知,同一类型退耕还林地土壤有机碳密度随土壤深度的增加明显下降,且随着退耕年限的延长,不同土层间有机碳密度差异增大。退耕种植侧柏 30 a 后 0—20 cm 土层有机碳密度比 20—40 cm 和 40—60 cm 分别高出  $3.61 \text{ Mg}/\text{hm}^2$  和  $3.79 \text{ Mg}/\text{hm}^2$ ,而种植侧柏 10 a 后,仅分别高出  $0.67 \text{ Mg}/\text{hm}^2$  和  $1.57 \text{ Mg}/\text{hm}^2$ 。同样,退耕种植刺槐 10,30,40 a 时,0—20 cm 土层有机碳密度比 20—40 cm 土层分别增加  $1.77, 8.41, 5.62 \text{ Mg}/\text{hm}^2$ ;比 40—60 cm 土层有机碳密度分别增加  $2.67, 8.72, 8.08 \text{ Mg}/\text{hm}^2$ 。而退耕种植柠条 10~40 a 后,有机碳密度在 0—20 cm 土层也比在 20—40 cm 和 40—60 cm 分别提高  $1.89 \sim 5.01 \text{ Mg}/\text{hm}^2$  和  $0.57 \sim 2.88 \text{ Mg}/\text{hm}^2$ 。

30 a 后 0—20 cm 土壤全氮密度比 20—40 cm 分别增加  $0.32, 0.30, 0.38 \text{ Mg}/\text{hm}^2$ ,比 40—60 cm 土层分别增加  $0.33, 0.36, 0.42 \text{ Mg}/\text{hm}^2$ ;退耕种植刺槐 40 a 后,土壤全氮密度 0—20 cm 土层比 20—40 cm 和 40—60 cm 土层分别高出  $0.35 \text{ Mg}/\text{hm}^2$  和  $0.61 \text{ Mg}/\text{hm}^2$ ;而退耕种植 10 a 后,仅分别高出  $0.23$  和  $0.30 \text{ Mg}/\text{hm}^2$ ;退耕种植柠条 10~40 a 后的土壤全氮密度 0—20 cm 比 20—60 cm 土层增加  $0.02 \sim 0.36 \text{ Mg}/\text{hm}^2$ 。相对于坡耕地,退耕种植 30 a 的侧柏、刺槐、柠条在 0—20 cm 土层中全氮密度增加量表现为刺槐( $0.74 \text{ Mg}/\text{hm}^2$ )>侧柏( $0.49 \text{ Mg}/\text{hm}^2$ )>柠条( $0.36 \text{ Mg}/\text{hm}^2$ ),对应的固氮速率分别为  $0.03, 0.02, 0.01 \text{ Mg}/(\text{hm}^2 \cdot \text{a})$ ;在 20—60 cm 土层全氮密度同样均比坡耕地显著增加,但增加量低于表层 0—20 cm 土层。退耕种植 10~40 a 后的刺槐、柠条在 0—60 cm 土层中比坡耕地明显增加,而侧柏林地全氮密度有所增加但并不显著。

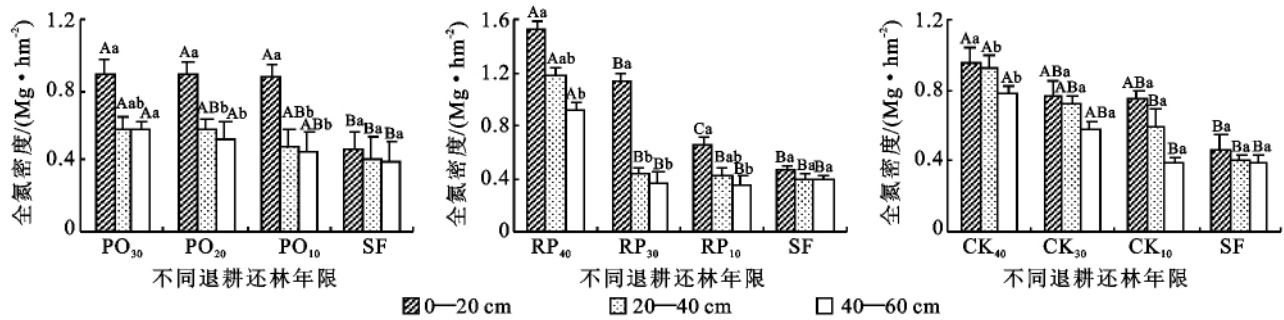


图 2 不同退耕还林地土壤全氮密度

### 2.3 不同退耕还林地增加有机碳、全氮的分布特征

各还林地平均增加的有机碳的 57%、全氮的 51% 的集中于 0—20 cm 的土层中,且增加有机碳分布比例比底层 20—40 cm 和 40—60 cm 分别高 36%,

36%,增加全氮分布比例则分别高 23%,32%(图 3)。这一方面说明有机碳、全氮具有一定的表聚效应,另一方面也可看出长期退耕还林下深层土壤也表现出截留碳氮的效应。

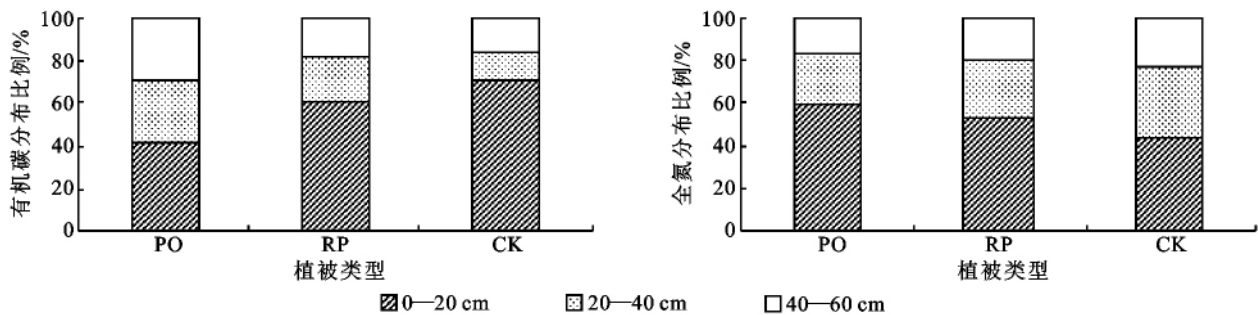


图 3 不同退耕还林地 10~30 a 土壤增加的有机碳、全氮在不同土层的分布比例

### 2.4 不同退耕还林地各土层碳氮关系及 C/N 变化

0—20 cm 土层中不同退耕还林地土壤 C/N 随着退耕年限的延长表现为先增加后下降的趋势,20—60 cm 土层中 C/N 比值并无明显规律;但 0—60 cm 土层土壤 C/N 明显高于农田土壤 C/N 比值(表 2)。

表 2 不同退耕还林地不同深度土层的 C/N

植被 类型	土层深度		
	0—20 cm	20—40 cm	40—60 cm
RP <sub>40</sub>	AB8.84±0.60a	ABC6.68±0.53a	ABC5.92±0.20a
RP <sub>30</sub>	ABC10.79±1.03a	BC8.79±1.64a	CD8.53±0.81a
RP <sub>10</sub>	AB8.59±1.75a	ABC7.96±1.92a	ABC6.9±1.31a
PO <sub>30</sub>	D13.16±1.65a	D12.51±1.41b	D12.21±1.27a
PO <sub>20</sub>	CD13.55±0.93a	C11.17±1.29a	ABC8.51±2.63ab
PO <sub>10</sub>	AB12.6±0.51b	C12.36±0.48a	BCD11.27±0.96a
CK <sub>40</sub>	A10.02±2.24b	ABC7.81±1.08a	AB5.67±0.27a
CK <sub>30</sub>	BCD11.79±1.18a	A6.67±0.43c	AB6.09±0.83bc
CK <sub>10</sub>	A8.64±0.59a	AB6.75±1.49ab	A6.68±0.42b
SF	D8.15±2.03a	ABC7.95±1.40b	A6.47±0.99c
平均值	A10.61±1.58b	BC8.87±1.36a	CD7.83±0.87a
变异系数/%	18.85	25.26	28.53

注:±表示标准差。不同大写字母表示不同年限还林地差异显著,不同小写字母表示不同土层差异显著( $P<0.05$ )。

不同退耕林地间比较可看出土壤 C/N 差异显著,在 0—20 cm 土层,退耕种植 30 a 的侧柏 C/N 最大值平均达 13.1,刺槐最小仅为 9.40,柠条位于两者之间为 10.09;而 20—60 cm 各土层中却表现为侧柏

最大(11.33),刺槐次之(7.46),柠条最小(6.61)。回归分析表明不同退耕林地土壤有机碳与全氮含量线性回归相关性均达到了极显著水平(图 4),说明土壤碳含量的贮存与氮素的积累有着直接联系,土壤有机碳与全氮的累积是相互促进的。

## 3 讨论

退耕还林(草)工程对于遏制水土流失、改善生态环境、提高土壤质量的生态效应已受到众多学者的认可<sup>[21-22]</sup>。本研究结果表明,60 cm 土层内有机碳储量较坡耕地相比都有所增加,侧柏、刺槐和柠条较坡耕地分别提高 64.09,48.21,39.44 Mg/hm<sup>2</sup> (10~40 a)。陕北黄土丘陵区约有 204.7 万 hm<sup>2</sup> 坡耕地(坡度>15°)实施退耕还林工程<sup>[23]</sup>,如果仅以柠条退耕后的土壤碳储量估算 40 a 后土壤固碳效果,将比坡耕地高出约 8 073.37 万 Mg。而且近年来有研究表明,这种固碳效果不仅体现在土壤有机碳的表聚效应,还对深层土壤碳库产生积极影响。例如,王征等<sup>[24]</sup>对黄土丘陵区植被恢复对深层土壤研究结果表明该区域深层土壤(50—200 cm)有机碳储量高达 26.28~46.50 Mg/hm<sup>2</sup>,占 2 m 土层有机碳储量的 50% 以上,显著高于浅层(0—50 cm)有机碳储量。可见退耕还林不仅影响表层土壤有机碳储量,对深层土壤碳库

也有着显著影响。多数研究表明不同退耕还林地因植被类型的年限不同,土壤有机碳、氮密度不同<sup>[25-27]</sup>。本研究结果显示退耕林地表层土壤与坡耕地相比,侧柏林年均固定有机碳速率是刺槐的1.2倍,柠条的1.7倍,而固氮速率则是刺槐林最高,达到侧柏的1.5倍,柠条的3倍,说明侧柏固碳效果最佳,而刺槐固氮效果最好。究其原因可能是刺槐属于豆科植物,本身具有较强的固氮能力,所以土壤全氮含量相对于其它树种要高。而侧柏林地凋落物积累较多,有利于腐殖化过程,进而有利于有机质积累。因此在实践中侧柏、刺槐可作为生物固定碳、氮的优先树种。

土壤有机碳和全氮含量具有极好的相关关系,它们之间的耦合关系是评价土壤质量水平的一个重要指标<sup>[28]</sup>。一般而言,土壤C/N为15~25,说明有机质供肥状况优越,而较小时微生物活动增强使土壤有效养分增加<sup>[29]</sup>。本研究结果表明,不同退耕还林地表层土壤C/N平均为10.6,说明表层土壤C/N比值较低,这可能是陕北地区干旱缺水等多种因素导致的结果。本研究亦显示,土壤C/N随土层深度的增加而减小,这主要是与微生物活动密切相关,土壤中C/N越高,有机质被微生物分解的越少,使得表层土壤累积的有机碳含量越高<sup>[29]</sup>。而不同退耕年限土壤C/N在0—20 m表现为先增后降的变化特征,可能是微生物同化同重量的氮需要消耗更多的碳,随年限增加土壤有机质老化,影响有机质的加速分解造成的,但具体机理还需进一步研究。另外有研究表明,同一气候背景区域内母质条件较为一致的土壤中,凋落物的质量决定土壤C/N<sup>[30]</sup>。因此,在陕北黄土丘陵区选取合理的树种,优化地表凋落物的有机组成,不仅有利于有机质的分解和积累,还能增加地表植被覆盖,减少水土流失。

## 4 结论

不同退耕年限还林地均能显著提升0—60 cm土层有机碳氮密度,而且以侧柏林地固碳能力较佳,刺槐林地固氮效果较好,但柠条林地在碳氮累积效应上都较前两种低。不同土层中碳、氮的增加在0—20 cm土层中最显著,碳、氮固定速率分别是20—60 cm土层的1.5~7.0倍和1.5~5.0倍。还林地10~30 a内增加的有机碳和全氮在表层分配比例也最高,分别达到57%和51%,但20—60 cm土层对提升土壤碳氮数量也起到了积极作用。不同还林地土壤有机碳与全氮均存在极显著的线性回归关系,说明土壤有机碳与全氮高度依存,互相促进增长。各还林地土壤

C/N比值在表层土中呈现先增后降低的变化特征,且随土壤深度的增加而减小。

## 参考文献:

- [1] 王春阳,周建斌,夏志敏,等.黄土高原区不同植物凋落物可溶性有机碳含量及其降解[J].应用生态学报,2010,21(12):3001-3006.
- [2] 刘苑秋,王芳,柯国庆,等.江西瑞昌石灰岩山区退耕还林对土壤有机碳的影响[J].应用生态学报,2011,22(4):885-890.
- [3] 李玉强,赵哈林,陈银萍.陆地生态系统碳源与碳汇及其影响机制研究进展[J].生态学报,2005,24(1):37-42.
- [4] 吴志祥,谢贵水,陶忠良,等.海南儋州不同林龄橡胶林土壤碳和全氮特征[J].生态环境学报,2009,18(4):1484-1491.
- [5] 刘姝媛,刘月秀,叶金盛,等.广东省桉树人工林土壤有机碳密度及其影响因子[J].应用生态学报,2010,21(8):1981-1985.
- [6] 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.
- [7] 廖洪凯,龙健.喀斯特山区不同植被类型土壤有机碳的变化[J].应用生态学报,2011,22(9):2253-2258.
- [8] 刘志鹏,邵明安.黄土高原小流域土壤水分及全氮的垂直变异[J].农业工程学报,2010,26(5):71-77.
- [9] 江玉梅,陈成龙,徐志红,等.退化红壤区人工林土壤的可溶性有机物、微生物生物量和酶活性[J].应用生态学报,2010,21(9):2273-2278.
- [10] 孙文义,郭胜利.天然次生林与人工林对黄土丘陵沟壑区深层土壤有机碳氮的影响[J].生态学报,2010,30(10):2611-2620.
- [11] 张景群,苏印泉,徐喜明,等.黄土高原人工刺槐林土壤有机碳动态监测研究[J].西北林学院学报,2009,24(5):21-25.
- [12] 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.
- [13] 李紫燕,李世清,李生秀.黄土高原典型土壤有机氮矿化过程[J].生态学报,2008,28(10):4940-4950.
- [14] 杨绒,严德翼,周建斌,等.黄土区不同类型土壤可溶性有机氮的含量及特性[J].生态学报,2007,27(4):1397-1403.
- [15] 郭胜利,车升国,梁伟,等.黄土高原沟壑区王东沟小流域土壤有机碳空间分布[J].生态学报,2010,30(1):52-59.
- [16] 左小安,赵哈林,赵学勇,等.科尔沁沙地退化植被恢复过程中土壤有机碳和全氮的空间异质性[J].环境科学,2009,30(8):2387-2393.

(下转第52页)

抵抗不良环境的能力。随着径级的增大,个体生态位空间不断扩大,种内和种间竞争加剧,种群密度下降,中径级和大径级主要表现为随机分布。

(3) 两样地均出现了枯梢现象,SⅢ样地和SV样地中的枯梢率分别为7.6%和3.5%。SV样地位于复垦地的最高平台,海拔为1420 m,四周没有有效的掩体;SⅢ样地海拔为1380 m,西侧为刺槐油松混交林样地,可以有效地遮挡西北方向的寒风,减少对树梢的冻伤。另外,SV样地中大径级个体的密度为1148株/hm<sup>2</sup>,存在着激烈的种内和种间竞争,而SⅢ样地中大径级个体的密度相对较小,为930株/hm<sup>2</sup>,其中刺槐密度为776株/hm<sup>2</sup>,榆树与臭椿在与刺槐的竞争中处于劣势地位,较低的密度降低了枯梢现象的发生。

(4) 在干旱、半干旱的黄土高原地区,水分是制约植被恢复与重建的关键性因子<sup>[7-8]</sup>。在两块样地中刺槐生长较好的区域都位于排水渠两侧10 m范围内。复垦时为了防止暴雨的发生,在复垦地内设置了蓄水工程和排水渠系,降水集中的季节排水渠径流较大,为两侧树木的生长提供了较多的水分,有利于刺槐的生长。

综上所述,刺槐×榆树×臭椿恢复模式的存活率比刺槐纯林要高,存活个体的生长情况也较刺槐纯林

好,枯梢个体的比例也只有刺槐纯林的一半。刺槐在半干旱区露天煤矿复垦过程中对水土保持和生态环境的改变发挥着重要的作用,然而它的栽种密度和适宜的配置物种还需要进一步深入研究。

#### 参考文献:

- [1] 宋永芳. 刺槐资源的开发利用[J]. 林业科技开发, 2002(5): 11-13.
- [2] 曹奇光, 张学培, 牛丽丽, 等. 晋西黄土区人工刺槐林生理生态特点分析与研究[J]. 水土保持研究, 2007, 14(3): 330-335.
- [3] 王改玲, 白中科, 赵景逵. 安太堡露天煤矿排土场刺槐生长状况研究[J]. 煤矿环境研究, 2000, 14(2): 21-24.
- [4] 王玉, 郭建斌. 黄土高原半干旱区刺槐人工林群落物种多样性研究[J]. 四川林勘设计, 2008, 3(1): 11-16.
- [5] 郝蓉, 白中科, 赵景逵, 等. 黄土区大型露天煤矿废弃地植被恢复过程中的植被动态[J]. 生态学报, 23(8): 1470-1476.
- [6] 段仁燕, 王孝安, 黄敏毅, 等. 太白红杉混交林径级结构与竞争的关系[J]. 生态学报, 2007, 27(11): 4919-4923.
- [7] 张运春, 张桥英, 罗鹏, 等. 克隆乔木黄牛奶树空间点格局分析[J]. 北京林业大学学报, 2007, 29(3): 67-73.
- [8] 孙一琳, 王洪英, 刘秀萍. 黄土高原人工刺槐林土壤水分特征[J]. 青岛农业大学学报: 自然科学版, 2007, 24(2): 123-126.
- [9] 宋永芳. 刺槐资源的开发利用[J]. 林业科技开发, 2002(5): 11-13.
- [10] 曹奇光, 张学培, 牛丽丽, 等. 晋西黄土区人工刺槐林生理生态特点分析与研究[J]. 水土保持研究, 2007, 14(3): 330-335.
- [11] 王改玲, 白中科, 赵景逵. 安太堡露天煤矿排土场刺槐生长状况研究[J]. 煤矿环境研究, 2000, 14(2): 21-24.
- [12] 王玉, 郭建斌. 黄土高原半干旱区刺槐人工林群落物种多样性研究[J]. 四川林勘设计, 2008, 3(1): 11-16.
- [13] 郝蓉, 白中科, 赵景逵, 等. 黄土区大型露天煤矿废弃地植被恢复过程中的植被动态[J]. 生态学报, 23(8): 1470-1476.
- [14] 段仁燕, 王孝安, 黄敏毅, 等. 太白红杉混交林径级结构与竞争的关系[J]. 生态学报, 2007, 27(11): 4919-4923.
- [15] 张运春, 张桥英, 罗鹏, 等. 克隆乔木黄牛奶树空间点格局分析[J]. 北京林业大学学报, 2007, 29(3): 67-73.
- [16] 孙一琳, 王洪英, 刘秀萍. 黄土高原人工刺槐林土壤水分特征[J]. 青岛农业大学学报: 自然科学版, 2007, 24(2): 123-126.
- [17] Young I M, Crwaford J W. The fractal structure of soil aggregates: its measurement and interpretation [J]. Journal of Soil Science Society of America, 1991, 42(2): 187-192.
- [18] Turcote D L. Fractal fragmentation [J]. Geography Research, 1986, 91(12): 1921-1926.
- [19] 高旺盛, 董孝斌. 黄土高原丘陵沟壑区脆弱农业生态系统服务评价: 以安塞县为例 [J]. 自然资源学报, 2003, 18(2): 182-188.
- [20] 鲍士旦. 土壤农化分析 [M]. 3 版. 北京: 中国农业出版社. 2000.
- [21] Potthoff M, Jackson L, Steenwerth K L, et al. Soil biological and chemical properties in restored perennial grassland in California [J]. Restoration Ecology, 2005, 13(1): 61-73.
- [22] Fang C, Smith P, Moncrieff J B, et al. Similar response of labile and resistant soil organic matter pools to changes in temperature [J]. Nature, 2005, 433: 57-59.
- [23] 徐勇, 田均良, 沈洪泉, 等. 生态重建模式的评价方法: 以黄土丘陵区为例 [J]. 地理学报, 2004, 59(4): 621-628.
- [24] 王征, 刘国彬, 许明祥. 黄土丘陵区植被恢复对深层土壤有机碳的影响 [J]. 生态学报, 2010, 30(14): 3947-3952.
- [25] 彭文英, 张科利, 陈瑶, 等. 黄土坡耕地退耕还林后土壤理化性质变化研究 [J]. 自然资源学报, 2005, 20(2): 272-278.
- [26] 温仲明, 焦峰, 刘宝元, 等. 黄土高原森林草原区退耕地植被自然恢复与土壤养分变化 [J]. 应用生态学报, 2005, 16(11): 2025-2029.
- [27] 赵溪, 李君剑, 李洪建. 关帝山不同植被恢复类型对土壤碳、氮含量及微生物数量的影响 [J]. 生态学杂志, 2010, 29(11): 2102-2110.
- [28] 党亚爱, 李世清, 王国栋, 等. 黄土高原典型土壤全氮和微生物氮剖面分布特征研究 [J]. 植物营养与肥料学报, 2007, 13(6): 1020-1027.
- [29] Mazzarino M J, Bertiller M B, Sain C, et al. Soil nitrogen dynamics in northeastern Patagonia steppe under different precipitation regimes [J]. Plant and Soil, 1998, 202(1): 125-131.
- [30] Pan K W, Xu Z H, Blumfield T, et al. In situ mineral <sup>15</sup>N dynamics and fate of added <sup>15</sup>NH<sub>4</sub><sup>+</sup> in hoop pine plantation and adjacent native forest in subtropical Australia [J]. Journal of Soil and Sediments, 2008, 8(6): 398-405.

(上接第 47 页)