

黄土丘陵区几种退耕还林地土壤固存碳氮效应

韩新辉^{1,2}, 杨改河^{1,2*}, 佟小刚³, 冯永忠^{1,2}, 任广鑫^{1,2}, 赵发珠^{2,4}, 杜约翰^{1,2}

(1.西北农林科技大学农学院, 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.西北农林科技大学资环学院, 陕西 杨凌 712100; 4.西北农林科技大学林学院, 陕西 杨凌 712100)

摘要:探讨了黄土丘陵区退耕 10 a 和 30 a 的柠条、刺槐、油松及侧柏林地 0~60 cm 不同土层有机碳、氮数量和分布的变化特征。结果表明:相比坡耕地,退耕还林 10 a 后,仅侧柏与油松林地各土层有机碳、氮含量和密度显著提升。退耕还林 30 a 与 10 a 相比,各土层有机碳含量增幅表现为侧柏>油松>刺槐>柠条,总体 0~60 cm 土层碳固存速率分别达到 1.06、0.71、0.43、0.36 mgC·hm⁻²·a⁻¹;氮固存速率以刺槐最高,达到 0.051 mgN·hm⁻²·a⁻¹,其他还林地固存氮速率接近,为 0.014~0.026 mgN·hm⁻²·a⁻¹。30 a 还林有机碳的增加主要来自 0~20 cm 土层,平均贡献达 51.9%,而全氮增加除刺槐林地外,主要来自 40~60 cm 土层,平均贡献达 42.5%。各还林地 C/N 仅在 0~20 cm 表层均有显著提高,但有机碳与氮均表现出显著的回归相关性。综上,长期退耕还林地能够固存碳氮,且以侧柏林地提升有机碳库较佳,而刺槐林地提升氮库较好。

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:S181 **文献标志码:**A **文章编号:**1672-2043(2012)06-1172-08

Soil Carbon and Nitrogen Sequestration Under Several Different Forest Lands Converted by Farmland in Loess Hilly Area

HAN Xin-hui^{1,2}, YANG Gai-he^{1,2*}, TONG Xiao-gang³, FENG Yong-zhong^{1,2}, REN Guang-xin^{1,2}, ZHAO Fa-zhu^{2,4}, DU Yue-han^{1,2}

(1.College of Agricultural Sciences, Northwest Agricultural & Forestry University, Yangling 712100, China; 2.Research Center of Recycle Agricultural Engineering and Technology of Shannxi Province, Yangling 712100, China; 3.College of Source and Environment, Northwest Agricultural & Forestry University, Yangling 712100, China; 4.College of Forestry, Northwest Agricultural & Forestry University, Yangling 712100, China)

Abstract: This research was conducted to determine the change of soil organic carbon and nitrogen in 0~60 cm soil layers under four types forested lands: Caragana, robinia, Chinese pine and orientalis, which has been converted by farmland for 10 years and 30 years in loess hilly area. The results showed that, compared with sloped farmland, either content or density of soil organic carbon and nitrogen in different soil layers were significantly increased in Chinese pine and orientalis forest land after 10 years forestation. Compared with 10 years forestation, the soil organic carbon and nitrogen was further increased after 30 years forestation, with the order of organic carbon: orientalis>Chinese pine>robinia>caragana, and that organic carbon sequestration rate(0~60 cm soil layers) reached 1.06, 0.71, 0.43, 0.36 mgC·hm⁻²·a⁻¹, respectively. In contrast, the rate of nitrogen sequestration was the highest by 0.051 mgN·hm⁻²·a⁻¹ under planting robinia, and was not significantly different among other forest lands by 0.014~0.026 mgN·hm⁻²·a⁻¹. After the 30 years forestation, the soil organic carbon increased mainly from 0~20 cm soil layer with average contribution ratio of 51.9% under all forest land, and the soil nitrogen increased mainly from 40~60 cm deep soil layer with average contribution ratio of 42.5% in all forest land except for robinia. The ratio of C/N also increased in 0~20 cm soil layer under different forest lands. There was significant regression correlation between soil organic carbon and nitrogen. In summary, conversion of cropland to forest could sequester carbon and nitrogen in soil, from which, buckthorn and robinia were a better to improve soil organic carbon pool and soil nitrogen pool, respectively.

Keywords: conversion of cropland to forest; soil organic carbon; soil total nitrogen; loess hilly area

收稿日期:2011-11-04

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

作者简介:韩新辉(1980—),女,博士,讲师,主要从事资源与环境生态方面的研究。E-mail:hanxinhui@nwsuaf.edu.cn

* 通讯作者:杨改河 E-mail:ygh@nwsuaf.edu.cn

土壤作为陆地生态系统中最大的碳库^[1],其碳汇作用受到越来越多学者的认可^[2-3],合理的土地利用方式及生态植被恢复措施也被认为是促进土壤固碳、缓解温室效应的潜在有效途径之一^[3-5],它们对土壤固碳和碳库演变的影响已成为全球变化研究的热点科学问题。土壤有机碳(Soil organic carbon;SOC)作为土壤肥力的核心物质,不仅影响土壤结构和持水保肥性,还起到缓解或调节与土壤退化及其生产力有关的一系列土壤过程的作用^[2]。但土壤有机碳的分解和累积一个关键影响因素就是土壤氮含量水平:较高的氮含量能够促进土壤微生物对新鲜有机残体的矿化分解,满足土壤养分的供应,从而促进植物生长产生更多的生物量碳,而氮含量较低,微生物繁殖与植物生长间就可能竞争氮源,造成土壤养分消耗,降低植物生物量碳的产生,即氮素影响到土壤碳的投入、利用、转移及累积过程^[6]。可见,土壤中碳、氮含量及其动态平衡直接影响着土壤质量和土地生产力,并影响生态系统中大气CO₂浓度和碳氮循环。因此,掌握土壤碳氮数量、质量及周转变化的过程对于认知植被恢复及土地利用固存碳氮、提升土壤质量及改良生态环境效应具有重要的意义。

退耕还林作为我国一项宏伟的生态造林工程,通过植被恢复改变了土壤内部及其与植物群落之间的养分元素流动状况,必然引起土壤碳氮数量和质量的改变。国外大量研究显示农田退耕还林后将会导致土壤碳氮的增加^[7-8],Johnson等还综述在退耕还林30a里土壤碳将会增加50 mg C·hm⁻²^[9]。然而,也有研究认为,造林后土壤碳储量在初期会下降,然后才开始积累^[10]。国内孙文义等^[11]研究显示植被恢复表层和深层土壤有机碳都有明显提升,但张景群等^[12]研究表明刺槐林恢复26a仍没有增加土壤碳库,且有机碳在不同土层垂直分布趋于一致^[13]。在土壤氮变化方面,研究主要集中于造林对土壤氮素矿化、硝化和微生物固持氮素过程,结果亦显示植被恢复下土壤氮也会出现明显变化^[14-15]。由于以上研究都将碳、氮变化独立研究,且植被恢复后土壤碳氮累积效应及其空间分布还有不确定性,需要进一步从长期植被恢复下土壤碳、氮变化特征及二者耦合关系进行探讨,以明确退耕还林土壤碳、氮固存效应及过程。本研究以黄土丘陵区安塞县典型退耕区不同退耕还林地土壤为研究对象,分析退耕10a和30a后不同还林地土壤有机碳和全氮在含量、密度及土层空间分布上的变化特征及碳氮耦合关系,以期对不同退耕还林类型土壤碳、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国家退耕还林示范区安塞县境内(东经105°05′44″,北纬36°30′45″),该区域地形破碎,沟壑纵横,属黄土高原丘陵沟壑地貌,暖温带半干旱季风气候,海拔1010~1400m,年均气温8.8℃,年均降水量505.3mm,无霜期160d左右,年总辐射量为552.6 kJ·cm⁻²。土壤类型以黄土母质上发育而成的黄绵土为主,土质疏松、有机质及全氮含量低、抗侵蚀能力差,植被类型处于暖温带落叶阔叶林向干草原过渡的森林草原带,是我国西北典型的生态环境脆弱区。该地区自上世纪90年代末开始实施旨在改善生态环境的退耕还林工程,布置有不同灌木林、乔木林及经济林,经多年的人工林草植被恢复建设及水土保持综合治理等措施,有效遏制了该地区土壤侵蚀,起到了明显的恢复退化生态效应,10多年间林草覆盖率由起初的17.7%提高到40.0%以上,生态环境进入良性循环状态。同时,该地区早在上世纪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自然研究条件。

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10a和30a的柠条(*Caragana Kintermedia*;CK₁₀,CK₃₀)、刺槐(*Robinia pseudoacacia*;RP₁₀,RP₃₀)、油松(*Pinus tabulaeformis* Carr;PC₁₀,PC₃₀)、侧柏(*Platycladus orientalis*;PO₁₀,PO₃₀)共4种退耕还林地样地,并以邻近坡耕地(*Slope Farmland*;SF)为对照,样地土壤类型均为黄绵土,粘粒含量为7%~9%,各样地其他基本特征见表1。在每个样地内,设置20m×20m标准采样区,采样时先除去地面凋落物,按照“S”型选12点,用土钻法取0~20、20~40、40~60cm共3层林下及草本植物覆盖下土样,以客观代表退耕还林地土壤。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,再将环刀内土壤过2mm筛,用清水洗净留在筛上砾石表面附着的土颗粒,按排水法测定砾石体积,用以计算砾石体积分数及土壤有机碳及全氮密度,采样共3次重复。各土层基本容重及砾石体积分数见表2。土壤样品自然风干后研磨过0.25mm筛。采用H₂SO₄-K₂Cr₂O₇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(Soil total nitrogen;STN)含量^[16]。

表 1 样地基本特征
Table 1 Description of the sampling plots

样地	坡位	坡向	坡度	海拔/m	林分密度/株·hm ⁻²	林下主要植物种
SF	梁坡中部	S	23°	1 167	—	荞麦
CK ₁₀	梁坡中部	SW20°	33°	1 154	3 000	铁杆蒿、长芒草、艾蒿
RP ₁₀	梁坡中上部	S	24°	1 175	2 100	胡枝子-长芒草-阿尔泰紫苑
PC ₁₀	梁坡中部	NE10°	21°	1 179	1 600	铁杆蒿-虎尾草
PO ₁₀	梁坡中部	S	22°	1 145	1 600	胡枝子-长芒草
CK ₃₀	梁坡中上部	SW32°	24°	1 157	2 400	铁杆蒿-长芒草、狗尾草
RP ₃₀	梁坡中部	SE15°	26°	1 165	1 800	白刺花、茭蒿、立式黄芪
PC ₃₀	梁坡中部	NW20°	25°	1 168	1 200	黄刺玫-虎榛子-铁杆蒿
PO ₃₀	梁坡中部	S	22°	1 149	1 200	白刺花-茭蒿

表 2 不同退耕还林地土壤容重和砾石体积分数
Table 2 Soil bulk density and volume fraction of gravel in different forest lands converted from slop farmland

样地	土壤容重/g·cm ⁻³			砾石体积分数/%		
	0~20 cm	20~40 cm	40~60 cm	0~20 cm	20~40 cm	40~60 cm
SF	1.25	1.27	1.32	1.1	0.9	0.8
CK ₁₀	1.28	1.39	1.37	1.3	0.9	1.1
RP ₁₀	1.19	1.31	1.32	1.4	0.8	1.0
PC ₁₀	1.21	1.31	1.34	1.5	1.1	1.2
PO ₁₀	1.26	1.32	1.33	1.2	1.0	1.0
CK ₃₀	1.19	1.32	1.37	1.3	1.1	0.9
RP ₃₀	1.20	1.29	1.35	1.3	1.2	1.1
PC ₃₀	1.20	1.24	1.28	1.6	1.3	1.2
PO ₃₀	1.18	1.35	1.38	1.3	1.1	0.9

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:

$$T_0=\sum_j^n (1-\delta_j)\rho_j c_j d_j/10$$

式中: T_0 为土壤有机碳或全氮密度,单位 $\text{mg}\cdot\text{hm}^{-2}$; δ_j 、 ρ_j 、 c_j 、 d_j 、 n 分别为第 j 层土中 $>2\text{ mm}$ 砾石的体积分数(%)、土壤容重($\text{g}\cdot\text{cm}^{-3}$)、有机碳或全氮平均含量($\text{g}\cdot\text{kg}^{-1}$)、土层厚度(cm)、土层数。不同土层对土壤有机碳和全氮累积的贡献率按以下公式计算:

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

式中: R_j 为第 j 层土壤对土壤有机碳或全氮累积贡献率; c_{30j} 和 c_{10j} 分别为退耕还林 30 a 和 10 a 时土壤有机碳或全氮含量($\text{g}\cdot\text{kg}^{-1}$);其他同上式。

实验结果的统计与分析采用 Excel 和 SPSS16.0

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、贡献比率、C/N 等差异显著性采用 Duncan 法进行检验分析($P<0.05$),土壤有机碳与全氮耦合关系采用回归分析进行。

2 结果与分析

2.1 退耕还林地土壤有机碳和全氮含量变化

表 3 显示,与坡耕地相比,退耕还林 10 a 后刺槐和柠条林地 0~60 cm 土壤有机碳并未显著变化。油松林地则使 20~40 cm 和 40~60 cm 土壤有机碳含量平均增加了 33.4%,侧柏林地使 0~60 cm 土壤有机碳均有增加,且不同土层增幅无显著差异,平均达到 60.8%。相对地,土壤全氮受退耕还林影响较大,不同退耕林地 0~20 cm 土壤全氮含量相比坡耕地均有显著增加,但以刺槐和柠条林地增幅较低,平均为 64.1%;以油松和侧柏林地增幅较高,平均达到 118.3%,并且它们还分别使 20~40 cm 土层全氮含量增加 77.0%和 35.6%。可见 10 a 退耕还林下,油松和侧柏林地相对比刺槐和柠条林地已开始恢复提升土

表 3 不同退耕还林地土壤有机碳和全氮含量

Table 3 Content of SOC and STN in different forest lands converted form slop farmland

样地	土壤有机碳含量/g·kg ⁻¹			土壤全氮含量/g·kg ⁻¹		
	0~20 cm	20~40 cm	40~60 cm	0~20 cm	20~40 cm	40~60 cm
SF	1.98±0.34a	1.41±0.07b	1.15±0.12a	0.16±0.02a	0.12±0.02a	0.12±0.03a
CK ₁₀	1.83±0.17a	0.98±0.17a	0.80±0.06a	0.26±0.05a	0.21±0.06b	0.14±0.01ab
RP ₁₀	2.12±0.52a	1.30±0.22b	0.91±0.04a	0.27±0.04a	0.16±0.05a	0.13±0.06ab
PC ₁₀	1.84±0.32a	1.79±0.32c	1.60±0.17b	0.36±0.03b	0.22±0.04bc	0.16±0.04ab
PO ₁₀	3.02±0.16b	2.28±0.06d	1.92±0.09c	0.34±0.03b	0.18±0.01b	0.17±0.02b
CK ₃₀	3.38±0.13c	1.75±0.36c	1.54±0.04b	0.33±0.03b	0.26±0.03c	0.20±0.07c
RP ₃₀	4.98±0.24d	1.81±0.24c	1.34±0.06b	0.46±0.09c	0.27±0.07c	0.23±0.07c
PC ₃₀	4.50±0.40d	3.64±0.40e	3.03±0.06d	0.42±0.07c	0.32±0.04c	0.24±0.11c
PO ₃₀	6.30±0.27e	5.63±0.17f	3.60±0.20e	0.41±0.07c	0.20±0.06b	0.21±0.11c

注:表中数据为 3 次重复平均值±标准差。同列数字后不同字母代表不同退耕还林地间在 $P<0.05$ 水平差异显著。下同。

Note: Data are means of 3 replications (mean±SD). Values in same column followed by a different letter are significant difference at 5% level among the forest lands converted from slope farmland. The same below.

壤碳、氮含量。

退耕还林 30 a 后,不同退耕林地均比坡耕地显著增加了土壤有机碳和全氮含量,并且相比退耕 10 a 土壤,其有机碳和全氮含量也有显著增长。相比退耕 10 a 土壤,不同土层有机碳含量总体以侧柏林地最高,0~20、20~40 cm 及 40~60 cm 土层有机碳含量增幅分别为 218.9%、301.2%及 210.3%,表现出强于其他退耕还林地提升土壤碳库的效应;以柠条林地有机碳含量最低,对应土层增幅分别为 70.9%、24.9%及 33.9%。对于土壤全氮,总体上不同退耕林地下各土层全氮含量并无显著差异,0~20、20~40 cm 及 40~60 cm 土层全氮含量增幅依次减小,平均分别为 149.9%、117.8%及 83.6%。可见长期退耕还林下土壤全氮含量受不同退耕还林地影响基本一致。

2.2 退耕还林地土壤有机碳和全氮储量变化

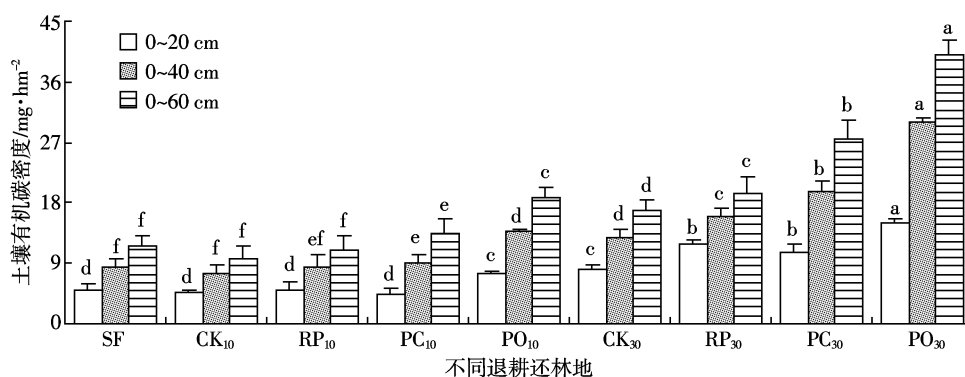
图 1、图 2 分别显示了不同退耕林地单位土地面积上土壤有机碳和全氮的储量即二者密度的变化状况。在退耕还林 10 a 时,仅侧柏和油松林地比坡耕地显著增加了各土层有机碳密度,柠条和刺槐林地各土层内有机碳密度均未显著变化。退耕 30 a 后,不同退耕还林地有机碳密度不仅比坡耕地显著增加,而且比对应退耕还林 10 a 的土壤也有显著提高。对比 10 a 退耕还林土壤,30 a 不同退耕还林地 0~60 cm 土层有机碳密度增幅总体表现为侧柏 (112.9%)>油松 (105.9%)>刺槐 (78.9%)>柠条 (75.7%),年均固碳速率分别达到 1.06、0.71、0.43、0.36 mgC·hm⁻²·a⁻¹。30 a 0~40 cm 土壤有机碳密度对比 10 a 各退耕还林地增幅仍以侧柏林地最高,柠条林地最低,年均固碳速率

在 0.26~0.82 mgC·hm⁻²·a⁻¹。表层 0~20 cm 土壤固碳速率仍以柠条林地最低,仅为 0.17 mgC·hm⁻²·a⁻¹,但刺槐、油松、侧柏林地年均固碳速率基本接近,平均为 0.34 mgN·hm⁻²·a⁻¹。可见长期退耕还林都起到了提升土壤碳库效应,但以侧柏林地土壤固碳效应最佳,而柠条林地相对较低。

相对土壤有机碳密度,土壤全氮对退耕还林响应更敏感(图 2)。退耕还林 10 a 时,不同退耕还林地各土层全氮密度均开始恢复提升,相比坡耕地增幅表现为侧柏、油松>刺槐、柠条林地,前两者平均增幅在 0~20、0~40 cm 及 0~60 cm 土层分别达到 116.0%、98.7%、79.5%,后两者平均增幅分别为 62.1%、64.0%、48.9%。退耕还林 30 a 后不同退耕还林土壤全氮密度增加更明显。对比退耕还林 10 a 土壤全氮密度增幅以刺槐林最高,且不同土层增幅接近,平均为 70.5%,但年均固氮速率按 0~20、0~40、0~60 cm 土层依次增大,分别达到 0.023、0.037、0.051 mgN·hm⁻²·a⁻¹,说明刺槐林地土壤相对固氮效应较强;而柠条、油松、侧柏林土壤全氮增幅接近,0~20、0~40、0~60 cm 土层增幅分别为 11.6%~19.9%、11.3%~21.3%、14.9%~27.5%,年均固氮速率随土层变深而增大,分别为 0.005~0.006、0.008~0.016、0.014~0.026 mgN·hm⁻²·a⁻¹。可见长期退耕还林都起到了提升土壤氮库效应,且深层土也表现出累积氮的效应。

2.3 退耕还林地土壤有机碳和全氮的分布

退耕 10 a 至 30 a 间,不同还林地各土层均不同程度地对土壤有机碳和全氮增加显出了作用(图 3)。退耕种植柠条、刺槐、油松、侧柏的林地 20 a 间增加



不同字母代表相同土层不同退耕还林地在 $P < 0.05$ 水平差异显著。下同
Different letters in the same soil layer indicate significant differences at $P < 0.05$ level among the forest lands converted from slope farmland. The same below

图 1 不同退耕还林地土壤有机碳密度

Figure 1 Density of SOC in different forest lands converted form slop farmland

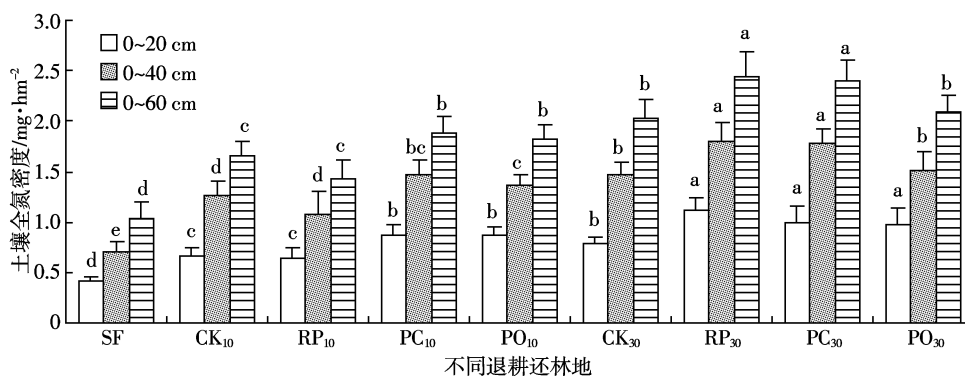


图 2 不同退耕还林地土壤全氮密度

Figure 2 Density of STN in different forest lands converted form slop farmland

的有机碳主要集中于 0~20 cm 土层,贡献率分别达到 46.1%、73.5%、44.7%、43.2%, 在 20~40 cm 和 40~60 cm 土层对有机碳的贡献率接近, 分别为 30.0%、13.3%、27.7%、28.4%。土壤全氮增加量在不同还林地各土层的分布差异较大,仅刺槐林地土壤全氮增加主要来自 0~20 cm 土层,贡献率达到 45.6%,平均是 20~40 cm 和 40~60 cm 土层对全氮贡献率的 1.7 倍。柠条、油松、侧柏林地土壤全氮增加主要在 40~60 cm 土层,贡献率分别达到 44.3%、39.8%、43.4%, 分别是 0~20 cm 和 20~40 cm 土层对全氮贡献率的 1.6、1.4、1.7 倍。

2.4 不同退耕还林地土壤碳氮关系

土壤碳氮比可反映土壤碳、氮的耦合关系,是评价土壤质量水平的一个重要指标^[17]。多数研究认为土壤中的全氮含量大体上决定了土壤有机碳的质量分数,土壤碳的保持在很大程度上取决于土壤全氮含量水平^[18-19]。本研究结果显示(表 3),对比坡耕地,退耕还林 10 a 时刺槐和柠条林各土层土壤 C/N 总体小于坡耕地,而侧柏和油松林地也仅在深层 40~60 cm 土

层与坡耕地 C/N 接近,土壤处于易消耗碳氮的水平。退耕 30 a 后,0~20 cm 土层 C/N 相比退耕 10 a 均有显著增加,但与坡耕地相比变化相对较小,仅侧柏林地各土层 C/N 均比坡耕地有显著增加,土壤处于碳充足而高消耗氮的水平。

土壤有机碳与全氮含量回归相关分析亦显示,各退耕还林地碳氮回归方程决定系数 R^2 均达到了显著水平(图 4),其中柠条、刺槐及油松林地土壤碳氮回归关系还达到极显著水平,但不同还林地土壤碳氮变化符合最高 R^2 的回归拟合方程都不相同,这说明还林地土壤碳氮之间存在明显的交互作用,且这种交互作用在不同还林地表现不一致,这与不同还林地对土壤碳氮含量影响存在差异密切相关。

3 讨论

林地土壤中有机碳和氮主要来源于地上部植物残体、凋落物、地下部根系分泌物及微生物残体和代谢产物^[17,20],大部分研究也得出林地通过自身生物量

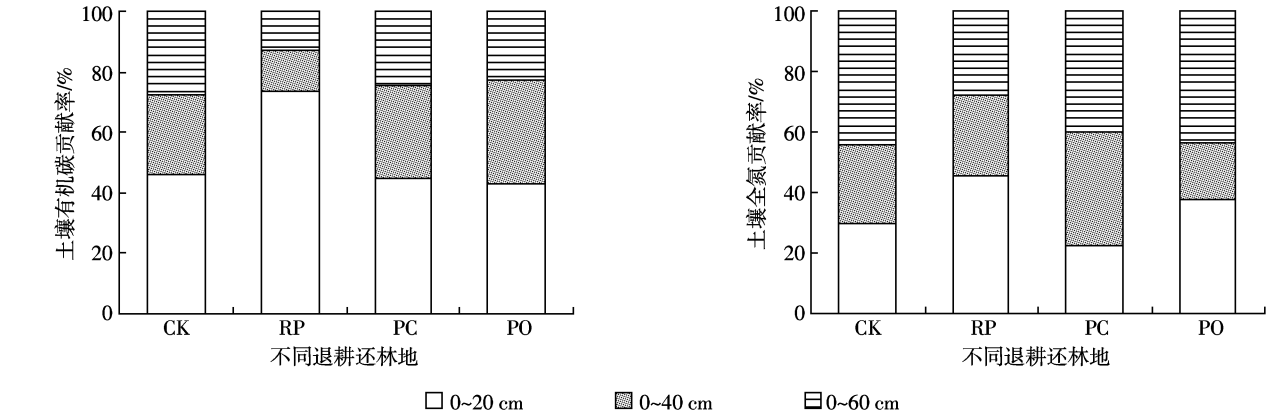


图 3 退耕还林 30 a 后不同土层土壤对有机碳和全氮累积贡献率

Figure 3 The contribution rate for accumulating SOC and STN in different soil layers after 30 years of conversion of cropland to forest

表 3 不同退耕还林地各土层 C/N

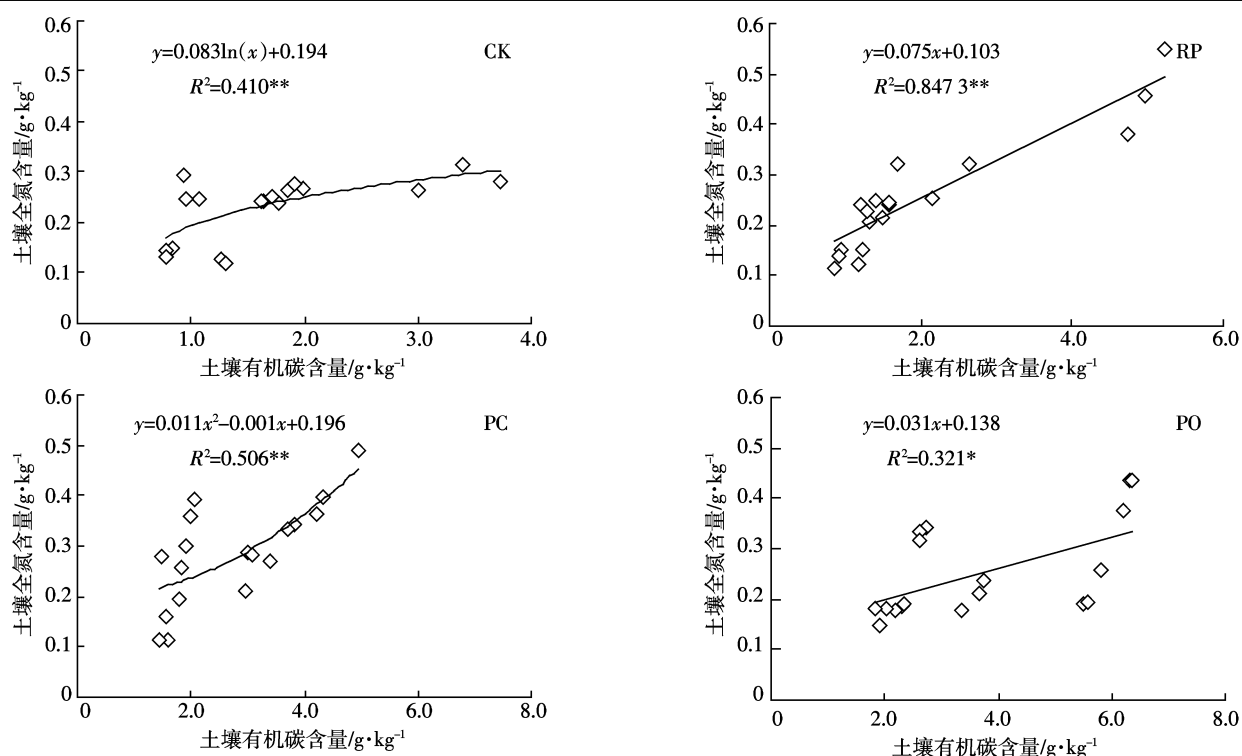
Table 3 The ratio of soil organic carbon to nitrogen in different soil layer under different forest lands converted form slop farmland

样地	土深		
	0~20 cm	20~40 cm	40~60 cm
SF	12.2±1.21a	11.7±1.28a	10.3±0.80a
CK ₁₀	7.0±1.02b	4.6±0.58b	5.6±0.35b
RP ₁₀	7.8±1.03b	8.0±1.33c	6.9±1.55b
PC ₁₀	5.1±0.93b	8.0±1.24c	10.2±1.05a
PO ₁₀	8.8±0.88b	12.4±0.84a	11.3±0.94a
CK ₃₀	10.3±1.05c	6.7±0.74bc	7.5±1.22b
RP ₃₀	10.8±1.18c	6.7±1.15bc	5.7±0.59b
PC ₃₀	10.8±0.97c	11.5±2.11a	12.4±1.07c
PO ₃₀	15.3±1.26d	28.2±3.64d	17.4±1.66d

物质投入能够增加土壤碳氮含量^[2,11,18]。本研究亦显示退耕 30 a 后,不同退耕还林地均显著增加了土壤有机碳和全氮含量,使得二者在 0~60 cm 土层中的储量也显著上升,但其中以侧柏林地固碳速率最高,刺槐林地固氮速率最高,而柠条林累积碳氮效应一般。这可能是侧柏林地具有较高的碳返还量,而刺槐林本身属于豆科可固氮植物,从而使它们分别对固碳和固氮表现较佳。如郭胜利等^[21]研究显示黄土区乔木林类凋落物是灌木林类的 1.9 倍,表层土有机质含量前者是后者的 2.3 倍,而曲卫东等^[22]报道灌木林根系生物量主要分布在 0~30 cm 土层,并且在长期生长下逐渐衰落,故造成其累积有机质数量显著低于乔木林。可见有机质的投入是影响土壤碳、氮库恢复的重要因素。另外,10~30 a 间不同退耕还林地各土层对有机碳和全氮均有贡献,但有机碳以表层土壤增加为主,增加的全氮仅在刺槐林地表现为表层(0~20 cm)聚集,而

柠条、油松、侧柏林地则在深层(40~60 cm)累积较多。一方面,人工造林恢复地表植被使表层土侵蚀减弱^[23],减少了有机碳氮的流失,并且表层土壤能够直接接收林木、草本等凋落物和根系生长代谢输入的有机碳,使有机碳增加明显。但表层高碳投入也使氮消耗较多,仅可固氮的刺槐林在表层土氮含量明显增加,其他还林地相对氮补充较少,使得表层对氮累积贡献较低。另一方面,深层土因为根系生长有大量死根的腐解为土壤提供丰富碳、氮源^[24],加之深层土相对密实,容重较大,使得其对单位体积土壤中碳氮储量增加也表现出积极的作用。

土壤中有有机碳和氮分别是微生物生命的能量来源和细胞结构的要素。因此,有机碳与氮含量比值共同影响微生物的活动和繁殖,从而影响有机质矿化分解与腐殖合成的动态平衡过程^[25]。较低 C/N 的比率下,微生物同化同重量的氮需要消耗更多的碳,因而会加速土壤原有碳和新鲜的有机碳的分解矿化,相对起到抑制碳累积趋势;而有机物质碳源输入的提高,C/N 的比率提高,又会反过来促使微生物消耗更多的氮,促进有机质分解产生更多可聚合为腐殖质的中间产物,相对起到促进碳累积的趋势^[26]。本研究结果显示退耕还林 10 a 时退耕还林地土壤 C/N 都处于较低的水平,土壤处于易消耗碳氮的水平,加之退耕初期林地生物量较低,消耗养分快,因此使得碳氮增加并不十分明显。退耕 30 a 后,0~20 cm 土层 C/N 相比退耕 10 a 均有显著增加,这源于表层大量有机物质的投入,土壤处于碳输入充足而氮消耗多的水平,这也对应了各还林地表层土对碳累积贡献较大;而对于氮,除可固氮刺槐外,其他还林地表层土对氮贡献相对较低。随土层加深,碳氮投入仅来自地下部分,数量



各林地碳、氮回归分析基于退耕 10 a 和 30 a 所有土层 3 次重复的碳、氮含量,样本数=18

图中 ** 和 * 分别代表回归相关性达到 0.01 和 0.05 水平

Regression correlation between SOC and STN in each forest land was analyzed based on 3 replications content of SOC and STN in all soil layers after 10 years and 30 years of returning farmland, and number of samples was 18.

The '**' and '*' indicated that regression correlation was significant at the 0.01 and 0.05 level respectively.

图 4 不同退耕还林地土壤有机碳和全氮回归关系分析

Figure 4 Analysis of regression correlation between SOC and STN in each forest lands converted from slop farmland

相对减少,二者动态平衡的相互作用关系使得 C/N 变化较小,同时消耗氮所需的碳补充不充足而使深层土壤对氮累积贡献较大。不同还林地碳氮的回归方程形式显著不同则进一步说明碳氮耦合效应较为复杂,除了直线回归关系外^[18],杜满义等^[17]还得出不同毛竹林地碳氮遵循三次多项式回归方程,但与本研究结果一致的是土壤碳氮均存在显著的回归关系,说明土壤碳素贮存与氮素积累有着直接的联系。

4 结论

长期退耕还林下,不同还林地均表现出显著的提升 0~60 cm 土壤有机碳、全氮含量和储量的效应,对改良土壤质量及促进大气-植被-土壤间碳氮循环起到了一定的积极作用。但不同还林地对固存碳氮表现出显著差异。相比坡耕地,退耕还林 10 a 时侧柏和油松林地就开始表现出累积碳氮的潜力,而柠条和刺槐林地仅使土壤全氮含量和储量开始恢复;退耕 30 a 后,不同还林地均表现出显著的碳氮累积效应,其中有机碳密度增加量表现为侧柏>油松>刺槐>柠条,而

全氮密度增加量以刺槐林地最显著,其它林地问氮增量接近。从不同土层看,各土层对碳氮累积在退耕还林 30 a 后均表现出积极的贡献,但有机碳增加主要来自表层 0~20 cm 土层,而氮增加除刺槐林外则主要来自深层 40~60 cm,这与不同土层碳氮补充及二者耦合作用密切相关。各还林地表层土碳补充逐渐充足,C/N 比例提高,相对有利于碳累积,而深层土氮消耗所需的碳相对补充不足,C/N 比例变化不明显,相对有利于氮累积。不同还林地土壤碳氮均存在显著回归相关性,进一步说明碳固存和氮累积间存在直接的联系。

参考文献:

- [1] Eswaran H, Berg Evan den, Reich P. Organic carbon in soils of the world [J]. *Soil Science Society of America Journal*, 1993, 57(1):192-194.
- [2] Lal R. Forest soils and carbon sequestration[J]. *Forest Ecology and Management*, 2005, 220(1-3):242-258.
- [3] Vesterdal L, Ritter E, Gundersen P. Change in soil organic carbon following afforestation of former arable land [J]. *Forest Ecology and Management*, 2002, 169(1-2):137-147.

- [4] 冯瑞芳, 杨万勤, 张健. 人工林经营与全球变化减缓[J]. 生态学报, 2006, 26(11): 3870–3877.
FENG Rui-fang, YANG Wan-qin, ZHANG Jian. Artificial forest management for global change mitigation[J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2006, 26(11): 3870–3877.
- [5] 胡会峰, 刘国华. 森林管理在全球 CO₂ 减排中的作用[J]. 应用生态学报, 2006, 17(4): 709–714.
HU Hui-feng, LIU Guo-hua. Roles of forest management in global carbon dioxide mitigation[J]. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2006, 17(4): 709–714.
- [6] Luo Y Q, Currie W S, Dukes J S, et al. Progressive nitrogen limitation of ecosystem responses to rising atmospheric carbon dioxide[J]. *Bioscience*, 2004, 54(8): 731–739.
- [7] Post W M, Kwon K C. Soil carbon sequestration and land use change: Processes and potential[J]. *Global Change Biology*, 2000, 6(3): 317–327.
- [8] Ohnui K, Mitchell M J, Bischoff J M. Effect of landscape position on N mineralization and nitrification in a forested watershed in the Adirondack Mountains of New York[J]. *Canadian Journal of Forest Research*, 1999, 29(4): 497–508.
- [9] Johnson P N, Mistsra S K, Ervin R T. A qualitative choice analysis of factors influencing post-CRP land use decisions [J]. *Journal of Agricultural and Applied Economics*, 1997, 29(1): 163–173.
- [10] Jug A, Makeschin F, Rehfuess K E, et al. Short-rotation plantations of balsam poplars, aspen and willows on former arable land in the Federal Republic of Germany (III): Soil ecological effects[J]. *Forest Ecological Manage*, 1999, 121: 852–991.
- [11] 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.
SUN Wen-yi, GUO Sheng-li. Effects of secondary and manmade forests on soil organic C and N in subsurface soil in hilly region of the Loess Plateau[J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2010, 30(10): 2611–2620.
- [12] 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]. 西北林学学报, 2009, 24(5): 21–25.
ZHANG Jing-qun, SU Yin-quan, XU Xi-ming, et al. Dynamic monitoring of organic carbon in the Black Locust Plantation in Loess Plateau [J]. *Journal of Northwest Forestry University*, 2009, 24(5): 21–25.
- [13] 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.
LI Yu-yuan, SHAO Ming-an, ZHENG Ji-yong, et al. Impact of grass-land recovery and reconstruction on soil organic carbon in the northern Loess Plateau[J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2007, 27(6): 2279–2287.
- [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.
YANG Rong, YAN De-yi, ZHOU Jian-bin, et al. Soluble organic nitrogen (SON) in different soils on the loess Plateau of China[J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2007, 27(4): 1397–1403.
- [15] 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.
LI Zi-yan, LI Shi-qing, LI Sheng-xiu. Organic N mineralization in typical soils of the Loess Plateau[J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2008, 28(10): 4940–4950.
- [16] 鲍士旦. 土壤农化分析[M]. 北京: 中国农业出版社, 2007: 30–60.
Bao Shi-dan. Soil agrochemical analysis[M]. Beijing: China Agricultural Press, 2007: 30–60.
- [17] 杜满义, 范少辉, 漆良华, 等. 不同类型毛竹林土壤碳、氮特征及其耦合关系[J]. 水土保持学报, 2010, 24(4): 198–202
DU Man-yi, FAN Shao-hui, QI Liang-hua, et al. Characteristics and coupling relationship of soil organic carbon and total nitrogen in different types of *Phyllostachys pubescens* Stands[J]. *Journal of Soil and Water Conservation*, 2010, 24(4): 198–202.
- [18] 洪 瑜, 方 晰, 田大伦. 湘中丘陵区不同土地利用方式土壤碳氮含量的特征[J]. 中南林学院学报, 2006, 26(6): 9–16.
HONG Yu, FANG Xi, TIAN Da-lun. Soil carbon and nitrogen concentration under different land use in central hilly area of Hunan province [J]. *Journal of Central South Forestry University*, 2006, 26(6): 9–16.
- [19] Jerry M M, Sarah B, Jennifer J, et al. Soil warming, carbon-nitrogen interactions, and forest carbon budgets[J]. *PNAS*, 2011, 108(23): 9508–9512.
- [20] 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.
WU Zhi-xiang, XIE Gui-shui, TAO Zhong-liang, et al. Characteristics of soil carbon and total nitrogen contents of rubber plantations at different age stages in Danzhou, Hainan island[J]. *Ecology and Environmental Sciences*, 2009, 18(4): 1484–1491.
- [21] 郭胜利, 马玉红, 车升国, 等. 黄土区人工与天然植被对凋落物量和土壤有机碳变化的影响[J]. 林业科学, 2009, 45(10): 14–18.
GUO Sheng-li, MA Yu-hong, CHE Sheng-guo, et al. Effects of artificial and natural vegetations on litter production and soil organic carbon change in Loess Hilly areas[J]. *Scientia Silvae Sinicae*, 2009, 45(10): 14–18.
- [22] 曲卫东, 陈云明, 王琳琳, 等. 黄土丘陵区柠条人工林土壤有机碳动态及其影响因子[J]. 中国水土保持科学, 2011, 9(4): 72–77.
QU Wei-dong, CHEN Yun-ming, WANG Lin-lin, et al. Dynamics of soil organic carbon in *Caragana microphylla* forest and its relationship with environment factors in loess hilly region[J]. *Science of Soil and Water Conservation*, 2011, 9(4): 72–77.
- [23] 姜 娜, 邵明安. 黄土高原小流域不同坡地利用方式的水土流失特征[J]. 农业工程学报, 2011, 27(6): 36–41.
JIANG Na, SHAO Ming-an. Characteristics of soil and water loss of different slope land uses in small watershed on the Loess Plateau[J]. *Transactions of the CSAE*, 2011, 27(6): 36–41.
- [24] Jobbagy E G, Jackson R B. The vertical distribution of soil organic carbon and its relation to climate and vegetation[J]. *Ecological Application*, 2002, 10(2): 423–436.
- [25] Mann L K. Change in soil carbon storage after cultivation[J]. *Soil Science*, 1986, 142: 279–288.
- [26] 任书杰, 曹明奎, 陶 波. 陆地生态系统氮状态对碳循环的限制作用研究进展[J]. 地理科学进展, 2006, 25(4): 58–67.
REN Shu-jie, CAO Ming-kui, TAO Bo, et al. The effects of nitrogen limitation on terrestrial ecosystem carbon cycle: A review[J]. *Progress in Geography*, 2006, 25(4): 58–67.