

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

孙文义¹, 郭胜利^{1,2,*}

(1. 中国科学院水利部水土保持研究所, 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)

摘要: 研究深层土壤有机碳、氮 (Soil organic C, SOC, Total soil N, TSN) 量对摸清陆地生态系统深层碳氮固定潜力, 寻找碳汇丢失之谜和应对全球气候变暖具有重要意义。以黄土区子午岭林场 3 种典型人工林 (油松、刺槐、小叶杨) 和 3 种天然次生林 (辽东栎、白桦、鼠李) 为对象, 在设立的 18 个样方内, 分层测定了 0–100 cm 土层 SOC、TSN 和 DOC (Dissolved organic C, DOC) 量变化, 监测了样方内地表长年凋落物积累量及其碳氮组成。1m 土层内 SOC、TSN 和 DOC 含量天然次生林显著高于人工林。与人工林相比, 天然次生林表层 (0–20cm) SOC、TSN 储量分别高 42%、22%, 但 20–100cm 土层 SOC、TSN 储量相对量最大。人工林下, 20–100cm 土层 SOC 储量为 33.6 t hm^{-2} , 占 1m 土层的 55%; TSN 储量为 3.9 t hm^{-2} , 占 1m 土层的 57%; 天然次生林下, 20–100cm 土层 SOC、TSN 储量分别为 55.3 t hm^{-2} 、 6.0 t hm^{-2} , 占 1m 土层储量分别为 59% 和 63%。其中, 40–60cm 天然次生林比人工林碳氮储量分别高了 82%、65%; 其次为 20–40cm, 天然次生林比人工林碳氮储量分别高了 73%、65%。不同植被恢复条件下, SOC 与 DOC、TSN、Olsen-P 都表现出较强的相关性。研究表明, 植被恢复有利于土壤碳氮的积累, 不仅表层土壤, 深层土壤也具有较强的碳氮固定能力; 天然次生林土壤碳氮固定能力和长年地表凋落物量都高于人工林。

关键词: 碳; 氮; 固定能力; 天然次生林; 人工林; 深层

Effects of secondary and manmade forests on soil organic C and N in subsurface soil in hilly region of the Loess Plateau

SUN Wenyi¹, GUO Shengli^{1,2,*}

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

Abstract: Exploring contents of soil organic C (SOC) and total soil N (TSN) in subsoil is crucial to finding out soil organic C and N sequestration potential in terrestrial ecosystem, the missing carbon sink and dealing with global warming. Data were presented on changes in soil organic C (SOC), total soil N (TSN) and Dissolved organic C (DOC) in three manmade forests (*Pinus tabulaeformis*, *Robinia pseudoacacia*, *Pobulus simonii*) and three secondary forests (*Quercus liaotungensis*, *Betula platyphyllum*, *Rhamnus davurica*) in Ziwojing site in hilly loess region, China. Eighteen sample plots were established to gather litter accumulation on aboveground and sample soils from 0–100cm soil profiles under different vegetation types at the hilly region. SOC, TSN and DOC in 0–100 cm soil layers and litter accumulation were determined to study soil organic C and N sequestration potential in subsoil under different vegetation. Storages of SOC, DOC and TSN of secondary forests were significantly higher than that in manmade forests. SOC and TSN sequestration quantity in surface soil (0–20cm) were 42% and 22% higher than that in manmade forests, respectively, but the relative C, N sequestration capacity in subsurface soil (20–100cm) were higher than that surface soil. For manmade forests, SOC storage (33.6 t hm^{-2}) in 20–100cm soil layer account for 55% of the amount of 1m soil layers and the storage of TSN (3.9 t hm^{-2}) in 20–100cm soil layer account for 57% of 1m soil layers respectively. For secondary forests, SOC storage (55.3 t hm^{-2}) in 20

基金项目: 国家自然科学基金面上资助项目 (40771125)

收稿日期: 2009-03-26; **修订日期:** 2010-03-15

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

—100cm soil layer account for 59% of 1m soil layers and TSN storage (6.0 t hm^{-2}) in 20—100cm soil layer account for 63% of 1m soil layers. The relative storages of SOC and TSN in 40—60cm were increased by 82%, 65% respectively, followed by 20—40cm the relative storages of SOC and TSN were increased by 73%, 65%, respectively. With increasing of SOC under the different revegetation conditions, there is a strong correlation between SOC, DOC, TSN, Olsen-P. The results suggested that revegetation could significantly enhance C and N sequestration capacity not only in surface soil but also in subsurface soil. Soil C and N sequestration capacity and litter accumulation under secondary forests were higher than that under manmade forests.

Key Words: C; N; sequestration capacity; secondary forests; manmade forests; subsurface

陆地生态系统中,土壤有机碳中的碳储量(1m 土层)是大气圈中 CO_2 -C 储量的 2 倍,生物圈中碳储量的 2—3 倍^[1]。因此,土壤有机碳储量变化对全球碳循环具有重要影响。土地利用与管理方式的变化是影响土壤有机碳库储量变化的重要因素。由于样品采集困难,实验分析耗时,目前大部分土壤固碳研究集中于 20cm 以内的表层^[2-3],而对 20cm 以下深层土壤有机碳变化的研究较少。深层土壤有机碳是陆地生态系统土壤碳的重要组成部分。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^[4-8]。在温带地区,大量的有机碳储存在 30cm 以下的土层中^[9]。在温带草原生态系统中,1m 土层中有机碳的 59% 储存在 20—100cm 土层中^[5]。此外,深层土壤有机物的分解矿化速率较表层土壤显著降低^[9-12]。因此,对深层土壤有机碳储量及其变化的研究,有助于深入了解陆地生态系统中土壤碳的源汇效应。

在黄土高原这一生态脆弱区,天然与人工植被恢复对治理水土流失,提高土壤有机碳氮具有重要意义。目前的研究表明,与人工植被相比,天然植被条件下,表层土壤具有显著的碳汇效应^[13-16]。例如,马玉红等^[15]研究发现,陕北丘陵沟壑区坡耕地土壤有机碳含量为 $3.3\text{—}4.8 \text{ g kg}^{-1}$,自然恢复的辽东栎群落土壤有机碳含量最高,为 29.5 g kg^{-1} ,而人工建造的刺槐林为 $5.53\text{—}11.9 \text{ g kg}^{-1}$,小叶杨为 $12.8\text{—}18.4 \text{ g kg}^{-1}$ 。但深层土壤是否具有同样作用并不清楚。植被的根系和凋落物是影响深层土壤有机碳周转的重要驱动力。黄土区土壤质地疏松,土层深厚,植被根系入土一般深达数米^[17-19]。探讨植被恢复措施条件下,整个土壤剖面中有机碳氮含量的垂直分布规律,有助于深入理解土壤的固碳潜力。

1 材料与方法

1.1 研究区概况

研究区位于黄土高原子午岭林区内的陕西省富县任家台林场($109^{\circ}11'E, 36^{\circ}05'N$)。地貌类型为黄土丘陵沟壑区,海拔 930—1683 m,相对高差为 100—150 m,沟壑密度为 4.5 km km^{-2} 。年平均气温 $7\text{—}8^{\circ}\text{C}$,无霜期为 120—160d,年均降水量 564 mm,其中夏季 6—8 月份降水占全年降水量的 60% 左右,属于暖温带半湿润气候,植被垂直带谱不明显^[20]。

子午岭林区是 1866 年当地人口外迁后在弃耕地上逐渐恢复起来的,是黄土高原目前保存较为完整的天然次生林之一,其林木郁闭度达 70% 以上,林下草被覆盖度达 90% 以上。林区所在区域内,生长有不同弃耕年限天然植被群落,物种多样性复杂,群落结构稳定。林区内典型的天然次生林种有辽东栎(*Quercus liaotungensis*)、白桦(*Betula platyphyllum*)、山杨(*Populus davidiana*)以及分布较广的小乔木鼠李(*Rhamnus davurica*)。该区人工林主要有刺槐(*Robinia pseudoacacia*)林、油松(*Pinus tabulaeformis*)林、小叶杨(*Pobulus simonii*)。灌木有狼牙刺(*Sophora Davidii*)、虎榛子(*Ostryopsis Davidiana* Deene)、酸枣刺(*Ziziphus guguba*)等。相对天然次生林,人工林群落结构简单,物种多样性较为单一。

为了保证立地条件的可比性,野外调查限定在一个较小的范围内进行,海拔高度为 1000—1200m;坡度为 $15\text{—}30^{\circ}$;坡向主要为阴坡和半阳坡;坡位主要为中下部(表 1)。

表 1 黄土区子午岭不同植被类型特征

Table 1 Characteristics of different vegetation type in Ziwuling area in hilly region of the Loess Plateau										
植被类型 Vegetation types	植被群落 Vegetation	坡位 Location	坡度/(°) Slope	坡向 Aspect	海拔/m Altitude	纬度 Latitude	经度 Longitude	封禁时间 Closing time/a	郁闭度/% Canopy closure	群落特征 Community characteristics
天然次生林 Secondary forest	鼠李 <i>Rhamnus danurica</i>	中下 Middle	25—30	阳坡 South	1066	36°03'57.9"	109°16'27.5"	> 30	40	天然，一直封禁；灌层为鼠李 + 文冠果 + 狼牙刺；草层为长茅草；周围有农田，路，人为干扰情况很少
	辽东栎 <i>Quercus liaotungensis</i>	中部 Middle	20—25	半阳坡 Southeast	1235	36°05'23.5"	109°08'55.6"	> 100	60—75	天然次生；封禁；胸径 8—10cm；林密度 180—200 株/666. 7m²；乔木层：油松、辽东栎；灌层稀疏，以绣线菊为主；草层为细叶苔草
	白桦林 <i>Betula platyphyllum</i>	下部 Foot	15—20	阴坡 North	1164	36°05'33.1"	109°08'57.7"	30—50	> 60	天然次生；封禁；乔木层：白桦 + 稀疏的辽东栎和油松等；灌层：鼠李，虎榛子，草层：细叶苔草；周围有油松，辽东栎，茶条槭
	油松 <i>Pinus tabulaeformis</i>	中部 Middle	20—25	半阳坡 Southeast	1235	36°05'23.5"	109°08'55.6"	10	> 60	人工种植，纯林，单层结构，地面有稀疏细叶苔草，有人为干扰
人工林 Manmade forest	刺槐 <i>Robinia pseudoacacia</i>	中部 Middle	20—25	半阳坡 Southeast	1166	36°04'01.8"	109°12'24.3"	30	55—60	人工种植，在沟谷中，坡度缓；乔木层：刺槐，草层：莎草，长势很好；周围有路，村庄，人为干扰强度很大；
	小叶杨 <i>Populus simonii</i>	下部 Foot	15—20	半阴坡 Northwest	1195	36°05'18.5"	109°09'30.2"	15	15—20	人工种植，有稀疏的铁杆蒿，地表形成结皮；有人为破坏，被砍伐；胸径：5—8cm，高度：6—8m

1.2 测定项目及方法

1.2.1 土样与凋落物采集

植被群落调查采用陆地生物群落典型样方调查方法^[21],在每个采样点设置 3 个样方,各点以 GPS 定位。乔木林样地采用 10m×10m 样方,主要调查林木种类、郁闭度、胸径、密度生长状况等;林下群落采用 1m×1m 样方,调查草丛盖度、高度、种类等;对植被群落下枯落物采用 1m×1m 样方,用网袋收集。每个样地 3 个样方,共计采集地表凋落物样品 18 个(2007 年 5 月)。

在每一种植被群落的样方内,按照 0—5、5—10、10—15、15—20、20—40、40—60、60—80、80—100cm 层次采集土壤样品,20cm 以内重复 3 次,20—100cm 重复 1 次。每一植被群落共采集 48 个土壤样品,6 种植被群落共计采集 288 土壤样品。

在白桦林和人工油松林选取典型地段挖 2 个土壤剖面,用环刀采集 0—20、20—40、40—60、60—80、80—100cm 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。

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 0.25mm 筛后,测定土壤有机碳(SOC)($\text{H}_2\text{SO}_4\text{-K}_2\text{Cr}_2\text{O}_7$ 外加热法)^[22]、全氮(TSN)(凯氏定氮法)含量(自动定氮仪 BUCHI322/343)^[23]、DOC($0.5\text{mol L}^{-1}\text{K}_2\text{SO}_4$ 溶液浸提,土液比 1:4,振荡 30min,TOC 仪测定)、Olsen P($0.5\text{mol L}^{-1}\text{NaHCO}_3$ 浸提,钼锑抗比色法)。

采集的地表凋落物样在 60℃ 烘 24h,称重,以此估算单位面积上枯落物量。粉碎后,测定碳($\text{H}_2\text{SO}_4\text{-K}_2\text{Cr}_2\text{O}_7$ 外加热法)^[22]和全氮(凯氏定氮法)^[23]含量。

土壤水分测定采用烘干法,即新鲜土样 105℃ 烘干 8h,计算公式:土壤水分含量 = (鲜重 - 干重)/干重 × 100%。

土壤有机碳储量的计算公式为: $C_i = d_i \times \rho_i \times O_i$

式中, i 为土壤不同层次, C 为土壤有机碳密度, d 为土层厚度, ρ 土壤容重, O 为土壤有机碳含量。

1.2.3 数据处理与统计分析

用 SAS8.1^[24] 软件对天然次生林和人工林下 SOC、TSN、DOC、地表长年凋落物量以及凋落物 C/N 进行了方差分析(ANOVA),当 F 检验显著时,进行均值间最小差异显著性(LSD)检验。

2 结果与分析

2.1 天然次生林与人工林对土壤有机碳氮含量与分布的影响

天然次生林与人工林植被类型条件下,1m 土层中 SOC 都遵从“上高下低”的分布趋势,但天然次生林与人工林 SOC 含量存在极显著($P < 0.01$)差异(表 2)。人工林下,1m 土层内 SOC 含量变化于 2.4—18.5 g kg^{-1} 之间,平均 9.4 g kg^{-1} 。天然次生林下 1m 土层中 SOC 含量变化于 3.7—31.3 g kg^{-1} 之间,平均值为 14.8 g kg^{-1} ,比人工林高 57%。在 1m 土层中,不同深度天然次生林 SOC 含量均高于人工林(表 2),但不同深度 SOC 的提高幅度不同。0—5cm 土层 SOC 含量天然次生林与人工林差值最大,达 12.7 g kg^{-1} ,其次为 5—10cm 土层(5.0 g kg^{-1})。但 40—60cm 之处,天然次生林较人工林的相对提高量最大,达 97%,其次 20—40cm 土层为 87%。

DOC 含量也因植被类型存在极显著($P < 0.01$)差异(表 2)。天然次生林下,表层 DOC 含量变化于 162.4—622.6 mg kg^{-1} 之间,平均为 322.6 mg kg^{-1} ,较人工林高 76%。天然次生林各土层 DOC 含量均高于人工林,而天然次生林与人工林差值和相对提高量均随土层深度增加而降低(表 2)。天然次生林与人工林 DOC 含量 0—5cm 差值(368.2 mg kg^{-1})和相对提高量(145%)最大,其次为 5—10cm 土层,差值为 104.6 mg kg^{-1} ,相对提高量为 55%。

同样,1m 土层中 TSN 变化规律与 SOC 一致(表 2)。天然次生林下 1m 土层中 TSN 含量平均值为 1.35 g kg^{-1} ,较人工林高 36%。0—5cm 土层 TSN 含量天然次生林与人工林差值(0.64 g kg^{-1})最大,但 20—60cm 土层中,天然次生林 TSN 较人工林的相对提高量(79%)最大。

综上所述,自然恢复的次生林比人工林能大幅度地提高 SOC、DOC、TSN 含量,且 1m 土层内各层 SOC、DOC、TSN 含量均有较大幅度的提高。与人工林相比,天然次生林下 SOC 的提高主要体现在 0—5cm 和 20—60cm 土层;DOC 体现在表层 0—10cm,尤其是 0—5cm 提高了近 1.5 倍;TSN 体现在 20—60cm。深层土壤的碳氮固定能力不容忽视,且 20—60cm 天然次生林相比人工林表现出更强的碳氮固定能力。

表 2 天然次生林与人工林土壤剖面有机碳氮含量

Table 2 The contents of SOC、DOC and TSN under manmade forest and secondary forest

测定项目 Item	土层 Depth /cm	样本数 Sample Number	人工林 Manmade forest Mean $\pm$ Std	天然次生林 Secondary forest Mean $\pm$ Std	差值 Difference (天然-人工)	提高 Increment/%
SOC/(g kg ⁻¹)	0—5	9	18.5 $\pm$ 8.5 b	31.3 $\pm$ 15.0 a	12.7	69
	5—10	9	12.3 $\pm$ 5.9 a	17.3 $\pm$ 6.3 a	5.0	40
	10—15	9	9.0 $\pm$ 3.3 b	12.9 $\pm$ 4.8 a	3.9	44
	15—20	9	6.1 $\pm$ 1.5 b	9.9 $\pm$ 3.1 a	3.8	63
	20—40	3	4.9 $\pm$ 1.8 a	9.3 $\pm$ 3.6 a	4.3	87
	40—60	3	3.0 $\pm$ 0.6 a	6.0 $\pm$ 2.0 a	2.9	97
	60—80	3	2.5 $\pm$ 0.4 a	4.1 $\pm$ 1.0 a	1.5	59
	80—100	3	2.4 $\pm$ 0.5 b	3.7 $\pm$ 0.2 a	1.4	56
	平均 Mean	48	9.4 bB	14.8 aA	5.4	57
DOC/(mg kg ⁻¹)	0—5	9	254.4 $\pm$ 105.7 b	622.6 $\pm$ 404.4 a	368.2	145
	5—10	9	190.5 $\pm$ 89.5 a	295.1 $\pm$ 179.3 a	104.6	55
	10—15	9	157.4 $\pm$ 52.3 a	210.1 $\pm$ 102.2 a	52.8	34
	15—20	9	130.3 $\pm$ 41.7 a	162.4 $\pm$ 42.5 a	32.1	25
	平均 Mean	36	183.1 bB	322.6 aA	139.5	76
TSN/(g kg ⁻¹)	0—5	9	1.82 $\pm$ 0.72 a	2.46 $\pm$ 0.73 a	0.64	35
	5—10	9	1.30 $\pm$ 0.55 a	1.61 $\pm$ 0.32 a	0.31	24
	10—15	9	0.97 $\pm$ 0.27 b	1.27 $\pm$ 0.32 a	0.30	31
	15—20	9	0.68 $\pm$ 0.08 b	1.03 $\pm$ 0.27 a	0.35	51
	20—40	3	0.55 $\pm$ 0.20 a	0.99 $\pm$ 0.40 a	0.44	79
	40—60	3	0.36 $\pm$ 0.06 a	0.64 $\pm$ 0.24 a	0.28	79
	60—80	3	0.32 $\pm$ 0.03 a	0.45 $\pm$ 0.12 a	0.13	42
	80—100	3	0.27 $\pm$ 0.03 b	0.42 $\pm$ 0.08 a	0.15	54
	平均 Mean	48	0.99 bA	1.35 aA	0.36	36

注:字母表示同一土层下天然次生林与人工林显著性比较

2.2 天然次生林与人工林对土壤有机碳氮储量的影响

在 1m 土层中,不同深度天然次生林 SOC 储量均高于人工林(表 3)。1m 土层 SOC 总储量天然次生林为 94.5 t hm⁻²,比人工林高 55%。人工林植被类型条件下,20—100cm 土层 SOC 储量为 33.6 t hm⁻²,占 1m 土层的 55%,天然次生林植被类型条件下,20—100cm 土层 SOC 储量为 55.3 t hm⁻²,占 1m 土层的 59%。40—60cm 天然次生林较之人工林相对提高量最大,天然次生林 SOC 储量为 94.5 t hm⁻²比人工林高 82%;其次为 20—40cm 土层,天然次生林 SOC 为 22.3 t hm⁻²,比人工林高 73%。

同样地,1m 土层天然次生林 TSN 总储量(9.5 t hm⁻²)比人工林总储量高 41%;人工林植被类型条件下,20—100cm 土层 TSN 储量为 3.9 t hm⁻²,占 1m 土层的 57%;天然次生林植被类型条件下,20—100cm 土层 TSN 储量为 6.0 t hm⁻²,占 1m 土层的 63%。20—60cm 天然次生林较人工林相对提高量最大,为 65%。

因此,天然次生林比人工林都能大幅度地提高 SOC、TSN 储量,且 1m 土层内各层 SOC、TSN 含量均有较大幅度的提高。20—60cm 土层天然次生林比人工林表现出更强的碳氮蓄存能力。

表 3 天然次生林与人工林下土壤有机碳氮储量

Table 3 Storages of SOC and TSN under manmade forest and secondary forest

测定项目 Item	土层/cm Depth	人工林 Manmade forest	天然次生林 Secondary forest	储量(天然-人工) Difference	提高 Increment/%
SOC/(t hm ⁻²)	0—20	27.5	39.2	11.7	42
	20—40	12.9	22.3	9.4	73
	40—60	7.8	14.3	6.4	82
	60—80	6.6	9.7	3.1	47
	80—100	6.2	9.0	2.8	44
	合计 Total	61.1	94.5	33.4	55
TSN/(t hm ⁻²)	0—20	2.9	3.5	0.6	22
	20—40	1.4	2.4	0.9	65
	40—60	0.9	1.5	0.6	65
	60—80	0.8	1.1	0.3	31
	80—100	0.7	1.0	0.3	42
	合计 Total	6.8	9.5	2.7	41

2.3 天然次生林与人工林对地表凋落物的影响

天然次生林与人工林植被类型条件下,地表凋落物长年积累量和凋落物 C/N 存在较大差异(表 4)。人工林地表凋落物量变化于 9.0—11.7 t hm⁻²,小叶杨群落最低,刺槐群落最高;天然次生林地表凋落物量变化于 9.8—35.5 t hm⁻²,鼠李群落最低,白桦群落最高。天然次生林长年地表凋落物积累量为 24.2 t hm⁻²,是人工林的 1.8 倍;凋落物 C/N 是人工林的 1.4 倍。这些结果表明,尽管天然次生林长年地表凋落物积累量(因鼠李群落差异较大)和 C/N(因小叶杨群落差异较大)没有达到显著差异,但二者都明显高于人工林。

表 4 天然次生林与人工林长年地表凋落物量及其 C/N

Table 4 Litter quantity and its C/N ratio under manmade forest and secondary forest

植被类型 Vegetation types	植被群落 Vegetation	凋落物量/(t hm ⁻²) Litter accumulation		凋落物 C/N Litter C/N	
		平均 Mean	CV	平均 Mean	CV
天然次生林 Secondary forest	鼠李 <i>Rhamnus davurica</i>	9.8		50.1	
	辽东栎 <i>Quercus liaotungensis</i>	27.3		57.7	
	白桦 <i>Betula platyphyllum</i>	35.5		41.3	
	平均	24.2	0.5	50	0.2
人工林 Manmade forest	油松 <i>Pinus tabulaeformis</i>	11.7		35.9	
	刺槐 <i>Robinia pseudoacacia</i>	20.5		22.6	
	小叶杨 <i>Pobulus simonii</i>	9.0		48.9	
	平均	13.8	0.4	36	0.4
LSD 0.10		17.8	19		

注:LSD 为天然次生林与人工林均值显著性检验

3 讨论

土壤有机碳氮垂直分布与根系分布及其分泌物密切相关^[25-29]。例如,在黄土高原丘陵沟壑区子午岭地区,人工油松林和天然白桦林 0—60cm 土层,人工油松细根生物量(0.67 mg cm⁻³)37% 集中在 0—20cm;天然白桦大部分的细根生物量(2.27 mg cm⁻³)75% 集中在 0—20cm。在黄土高原沟壑区,人工林油松和刺槐的根系分布主要集中在 0—60cm 土层,油松根系生物量在 10—30cm 最高,刺槐根系生物量在 40—60cm 最高^[31-34]。李勇等^[35]对湖南紫色土人工刺槐的研究表明,其根系集中分布在 0—50cm 土层,并呈指数递减趋势。本研究的结果显示,有机碳氮剖面中的分布模式与根系在土层中的垂直分布规律基本一致。

在子午岭地区,天然白桦林表层细根生物量(2.27 mg cm⁻³)是人工油松(0.67 mg cm⁻³)的 3.4 倍,表层

天然白桦细根表面积(422.3cm^2)是油松人工林(107.9cm^2)的 3.91 倍^[30]。这与本研究天然次生林下碳氮储量高于人工林是一致的。但安慧等^[30]研究发现,20—60cm 天然白桦的细根生物量(25%)远远低于人工油松(63%),而土壤碳氮并非低于人工油松,40—60cm 土层天然白桦林全氮含量(0.76mg kg^{-1})是人工油松林(0.40mg kg^{-1})的 2 倍。

表层土壤碳氮的蓄存能力较高不仅与大量根系分布有关,而且与凋落物也密切相关^[36-37]。本研究与李裕元等^[20]的结果显示,人工油松、刺槐、小叶杨群落为“乔-草”两层群落结构,缺少灌层,且草被稀疏;天然次生辽东栎、白桦林群落有完整的“乔-灌-草”3 层群落结构,封禁后受人为破坏较小。此外,天然林凋落物量显著高于人工林^[38-42]。与人工林相比,天然次生林大量地表凋落物分解以及细根分泌物和死亡分解向土壤中释放大量的营养物质,使表层土壤蓄存了大量的有机碳氮^[43],这也是表层 DOC 显著提高的重要原因^[44-47]。此外,凋落物化学特性也是影响凋落物分解速率重要影响因素,凋落物 C/N 高,分解较慢^[48-49]。这可能是本研究中天然次生林凋落物积累量显著增高的主要原因。

此外,在植被恢复的条件下,随着 SOC 的改善,土壤的其它性状也得到了相应地提高(图 1)。除 TSP 外, SOC 与 DOC、TSN、OlsenP 都存在显著相关关系。植被类型不同,其斜率也存在较大差异。天然次生林 TSN、TSP 与 SOC 斜率小于人工林,但 DOC、OlsenP 与 SOC 斜率大于人工林,表明随着 SOC 含量的增加,天然次生林下速效养分比人工林增加的速度快。

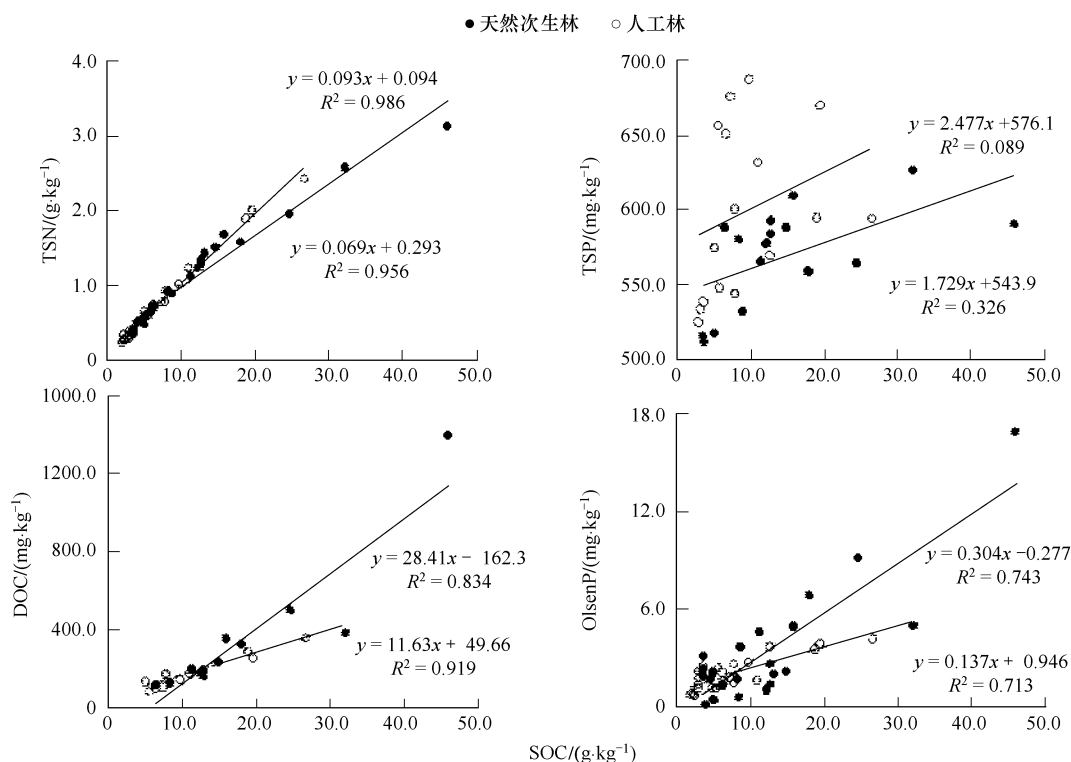


图 1 天然次生林与人工林对土壤碳氮磷关系的影响

Fig. 1 Effects of secondary and manmade forest on relationship between soil organic C, N, P

4 结论

(1) 黄土区天然次生林与人工林植被类型条件下, 0—20cm 土层表现出较强碳氮固定能力, 但 20—100cm 土层土壤的碳氮固定能力也不容忽视。人工林下, 20—100cm 土层 SOC、TSN 储量分别占 1m 土层的 55%、57%; 天然次生林下, 20—100cm 土层 SOC、TSN 储量占 1m 土层的 59%、63%。

(2) 黄土区天然次生林各层 SOC、TSN 储量均显著高于人工林, 分别高 42%—82%、22%—65%。尤其是 40—60 cm 土层其碳氮相对提高量较大, 比人工林分别高 82%、65%。DOC 体现在表层 0—10cm, 尤其是 0—

5cm 提高了近 1.5 倍。

(3) 在植被恢复的条件下, 随着 SOC 的改善, 土壤的其他性状也得到了相应地提高, SOC 与 DOC、TSN、OlsenP 都表现出较强的相关性。

References:

- [1] Eswaran H, Berg E, Reich P. Organic carbon in soils of the world. *Soil Science Society of America Journal*, 1993, 57(1): 192-194.
- [2] Davidson E A, Ackerman I L. Changes in soil carbon inventories following cultivation of previously untilled soils. *Biogeochemistry*, 1993, 20: 161-193.
- [3] Post W M, Kwon K C. Soil carbon sequestration and land-use change: processes and potential. *Global Change Biology*, 2000, 6: 317-327.
- [4] Batjes N H. Total carbon and nitrogen in the soil of the world. *European Journal of Soil Science*, 1996, 47: 151-163.
- [5] Jobbagy 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.
- [6] Wang S L, Huang M, Shao X M, Li K, Ji J J. Vertical distribution of soil organic carbon in China. *Environment Management*, 2004, 33: 200-209.
- [7] Anwar M, Yang T H, Guo Z D, Fang J Y. Carbon contents and its vertical distribution in alpine grasslands in bayinbulak, middle stretch of the Tianshan Mountains of Xinjiang. *Journal of Plant Ecology*, 2006, 30(04): 545-552.
- [8] Wu Y Q, Hua L G, Fu B J, Guo Y H. Study on the vertical distribution of soil organic carbon density in the Tibetan Plateau. *Acta Scientiae Circumstantiae*, 2008, 28(02): 362-367.
- [9] 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. *Advances in Agronomy*, 2005, 88: 35-66.
- [10] Franzluebbers A J, Hons F M, Zubere D A. Seasonal changes in soil microbial biomass and mineralizable C and N in wheat management systems. *Soil Biology and Biochemistry*, 1994, 26: 1469-1475.
- [11] Dam D V, Veldkamp E, Breemen N. Soil organic carbon dynamics: variability with depth in forested and deforested soils under pasture in Costa Rica. *Biogeochemistry*, 1997, 39: 1469-1475.
- [12] Gill R A, Burke I C. Influence of soil depth on the decomposition of *Bouteloua gracilis* roots in the shortgrass steppe. *Plant and Soil*, 2002, 241(2): 233-242.
- [13] Pang X Y, Hu H, Qiao Y K, Pan K W, Liu S Q, Chen Q H, Liu Q. Nutrient distribution and cycling of artificial and natural subalpine spruce forests in western Si Chuan. *Chinese Journal of Applied and Environment Biology*, 2002, 8(01): 1-7.
- [14] Zhang X B, Shangguan Z P. Nutrient distributions and bio-cycle patterns in both natural and artificial *Pinus tabulaeformis* forests in Hilly Loess Regions. *Acta Ecologica Sinica*, 2006, 26(02): 373-382.
- [15] 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(01): 97-105.
- [16] Mao Y L, Yang Y S, Xing S H, Quan Z S, Cui J C. A comparison of soil organic carbon of water-stable aggregates between *Altingia gracilipes* natural forest and *Cunninghamia lanceolata* plantation. *Journal of Huaqiao University (Natural Science)*, 2008, 29(01): 106-110.
- [17] Wang D H, Zhao Z, Xue W P, Cheng X R. Effect of soil water environment on vertical fine root distribution of *Robinia pseudoacacia*. *Research of Soil and Water Conservation*, 2005, 12(5): 200-202.
- [18] Cao Y, Zhao Z, Qu M, Cheng X R, Wang D H. Effects of *Robinia pseudoacacia* roots on deep soil moisture status. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2006, 17(05): 765-768.
- [19] Cong X H, Liang Y M, Li D Q. Research of *Hippophae rhamnoides* root characteristics and soil water dynamics on semi-arid area in Loess Plateau. *Bulletin of Soil and Water Conservation*, 1990, 10(06): 98-103.
- [20] Li Y Y, Zheng J Y, Shao M A. Comparison of the attributes of natural forests and plantations in Ziwuling mountain. *Acta Botanica Boreali-Occidentalia Sinica*, 2005, 25(12): 2447-2456.
- [21] Dong M. Survey, observation and analysis of terrestrial biocommunities. Beijing: China Standard Press, 1996.
- [22] Nelson D W, Sommers L E. Total carbon organic carbon and organic matter//Page A L, Miller R H, Keeney D R, eds. *Methods of soil analysis, part 2 chemical and microbiological properties (second edition)*. Madison, Wisconsin, USA, 1982: 562-564.
- [23] Bremner J M, Mulvaney C S. Regular Kjeldahl method//Page A L, Miller R H, Keeney D R, eds. *Methods of soil analysis, part 2 chemical and microbiological properties (second edition)*. Madison, Wisconsin, USA, 1982: 610-616.
- [24] SAS Release(8.1). SAS Institute Inc., Cary, USA, 1999.

- [25] Balesdent J, Balabane M. Major contribution of root to soil carbon storage inferred from maize cultivated soils. *Soil Biology & Biochemistry*, 1996, 9: 1261-1263.
- [26] Jobbaagy 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.
- [27] Rasse D P, Rumpel C, Dignac M F. Is soil carbon mostly root carbon? Mechanisms for a specific stabilisation. *Plant and Soil*, 2005, 269: 341-356.
- [28] Cheng Y H, Han Y Z, Wang Q C, Wang Z Q. Seasonal dynamics of fine root biomass, rooting density, specific root length and soil resource availability. *Acta Phytocologica Sinica*, 2005, 29(03): 403-410.
- [29] Wu C H, Chen Y M, Wang G L, Lu J L. Vertical distribution characters of typical communities root system in relation to environmental factors in the Hill-gully region of Loess Plateau. *Science of Soil and Water Conservation*, 2008, 6(03): 65-70.
- [30] An H, Wei L Y, Liu Y, Shangguan Z P. Distribution characters of fine root of artificial *Pinus tabulaeformis* and natural *Betula platyphylla* forests and their relation to soil nutrients in Hilly Loess Regions. *Plant Nutrition and Fertilizer Science*, 2007, 13(04): 611-619.
- [31] Li P, Li Z B, Zhao Z, Zheng L Y. Researches on root distribution characters of *Robinia pseudoacacia* on different sites in Weibei Loess Plateau. *Bulletin of Soil and Water Conservation*, 2002, 22(05): 15-19.
- [32] Zhao Z, Lin P, Wang N J. Distribution patterns of root systems of main planting tree species in Weibei Loess Plateau. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2000, 11(01): 37-39.
- [33] Zhao Z, Lin P. Researches on vertical root distributions and drought resistance of main planting tree species in Weibei Loess Plateau. *Journal of Soil and Water Conservation*, 2002, 16(01): 96-99.
- [34] Zhao Z, Li P, Xie W P, Guo S W. Study on relations of growth and vertical distribution of fine root system of main planting tree species to soil density in the Weibei Loess Plateau. *Scientia Silvae Sinicae*, 2004, 40(05): 50-55.
- [35] Li Y, Wu S X, Xiahou G F. Stabilization of soil structure by roots of artificial locust trees in Purple Soil region. *Journal of Soil Erosion and Soil and Water Conservation*, 1998, 4(02): 1-7.
- [36] Laskowski R, Berg B, Caswell H. Litter decomposition: a guide to carbon and nutrient turnover. New Jersey: Academic Press, 2006.
- [37] Sauer T, Cambardella C, Brandle J. Soil carbon and tree litter dynamics in a red cedar-scotch pine shelterbelt. *Agroforestry Systems*, 2007, 71(3): 163-174.
- [38] Anderson J M, Swift M J. Decomposition in tropical forest//Sutton S. L., Whitmore T. C., Chadwick A. C. *Tropical Rain forest: Ecology and Management*. Blackwell, Oxford, 1983: 287-309.
- [39] Takeda H. Decomposition processes of litter along a latitudinal gradient//Sasa K. *Environmental Forest Science*. Kluwer Academic Publishers, London, 1998: 197-206.
- [40] Attignon S, Weibel D, Lachat T, Sinsin B, Nagel P, Peveling R. Leaf litter breakdown in natural and plantation forests of the Lama forest reserve in Benin. *Applied Soil Ecology*, 2004, 27(2): 109-124.
- [41] Yang Y S, Lin P, Guo J F, Lin R Y, Chen G S, He Z M, Xie J S. Litter production, nutrient return and leaf-litter decomposition in natural and monoculture plantation forests of *Castanopsis kawa kamii* in subtropical China. *Acta Ecologica Sinica*, 2003, 23(07): 1278-1289.
- [42] Yang Y S, Guo J F, Lin P, He Z M, Xie J S, Chen G S. Carbon and nutrient pools of forest floor in native forest and monoculture plantations in subtropical China. *Acta Ecologica Sinica*, 2004, 24(02): 359-367.
- [43] Guo J F, Chen G S, Qian W, Yang S H, Yang Y S, Zheng Q R. Litter production and nutrient return in two natural forests and a *Cunninghamia lanceolata* plantation in Wanmulin Nature Reserve. *Acta Botanica Sinica*, 2006, 26(12): 4091-4098.
- [44] Huang W Z, Schoenau J J. Fluxes of water-soluble nitrogen and phosphorus in the forest floor and surface mineral soil of a boreal aspen stand. *Geoderma*, 1998, 81(34): 251-264.
- [45] Kalbitz K, Solinger S, Park J H, Michalzik B, Matzner E. Controls on the dynamics of dissolved organic matter in soils: A review. *Soil Science*, 2000, 165(4): 277-304.
- [46] Uselman S M, Qualls R G, Lilienfein J. Production of total potentially soluble organic C, N, and P across an ecosystem chronosequence: root versus leaf litter. *Ecosystems*, 2009, 12(2): 240-260.
- [47] Wang Q K, Wang S L, Yu X J, Zhang J, Liu Y X. Effects of *Cunninghamia lanceolata*-broadleaved tree species mixed leaf litters on active soil organic matter. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2007, 18(6): 1203-1207.
- [48] Berendse F, Bobbink R, Rouwenhorst G. A comparative study on nutrient cycling in wet heathland ecosystems. II. Litter decomposition and nutrient mineralization. *Oecologia*, 1989, 78: 338-348.
- [49] Li Z A, Zou B, Zhen D Y, Cao Y S. Key factors of forest litter decomposition and research progress. *Chinese Journal of Ecology*, 2004, 23(6): 77-83.

参考文献:

- [7] 安尼瓦尔·买买提, 杨元合, 郭兆迪, 方精云. 新疆天山中段巴音布鲁克高山草地碳含量及其垂直分布. 植物生态学报, 2006, 30(4): 545-552.
- [8] 吴雅琼, 刘国华, 傅伯杰, 郭玉华. 青藏高原土壤有机碳密度垂直分布研究. 环境科学学报, 2008, 28(2): 362-367.
- [13] 庞学勇, 胡泓, 乔永康, 潘开文, 刘世全, 陈庆恒, 刘庆. 川西亚高山云杉人工林与天然林养分分布和生物循环比较. 应用与环境生物学报, 2002, 8(1): 1-7.
- [14] 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. 生态学报, 2006, 26(2): 373-382.
- [15] 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.
- [16] 毛艳玲, 杨玉盛, 邢世和, 邹双全, 崔纪超. 细柄阿丁枫天然林与杉木人工林土壤水稳性团聚体有机碳比较. 华侨大学学报(自然科学版), 2008, 29(1): 106-110.
- [17] 王迪海, 赵忠, 薛文鹏, 成向荣. 水分生态环境对刺槐细根垂直分布的影响. 水土保持研究, 2005, 12(5): 200-202.
- [18] 曹扬, 赵忠, 渠美, 成向荣, 王迪海. 刺槐根系对深层土壤水分的影响. 应用生态学报, 2006, 17(5): 765-768.
- [19] 从心海, 梁一民, 李代琼. 黄土高原半干旱区沙棘根系特性与土壤水分动态研究. 水土保持通报, 1990, 10(6): 98-103.
- [20] 李裕元, 郑纪勇, 邵明安. 子午岭天然林与人工林群落特征比较研究. 西北植物学报, 2005, 25(12): 2447-2456.
- [21] 董鸣. 陆地生物群落调查观测与分析. 北京: 中国标准出版社, 1996.
- [28] 程云环, 韩有志, 王庆成, 王政权. 落叶松人工林细根动态与土壤资源有效性关系研究. 植物生态学报, 2005, 29(3): 403-410.
- [29] 武春华, 陈云明, 王国梁, 卢建利. 黄土丘陵区典型植物群落根系垂直分布与环境因子的关系. 中国水土保持科学, 2008, 6(3): 65-70.
- [30] 安慧, 韦兰英, 刘勇, 上官周平. 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. 植物营养与肥料学报, 2007, 13(4): 611-619.
- [31] 李鹏, 李占斌, 赵忠, 郑良勇. 渭北黄土高原不同立地上刺槐根系分布特征研究. 水土保持通报, 2002, 22(5): 15-19.
- [32] 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. 应用生态学报, 2000, 11(1): 37-39.
- [33] 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. 水土保持学报, 2002, 16(1): 96-99.
- [34] 赵忠, 李鹏, 薛文鹏, 郭生武. 渭北主要造林树种细根生长及分布与土壤密度关系. 林业科学, 2004, 40(5): 50-55.
- [35] 李勇, 武淑霞, 夏侯国风. 紫色土区刺槐林根系对土壤结构的稳定作用. 水土保持学报, 1998, 4(2): 1-7.
- [42] 杨玉盛, 郭剑芬, 林鹏, 何宗明, 谢锦升, 陈光水. 格氏栲天然林与人工林枯枝落叶层碳库及养分库. 生态学报, 2004, 24(2): 359-367.
- [43] 郭剑芬, 陈光水, 钱伟, 杨少红, 杨玉盛, 郑群瑞. 万木林自然保护区2种天然林及杉木人工林凋落量及养分归还. 生态学报, 2006, 26(12): 4091-4098.
- [47] 王清奎, 汪思龙, 于小军, 张剑, 刘燕新. 杉木与阔叶树叶凋落物混合分解对土壤活性有机质的影响. 应用生态学报, 2007, 18(6): 1203-1207.
- [49] 李志安, 邹碧, 丁永祯, 曹裕松. 森林凋落物分解重要影响因子及其研究进展. 生态学杂志, 2004, 23(6): 77-83.