

东北地区两种主要造林树种生态系统固碳潜力

王春梅^{1,*}, 邵彬², 王汝南¹

(1. 北京林业大学环境学院, 100083; 2. 中国科学院地理科学与资源研究所, 100101)

摘要: 自从 1980 年, 我国开展了一系列举世瞩目的造林工程, 增加了森林面积 3 亿 hm^2 。造林后生态系统有机碳库的微小变化都显著影响大气碳库, 对全球碳素循环和平衡起着重要的作用。研究了退耕还林不同年限长白落叶松林的植被、凋落物和土壤碳库的变化规律, 并且选择可比性较强的退耕还红松林、退耕还草和红松原始林作为参照, 分析总结了退耕还林对生态系统储碳能力和碳循环的影响。结果表明, 退耕还林后生态系统的植被、凋落物碳储量随退耕还林年限增加而增加: 从退耕 3a 到 33a, 植被和凋落物碳储量分别从 4.134、0 Mg/hm^2 增加到 74.11、11.31 Mg/hm^2 。土壤碳储量则是先降低再增加: 在还林初期的 12a 里, 土壤碳密度降低到最小量 75.87 Mg/hm^2 , 随后逐渐恢复和积累, 21a 后, 土壤碳密度恢复到农田的水平 84.28 Mg/hm^2 , 随后土壤碳密度出现净积累。在长白山地区, 退耕 3、12、22a 和 33a 长白落叶松、33a 红松生态系统的碳储量分别是 81.778、114.488、130.004、187.255 Mg/hm^2 和 178.580 Mg/hm^2 。长白落叶松的固碳能力随林龄而增加, 两种主要造林树种(长白落叶松和红松)的生态系统的固碳潜力没有显著差异。长期来看(如 250a), 生态系统碳库存的能力非常大(269.57 Mg/hm^2)。这种状况表明, 在长白山地区退耕还林后, 生态系统长期来看是一个可观的碳汇。

关键词: 碳汇; 造林; 长白落叶松; 红松; 中国东北

Carbon sequestration potential of ecosystem of two main tree species in Northeast China

WANG Chunmei^{1,*}, SHAO Bin², WANG Runan¹

1 College of Environmental Science and Engineering, Beijing Forestry University, Beijing 100083, China

2 Institute of Geographical Sciences and Natural Resources Research, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100101, China

Abstract: Since 1980, China has launched large-scale afforestation campaigns with an area of 30 million hectares. Even if afforestation only slightly affects ecosystem C stocks at the local level, it could have a significant effect on the global C budget if enough agricultural land is converted. We studied the change of C stock in biomass, forest floor and soil and C circle after the cropland was converted to larch (*Olga Bay Larch*, *Larix olgensis* Henry) forest in seven stands in afforestation chronosequence, and made comparisons of ecosystem carbon change with adjacent Korean pine (*Pinus koraiensis* Sieb. et Zucc), pasture, and cropland. An adjacent 250-year-old natural forest was included as a control for the possible long-term carbon storage in Changbai Mountain, northeast China. The findings are that: the C stocks in biomass and forest floor both increased over stand age; from the third year to the 33rd year of cropland-to-forest conversion program, the C stock changed from 4.134 to 74.11 Mg/hm^2 for the biomass, and from 0 to 11.31 Mg/hm^2 for the forest floor. Soil carbon density initially decreased during the first 12 years to a minimum level of 75.87 Mg/hm^2 . Then it gradually recovered and started to accumulate and reached a level of 84.28 Mg/hm^2 in the 21st year, as high as that of cropland. The ecosystem C stocks were 81.778, 114.488, 130.004, 187.255 and 178.580 Mg/hm^2 after afforestation of 3、12、22、33 years for larch and 33 years for Korean pine. The carbon sequestration of larch increased over afforestation time. There was no significant difference in the ecosystem C stocks between larch and Korean pine. The high ecosystem carbon contents (269.57 Mg/hm^2) in the 250-year-old afforested stand suggest that the afforestation ecosystem in Changbai Mountain area

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(30600090); 北京林业大学优秀青年教师科技创新计划资助项目(200-124010)

收稿日期: 2009-01-05; **修订日期:** 2009-02-17

* 通讯作者 Corresponding author. E-mail: sdwcm@126.com

may serve as potential sinks for C in the long run.

Key Words: carbon sequestration; afforestation; *Larix olgensis* Henry; *Pinus koraiensis* Sieb. et Zucc; Northeast China

自 1980 年,我国开展了一系列举世瞩目的造林工程,增加了森林面积 3 亿 hm^2 。与其他陆地生态系统相比,森林生态系统具有较高的生产力,森林植被生物量占全球植被生物量的 86%,而森林土壤中的碳占全球土壤碳的 73%^[1]。造林后生态系统有机碳库的微小变化都显著影响大气碳库,对全球碳素循环和平衡起着重要的作用。因此,森林生态系统在调节全球碳平衡,减缓大气中 CO_2 等温室气体浓度上升以及维护全球气候等方面中具有不可替代的作用^[2-8]。因此,《京都协议书》认可造林可以用来抵消各国承诺的温室气体减排指标。随着全球碳循环受到国内外学者的广泛关注^[2-17],生态系统固碳的研究具有较为重要的理论意义和实践价值。

目前,一些学者估计了造林在全球^[9]和区域^[10-13]尺度上对全球碳循环的贡献,但是在生态系统尺度上研究造林再造林碳汇潜力的比较少^[14]。生态系统碳储量的变化包括生物量碳储量、凋落物碳储量和土壤碳储量的变化,造林再造林后生物量碳储量^[15]和凋落物碳储量^[16]变化明显且相对容易监测,所以研究较多,而土壤固碳方面研究较少^[17]。

本文选择东北长白山地区为研究地点,利用时间替代空间样地测量法量化退耕还林后生物量碳储量、凋落物碳储量和土壤碳储量的变化规律,试图(1)对提高造林对碳汇影响的估测能力,减少预算的不确定性,为将来的碳贸易提供数据支持;(2)对进一步开展造林固碳政策的制定提供科学的指导;(3)为政府参与国际全球气候变化的谈判提供一个很好的案例研究和科学根据。

1 材料和方法

1.1 研究地点描述

研究地点位于长白山地区吉林省敦化市(127°28'—129°17'E, 42°42'—44°30'W),大陆性中温带湿润气候。年平均气温 2.6℃,最热月平均气温 19.8℃,最冷月平均气温 -17.4℃,年平均降水量 631.8mm。地带性的植被是针阔混交林,主要树种是红松(*Pinus koraiensis* Sieb. et Zucc)和长白落叶松(*Larix olgensis* Henry)^[18]。

敦化市地处长白山北侧,四周环山,境内平均海拔 756m,这些山脉均系长白山山脉的支脉。采样地点位于敦化市西南江源镇,其附近有一列西南东北向延伸的山脉,这种在相近坡向和坡度下绵延的地貌形态,为在同种土壤类型下研究退耕还林后土壤碳变化提供了得天独厚的地形条件。土壤类型是暗棕壤,排水状况良好。并且这里有比较完整的退耕还长白落叶松的年限系列。7 个不同的退耕还林(长白落叶松)样地,组成了一个从退耕 1a 到 33a 的时间序列(表 1)。同时,选择样地附近退耕还红松林和退耕还草、农田,以及距离江源镇 2.5km 的 250a 林龄的原始林作为对照点。所有这些样地分布在 1km × 3km 的范围内,海拔在 579—640m 之间,坡向均为北西方向,坡度为 7—13°,除了原始林和退耕 22a 样地外,其余样地均为 2—3 个重复,每个样地面积约 0.5 hm^2 。据调查,所有的退耕样地在退耕前均种植农作物(玉米和黄豆);退耕后直接按照传统方式挖坑种树,样地造林后均没有再施肥。退耕还林样地(包括落叶松和红松样地)作为人工林生态系统,其群落结构简单,当林分郁闭后,培育树种成为绝对优势种群,林下植物难以生存,形成了单层结构,俗称“清膛林”,几乎没有伴生阔叶树和灌木,草本植物也很稀少。

1.2 样品采集和测试

1.2.1 乔木层植被生物量的测定方法

幼树(林龄 < 10a)可利用灌木生物量规范测定,一般树木及天然林对照利用乔木生物量规范测定。除幼树林外,样地面积分别为 20m × 20m,各重复 3 次,在每块样地内进行每木调查,测量树木的树高、胸径和树冠冠幅,计算出平均树高、胸径和树冠冠幅,根据结果确定标准木。标准木的生物量依据参考文献相对生长方程计算^[19-21]。根据标准木的生物量推算整个样地林木的生物量。备测碳含量样品的采集则是:选取 3 株乔木,

树干和树皮用砍刀在距地面 1.3m 处取,为做到树干采样的代表性,在最小破坏范围内尽量采集到树干心材部位;叶片和树枝按冠幅不同层次和方位混合取样;树根采集时在树基周围小心清除土层,沿侧根方向采集两个径级根系分别混合。样品采后分别装入纸袋封好带回备测碳含量。

表 1 调查试验样地的基本情况表
Table 1 Primary information of survey experimental plots

林型和还林时间 Forest type and afforestation age	经纬度 Longitude and latitude	坡向和坡度 Orientation of slope and slope	海拔/m Altitude	全林平均 Average		密度/(株/hm ²)		立地指数 Site index
				胸径/cm DBH	树高/m Height	栽植密度 Density of planting	现实密度 Density of living	
长白落叶 松林, 1a	128°4'43.2"E, 43°10'17.2"N	North west, 9°	640	—	—	7692	7423	—
长白落叶 松林, 3a	128°5'47.2"E, 43°10'34.5"N	North west, 12°	605	1.41 *	0.56	7692	7333	14.21
长白落叶 松林, 8a	128°5'46.8"E, 43°11'31.4"N	North west, 8°	587	5.82	7.70	15300	8075	15.76
长白落叶 松林, 12a	128°5'48.4"E, 43°10'34.5"N	North west, 11°	609	7.32	9.10	8500	3950	14.21
长白落叶 松林, 18a	128°5'44.4"E, 43°10'16.8"N	North west, 9°	640	9.62	12.08	6667	2750	13.34
长白落叶 松林, 22a	128°5'16.5"E, 43°10'30.3"N	North east, 9°	580	9.10	12.28	6667	2850	12.17
长白落叶 松林, 33a	128°5'43.7"E, 43°11'17.6"N	North west, 7°	591	18.24	18.33	6667	1050	13.34
红松林, 33a	128°5'43.1"E, 43°10'45.3"N	North west, 13°	605	14.56	11.18	8333	1900	/

* 地径值

1.2.2 灌木、草本、农作物、凋落物生物量的取样和测定方法

除了原始林,人工林生态系统的下层木和灌木十分稀少。下木层的生物量测定是在每一样地内按对角线或者品字形设置 2m×2m 的样方 5 块。在每块样方内,记载下木的种类、高度和多度,选择 10 株标准样株,并以 50 cm 为一层,对地上部分齐地面分层采样,分别测定其基径(D)和株高(H),按径阶标准木法计算得到各器官生物量。对于灌木层十分稀少的地块,则将灌木逐个砍倒进行实测称重,带回备测碳含量。草本地被物层和农田生物量测定是在每一样地内按梅花形设置 5 个面积 1m×1m 的小样方,记录每个样方内的植物种类,采用全挖法实测生物量,同时用作分析样品。枯枝落叶的采集是在每个样地任意选择 3 个样方,用 20cm×20cm 的固定框把要采集的枯枝落叶圈起来,用布袋收集。

1.2.3 不同乔木、灌木、草本植物、枯枝落叶的含 C 率测定

对于乔木、灌木,分析树干(含树皮)、树枝、叶、树根等各部分碳含量;草本植物,分地上部分、地下部分分别测定。首先清洗根系部分,100℃杀青后在 65℃下烘干至恒重,用植物粉碎机将样品粉碎,过筛。碳含量用干烧法-元素分析仪(FlashEA1112, Thermofinnigan, Italy, 2002)在 1330℃测定碳含量。

1.2.4 土壤样品的采集与测试

每个样地的土壤剖面挖到 1m 深或到基岩,3 个重复,剖面的各种属性被详细记录,全剖面按照发生层次取样,用环刀在每个发生层取样备测容重。

土壤样品自然风干后,研磨,过 100 目筛。用干烧法-元素分析仪(FlashEA1112, Thermofinnigan, Italy, 2002)在 1330℃测定土壤全碳氮。测 pH 值采用电位法(土水比 1:5);采用激光粒度仪测定土壤机械组成;土壤容重用烘干法。

1.3 统计分析

1.3.1 生物量计算

退耕 3a 和 8a 以上长白落叶松林、33a 的红松林生物量分别根据杨义波、王喜武、丁宝勇的研究中的相对

生长方程^[22-24],分别计算树干、树皮、树枝、树根、针叶的生物量。

1.3.2 伐桩干扰问题

考虑到现时土壤排放的 CO_2 量,不包括维持伐桩所代表的林木生长之呼吸作用所产生 CO_2 ,所以可以忽略这部分的干扰,但仍有部分误差,即埋在土壤中的死树根会增加部分微生物及土壤动物活动并产生部分 CO_2 量。

1.3.3 碳储存计算

$$\text{生物量碳储量计算} \quad C_{TB} = M_{si} \times C_{Si} + M_{Bi} \times C_{Bi} + M_{Li} \times C_{Li} + M_{Ri} \times C_{Ri} \quad (1)$$

式中, C_{TB} 是生物量碳储量; M_{si} 是退耕 i 年树干质量, C_{Si} 是退耕 i 年树干的碳含量; M_{Bi} 是退耕 i 年树枝质量, C_{Bi} 是退耕 i 年树枝的碳含量; M_{Li} 是退耕 i 年树叶质量, C_{Li} 是退耕 i 年树叶的碳含量; M_{Ri} 是退耕 i 年树根的质量, C_{Ri} 是退耕 i 年树根的碳含量。

$$\text{凋落物碳储量计算} \quad C_{FF} = M_i \times C_i \quad (2)$$

式中, C_{FF} 是凋落物的碳库储量; M_i 是退耕 i 年凋落物的质量; C_i 是退耕 i 年凋落物的碳含量。

土壤有机碳密度(SOCD)是由土壤有机碳含量、砾石(粒径 $> 2\text{mm}$) 含量和容重共同决定的。SOCD 的计算公式为^[25]

$$T_0 = \sum_{j=1}^n \frac{(1 - \delta_j) c_j \rho_j d_j}{10} \quad (3)$$

式中, T_0 为剖面深度范围内土壤有机碳密度 (Mg/hm^2), n 为土壤剖面的分层数, c_j 为第 j 层土种土壤有机碳含量 (g/kg), ρ_j 为第 j 层平均容重 (g/cm^3), δ_j 第 j 层砾石的体积百分数, d_j 为第 j 层土壤厚度 (cm)。

$$\text{生态系统总碳储量的计算} \quad C_T = C_{FF} + C_{TB} + C_S \quad (4)$$

式中, C_T 是森林群落的总碳储量; C_{FF} 是凋落物的碳储量; C_{TB} 是地上生物量的碳储量; C_S 是土壤碳储量。

2 结果与分析

2.1 植被碳储量的变化

退耕还林是增加生态系统碳汇的重要方式。退耕还林后,不同树种的碳含量不同,退耕 33a 的落叶松(树龄 36a)和退耕 33a 的红松(树龄 38a)的树干含碳量分别是 49.33% 和 47.71%。同一种树木的各个器官碳含量也是不同的,退耕 33a 的落叶松的树枝、树叶和树根的碳含量分别是 46.99%、43.50% 和 45.77%。

不同退耕还林树种的生物量碳储存量是不同的,退耕 33a 的落叶松和红松的生物量碳储存量分别是 $74.11 \text{ Mg}/\text{hm}^2$ 和 $69.941 \text{ Mg}/\text{hm}^2$ (表 2)。因为人工林的落叶松种植密度大,且落叶松是早年速生树种,在 30 多年之前,其生长速度都比红松快,所以积累的生物量较大。同一树种不同退耕还林年限生物量的碳储存量随退耕年限而增加。

可以认为,通过退耕还林,采用人工造林加快恢复植被手段,或者通过自然更新恢复植被手段,都可以有效地增加植被的碳截留,恢复生态系统的本来面目,从而发挥森林生态系统的涵养水源、保持水土等生态功能。

2.2 凋落物碳储量的变化

3a 落叶松林的地表凋落物量非常小,忽略不计。农田的凋落物主要是黄豆的叶片,质量也十分小,和生物量计算在一起。随着退耕年限的增加,凋落物逐渐累积。由于寒冷的气候和针叶较难分解的原因,在落叶松人工林林地上,积累了厚厚的一层以针叶为主的凋落物,凋落的针叶纵横交织,在微生物菌丝的穿织下,形成了结构性很强的“林褥”。不同退耕年限落叶松林地、红松林地和原始林地的凋落物质量变化范围是 $21.21\text{--}39.04 \text{ Mg}/\text{hm}^2$ (表 3)。红松林的凋落物质量最大,虽然原始林有巨大的生物量,但是原始林内的阔叶树种的凋落物比较容易分解,所以凋落物的现存量不是最大的。在落叶松的时间序列样地里,凋落物基本上随树龄增加而增加,在 33a 的时候,由于一部分落叶松被间伐了,所以其凋落物量没有 22a 的大。

表 2 不同生态系统类型植被碳储量的比较

Table 2 Comparison of vegetation carbon stock among different ecosystem types

林型和还林时间 Forest type and afforestation age	林龄/a Stand age	乔木生物量/(Mg/hm ²)				乔木碳储量 /(Mg/hm ²) C stock in arbor	灌木和草本 碳储量 /(Mg/hm ²) C stock in shrub and grass	总碳储量 /(Mg/hm ²) Total C stock
		树干 (含树皮) Stem (including bark)	树枝 Branch	针叶 Needle leaf	树根 Root			
长白落叶松林, 3a	6	1.259	3.065	3.262	0.846	3.834	0.3	4.134
长白落叶松林, 8a	11	38.984	11.453	2.896	16.710	31.516	0.01	31.526
长白落叶松林, 12a	15	35.558	8.393	1.942	13.126	28.504	0.02	28.524
长白落叶松林, 18a	21	56.295	9.958	2.050	17.065	40.571	0.01	40.581
长白落叶松林, 22a	25	53.142	9.713	2.026	16.474	39.235	0.01	39.245
长白落叶松林, 33a	36 *	115.828	11.340	1.837	23.444	73.910	0.2	74.11
红松林, 33a	38 *	79.069	18.328	14.771	32.184	67.921	0.02	67.941

* 落叶松是 3a 苗, 红松是 5a 苗

凋落物的碳含量之间的差异不是很大。碳含量和凋落物的成分和分解程度有关。红松的凋落物碳含量最大为 451.86g/kg, 其次是原始林, 其碳含量是 436.78g/kg, 落叶松的最小。同是落叶松的凋落物, 随着退耕年限的增加, 分解程度的增加, 其碳含量有减小的趋势。33a 的落叶松碳含量最小, 红松比其高 9.3%。凋落物碳储量最大的红松林地, 为 17.64Mg/kg, 是相同退耕年限的落叶松林地的 1.56 倍。其次是原始林为 15.12 Mg/kg。落叶松林地的碳储量基本上随退耕年限而增加, 到 33a 的时候凋落物碳储量增加到为 11.31 Mg/kg。凋落物碳储量在整个生态系统中占的比例虽少, 但也是一个不容忽视的碳库, 减缓凋落物的分解速度对于生态系统的碳截留也起到一定的作用。

2.3 土壤碳储量的变化

各种生态系统类型的土壤剖面、土壤机械组成、土壤容重、pH 和 C 含量如表 3 所示。

表 3 各种生态系统类型的土壤剖面、颗粒分布、pH 和土壤容重

Table 3 Soil projects, soil particle distribution, pH, soil density from four soil pits dug in different forest type

生态系统 类型 Ecosystem	退耕年限 afforestation age(a)	土层 Layer	土层厚度 /cm Depth	粘粒 /% Clay	粉粒 /% Silt	砂粒 /% Sand	土壤容重 soil densit /(g/cm ³)	pH	C /(g/kg)
农田	—	A	0—13.5	4.78	52.63	42.59	1.08 (0.09)	6.1 (0.08)	2.88
		B	13.5—34.4	4.53	49.60	45.87	1.65 (0.11)	6.44 (0.12)	1.38
长白落叶松	33	A	0—21.7	9.32	63.75	26.94	0.98 (0.03)	5.72(0.07)	1.96
		B	21.7—56	2.95	71.91	25.14	1.46 (0.06)	5.85 (0.16)	1.35
红松	33	A	0—13.3	7.34	75.05	17.62	1.04 (0.08)	5.98(0.12)	3.06
		B	13.3—43	1.16	69.33	29.52	1.49 (0.1)	5.88 (0.11)	1.21
草	15	A	0—12.8	7.37	40.40	52.22	0.90 (0.03)	5.84(0.12)	5.01
		B	12.8—48	7.02	45.64	47.34	1.3 (0.07)	6.02 (0.11)	1.07
原始林(250a)	—	A	0—15.2	0.60	64.84	34.58	0.63 (0.02)	6.51 (0.13)	7.33
		B	15.2—58.3	1.08	84.32	14.6	1.27 (0.06)	6.13 (0.17)	1.52

因为粉质含量都大于 45%, 所以这些土壤质地都应称为粉质。这种质地的土壤兼有沙土和粘土的优点, 可保水保肥, 耕性优良, 是较为理想的土壤。随着退耕还林年限的增加, 粘粒含量有增加的趋势, 土壤质地没有恶化现象。退耕还林后土壤 pH 值降低了约 0.3 个单位, 有弱酸化趋势。

土壤上不同退耕还林年限 0—100cm 土壤有机碳密度的变化范围是 70.87—115.83 Mg/hm² (表 4)。在退耕 12a 的时候降为最低 75.87 Mg/hm², 比退耕 1a 的降低了 9.6%。然后, 土壤碳密度缓慢增加, 到 33a 的

时候增加为 101.83 Mg/hm^2 , 比退耕 1a 的增加了 21.4%。暗棕壤土壤上的农田土壤碳密度为 84.032 Mg/hm^2 , 当退耕还林 21a 的时候土壤碳密度 (84.28 Mg/hm^2) 恢复到农田土壤碳水平。以后退耕还林地的土壤出现净累积。

表 4 不同生态系统凋落物和土壤碳储量

Table 4 Carbon content in forest floor and soil of different ecosystem systems

生态系统类型 Ecosystem	凋落物质量 /(Mg/hm^2) Mass of forest floor	凋落物碳含量/(g/kg) C content of forest floor	凋落物碳储量 /(Mg/hm^2) C stock of forest floor	0—100cm 土壤碳储量 /(Mg/hm^2) C stock of soil in 0—100cm
长白落叶松林(1a)	—	—	—	83.90
长白落叶松林(3a)	—	—	—	77.74
长白落叶松林(8a)	21.21(1.02)	422.14(21.11)	8.95(0.44)	80.16
长白落叶松林(12a)	24.01(1.18)	420.19(20.99)	10.09(0.49)	75.87
长白落叶松林(18a)	25.47(1.19)	418.22(20.90)	10.65(0.52)	90.01
长白落叶松林(22a)	27.29(1.38)	415.43(20.77)	11.34(0.56)	79.42
长白落叶松林(33a)	23.86(1.11)	413.5(19.34)	11.31(0.57)	101.83
红松(33a)	39.04(1.39)	451.86(22.59)	17.64(0.87)	93.00
农田	—	—	—	84.03
草地(15a)	—	—	—	116.20
原始林(250a)	29.86(1.36)	436.78(21.78)	15.12(0.76)	183.57

红松样地的土壤有机碳密度是 93 Mg/hm^2 , 比农田增加了 10.7%。同是退耕 33a, 红松样地比长白落叶松样地碳密度减少了 8.7%。说明不同的树种对土壤碳库存在差异, 但在整个剖面上差异不是十分显著。红松凋落物的质量、凋落物碳含量及凋落物碳储量都比落叶松高(表 4), 但红松凋落物的分解速率小于落叶松, 凋落物的年失重率是分别是 30% 和 35%, 红松和落叶松凋落叶分解 50% 及 95% 分别需要 2.1 a 和 8.8a、1.6 a 和 6.6 a, 所以两种树种下土壤碳含量整体差异不是十分显著。人工林的特殊群落结构形成了独特的林下生态环境。落叶松和红松人工林郁闭后, 林分郁闭度近 1.0。林下光照不足, 温度较低, 形成了相对封闭的小气候, 造成土壤动物和微生物种类和数量的减少, 从而影响了凋落物的分解速率。草地的碳密度是 116.2 Mg/hm^2 , 比长白落叶松样地、红松样地分别高 14.1% 和 24.9%。说明退耕还草和还树对土壤碳密度影响比较大。森林植被凋落物一般在地表分解, 草原土壤有机碳的主要来源是草本植物的残根。松树的凋落物量很大, 但由于温度低, 凋落物回归土壤的速率比较慢; 而草地的凋落物和草根则相对容易分解。原始林的碳密度是 183.57 Mg/hm^2 , 是农田的 2.0—2.2 倍。对于耕地土壤, 由于农作物秸秆在收割时移走、地温和淋溶损失较高, 扰动导致土壤碳分解增加, 而且水土流失也带走一部分有机碳, 其有机碳密度比森林土壤低^[8,26]。

2.4 退耕还林后生态系统碳储量的变化

生态系统总碳储量包括植被碳储量、凋落物碳储量和土壤碳储量。在农田生态系统中, 由于农作物的生物量比较小, 其碳储量也小, 农田总碳储量基本上都是土壤碳储量。随着造林后生物量的增加, 土壤碳占的比重逐渐减少, 但是即使是原始林中, 土壤碳储量也占 68%。可见减少土壤碳排放可以使整个生态系统固定更多的碳。退耕还林后造落叶松和红松对生态系统碳储量没有显著差异, 落叶松林的生物量和土壤碳储量都比红松林大, 但是红松林的凋落物碳储量比落叶松林高, 所以落叶松林的总碳储量仅仅比红松林的高 5%。退耕还草对土壤碳储量有显著提高, 退耕 15a 的草地土壤碳储量是退耕 15a(12a 和 18a 林地的平均值)落叶松

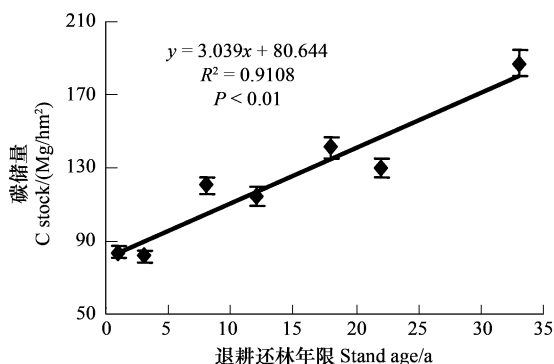


图 1 退耕还落叶松生态系统碳储量随时间变化

Fig. 1 Carbon stores in tree biomass, forest floors and soil in afforestation chronosequences of larch

林地的 1.4 倍,但是整个生态系统的碳储量则没有显著性差异。而且随着造林年限的增加,地上生物量增加很快,而草地的地上生物量的变化则相对比较小。

因为落叶松人工林和红松林的轮伐期分别是 40a 和 80a。36 年生的落叶松已经接近成熟,40a 左右,落叶松林的生物量已趋于平稳,而红松的生物量还在继续增加。所以在落叶松林到了成熟年龄之后,红松林生态系统的碳储量会很快超过落叶松林。

3 讨论

从农田到森林的土地利用方式的改变意味着耕作和收获庄稼的循环被更长周期的森林循环代替了。在这种情况下,会产生更多的生物量,并且减少土壤干扰的程度。生物量碳作为生态系统中积累的植物有机物总量,是整个生态系统运行的能量基础和营养物质来源,因此分析不同生态系统类型下的植被碳储量具有重要意义。退耕还林地的生物量主要是乔木,因为人工林生态系统的一大特点是结构简单,特别是纯针叶单层林,当林分郁闭后,培育树种成为绝对优势种群,林下植

物难以生存,形成了单层结构,俗称“清膛林”,几乎没有伴生阔叶树和灌木,草本植物也很稀少^[27]。退耕还林后,生物量碳储量是明显增加的,退耕 33 年的落叶松和红松的生物量碳截留量分别是 73.91 Mg/hm² 和 63.921 Mg/hm²。这和 Vesterdal 研究的结论一致,28—29 年生的橡树 (*Quercus albus*) 和云杉 (*Picea asperata* Mast) 生物量碳储量是 75 Mg C/hm² 和 105 Mg C/hm²^[9]。

凋落物是土壤碳的先驱,凋落物的性质和分解速率影响土壤碳库的变化。土壤碳库变化的速度比在生物量中慢得多,因为土壤中碳储存的变化有个缓冲作用。土壤碳含量主要由两部分决定的:一是植物枯枝落叶的输入量,二是枯枝落叶的分解率。当农田被转化为森林的时候,农田生态系统的碳输入和输出平衡被打破,造林后的田地将不再施有机肥,而森林这种新的生态系统的循环机制还不健全,处于一种无序状态。长白落叶松凋落物平均碳含量是 417.90 mg g⁻¹,凋落物分解较慢,一般年分解率为 20%—30%,针叶人工林的林木吸收了土壤中的速效养分,在养分归还土壤的过程中,有相当长时间处于难利用状态,营养元素生物循环受到了阻滞^[27]。在退耕还林初期,由于幼树比较小,凋落物的归还就较少。而在这个期间,来自农业耕作的有机物还在继续分解。且来自农田里的凋落物比较容易分解,再加上由于频繁的土壤翻耕更利于土壤微生物分解^[28]。另外,在这个过渡阶段,凋落物的分布和农业土壤相比是不均匀的。因此,退耕还林后 12a 土壤碳密度降低,随着地上生物量的积累,凋落物回归的增加,人工林这种生态系统中一种新的循环逐渐建立。在一个稳定的森林生态系统中,根据森林里凋落物的输入和分解率,土壤碳积累将会达到一个新的动态平衡,这时年度变化就不明显。有研究表明,在夏威夷种植甘蔗的农田种植桉树后,表层来自桉树的碳增加被次表层来自甘蔗的碳分解所抵消。Guo 等^[4]对全球 74 篇关于土地利用变化对土壤中碳储量影响的文献中 537 个观测点的数据进行分析,发现从草地到人工林的土地利用变化,土壤碳储量下降 10%,而从农田到人工林的土地利用变化,土壤碳储量增加 18%。

4 结论

退耕还林后生态系统的植被碳储量、凋落物碳储量和土壤碳储量都随退耕还林年限而变化。在退耕还林初期的 12a 里,土壤碳库存减少,随后逐渐恢复和积累。退耕后 12a 碳密度降低到最小量 75.87 Mg/hm²,然后逐渐恢复,在退耕 21a 的时候,土壤有机碳恢复到农田的水平 84.28 Mg/hm²。21a 后土壤碳密度出现净积累。

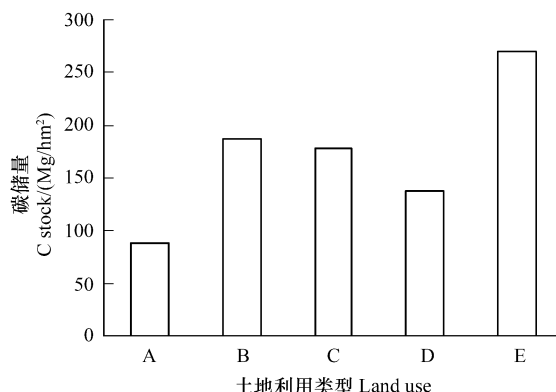


图 2 对比不同的土地利用方式生态系统碳储量

Fig. 2 Comparison of carbon stock in tree biomass, forest floor and soil in different land use

A: 农田; B: 落叶松、退耕 33a; C: 红松、退耕; D: 草、退耕 15a; E 原始林、约 250a

退耕 3、12、22a 和 33a 长白落叶松和 33a 的红松生态系统的总碳储量分别是 81.778、114.488、130.004、187.255 Mg/hm^2 和 178.580 Mg/hm^2 。东北地区主要的造林树种(长白落叶松和红松)的生态系统的总碳储量没有明显差异。而长期来看(如 250a),生态系统碳库存的能力非常大(269.57 Mg/hm^2)。这种状况表明,长白山地区退耕还林后,生态系统长期来看是一个可观的碳汇。

References:

- [1] Sedjo R A. The carbon cycle and global forest ecosystem. *Water, Air and Soil Pollution*, 1993, 70: 295-307.
- [2] Banaitis M R, Langley-Turnbaugh S J, Aboueissa A A. Variations of Soil Organic Carbon in Three Urban Parks: A Maine Case Study. *International Journal of Applied Environmental Sciences*, 2007, 2:119-128.
- [3] Paul K I, Polglase P J, Nyakuengama J G, Khanna P K. Change in soil carbon following afforestation. *Forest Ecology and Management*, 2002, (168): 241-257.
- [4] Guo L B, Gifford R M. Soil carbon stocks and land use change: a meta analysis. *Global Change Biology*, 2002, (8):345-360.
- [5] Nie D P, Xu D Y, Wang B. Research on the relation between lobule carbon recycle and forest — problem and progress. *World Forestry Research*, 1997, 10(5): 34-40.
- [6] Yang Y B. Research of biomass of the young trees of *Larix olgensis*. *Journal of Jilin Forestry University*, 1995,11(2):22-25.
- [7] Tao B, Ge Q S, Li K R. Progress in the studies on carbon cycle in terrestrial ecosystem. *Geographical Research*, 2001,20(5): 564-575.
- [8] Zhou Y R, Yu Z L, Zhao S D. Carbon storage and carbon balance of main forest ecosystem of China. *Chinese Journal of Plant Ecology*, 2000,24(5): 518-522.
- [9] Vesterdal L, Ritter E, Gundersen P. Change in soil organic carbon following afforestation of former arable land. *Forest Ecology and Manage*, 2000, 169: 137-147.
- [10] Sharpe D M, Johnson W C. Land use and carbon storage in Georgia forests. *Journal of Environmental Management*, 1981, 12: 221-233.
- [11] Maclaren J P, Wakelin S J. Forestry and forest products as a carbon sink in New Zealand. FRI Bulletin No. 162. Forest Research Institute, Rotorua, New Zealand, 1991.
- [12] Shvidenko A, Nilsson S, Roshkov V. Possibilities for increased carbon sequestration through the implementation of rational forest management in Russia. *Water Air Soil Pollution*, 1997, 94, 137-162.
- [13] Turner D P, Koerper G J, Harmon M E, Lee J J. Carbon sequestration by forests of the United States-current status and projections to the year 2040. *Tellus Ser, B*, 1995, 47: 232-239.
- [14] Chen X G, Zhang Y P, Zhan H. Biomass carbon sequestration potential of trees under the Grain for Green programs in Yunnan Province. *Scientia Silvae Sinicae*, 2008,44(5), 24-30.
- [15] Fang J Y, Chen A P, Peng C H, Zhao S Q, Ci L. Changes in Forest Biomass Carbon Storage in China between 1949 and 1998. *Science*, 2001, 291: 2320-2322.
- [16] Zhang D L, Mao Z J, Zhu S Y, Zhou B. Litter falls of 6 major forest stands in Maoershan Mountain of Heilongjiang Province. *Botanical Research*, 2008, 28(1):104-108.
- [17] Zinn Y L,, Resck D V S, Silva J E D. Soil organic carbon as affected by afforestation with Eucalyptus and Pinus in the Cerrado region of Brazil. *Forest Ecology and Management*, 2002, 166: 285-294.
- [18] Wang C M, Ouyang H, Shao B, Tian Y Q. Soil carbon changes following afforestation with Olga Bay Larch (*Larix olgensis* Henry) in Northeastern China. *Journal of Integrative Plant Biology*, 2006, 48 (5):1-5.
- [19] Feng Z W, Wang X K, Wu G. The biomass and productivity of forestry ecosystem, China. Beijing: Science Press, 1999: 164-171.
- [20] Peng S L, Ren H. Study on the energy and ecology of forest ecosystem of South Subtropics. Beijing: China Meteorological Press, 1998: 18-22.
- [21] Jiang Y X. Study on the structure and function of forest ecosystem of China. Bijing: China Forestry Publishing House, 1996.
- [22] Yang Y B. Study on the relative growing relation of all organs of Olga Bay Larch (*Larix olgensis* Henry). *Jilin Forestry Science and Technology*, 1995, 4(117):12-14.
- [23] Wang X W. Research on the biomass measuring of Olga Bay Larch (*Larix olgensis* Henry). *Liaoning Forestry Science and Technology*, 1993, (6):18-21.
- [24] Ding B Y. Biomass of the planted red pine community in east mountain area in Northeast China. *Jilin Forestry Science and Technology*, 1989: 18-21.
- [25] Jin F, Yang H, Cai Z C. Statistical research on the soil organic carbon density and storage. *Acta Pedologica Sinica*, 2001, 38(4): 522-528.
- [26] Zhao G, Jiang Y B. Study on the three kinds of mature stand age of Olga Bay Larch (*Larix olgensis* Henry), *Liaoning Forestry Science and*

Technology, 1995, (2): 31-34.

- [27] Cui G F. Regressive mechanism of man-made forest and preventing measure. Research of World Forestry, 1996, (5): 61-69.
- [28] Bouwman A F, Leemans R. The role of forest soils in the global carbon cycle//Mcfee W F, Kelly F M, eds. Carbon Forms and Functions in Forest Soils. Soil Science Society of America, Madison, WI, 1995. 503-525.

参考文献:

- [5] 聂道平,徐德应,王兵. 全球碳循环与森林关系的研究——问题与进展. 世界林业研究, 1997, 10(5): 34-40.
- [6] 杨义波. 长白落叶松(*Larix olgensis*)幼树生物量的初步研究. 吉林林学院学报, 1995, 11(2): 22-25.
- [7] 陶波,葛全胜,李克让. 陆地生态系统碳循环研究进展. 地理研究, 2001, 20(5): 564-575.
- [8] 周玉荣,于振良,赵士洞. 我国主要森林生态系统碳贮量和碳平衡. 植物生态学报, 2000, 24(5): 518-522.
- [14] 陈先刚,张一平,詹卉. 云南退耕还林工程林木生物质碳汇潜力. 林业科学, 2008, 44(5): 24-30.
- [16] 张东来,毛子军,朱胜英,周彪. 黑龙江省帽儿山林区6种主要林分类型凋落物研究. 植物研究, 2008, 28(1): 104-108.
- [19] 冯宗炜,王效科,吴刚. 中国森林生态系统的生物量和生产力. 北京:科学出版社, 1999: 164-171.
- [20] 彭少麟,任海. 南亚热带森林生态系统的能量生态研究. 北京:气象出版社, 1998.
- [21] 蒋有绪. 中国森林生态系统结构与功能研究. 北京:中国林业出版社, 1996.
- [22] 杨义波. 长白落叶松幼树各器官相对生长关系的研究. 吉林林业科技, 1995, 4(117): 12-14.
- [23] 王喜武. 长白落叶松生物量测定的初步探讨. 辽宁林业科技, 1993, (6): 18-21.
- [24] 丁宝勇. 东北东部山区红松人工林群落生物量的研究(林龄37年). 吉林林业科技, 1989, 18-21.
- [25] 金峰,杨浩,蔡祖聪. 土壤有机碳密度及储量的统计研究. 土壤学报, 2001, 38(4): 522-528.
- [26] 赵刚,姜以斌. 长白落叶松人工林3种成熟龄的研究. 辽宁林业科技, 1995, (2): 31-34.
- [27] 崔国发. 人工林地力衰退机理及其防止对策. 世界林业研究, 1996, (5): 61-69.