

耕地造林和撂荒 2 种植被恢复方式碳储量差异

彭 阳, 白彦锋, 姜春前, 徐 睿, 刘秀红

(中国林业科学研究院 林业研究所, 北京 100091)

摘要: 为了解耕地在造林和撂荒这 2 种恢复方式下生态系统碳储量的差异和分配特征, 并为估算森林碳汇提供基础数据支撑, 在 2016 年 7-8 月, 采用野外样地调查并结合室内测定对湖南会同恢复 14 a 的退耕还林地(即耕地造林)和农田撂荒地(即耕地撂荒)进行植被、凋落物以及土壤碳储量的调查。结果表明: ①退耕还林地的生物量碳储量显著($P<0.05$)高于农田撂荒地。其中, 退耕还林地的乔木层碳储量高于农田撂荒地, 并且前者是后者的 2.76 倍, 但灌木层和草本层正好相反。②耕地在 2 种恢复方式下土壤碳质量分数均随土壤深度的增加而依次减小。农田撂荒地土壤碳储量随土壤深度的增加也依次减小, 但退耕还林地土壤碳储量的大小为 20~40 cm>0~10 cm>40~60 cm>10~20 cm>60~80 cm。退耕还林地 0~80 cm 深土壤碳储量略高于农田撂荒地, 但两者没有显著差异($P>0.05$)。③退耕还林地生态系统碳储量要高于农田撂荒地。2 种恢复方式下各组分碳储量大小均为土壤层>乔木层>凋落物层>草本层>灌木层。研究显示, 在试验时段内, 耕地采用造林的方式其固碳能力要优于撂荒的方式。表 7 参 21

关键词: 森林生态学; 耕地; 退耕还林地; 农田撂荒地; 恢复; 碳储量

中图分类号: S718.5 **文献标志码:** A **文章编号:** 2095-0756(2018)02-0235-08

Carbon storage differences for farmland with two rehabilitation approaches

PENG Yang, BAI Yanfeng, JIANG Chunqian, XU Rui, LIU Xiuhong

(Research Institute of Forestry, Chinese Academy of Forestry, Beijing 100091, China)

Abstract: To understand the differences and allocation of carbon storage on farmland with afforestation versus abandonment and to provide basic accounting data for forest carbon storage. When farmland through afforestation and abandonment had been restored 14 years respectively, the carbon storage of vegetation, litter, soil were estimated through field investigation and laboratory bioassay. Results showed that (1) biological carbon storage of returning farm to forest was significantly higher than that of abandoned farmland ($P<0.05$). The tree layer of returning farm to forest was 2.76 times the abandoned farmland; whereas, the shrub layer and the herb layer were lower than the latter. (2) Soil carbon content for the two rehabilitation approaches decreased with an increase in soil depth. Soil carbon storage on abandoned farmland also decreased with an increase of soil depth. Soil carbon storage from 0 to 80 cm depths for returning farm to forest was in the order of 20-40 cm>0-10 cm>40-60 cm>10-20 cm>60-80 cm. The soil carbon storage of 0-80 cm deep for returning farm to forest was not significantly different ($P>0.05$) from abandoned farmland. (3) Carbon storage for the ecosystem in returning farm to forest was higher than that of abandoned farmland($P<0.05$). Carbon storage of the ecosystem with the two rehabilitation approaches was soil layer>tree layer>litter layer>herb layer>shrubs layer. This study showed that during this period the carbon sequestration capacity with afforestation on farmland was better than abandonment. [Ch, 7 tab. 21 ref.]

收稿日期: 2017-03-03; 修回日期: 2017-05-16

基金项目: 中央级公益性科研院所基本科研业务费专项基金资助项目(CAFYBB2014MB001, CAFYBB2014QA001)

作者简介: 彭阳, 从事碳计量研究。E-mail: pyang356@yeah.net。通信作者: 姜春前, 研究员, 博士, 从事林业与气候变化研究。E-mail: jiangchq@caf.ac.cn

Key words: forest ecology; farmland; returning farm to forest; abandoned farmland; rehabilitation; carbon storage

大气中二氧化碳(CO₂)等温室气体浓度增加引起全球气候变暖,这已经成为当前人类面临的最为严重的环境问题之一^[1]。通过植树造林实现森林碳汇功能是当前最为快捷和有效的碳平衡方法之一^[2]。其中,将农田转变为森林的土地利用方式,已成为国家减排增汇的一项重要措施^[3]。中国自20世纪90年代以来在全国开展“退耕还林”工程,除了体现在植物覆被的变化以及社会、经济和生态效益之外,其固碳效益也引起了人们重视^[4]。中国“退耕还林”工程的实施将会增强陆地生态系统的碳汇功能^[5]。迄今为止,已有许多学者对耕地变为林地后的生态系统碳储量变化^[6]及不同造林树种^[7]、不同退耕年限^[8]、不同立地条件^[9]等因素对退耕还林生态系统碳储量的影响进行了研究。在耕地上造林,相对于耕地来说其生物量碳储量明显增加,但土壤碳储量的变化还未得到一致的结果。耕地的恢复方式除通过造林外,还有一种方式是撂荒。在20世纪后期由于山区人口减少,全球出现了耕地撂荒的现象^[10],即由农田转变为农田撂荒地。农田撂荒地已经是分布广泛的土地利用类型之一^[11]。一般来说,只要破坏不严重,农田撂荒地可以通过自然演替进行植被恢复。PRACH等^[12]认为:农田撂荒地的自然演替是一种成本低廉、生态有效的恢复方式。NOVARA等^[13]认为:农田撂荒地从草本演替为木本植物阶段后,其土壤碳储量增加了14 g·kg⁻¹。森林碳储量及其变化的准确估算是核算碳汇的数据基础。造林碳汇一般是计算造林增加的碳储量减去造林前的土地利用在无人介入的情况下通过自然生长所固定的碳。通常在估算其自然生长所固定的碳时多采用模型预测或简单推理。如魏亚韬^[14]采用简单推理法来确定造林前的荒山通过自然生长所到达的状态,估算其碳储量。本研究中,耕地通过撂荒的方式恢复即为无人介入植被自然生长的状态。因此,本研究估算耕地在撂荒恢复后其生态系统碳储量能够为核算中国造林碳汇提供理论和基础数据支撑。此外,估算耕地通过造林方式(以下简称“退耕还林地”)与撂荒方式(以下简称“农田撂荒地”)恢复14 a后的生态系统碳储量,比较分析耕地在造林和撂荒方式下生态系统碳储量的差异及空间分配特征。研究结果将明晰耕地的不同植被恢复方式对生态系统碳储量的影响,这对今后耕地采用何种恢复经营措施具有重要的指导意义。

1 研究区概况与研究方法

1.1 研究区概况

试验地位于湖南省会同县境内(26°50'N, 109°36'E),地处云贵高原东缘和雪峰山脉西南部,海拔高度为300~500 m,为低山丘陵地貌类型。气候属典型亚热带湿润季风气候,年平均气温16.6℃,年平均降水量1 265.0 mm,年平均相对湿度80%。土壤类型为山地红黄壤。地带性植被为常绿阔叶林,以壳斗科Fagaceae的常绿树种如栲 *Castanopsis fargesii* 和青冈 *Cyclobalanopsis glauca* 等为主,人工林树种多为杉木 *Cunninghamia lanceolata* 和马尾松 *Pinus massoniana* 等。

在2016年7~8月,选取具有相似立地条件且恢复均为14 a的农田撂荒地和退耕还林地为研究对象进行调查。2个样地的土壤类型均为山地黄壤。各样地基本概况见表1。

1.2 研究方法

1.2.1 样地设置及植被调查 在农田撂荒地和退耕还林地分别按照坡位选取10块大小为10 m × 10 m

表1 样地基本概况

Table 1 Basic information of plots

样地类型	测量时年限/a	平均海拔/m	平均树高/m	平均胸径/cm	样地特征
农田撂荒地	14	380~410	7.9	6.6	在2002年弃耕,弃耕后无人管理,通过撂荒的方式自然恢复,周围是常绿阔叶林和杉木林。目前多以灌木和草本为主,有少量的乔木。乔木层的优势种为枫香 <i>Liquidambar formosana</i> 等,灌木层的优势种是梵天花 <i>Urena procumbens</i> ,空心泡 <i>Rubus rosifolius</i> 等,草本多以芒 <i>Miscanthus sinensis</i> 等为主
退耕还林地	14	331~354	16.1	14.9	在2002年实施退耕还林,造林树种为杉木,初植密度为2 490株·hm ⁻² 。目前乔木层多以杉木为主,灌木层主要为菝葜 <i>Smilax china</i> 和地苳 <i>Melastoma dodecandrum</i> 等,草本层多为狗脊 <i>Woodwardia japonica</i> 等

的标准样地。①乔木层：对标准样地内所有乔木进行每木检尺，记录树种名称、胸径和树高。②林下植被层：在各个标准样地的四角和中央各设 1 个 2 m × 2 m 的样方，记录样方内所有灌木和草本的种名、基径以及株高。在样方内选取一些主要灌木、草本植株，测量其基径和株高后挖取全株带回实验室，在 105 °C 恒温条件下杀青 10~30 min，然后在 75 °C 下烘至恒量，称量并记录各株植株总干质量以及灌木各器官干质量，草本植物记录地上、地下部分干质量，同时用作分析样品。③凋落物层：在各个标准样地内分别随机选取 3 个 1 m × 1 m 的样方收集凋落物。收集的凋落物全部称其湿质量。取部分样品，称湿质量后再称其干质量得到凋落物含水量，同时用于测定碳质量分数。④土壤层：在各个标准样地内按对角线法布点 3 个，并均按 0~10, 10~20, 20~40, 40~60, 60~80 cm 分层用土钻分别采集土壤样品。将同一样方内相同土层所取的样品等量混合带回实验室，土壤样品风干后过 2 mm 筛备用。同时，在每个标准地内各挖 1 个规格为 100 cm × 100 cm 的土壤剖面，采用环刀法测定土壤容重。

1.2.2 碳储量计算方法 (1)生物量的计算。①乔木层：根据所测得树高和胸径，采用当地生态站建立的各种树种异速生长方程得出。具体方程见当地生态站数据集^[15]。②灌木层：根据所测的基径和株高，采用当地生态站已有的灌木生物量方程进行估算。具体方程见当地生态站数据集^[15]。③草本层：当地生态站数据库中有利用收获法测得的多种草本层地上、地下部生物量，根据相同基径、株高的同种草本具有相似生物量，故利用计算机在数据库中查找与调查时记录的草本同种且基径株高一一致的植株，计算这些条件相同的草本生物量平均值作为所调查草本植株的生物量。④凋落物层：采用干质量/鲜质量比估算其生物量。(2)碳质量分数的测定。采用元素分析仪测定采集的白栎 *Quercus fabri*, 枫香, 梵天花和芒等主要乔木、灌木、草本各器官碳质量分数和所有凋落物碳质量分数以及土壤碳质量分数。其中农田撂荒地的凋落物平均碳质量分数为 378.1 g·kg⁻¹, 退耕还林地的凋落物平均碳质量分数为 465.1 g·kg⁻¹。其余实际测定的物种碳质量分数见表 2~4。未采集的乔木、灌木和草本平均碳质量分数引自生态站长期监测数据库中数据^[15]。(3)碳储量的计算。①生物量碳储量为各部分生物量乘以相对应的碳质量分数后得出。②土壤碳储量根据下列公式^[16]进行计算。

$$S = \sum_{i=1}^n (C_i \times d_i \times H_i) / 10.$$

其中：S 为土壤层有机碳储量(t·hm⁻²)，C_i 为第 i 层土壤碳质量分数(g·kg⁻¹)，d_i 为第 i 层土壤的平均容重(g·cm⁻³)，H_i 表示第 i 层土壤的厚度(cm)，n 为土壤层数。③森林生态系统碳储量为乔木层、灌木层、草本层、凋落物层、土壤层碳储量之和。

1.3 数据处理

采用 Excel 处理数据，用 SPSS 19.0 进行 t 检验和单因素方差分析，应用最小显著差异法(LSD)分析

表 2 2 种恢复方式下乔木层主要树种碳质量分数

Table 2 Carbon content of main species of tree layer under two rehabilitation approaches

树种	恢复方式	$w_{\text{碳}} / (\text{g} \cdot \text{kg}^{-1})$				
		树干	树枝	树叶	树皮	树根
杉木	造林	439.7	416.3	390.1	428.9	430.6
枫香	撂荒	476.0	454.2	455.1	433.6	447.0
白栎	撂荒	460.7	475.4	470.8	458.0	418.1
马尾松	撂荒	529.1	562.9	563.0	557.0	567.2

表 3 2 种恢复方式下灌木层主要物种碳质量分数

Table 3 Carbon content of main species of shrub layer under two rehabilitation approaches

物种	恢复方式	$w_{\text{碳}} / (\text{g} \cdot \text{kg}^{-1})$		
		枝干	叶	根
梵天花	撂荒	440.2	435.0	415.5
太平莓 <i>Rubus pacificus</i>	撂荒	464.5	481.4	430.0
大叶白纸扇 <i>Mussaenda esquirolli</i>	撂荒	408.7	388.1	400.6
杜茎山 <i>Maesa japonica</i>	造林	390.3	390.2	369.8
细齿叶柃 <i>Eurya nitida</i>	造林	478.5	395.5	456.9

表4 2种恢复方式下草本层主要物种碳质量分数

Table 4 Carbon content of main species of herb layer under two rehabilitation approaches

物种	恢复方式	$w_{\text{碳}}/(\text{g}\cdot\text{kg}^{-1})$	
		地上	地下
芒	撂荒	443.9	414.9
六月雪 <i>Serissa serissoides</i>	撂荒	449.9	444.6
碎米莎草 <i>Cyperus iria</i>	撂荒	422.3	374.8
山蚂蝗 <i>Desmodium</i>	撂荒	457.6	409.6
狗脊	撂荒	442.1	381.4
狗脊	造林	445.2	385.9
金星蕨 <i>Parathelypteris glanduligera</i>	造林	385.65	350.19
淡竹叶 <i>Lophatherum gracile</i>	造林	336.24	335.8

不同数据组间的差异性，显著性水平设置为 $\alpha=0.05$ 。

2 研究结果

2.1 乔木层碳储量及分配特征

恢复 14 a 后的退耕还林地乔木层碳储量是农田撂荒地的 2.76 倍，两者具有显著差异 ($P<0.05$) (表 5)。其中，退耕还林地的乔木层地上部碳储量为 $(68.05 \pm 7.89) \text{ t}\cdot\text{hm}^{-2}$ ，农田撂荒地 $(19.77 \pm 2.95) \text{ t}\cdot\text{hm}^{-2}$ ，前者高于后者且为后者的 3.44 倍；而农田撂荒地的乔木层地下部碳储量（即树根碳储量）略高于退耕还林地，但两者并没有显著差异 ($P>0.05$)。由于不同恢复方式形成的树种不同，因此乔木层各器官碳储量分配有所不同。农田撂荒地的乔木层各器官碳储量大小依次为树干>树根>树枝>树皮>树叶。退耕还林地的乔木层各器官碳储量大小依次为树干>树叶>树皮>树枝>树根。尽管 2 种恢复方式下均为树干对乔木层碳储量的贡献率最大，但是其余各器官碳储量分配格局却大不相同。

表5 2种恢复方式生物量碳储量及分配

Table 5 Biological carbon storage and allocation under two rehabilitation approaches

项目	部位	碳储量/ $(\text{t}\cdot\text{hm}^{-2})$		分配比/%	
		农田撂荒地	退耕还林地	农田撂荒地	退耕还林地
乔木层	树干	11.190 ± 1.63 Aa	35.010 ± 4.16 Ba	43.45 ± 0.38	49.11 ± 0.06
	树枝	5.190 ± 0.82 Ab	5.060 ± 0.61 Ab	20.11 ± 0.12	7.09 ± 0.02
	树叶	1.590 ± 0.26 Ac	22.140 ± 2.49 Bc	6.16 ± 0.21	31.12 ± 0.21
	树皮	1.800 ± 0.28 Ac	5.840 ± 0.66 Bb	6.98 ± 0.08	8.21 ± 0.08
	树根	6.040 ± 0.99 Ab	3.210 ± 0.50 Ab	23.30 ± 0.36	4.47 ± 0.23
	小计	25.810 ± 3.84 A	71.260 ± 8.38 B	100.00	100.00
灌木层	枝干	0.136 ± 0.017 Aa	0.034 ± 0.002 Ba	58.31 ± 2.18	47.66 ± 4.16
	叶	0.031 ± 0.004 Ab	0.017 ± 0.003 Bb	13.72 ± 1.81	23.71 ± 3.67
	根	0.064 ± 0.005 Ac	0.021 ± 0.002 Bb	27.97 ± 1.29	28.63 ± 2.07
	小计	0.231 ± 0.023 A	0.072 ± 0.002 B	100.00	100.00
草本层	地上	0.525 ± 0.069 Aa	0.243 ± 0.052 Ba	64.60 ± 0.16	67.84 ± 0.52
	地下	0.288 ± 0.040 Ab	0.115 ± 0.026 Ba	35.40 ± 0.16	32.16 ± 0.52
	小计	0.813 ± 0.109 A	0.358 ± 0.078 B	100.00	100.00
凋落物层	凋落物	0.819 ± 0.103 A	3.363 ± 0.336 B		

说明：数据是平均值±标准误。同行不同大写字母表示 2 种恢复方式下碳储量差异显著 ($P<0.05$)，同列不同小写字母表示植被层中不同部位碳储量差异显著 ($P<0.05$)

2.2 灌木层碳储量及分配特征

耕地在 2 种恢复方式下灌木层总碳储量具有显著差异 ($P<0.05$) (表 5)。农田撂荒地的灌木层总碳储量、地上部碳储量及地下部碳储量均高于退耕还林地，分别是其的 3.20 倍、3.27 倍、3.04 倍。由此可

见：耕地的自然恢复方式更有利于灌木层碳的积累。尽管农田撂荒地灌木层碳储量高于退耕还林地，但 2 种恢复方式的灌木层各器官碳储量分配却具有相似的特征，即枝干碳储量占灌木层碳储量的比例最大，叶片对灌木层碳储量贡献率最小。

2.3 草本层碳储量及分配特征

农田撂荒地的草本层总碳储量、地上部及地下部碳储量均是退耕还林地的 2.27 倍、2.16 倍、2.50 倍，并且各部分皆有显著差异($P < 0.05$) (表 5)。这说明自然恢复的方式比人工恢复方式更有利于草本层碳储量的积累。在草本层器官碳储量分配方面，2 种恢复方式的草本层碳储量具有相似的分配格局。2 种恢复方式均以地上部分碳储量对草本层碳储量的贡献率最大，皆占 60% 以上，地上部碳储量近似是地下部的 2 倍。

2.4 凋落物层碳储量

2 种恢复方式下凋落物碳储量具有显著差异($P < 0.05$) (表 5)。退耕还林地的凋落物碳储量为农田撂荒地的 4.11 倍。退耕还林地的凋落物主要是由杉木的落叶组成，而农田撂荒地树木较少，可能造成此结果。

2.5 土壤碳储量及分配特征

耕地在 2 种恢复方式下土壤碳质量分数均随土壤深度的增加而依次减小(表 6)。农田撂荒地及退耕还林地 0~10 cm 深的土壤碳质量分数分别为 60~80 cm 土壤层的 5.9 倍和 3.2 倍。此外，农田撂荒地的 0~10 cm 与 10~20 cm 深的土壤碳质量分数要略高于退耕还林地，其余土层碳质量分数均略低于后者，但这 2 种恢复方式下每层土壤碳质量分数差异并不显著。

在碳储量方面，退耕还林地土壤总碳储量略高于农田撂荒地，但两者之间没有显著差异($P > 0.05$) (表 6)。土壤碳储量在水平分布上，除 0~10 cm 以及 10~20 cm 土壤层碳储量为农田撂荒地高于退耕还林地外，其余土层碳储量大小正好相反。在垂直分布上，农田撂荒地土壤层碳储量随土壤深度的增加逐渐减小；退耕还林地土壤碳储量大小依次为 20~40 cm > 0~10 cm > 40~60 cm > 10~20 cm > 60~80 cm。由此可见，尽管农田撂荒地及退耕还林地土壤总碳储量没有显著差异($P > 0.05$)，但是在各土壤层分布方面却有一些不同。

表 6 2 种恢复方式下土壤碳储量及分配

Table 6 Carbon storage and allocation of soil under two rehabilitation approaches

土壤层次/cm	$w_{\text{土壤碳}}/(\text{g}\cdot\text{kg}^{-1})$		土壤碳储量/ $(\text{t}\cdot\text{hm}^{-2})$	
	农田撂荒地	退耕还林地	农田撂荒地	退耕还林地
0~10	16.24 ± 0.94 Aa	13.47 ± 0.59 Aa	22.40 ± 1.35 Aa	17.77 ± 0.06 Ba
10~20	10.46 ± 0.58 Ab	8.83 ± 0.09 Ab	15.11 ± 0.83 Ab	12.30 ± 0.30 Bb
20~40	4.70 ± 0.88 Ac	6.33 ± 0.62 Ac	14.92 ± 2.86 Ab	18.15 ± 1.56 Aa
40~60	3.56 ± 0.61 Ac	5.23 ± 0.66 Acd	11.31 ± 1.85 Abc	15.07 ± 1.64 Aab
60~80	2.74 ± 0.59 Ac	4.23 ± 0.46 Ad	8.81 ± 1.88 Ac	12.17 ± 1.30 Ab
合计	-	-	72.55 ± 7.36 A	75.46 ± 3.07 A

说明：数据是平均值±标准误。同行不同大写字母表示 2 种恢复方式下土壤碳质量分数、土壤碳储量差异显著($P < 0.05$)，不同小写字母表示不同土壤层碳质量分数、碳储量差异显著($P < 0.05$)

表 7 2 种恢复方式生态系统碳储量及分配

Table 7 Carbon storage and allocation of ecosystem under two rehabilitation approaches

项目	层次	碳储量/ $(\text{t}\cdot\text{hm}^{-2})$	
		农田撂荒地	退耕还林地
生物量碳	植被层	26.850 ± 3.950 A	71.690 ± 8.450 B
	凋落物层	0.819 ± 0.103 A	3.363 ± 0.336 B
	小计	27.670 ± 4.040 A	75.050 ± 8.880 B
土壤碳储量	土壤层	72.550 ± 7.360 A	75.460 ± 3.070 A
	总计	100.220 ± 7.120 A	150.510 ± 5.850 B

说明：数据是平均值±标准误，同列不同大写字母表示不同恢复方式下碳储量差异显著($P < 0.05$)

2.6 生态系统碳储量及分配特征

退耕还林地生态系统碳储量是农田撂荒地的 1.5 倍, 两者具有显著差异 ($P < 0.05$) (表 7)。由此说明, 恢复 14 a 的退耕还林地生态系统的固碳能力要优于恢复相同年限的农田撂荒地。在碳分配方面, 农田撂荒地的生态系统碳储量以土壤碳储量为主, 占总碳储量的 72.39%, 其次是乔木层; 而在退耕还林地中, 土壤碳库与乔木层碳库对生态系统的贡献率大小相近, 所占比率分别为 50.13% 和 47.34%。除土壤层和乔木层外, 其余各层对生态系统碳储量的贡献率大小均为凋落物层 > 草本层 > 灌木层, 但各部分碳储量所占生态系统碳储量的比例有所不同。在农田撂荒地中, 凋落物层、草本层、灌木层碳储量所占比例依次为 0.81%, 0.81% 和 0.23%; 在退耕还林地中, 各部分碳储量所占比例依次为 2.23%, 0.23% 和 0.04%。

3 结论

本研究中, 退耕还林地的生物量碳储量 (75.26 ± 8.88) $t \cdot hm^{-2}$ 要明显高于农田撂荒地 (27.67 ± 4.04) $t \cdot hm^{-2}$, 前者是后者的 2.72 倍。其中, 退耕还林地乔木层、凋落物层碳储量要远高于农田撂荒地, 但后者的林下植被层碳储量要高于前者。此外, 在 2 种恢复方式下, 生物量碳储量的分配均为乔木层 > 凋落物层 > 草本层 > 灌木层。

在 2 种恢复方式下土壤碳质量分数均随土壤深度的增加而减小。退耕还林地 0~80 cm 深土壤碳储量略高于农田撂荒地, 但两者并没有显著差异 ($P > 0.05$)。农田撂荒地的表层土壤 (0~20 cm) 碳储量要高于退耕还林地, 其他土层则相反。

退耕还林地在恢复 14 a 后生态系统碳储量要高于农田撂荒地, 且两者的生态系统碳分配格局也有所不同。农田撂荒地是以土壤碳库对生态系统的贡献率最高, 而退耕还林地生物量与土壤碳库对生态系统的贡献率相近。

4 讨论

本研究中, 退耕还林地的乔木层碳储量要高于农田撂荒地。这主要是由于恢复 14 a 后, 退耕还林地的杉木林已成长为中龄林, 而农田撂荒地却只有少量的乔木, 且大多为幼树。农田撂荒地生长环境良好, 周围是常绿阔叶林和杉木林, 易于种子传播, 在恢复 14 a 后才出现少量的乔木。

农田撂荒地的林下植被层碳储量要高于退耕还林地, 这与 ZHENG 等^[17]研究的中国红壤区自然恢复 14 a 的次生林林下植被层碳储量要高于人工林的研究结果一致。这可能是由于退耕还林地中杉木林冠层郁闭度较高, 消光系数大, 林下光照较弱, 灌木、草本稀疏, 进而影响林下植被层碳储量。

退耕还林地的表层土壤 (0~20 cm) 碳储量要低于农田撂荒地。这可能是由于退耕还林地受人工整地干扰的影响, 表层土壤碳大量流失, 但对深层土壤碳储量影响却不大。这与陈亮中等^[18]研究三峡库区以农田作对照的退耕还林对土壤碳储量的影响的结论相似。农田撂荒地土壤碳储量要略高于洪瑜^[19]研究的湘中丘陵地区的恢复 30 a 的撂荒地 ($61.38 t \cdot hm^{-2}$), 说明撂荒地周围环境不同, 其固碳能力有所差异。2 种恢复方式下的土壤碳储量均高于张伟畅等^[20]估算的湖南洪江市农田土壤碳储量 ($40.48 t \cdot hm^{-2}$)。这说明退耕地无论是自然恢复还是人工恢复都有助于土壤碳的固定。

退耕还林地的生态系统碳储量要高于农田撂荒地, 说明耕地在这一时段内采用人工恢复的方式较自然恢复固碳能力更强。这与施志娟^[21]得出的自然恢复生态系统碳储量高于人工恢复的结论相反。本研究中, 耕地在 2 种恢复方式下生态系统碳储量的差异主要是由于 2 种恢复方式对其乔木层碳储量的差异较大。

总的来说, 退耕还林对陆地生态系统碳循环与全球气候变化有重要意义, 然而耕地的自然恢复更有利于林下植被层的碳积累。在本研究中, 只考虑了耕地恢复 14 a 后的生态系统碳储量大小, 故不知道如果在较长的时间尺度下, 2 种恢复方式生态系统碳储量的差异是否仍旧如本研究结果一样。再者, 退耕还林地中造林树种的不同会导致其生态系统碳储量的不同, 农田撂荒地周围环境不同也会导致其演替进程的不同, 进而会影响两者比较的结果。因此, 关于耕地的 2 种恢复方式对生态系统碳储量的影响还有待进一步研究。此外, 本研究仅估算了耕地在造林和撂荒方式下的碳储量, 并未考虑耕地在 2 种恢复

方式下的碳储量变化以及在造林过程中产生的碳排放问题。在未来的研究中, 可以进一步核算耕地造林产生的碳汇。

5 参考文献

- [1] 张小全, 陈先刚, 武曙红. 土地利用变化和林业活动碳贮量变化测定与监测中的方法学问题[J]. 生态学报, 2004, **24**(9): 2068 – 2073.
ZHANG Xiaoquan, CHEN Xiangang, WU Shuhong. Methodological issues related to measuring and monitoring carbon stock changes induced by land use change and forestry activities [J]. *Acta Ecol Sin*, 2004, **24**(9): 2068 – 2073.
- [2] 李海奎, 雷渊才, 曾伟生. 基于森林清查资料的中国森林植被碳储量[J]. 林业科学, 2011, **47**(7): 7 – 12.
LI Haikui, LEI Yuancai, ZENG Weisheng. Forest carbon storage in China estimated using forestry inventory data [J]. *Sci Silv Sin*, 2011, **47**(7): 7 – 12.
- [3] VESTERDAL L, RITTER E, GUNDERSEN P. Change in soil organic carbon following afforestation of former arable land [J]. *For Ecol Manage*, 2002, **169**(1/2): 137 – 147.
- [4] URI V, TULLUS H, LÖHMUS K. Biomass production and nutrient accumulation in short-rotation grey alder (*Alnus incana*, (L.) Moench) plantation on abandoned agricultural land [J]. *For Ecol Manage*, 2002, **161**(1/3): 169 – 179.
- [5] 周广胜, 王玉辉, 蒋延玲, 等. 陆地生态系统类型转变与碳循环[J]. 植物生态学报, 2002, **26**(2): 250 – 254.
ZHOU Guangsheng, WANG Yuhui, JIANG Yanling, *et al.* Conversion of terrestrial ecosystems and carbon cycling [J]. *Acta Phytoecol Sin*, 2002, **26**(2): 250 – 254.
- [6] 胡亚林, 曾德慧, 姜涛. 科尔沁沙地退耕杨树人工林生态系统 C, N, P 储量和分配格局[J]. 生态学报, 2009, **29**(8): 4206 – 4214.
HU Yalin, ZENG Dehui, JIANG Tao. Effects of afforested poplar plantations on the stock and distribution of C, N, P at Keerqin Sandy Lands [J]. *Acta Ecol Sin*, 2009, **29**(8): 4206 – 4214.
- [7] 刘迎春, 王秋凤, 于贵瑞, 等. 黄土丘陵区 2 种主要退耕还林树种生态系统碳储量和固碳潜力[J]. 生态学报, 2011, **31**(15): 4277 – 4286.
LIU Yingchun, WANG Qiufeng, YU Guirui, *et al.* Ecosystems carbon storage and carbon sequestration potential of two main tree species for the Grain for Green Project on China's Hilly Loess Plateau [J]. *Acta Ecol Sin*, 2011, **31**(15): 4277 – 4286.
- [8] 白雪爽, 胡亚林, 曾德慧, 等. 半干旱沙区退耕还林对碳储量和分配格局的影响[J]. 生态学杂志, 2008, **27**(10): 1647 – 1652.
BAI Xueshuang, HU Yalin, ZENG Dehui, *et al.* Effects of farmland afforestation on ecosystem carbon stock and its distribution pattern in semi-arid region of Northwest China [J]. *Chin J Ecol*, 2008, **27**(10): 1647 – 1652.
- [9] 申家朋, 张文辉, 李彦华, 等. 黄土高原丘陵区退耕还林地油松人工林碳储量及分配特征研究[J]. 西北植物学报, 2013, **33**(11): 2309 – 2316.
SHEN Jiapeng, ZHANG Wenhui, LI Yanhua, *et al.* Characteristics of carbon storage and sequestration of *Pinus tabulaeformis* forest land converted by farmland in loess hilly area [J]. *Acta Bot Boreal-Occident Sin*, 2013, **33**(11): 2309 – 2316.
- [10] 李秀彬, 赵宇鸾. 森林转型、农地边际化与生态恢复[J]. 中国人口·资源与环境, 2011, **21**(10): 91 – 95.
LI Xiubin, ZHAO Yuluan. Forest transition, agricultural land marginalization and ecological restoration [J]. *Chin Popul Resour Environ*, 2011, **21**(10): 91 – 95.
- [11] ZAKKAK S, KAKALIS E, RADOVIĆ A, *et al.* The impact of forest encroachment after agricultural land abandonment on passerine bird communities: the case of Greece [J]. *J Nat Conserv*, 2014, **22**(2): 157 – 165.
- [12] PRACH K, PYŠEK P. Using spontaneous succession for restoration of human-disturbed habitats: experience from Central Europe [J]. *Ecol Eng*, 2001, **17**(1): 55 – 62.
- [13] NOVARA A, GRISTINA L, la MANTIA T, *et al.* Carbon dynamics of soil organic matter in bulk soil and aggregate fraction during secondary succession in a Mediterranean environment [J]. *Geoderma*, 2013, **193**(2): 213 – 221.
- [14] 魏亚韬. 我国造林再造林碳汇项目碳计量方法研究: 以八达岭地区为例[D]. 北京: 北京林业大学, 2011.
WEI Yantao. *The Measure Study on Afforestation and Reforestation Carbon Project in China: Take Badaling Area for Example* [D]. Beijing: Beijing Forestry University, 2011.

- [15] 汪思龙. 中国生态系统定位观测与研究数据集: 森林生态系统卷(湖南会同站 1960–2006)[M]. 北京: 中国农业出版社, 2012.
- [16] 解宪丽, 孙波, 周慧珍, 等. 中国土壤有机碳密度和储量的估算与空间分布分析[J]. 土壤学报, 2004, **41**(1): 35 – 43.
XIE Xianli, SUN Bo, ZHOU Huizhen, *et al.* Organic carbon density and storage in soils of China and spatial analysis [J]. *Acta Pedol Sin*, 2004, **41**(1): 35 – 43.
- [17] ZHENG Hua, OUYANG Zhiyun, XU Wenhua, *et al.* Variation of carbon storage by different reforestation types in the hilly red soil region of southern China [J]. *For Ecol Manage*, 2008, **255**(3/4): 1113 – 1121.
- [18] 陈亮中, 肖文发, 唐万鹏, 等. 三峡库区几种退耕还林模式下土壤有机碳研究[J]. 林业科学, 2007, **43**(4): 111 – 114.
CHEN Liangzhong, XIAO Wenfa, TANG Wanpeng, *et al.* Study on soil organic carbon under several reforestation patterns in the Three Gorges Reservoir Area [J]. *Sci Silv Sin*, 2007, **43**(4): 111 – 114.
- [19] 洪瑜. 湘中丘陵区不同土地利用方式土壤的碳氮含量及质量评价[D]. 长沙: 中南林业科技大学, 2007.
HONG Yu. *Soil Carbon and Nitrogen, Quality Evaluation under Different Land Use in Central Hilly Area of Hunan Province* [D]. Changsha: Central South University of Forestry and Technology, 2007.
- [20] 张伟畅, 周清, 谢红霞, 等. 湘西山区农田耕层土壤有机碳储量及分布特性: 以洪江市为例[J]. 南方农业学报, 2015, **46**(7): 1200 – 1205.
ZHANG Weichang, ZHOU Qing, XIE Hongxia, *et al.* Storage and distribution of organic carbon in plow layer of cultivated land in mountainous areas of western Hunan: a case study of Hongjiang City [J]. *J South Agric*, 2015, **46**(7): 1200 – 1205.
- [21] 施志娟. 杉木人工林皆伐后不同更新模式碳储量的比较研究[D]. 北京: 中国林业科学研究院, 2016.
SHI Zhijuan. *A Comparative Study on Carbon Storage in Clear-Cutting Forestland of Chinese Fir under Different Regeneration Approaches* [D]. Beijing: Chinese Academy of Forestry, 2016.