

退耕草地演替过程中的碳储量变化

王俊明^{1,2}, 张兴昌¹

(1. 黄土高原土壤侵蚀与旱地农业国家重点实验室 中国科学院水利部水土保持研究所, 陕西 杨凌 712100; 2. 中国科学院研究生院, 北京 100049)

摘要:退耕草地演替的研究对了解现有退耕草地的变化趋势有重要意义,也可以为退耕地的植被恢复提供科学依据。本研究采用以空间代替时间的方法,对处于不同演替时间阶段退耕草地的土壤碳储量以及植被的地上部分与根系生物碳储量变化进行了研究,结果表明,退耕草地演替过程中,地上部分生物碳储量呈阶梯式上升趋势,演替初期地上部分生物碳储量先降后升,并在演替的22~32年,保持相对平稳,之后在演替的40~60年,达到第2个相对平稳的阶段。根系生物碳储量也呈分阶段的阶梯式上升趋势,但第1个相对平稳的阶段出现在演替的第12~28年,在演替的第32~60年出现第2个相对平稳的阶段。退耕草地的土壤碳储量在退耕演替的初期下降,且在演替的第1~12年一直小于农地,在演替的第15年之后,土壤碳储量逐步上升。在0~150 cm的不同土层中,土壤有机碳含量以0~15 cm最高,在演替的1~12年,各土层有机碳含量均小于农地,之后在演替的第15~60年,各土层土壤有机碳含量均随演替时间的增加有所增加,且0~50 cm表层土壤有机碳含量在演替第34~60年迅速积累,增幅较大。在演替初期,草地地上部分生物碳储量、根系生物碳储量和土壤碳储量较演替第1年均表现为下降趋势,表明退耕初期生态环境并没有改善,如何缩短这段时间需进一步研究。

关键词:退耕草地;演替;土壤碳储量;地上部分生物碳储量;根系生物碳储量

中图分类号:S156;S153.6⁺¹ **文献标识码:**A **文章编号:**1004-5759(2009)01-0001-08

* 草地生态系统是陆地生态系统中最重要、分布最广的生态系统类型之一,在全球碳循环和气候调节中起重要的作用^[1,2]。但有关陆地生态系统碳库存量及其动态变化的研究大多侧重于森林植被方面的工作,而草地植被的研究相当薄弱^[3]。对草地生态系统碳库存量的研究有助于增加对全球碳平衡与草地生态系统碳循环的了解。目前,研究者主要通过估算植被生物量的方法来估算生态系统的碳库^[4],用来估算草地生物量大小的方法主要有:全球生物量密度法(用全球植被类型的平均生物量密度乘以对应的面积来估算)^[5,6]、产草量法(用草地普查资料数据直接估算生物量)^[7,8]、遥感模型法(用遥感资料与野外实测调查资料建立回归模型来估算生物量)^[4]以及野外样地调查(选代表性样地来估算整个区域的生物量)^[9]等。这些方法虽方便了对草地碳储量的估算,但由于对植物根系与土壤有机碳垂直分布的研究甚少及对草地地下生物量实测数据的不足,使得估算出的草地生物量与碳储量具有较大的不确定性。

黄土高原是我国乃至全球水土流失最严重的地区之一,生态环境极其脆弱。为改善这种恶化了的生态环境,中国政府于1999年开始推行“退耕还林还草”项目计划,通过“以粮代赈”与资金补助等措施,促使生态环境脆弱区域部分坡耕地的退耕,以增加林草植被覆盖、减少水土流失与改善区域生态环境。截至2005年底,甘肃、宁夏、青海、陕西已累计完成退耕还林(草)面积400万hm²,其中退耕地还林(草)197万hm²^[10]。大面积的退耕林(草)地对改善当地的生态环境具有重要意义,也势必会影响到土壤的有机碳含量,而土壤有机碳储量是植物生态系统中土壤碳循环研究的基础,它不但决定了退耕后的植物生态系统碳库的大小,而且能直接表征土壤的有机质水平,是评价土壤肥力和植被生态价值的主要指标之一。因而了解退耕草地植被演替过程中土壤有机碳储量的变化及其垂直分布特点,具有重要的理论和现实意义。目前,对黄土高原退耕地植被演替的研究已有很多,有关弃耕演替中的演替序列^[11~13],植被种类组成^[11~15],初级生产力特征^[16~18],水土保持功能^[19,20]和土壤理化性质演变^[21~24]等均有报道。但对这种因土地利用方式改变而导致的土壤碳库变化的研究还不多,对退耕草地演替过程中土壤有机碳储量的变化及其垂直分布特征还未见报道,对退耕草地演替过程中地上部分与根系的生物碳储量

* 收稿日期:2008-02-26;改回日期:2008-04-09

基金项目:教育部创新团队支持计划和国家科技支撑计划(2006BAD09)资助。

作者简介:王俊明(1979-),男,山西朔州人,在读博士。E-mail:wjmnsx@sohu.com

的变化研究也不多。准确估算退耕草地植被演替过程中不同阶段土壤有机碳储量的大小并了解其垂直分布对草地碳循环研究具有重要的科学意义,并能为准确评价“退耕还林还草”政策的生态效益提供科学参考。本研究采用以空间代替时间序列的方法,对处于不同演替阶段的退耕草地进行研究,利用实测的地上与地下部分生物量和土壤有机碳数据,试图揭示退耕草地演替过程中土壤有机碳储量的变化与垂直分布规律以及不同演替阶段退耕草地地上部与根系生物碳储量的变化规律。

1 材料与方法

1.1 研究区概况

纸坊沟流域位于陕西省安塞县(36°51'N,109°19'E),属于黄土高原丘陵沟壑区第二副区,海拔1 010~1 431 m。在气候区划上属暖温带半干旱气候,年平均降水量510 mm,干燥度指数1.48,年均气温8.8℃,≥10℃年积温2 800~3 500℃,无霜期160 d左右。土壤类型为黄绵土,其中粉粒占64%~73%,黏粒占17%~20%,土质疏松,抗蚀抗冲性差,水土流失严重。草本植物主要是铁杆蒿(*Artemisia gmelinii*)、芨蒿(*A. giraldii*)、达乌里胡枝子(*Lespedeza dahuricus*)、长芒草(*Stipa bungeana*)等组成。

纸坊沟流域过去林草茂盛,但到1958年,由于人口增长、耕地面积扩大等因素,森林几乎被破坏殆尽。从1974年起,纸坊沟流域开始进行综合治理,逐步进行退耕还林还草,1984年,纸坊沟流域开始持续稳定退耕,林草地面积不断增加,生态系统得到了恢复和重建。1999年,响应国家“退耕还林还草”政策,又有一些坡耕地进行了退耕^[25,26]。本研究共选取了13个退耕年限的38块样地,并以种植玉米(*Zea mays*)的3块农地作为有机碳储量变化的研究对照,具体样地情况见表1。

1.2 研究方法

1.2.1 野外采样 在每块地中都设置1个大样方(10 m×10 m),大样方四角及中心部位各设置1个小样方(1 m×1 m),共5个,于2006年7月调查每个小样方内出现的物种及其盖度,并记录样地海拔、坡度和坡向等。将5个小样方内植物地上部分全部剪下,除去粘附的土壤、砾石等杂质后带回实验室,65℃下烘干并称重。每块样地设置1个小样方(50 cm×50 cm),用于测定地下生物量。将地上部分齐地面刈割后,采用挖掘法分层(0~15,15~30,30~50,50~70,70~90,90~110,110~130和130~150 cm)采集植物根系,共分8个土层,挖出的土壤暴晒片刻后,用干筛法(筛孔2 mm×2 mm)过滤得到植物根系,带回实验室水洗后,65℃下烘干至恒重,用以测定地下部分生物量。同时在挖开剖面的各个土层上利用环刀法采集土样用于测定土壤容重,并采集用于测定土壤有机碳含量的土样。

1.2.2 室内分析 将野外处理过的根系在实验室内冲洗,然后在65℃下烘干至恒重。在105℃下将土样烘干至恒重,测定土壤含水率与容重;用于测定土壤有机质的土样去除草根等杂质后过100目土壤筛,105℃烘干至恒重,用重铬酸钾外加热氧化法测定土壤有机质含量^[26]。

1.2.3 数据处理 对5个小样方的地上生物量求平均得到每块样地的地上生物量,用同一退耕年限不同样地的地上生物量的平均值来计算这一退耕年限的地上生物量的平均值与标准差。地下部分生物量为各土层中根系生物量的总和,由退耕年限相同的不同样地的地下部分生物量来计算这一退耕年限的地下部分生物量的平均值与标准差。数理统计使用软件SPSS 15.0进行,其中多重比较选用Waller-Duncan检验法,选取0.05显著水平。本研究采用转换系数(0.45)将生物量统一以碳(g/m²)的形式表示^[27]。

土壤剖面中的有机碳储量按下列公式计算:

$$SOCC = \sum T_i \times \rho_i \times M_i \times S_i \times (1 - C_i) / 10$$

式中, T_i 、 ρ_i 、 M_i 、 S_i 、 C_i 分别表示第*i*层土层厚度(cm)、土壤容重(g/cm³)、有机碳浓度(g/kg)、面积(m²)、>2 mm的砾石含量(%),SOCC为土壤有机碳含量(kg/m²)。因土样采集地点的土壤为典型黄绵土,砾石含量极小,远小于10%,因而在计算中忽略 C_i ^[28]。

2 结果与分析

2.1 不同演替年限退耕草地地上部分生物碳储量的变化

农地退耕后的第1年,地上部生物碳储量较高(图1),可达53.12 g/m²,之后下降,演替第2年地上部生物碳储量值最低,为22.32 g/m²,且在演替第2~15年,地上部生物碳储量一直未能超过第1年,这可能与农地退耕

后的第 1 年土壤肥力依然较高有关。退耕演替的 22~32 年地上部生物碳储量变化不大,维持在 61.98~69.44 g/m²。之后继续上升,在演替的 40~60 年,地上部分生物碳储量的变化再次的相对平稳,为 90.41~98.16 g/m²。对不同演替时间的地上生物量进行多重比较发现,演替时间为 22,28 和 32 年的草地地上部分生物碳储量处于同一显著水平,而演替时间为 40,50 和 60 年的草地也处于同一显著水平。这说明草地的地上部分生物碳储量在演替的初始阶段相对较小,在演替的 22~32 年生物碳储量上升达到了第 1 个较大的、相对平稳的阶段;之后,在演替的 40~60 年生物量上升达到第 2 个相对平稳的阶段。由此可知,在草地自然演替过程中,地上部分生物碳储量并不是随演替时间线性增长的,而是在演替的过程中呈分阶段的阶梯式上升趋势。

表 1 研究样地的基本情况

Table 1 Basic characteristic of the research samples

样地数 Number of samples	退耕年限 Years of being abandoned (a)	坡度 Slope degree (°)	坡向 Slope direction	坡位 Slope position	盖度 Coverage (%)	群落优势种 Dominant species
3	0(农地 Cropland)	15~27	半阳 2 Semi-sunny slope 2、半阴 1 Semi-shady slope 1	中 3 Middle 3	70~85	玉米 <i>Z. mays</i>
3	1	18~25	阳 1 Sunny slope 1、半阳 1 Semi-sunny slope 1、半阴 1 Semi-shady slope 1	中 2 Middle 2、 下 1 Lower 1	60~73	猪毛蒿 <i>A. scoparia</i> 、狗尾草 <i>Setaria viridis</i>
3	2	19~23	半阳 2 Semi-sunny slope 2、半阴 1 Semi-shady slope 1	中 1 Middle 1、 下 2 Lower 2	25~55	猪毛蒿 <i>A. scoparia</i> 、狗尾草 <i>S. viridis</i>
4	4	12~20	半阴 2 Semi-shady slope 2、阳 1 Sunny slope 1、半阳 1 Semi-sunny slope 1	中 2 Middle 2、 上 2 Upper 2	50~75	猪毛蒿 <i>A. scoparia</i> 、山苦荬 <i>Ixeris chinensis</i>
5	7	16~27	半阳 2 Semi-sunny slope 2、半阴 2 Semi-shady slope 2、阴 1 Shady slope 1	上 1 Upper 1、 中 2 Middle 3、 下 1 Lower 1	70~80	猪毛蒿 <i>A. scoparia</i> 、香青兰 <i>Dracocephalum moldavica</i> 、阿尔泰狗娃花 <i>Heteropappus altaicus</i>
3	10	15~25	阳 1 Sunny slope 1、半阴 2 Semi-shady slope 2	中 2 Middle 2、 下 1 Lower 1	70~85	铁杆蒿 <i>A. gmelinii</i> 、猪毛蒿 <i>A. scoparia</i>
2	12	18~20	半阳 1 Semi-sunny slope 1、阴 1 Shady slope 1	中 1 Middle 1、 下 1 Lower 1	45~65	长芒草 <i>S. bungeana</i> 、铁杆蒿 <i>A. gmelinii</i>
3	15	13~19	阳坡 1 Sunny slope 1、半阳 2 Semi-sunny slope 2	中 2 Middle 2、 下 1 Lower 1	50~70	长芒草 <i>S. bungeana</i> 、铁杆蒿 <i>A. gmelinii</i> 、达乌里胡枝子 <i>L. dahuricus</i>
3	22	12~16	半阳 2 Semi-sunny slope 2、半阴 1 Semi-shady slope 1	中 2 Middle 2、 下 1 Lower 1	70~85	芨蒿 <i>A. giraldii</i> 、铁杆蒿 <i>A. gmelinii</i> 、达乌里胡枝子 <i>L. dahuricus</i>
3	28	24~30	半阴 2 Semi-shady slope 2、半阳 1 Semi-sunny slope 1	中 2 Middle 2、 下 1 Lower 1	70~90	芨蒿 <i>A. giraldii</i> 、铁杆蒿 <i>A. gmelinii</i> 、硬质早熟禾 <i>Poa sphondylodes</i>
2	32	22~34	半阴 1 Semi-shady slope 1、半阳 1 Semi-sunny slope 1	中 2 Middle 2	75~90	长芒草 <i>S. bungeana</i> 、草木樨 <i>Melilotus suaveolens</i> 、铁杆蒿 <i>A. gmelinii</i>
3	40	33	半阳 3 Semi-sunny slope 3	中 2 Middle 2、 下 1 Lower 1	80~90	铁杆蒿 <i>A. gmelinii</i> 、长芒草 <i>S. bungeana</i> 、芨蒿 <i>A. giraldii</i>
2	约 50 About 50	5~12	半阴 2 Semi-shady slope 2	中 2 Middle 2	80~90	长芒草 <i>S. bungeana</i> 、铁杆蒿 <i>A. gmelinii</i> 、大针茅 <i>Stip grandis</i>
2	60 以上 Above 60	34~37	阴 1 Shady slope 1、半阴 1 Semi-shady slope 1	中 1 Middle 1、 上 1 Upper 1	85~95	长芒草 <i>S. bungeana</i> 、铁杆蒿 <i>A. gmelinii</i>

注:坡向后的数值为样地数。

Note: Numbers behind the slope direction and slope position indicated the number of samples.

2.2 不同演替年限退耕草地根系生物碳储量的变化

根系生物碳储量的变化与植被地上部分生物碳储量的变化相似,在演替初期的1~10年,根系生物碳储量相对较小,在 $57.12\sim 129.37\text{ g/m}^2$;在演替的12~28年,根系生物碳储量上升达到第1个相对平稳的阶段,生物碳储量达到 $241.23\sim 266.83\text{ g/m}^2$;之后在演替的32~60年根系生物碳储量上升达到第2个较平稳的阶段,生物碳储量的数值在 $351.76\sim 405.38\text{ g/m}^2$ (图2)。用SPSS 15.0选择Waller-Duncan检验法对处于不同演替时间的根系生物碳储量进行多重比较结果表明,演替时间为12,15,22和28年的草地,根系生物碳储量处于同一显著水平,而演替时间为32,40,50和60年的草地,根系生物碳储量也处于同一显著水平。这说明在退耕草地的演替过程中,草地植被根系的变化也呈阶梯式上升趋势,但与地上部分生物碳储量的变化相比,根系生物碳储量相对平稳阶段出现的时间都有所提前。

2.3 不同演替年限退耕草地土壤有机碳储量的变化

退耕草地在演替的开始几年中,0~150 cm土层中的土壤有机碳储量较农地土壤有机碳储量有所下降,均较农地的 6.624 kg/m^2 为低(图3)。直到退耕草地自然演替15年,土壤有机碳储量才超过农田土壤有机碳储量,达到 9.419 kg/m^2 。在此后的演替过程中土壤有机碳储量均高于农地土壤有机碳储量,并呈逐渐增加的趋势,演替年限越长,土壤有机碳储量越高,在演替时间为60年达到最大值 19.278 kg/m^2 。而表层0~30 cm土层的土壤有机碳储量变化与土壤有机碳含量储量的变化趋势相近,在从农地到演替第12年里变化幅度不大,而在演

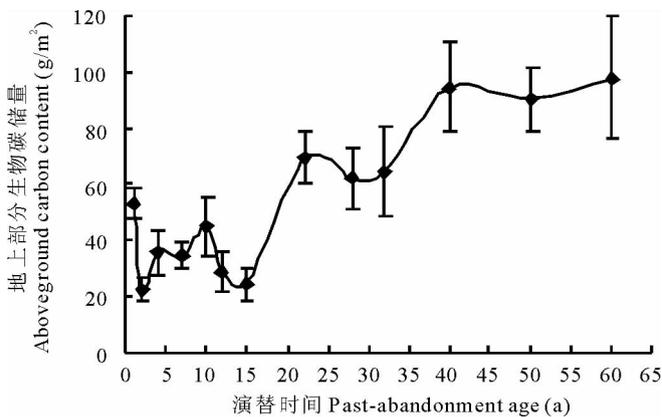


图1 退耕草地演替过程中地上部分生物碳储量随演替时间的变化

Fig. 1 Changes of aboveground carbon content with different abandoned ages

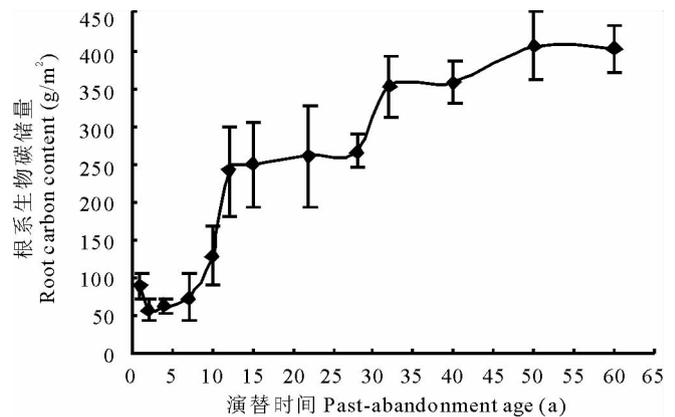


图2 退耕草地演替过程中根系生物碳储量随演替时间的变化

Fig. 2 Changes of root carbon content with different abandoned ages

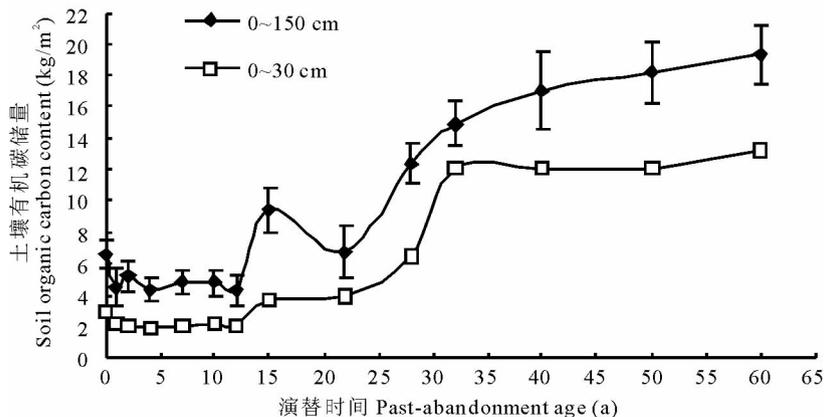


图3 土壤有机碳储量随演替时间的变化

Fig. 3 Changes of soil organic carbon content with different abandoned ages

替的第 12 年到第 32 年中 0~30 cm 的土壤有机碳储量上升较为迅速,之后的第 32 年到第 60 年中,0~30 cm 土层中的有机碳储量又相对较为平稳。

在草地演替前期的 1~12 年中,不同演替年限土壤的各个土层中的土壤有机碳含量都较农地的低(图 4)。到演替的 15 年之后,土壤有机碳含量的总量开始超过农地的土壤有机碳含量。不同土层中,以 0~15 cm 的表层土壤有机碳含量最高,15~50 cm 的 2 个土层中土壤有机碳含量迅速下降,之后 50~150 cm 的 5 个土层中,土壤有机碳含量开始平缓下降。从演替时间来看,退耕演替的前 1~28 年,各土层中的土壤有机碳含量变化相对平缓,总体表现为下降趋势。到演替的第 32~60 年中,表层 0~15 cm 的土壤有机碳含量都达到了一个较高的水平,且 0~50 cm 土层中的有机碳含量均较演替第 28 年的要高,这说明在演替的第 28 年之后,0~50 cm 表层土壤的有机碳含量都有了大幅度的积累,其积累量又以 0~15 cm 土层最多。

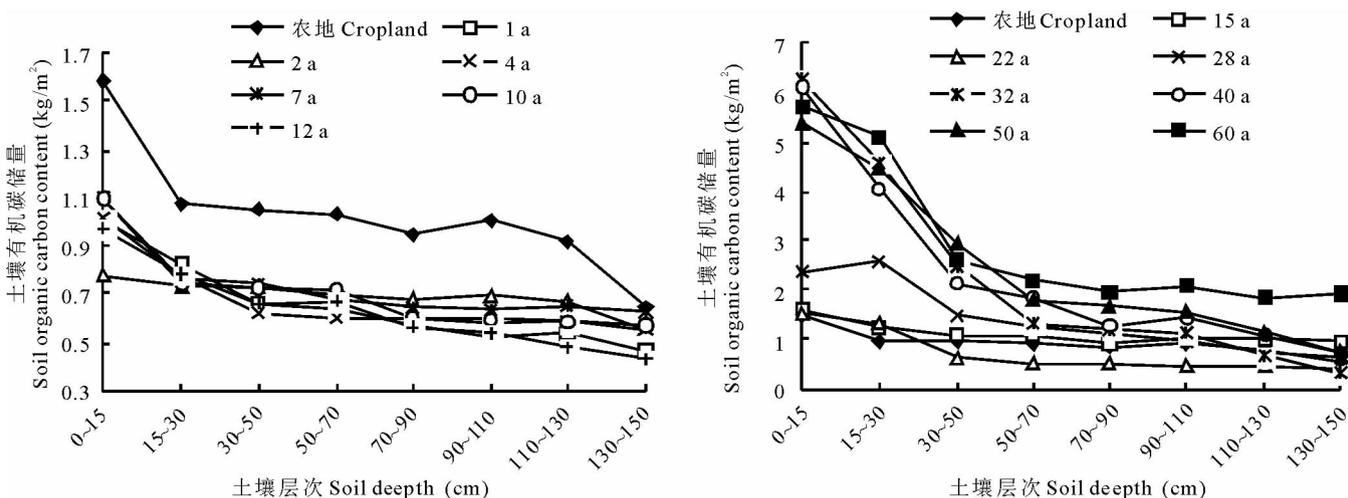


图 4 不同土层中土壤有机碳储量的变化

Fig. 4 Vertical distribution of soil organic carbon content in different abandoned ages

2.4 不同演替年限退耕草地有机碳储量的变化

土壤的有机碳储量在数值上远大于植被的生物碳储量,是退耕草地有机碳储量的主体,植被生物有机碳储量只占草地有机碳总储量的 3% 左右(表 2)。而在植被的生物碳储量中,根系的生物碳储量要大于植被地上部分的生物碳储量。在退耕草地演替的前期,根系生物碳储量约占植被生物碳储量总量的 60% 左右,而到演替的第 10 年之后,根系生物碳储量可占植被生物碳储量的 80% 左右,特别是在演替的第 15 年,根系生物碳储量占植被生物碳储量总量的 91.95%。而在 0~150 cm 土层中的土壤有机碳储量中,约有 70% 的量集中在 0~90 cm 土层,表层 0~30 cm 土层土壤有机碳储量所占 0~150 cm 土壤剖面有机碳储量总量的比例在演替的中后期逐渐增加,在演替的第 32 年之后可占到 0~150 cm 土壤有机碳储量的 40% 左右。

3 讨论与结论

草地是世界最广布的植被类型之一,草地植被对全球气候变化具有重大影响。目前草地生态系统中碳储量的估计已成为草地碳循环研究的热点之一,估算草地生态系统碳储存量对分析草地植被在气候变化中的生态价值和贡献,研究陆地碳循环机制和全球碳收支平衡都具有重要意义,这样的研究已有不少^[29,30],但对土地利用方式改变后土壤碳库变化的研究还并不多见。有研究认为,农地退耕之后,土壤有机碳储量随着演替时间的推进而逐渐上升^[30]。但由本研究的结论看来,退耕草地在退耕后的初始阶段,无论是植被的地上部分生物碳储量与根系生物碳储量,还是土壤的有机碳储量都没有表现出直接上升的趋势,而是在退耕后的第 2 年迅速下降,之后缓慢回升,需要经过很长一段时间才能达到退耕后第 1 年的水平,这一点与前人的研究有所不同^[30]。这应与其选择的样地演替年限太少有关。这种情况的成因可能是因为退耕第 1 年时的土壤肥力仍保持着一个较高的水平。而

表 2 不同演替年限退耕草地的有机碳储量

Table 2 Carbon storage in vegetation and soil during different successional stages of rehabilitated grassland

退耕年 限 Years of being aban- doned (a)	植被生物碳储量 Carbon storage in vegetation			土壤有机碳储量 Soil organic carbon storage			退耕草地有机碳 总储量 Total or- ganic carbon stor- age of rehabilita- ted grassland (kg/m ²)
	植被生物碳储量 总量 Total carbon storage in vegeta- tion (g/m ²)	地上部 分比率 Proportion of shoot (%)	根系比率 Proportion of root (%)	0~150 cm 土壤 有机碳储量 Soil organic carbon storage of 0-150 cm (kg/m ²)	0~30 cm 土层有机 碳储量比率 Propor- tion of 0-30 cm soil organic carbon stor- age (%)	0~90 cm 土层有机 碳储量比率 Propor- tion of 0-90 cm soil organic carbon stor- age (%)	
1	144.83	36.68	63.32	4.494	28.15	67.85	4.639
2	70.61	31.61	68.39	5.159	22.31	62.78	5.230
4	96.31	36.85	63.15	4.333	25.85	59.50	4.429
7	78.21	44.19	55.82	4.827	24.57	62.30	4.905
10	164.77	27.47	72.53	4.769	25.85	64.29	4.935
12	266.95	10.75	89.25	4.339	27.59	66.17	4.605
15	297.77	8.05	91.95	9.419	22.38	59.37	9.717
22	328.10	21.16	78.84	6.708	34.20	72.36	7.037
28	318.93	19.43	80.57	12.344	30.48	65.72	12.663
32	432.76	14.91	85.09	14.899	51.02	83.32	15.332
40	455.57	20.74	79.26	17.061	41.10	70.55	17.517
50	513.43	17.61	82.39	18.189	38.62	77.00	18.702
60	502.31	19.54	80.46	19.278	39.77	72.07	19.781

在演替的第 2 年土壤肥力已有所消耗与流失,所以出现了演替第 2 年土壤有机碳、地上生物量与根系生物量均下降为所有演替年限中最低水平的情况,但其具体原因还值得进一步深入研究。在退耕草地的演替过程中,前期较长一段时间里的土壤有机碳含量、地上与根系生物量均低于退耕后第 1 年的水平,这可以说明退耕还草的最初几年中,当地的生态状况并不会有明显好转,土壤肥力与草地的植被状况还可能会有一定的退步,直到退耕的数十年以后,土壤有机碳含量与草地的地上地下生物量才开始明显上升。这段演替前期的生态状况并没有得到改善的数十年时间,在现实的退耕还林(草)工作中应尽量缩短,但如何实现也需要做更进一步的研究。在退耕草地演替的中后期,土壤有机碳表现线性的上升趋势,但植被的地上与根系生物量却表现出分阶段的阶梯式上升趋势,这种现象的成因,也需要在今后的研究中继续探讨。

致谢:感谢纸坊沟流域峙岷岷村张志俊老人在样地选择时给予的诸多帮助。

参考文献:

- [1] Scurlock O J M, Hall D O. The global carbon sink; A grassland perspective[J]. *Global Change Biology*, 1998, 4: 229-233.
- [2] Scurlock J M. Estimating net primary productivity from grassland biomass dynamics measurements[J]. *Global Change Biology*, 2002, 8: 736-753.
- [3] Hall D O. Response of temperate and tropical grasslands to CO₂ and climate change[J]. *Journal of Biogeography*, 1995, 22: 537-547.
- [4] 朴世龙, 方精云, 贺金生, 等. 中国草地植被生物量及其空间分布格局[J]. *植物生态学报*, 2004, (4): 491-498.
- [5] Jian N. Carbon storage in terrestrial ecosystems of China: Estimates at different resolutions and their responses to climate change[J]. *Climatic Change*, 2001, (3): 339-358.
- [6] Prentice I C. Modeling global vegetation patterns and terrestrial carbon storage at the last glacial maximum[J]. *Global Ecology*

Biogeography, 1993, 3: 67-76.

- [7] 方精云. 中国陆地生态系统的碳库[M]. 北京: 中国环境科学出版社, 1996. 109-128.
- [8] Jian N. Forage yield-based carbon storage in grasslands of China[J]. Climatic Change, 2004, (2): 237-246.
- [9] Jian N. Estimating net primary productivity of grasslands from field biomass measurements in temperate northern China[J]. Plant Ecology, 2004, 174: 217-234.
- [10] 宋富强, 杨改河, 冯永忠. 黄土高原不同生态类型区退耕还林(草)综合效益评价指标体系构建研究[J]. 干旱地区农业研究, 2007, (3): 169-174.
- [11] 程积民. 黄土区植被的演替[J]. 土壤侵蚀与水土保持学报, 1999, 5(5): 58-60.
- [12] 杜国祯, 王刚. 亚高山草甸弃耕地演替群落的种多样性及种间相关分析[J]. 草业科学, 1991, (4): 108-116.
- [13] 杜峰, 山仑, 陈小燕, 等. 陕北黄土丘陵区撂荒演替研究——撂荒演替序列[J]. 草地学报, 2005, (4): 328-333.
- [14] 李裕元, 邵明安. 子午岭植被自然恢复过程中植物多样性的变化[J]. 生态学报, 2004, (2): 252-260.
- [15] 白文娟, 焦菊英, 张振国. 黄土丘陵沟壑区退耕地土壤种子库与地上植被的关系[J]. 草业学报, 2007, 16(6): 30-38.
- [16] 杜峰, 梁宗锁, 徐学选, 等. 陕北黄土丘陵区撂荒演替中期群落比较异质性研究[J]. 草业学报, 2007, 16(5): 40-47.
- [17] 郝文芳, 梁宗锁, 陈存根, 等. 黄土丘陵区弃耕地群落演替过程中的物种多样性研究[J]. 草业科学, 2005, (9): 1-8.
- [18] 项文化, 田大伦, 闫文德, 等. 杉木林采伐迹地撂荒后植被恢复早期的生物量与养分积累[J]. 生态学报, 2003, (4): 695-702.
- [19] 刘国彬, 梁一民. 黄土高原草地植被恢复与土壤抗冲性形成过程——I. 草地植被恢复生物量特征[J]. 水土保持研究, 1997, (增刊): 102-121.
- [20] 吕粉桃, 韩泽, 张伟华, 等. 青海大通县山地退耕还林土壤抗冲性研究[J]. 华北农学报, 2005, (增刊): 85-90.
- [21] 温仲明, 焦峰, 赫晓慧, 等. 黄土高原森林边缘区退耕地植被自然恢复及其对土壤养分变化的影响[J]. 草业学报, 2007, 16(1): 16-23.
- [22] 彭文英, 张科利, 陈瑶, 等. 黄土坡耕地退耕还林后土壤性质变化研究[J]. 自然资源学报, 2005, (2): 272-278.
- [23] 周萍, 刘国彬, 侯喜禄. 黄土丘陵区铁杆蒿群落植被特性及土壤养分特征研究[J]. 草业学报, 2008, 17(2): 9-18.
- [24] 王继军, 董银果, 白钢萍. 论“退耕还林(草)”[J]. 世界科技研究与发展, 2002, (2): 69-72.
- [25] 王继军. 纸坊河流域生态经济系统演变分析[J]. 世界科技研究与发展, 2000, (5): 85-88.
- [26] 鲍士旦. 土壤农化分析(第三版)[M]. 北京: 中国农业出版社, 2000.
- [27] 安尼瓦尔·买买提, 杨元合, 郭兆迪, 等. 新疆天山中段巴音布鲁克高山草地碳含量及其垂直分布[J]. 植物生态学报, 2006, (4): 545-552.
- [28] 钟华平, 樊江文, 于贵瑞, 等. 草地生态系统碳蓄积的研究进展[J]. 草业科学, 2005, 22(1): 4-11.
- [29] 耿元波, 董云社, 齐玉春. 草地生态系统碳循环研究评述[J]. 地理科学进展, 2004, 23(3): 74-81.
- [30] 彭文英, 张科利, 杨勤科. 退耕还林对黄土高原地区土壤有机碳影响预测[J]. 地域研究与开发, 2006, (3): 94-99.

Changes of carbon storage in vegetation and soil during different successional stages of rehabilitated grassland

WANG Jun-ming^{1,2}, ZHANG Xing-chang¹

(1. State Key Laboratory of Soil Erosion and Dryland Farming on the Loess Plateau, Institute of Soil and Water Conservation, Chinese Academy of Sciences, Yangling 712100, China;

2. Graduate School, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China)

Abstract: Over the last few decades the extent of land-use and vegetation composition has dramatically changed in the Loess Plateau. For a better understanding of the dynamics of rehabilitated grassland, carbon storage in vegetation and soil were studied in a space series of replaced time courses. The aboveground biomass carbon did not directly increase at the beginning stage of succession, but decreased to its lowest point in the second year following abandonment. After abandonment for 22 to 32 years, the aboveground biomass carbon increased to a steady state and after abandonment for 40 and 60 years, it approached a second steady state. The dynamics of root biomass carbon was similar to that of aboveground biomass carbon. Between abandonment ages 12 and 28 years, the root biomass carbon reached a steady state and between abandonment ages 32 and 60 years, the root biomass carbon approached a second steady state. Compared with cropland, the rehabilitated grassland had a lower soil organic carbon storage at the beginning (1–12 years) but after 15 years the soil organic carbon storage was higher than in cropland and had increased stably. In the 0 to 150 cm soil profile, the soil organic carbon content of the 0 to 15 cm layer was the highest. Our study indicated that in the early successional stage of rehabilitated grassland, the aboveground biomass carbon, root biomass carbon and soil organic carbon storage did not increase, but remained at a low-level for about 10 years. Further study is required to work out how to reduce this delay.

Key words: rehabilitated grassland; succession; soil organic carbon storage; aboveground biomass carbon storage; root biomass carbon storage