

贵州省退耕还林工程碳汇潜力预测

蔡丽莎¹, 陈先刚¹, 郭颖², 殷瑶¹

(1. 西南林学院 环境科学与工程系, 云南 昆明 650224; 2. 贵州省林业调查规划院, 贵州 贵阳 550003)

摘要: 收集贵州省 2000–2007 年退耕还林的面积和树种数据, 并对 2008–2010 年期间的年度造林面积设置 6 种可能情景。然后根据贵州省森林资源清查中人工林生长的历史数据, 拟合出退耕还林工程主要树种的生长曲线, 再结合各树种的生物量扩展系数、木材密度和碳含量等参数, 利用“人工林生长曲线法”估算出贵州省未来 50 a 不同情景下的退耕还林工程碳储量变化。结果表明在 2010, 2020, 2030, 2040, 2050 年, 贵州省退耕还林工程碳储量分别达到 15.013 ~ 15.585, 33.421 ~ 41.296, 40.755 ~ 56.224, 41.640 ~ 66.111 和 47.314 ~ 71.252 Tg, 有着相当大的碳汇潜力。图 2 表 1 参 21

关键词: 森林生态学; 退耕还林; 碳储量; 潜力

中图分类号: S718.56

文献标志码: A

文章编号: 1000-5692(2009)05-0722-07

Carbon sequestration potential with the Grain for Green Program in Guizhou Province

CAI Li-sha¹, CHEN Xian-gang¹, GUO Yin², YIN Yao¹

(1. Department of Environmental Science and Engineering, Southwest Forestry College, Kunming 650224, Yunnan, China; 2. Guizhou Forestry Survey and Planning Institute, Guiyang 550003, Guizhou, China)

Abstract: To estimate carbon stock changes to the year 2050 in Guizhou Province, area and tree species data from 2000 to 2007 for Guizhou's Grain for Green Programs (GGP) were collected, and six possible scenarios of annual area for the period 2008 to 2010 were set up. Based on National Forest Inventory data, growth curves for the main tree species planted in the GGP were derived, then growth curves were used to establish calculating model for carbon stocks in combination with biomass expansion factors (BEF), wood density (WD), and carbon fractions (CF). Results showed that carbon stock (in Tg) of GGP forests in Guizhou would be: 15.013 ~ 15.585 in 2010, 33.421 ~ 41.296 in 2020, 40.755 ~ 56.224 in 2030, 41.640 ~ 66.111 in 2040, and 47.314 ~ 71.252 in 2050. Thus, the carbon sequestration potential up to the year 2050 is considerable. [Ch, 2 fig, 1 tab, 21 ref.]

Key words: forest ecology; conversion of farmland back to forests; carbon storage; potential

二氧化碳(CO₂)是大气中最主要的温室气体之一,且CO₂浓度自进行测定以来一直呈逐年增加的状态,到2050年大气CO₂浓度将比100a前的浓度增加近1倍,可能使全球升温3~4℃,带来因极地冻冰层融化使海平面上升,从而导致陆地消失的灾难性后果^[1-3]。森林作为CO₂的一个重要的碳汇,在全球碳循环中有着重要意义^[4]。为了遏制森林的不断减少,保护生态环境,越来越多的国家都在大力开展造林再造林活动。中国自20世纪80年代以来就相继开展了六大林业工程,使得新增人工林的面积逐步扩大,其中退耕还林工程作为目前中国范围最广、造林面积最大的活动,其碳汇潜力

收稿日期: 2008-11-11; 修回日期: 2009-03-14

基金项目: 云南省教育厅资助项目(06Z076B); 云南省应用基础研究面上项目

作者简介: 蔡丽莎, 从事森林生态学研究。E-mail: lisa123_cai@163.com。通信作者: 陈先刚, 副教授, 博士, 从事森林气象和生态环境等研究。E-mail: ch-x-g@vip.sina.com

不容忽视。近年来,一些学者利用野外观测资料,并结合全国森林资源清查资料,对全国尺度的主要森林类型的碳储量和碳密度进行估算^[5-7],但是,对退耕还林工程的碳汇潜力预测研究还较为少见。因此,本研究针对贵州省退耕还林工程林的生物质碳储量和土壤的有机碳增量进行预测,既可为提高人工林碳储量的计算精度奠定基础,又可为退耕还林工程的生态效益评价提供参考。

1 研究区概况

贵州省位于云贵高原东部,地处 24°30′ ~ 29°13′ N, 103°31′ ~ 109°30′ E,地势西高东低,自中部向北、东、南三面倾斜,平均海拔为 1 100 m 左右。省内为亚热带湿润季风气候区,年均温为 11 ~ 19 ℃,日照时数 1 000 ~ 1 500 h,年降水量 1 100 ~ 1 300 mm。总的自然特点是纬度较低海拔较高,气候温暖,雨水充沛,河谷深切,地势起伏较大,岩性组合复杂,植被类型丰富。主要树种有杉木 *Cunninghamia lanceolata*, 柳杉 *Cryptomeria fortunei*, 马尾松 *Pinus massoniana*, 华山松 *Pinus armandii*, 柏木 *Cupressus funebris*, 樟树 *Cinnamomum camphora*, 麻栎 *Quercus acutissima*, 蓝桉 *Eucalyptus globules*, 滇杨 *Populus yunnanensi*, 檫木 *Sassafras tsumu*, 油桐 *Aluierites fordii* 和桦木 *Betula* spp.等。

2 研究数据与方法

2.1 研究数据

本研究所采用的数据是贵州省 2000 - 2007 年退耕还林工程逐年复查资料,由资料中的数据得知,2000 - 2007 年已造林面积为 112.74 万 hm² (其中退耕地造林 43.24 万 hm²,荒山造林 69.50 万 hm²)。对于贵州省未来 3 a 造林总面积的预测,则先根据全国 2010 年的退耕还林规划目标^[8]和全国已造林面积算出 2008 - 2010 年的应造林总面积,再用贵州省已造林面积占全国已造林面积的比例乘以应造林总面积得出。因此,推算出 2008 - 2010 年贵州省退耕还林工程的应造林总面积为 36.08 万 hm²(其中退耕地造林 22.24 万 hm²;荒山地造林 13.84 万 hm²)。

2.2 研究方法

2.2.1 未来 3 a 造林面积的预测情景 对未来 3 a 造林面积安排,则分别考虑以下 3 种可能情景。情景 A: 将贵州省退耕还林工程总目标面积中应造林总面积 36.08 万 hm² 在剩下的 3 a 内均值安排;情景 B: 以近 4 a(2004 - 2007 年)造林面积的均值 8.82 万 hm² 安排未来 3 a;情景 C: 2007 年后不再安排任何造林面积。贵州省开展退耕还林工程以来,所营造的生态林比例不低于 90%^[8],根据《生态公益林技术规程》,只有当进入过熟林后才可能进行采伐,因此,进一步将情景 A, B 和 C 均细分 2 种模式:无采伐模式(1)和在最小采伐林龄采伐模式(2)。按已造林中各树种所占面积比例,推算 2008 - 2010 年退耕还林工程各树种的造林面积(表 1)。

2.2.2 树生物质碳储量计算 本研究的碳储量包括树生物质碳储量和造林后的土壤有机碳增量。首先,利用“人工林生长曲线法”预测树生物质碳储量(以下简称生物量碳)^[9]。

$$C_i = \sum_j \sum_k A_{jk} \cdot V_{ijk} \cdot D_{wj} \cdot F_{BEj} \cdot F_G \quad (1)$$

式(1)中: C_i 为第 i 目标年树生物质碳库中的碳储量(Mg); A_{jk} 为 j 树种在第 k 年的造林面积(hm²); V_{ijk} 为第 k 年造林的 j 树种到第 i 目标年时的林分蓄积量(m³·hm⁻²); D_{wj} 为 j 树种的木材密度(Mg·m⁻³); F_{BEj} 为 j 树种由林分材积生物质换算为全林分生物质的扩展系数(无量纲数); F_G 为 j 树种的碳密度(g·g⁻¹)。

根据贵州省历次森林资源连续清查所得到的不同龄级不同树种人工林和面积蓄积量数据,用下述理查德方程拟合各林分类型的蓄积生长曲线,并用于计算第 k 年营造的 j 林分类型到第 i 目标年时的林分蓄积量,即:

$$V_{ijk} = a(1 - \exp(-bA))^c \quad (2)$$

式(2)中: A 为林龄($A = i - k$), a , b 和 c 为拟合参数,造林当年的蓄积量假设为 0。计算过程中已针对每种树种建立生长曲线方程及选用相对应参数,但由于某些树种的参数缺乏,所以,以相似林型

表 1 贵州省退耕还林工程 2008 – 2009 年各树种造林面积和轮伐期，及各树种的木材密度、生物量扩展因子和碳质量分数

Table 1 Harvest rotation and area to be planted for each tree species under grain for green programs in Guizhou Province in 2008 – 2009, and wood density, biomass expansion factor and carbon content for different tree species

树 种	造林面积/hm ²		轮伐期/a	木材密度/(Mg·m ⁻³)	生物量 扩展因子	碳/(g·g ⁻¹)
	情景 A	情景 B				
马尾松 <i>Pinus massoniana</i>	8 751.9	6 422.6	61	0.405	2.00	0.54
华山松 <i>Pinus armandii</i>	4 956.4	3 637.3	51	0.396	2.29	0.54
杉木 <i>Cunninghamia lanceolata</i>	15 709.1	11 528.1	36	0.307	1.92	0.49
柳杉 <i>Cryptomeria fortunei</i>	17 115.7	12 560.3	36	0.294	1.91	0.50
柏木 <i>Cupressus funebris</i>	8 187.3	6 008.2	101	0.478	2.11	0.52
其他针叶树	2 698.1	1 980.0		0.405	2.00	0.54
樟树 <i>Cinnamomum camphora</i>	168.2	123.5	71	0.460	1.89	0.49
麻栎 <i>Quercus acutissima</i>	268.8	197.3	71	0.676	2.09	0.50
其他硬阔树	6 958.4	5 106.4	71	0.598	2.34	0.50
蓝桉 <i>Eucalyptus globules</i>	327.2	240.1	26	0.578	1.65	0.50
檫木 <i>Sassafras tsumu</i>	12.7	9.3	26	0.477	2.49	0.50
滇杨 <i>Populus yunnanensis</i>	3 972.6	2 915.3	26	0.378	2.16	0.51
油桐 <i>Aluertes fordii</i>	370.8	272.1	26	0.239	3.69	0.50
桦木 <i>Betula</i> spp.	175.5	128.8	51	0.541	1.62	0.50
其他软阔树	18 910.6	13 877.5	26	0.443	2.5	0.43
阔叶混	8 110.8	5 952.1	51	0.482	1.95	0.50
未分树种	7 898.8	5 796.5				
灌藤类	10 308.7	7 565.0				
草本类	5 338.9	3 917.9				
小计	120 240.7	88 238.4				

说明：各树种的木材密度、生物量扩展因子和碳质量分数参考文献[9–14]。

的生长曲线方程替代，针叶类树种用针叶混曲线替代；硬阔叶类树种用阔叶混曲线替代；软阔叶类树种用多树种混合曲线替代^[9]。 D_{wj} ， F_{BEj} ， F_{Gj} 采用中国初始国家信息通报中土地利用变化和林业温室气体排放清单中采用的相关参数以及通过文献调研获得(表 1)^[9–14]。由于工程中营造的灌木、藤本植物以及草的碳储量所占比例很小(<2%)，所以均不纳入测算。

2.2.3 土壤有机碳增量计算 计算公式为：

$$C_{\text{SOC}i} = \sum_j \sum_k r \times (i - k) \times S_{jk} \quad (3)$$

式(3)中， $C_{\text{SOC}i}$ 为第 i 目标年土壤碳库中的碳储量(Mg)； s_{jk} 为 j 树种在第 k 年的造林面积(hm²)； r 为土壤碳储量变化因子(Mg·hm⁻²·a⁻¹)。 r 按林木生长阶段取其代表平均状况的值，0 ~ 10 a 取 0.70，11 ~ 40 a 取 0.46，41 ~ 50 a 取 0.06^[15]。最后利用方程(1)与(3)来预测贵州省退耕还林工程未来 50 a 的碳储量。数据处理采用 Excel 2000；方程模拟、参数拟合采用 SPSS 11.0 软件。

3 结果与分析

3.1 退耕还林工程林碳储量

贵州省退耕还林工程在不采伐模式下的 3 个情景中(图 1，A-1，B-1 和 C-1)，假设退耕还林工程

进行到 2010 年, 它们的碳储量预测值对应于 2010, 2020, 2030, 2040, 2050 年分别为: 15.013 ~ 15.585, 33.421 ~ 41.296, 43.867 ~ 56.224, 51.001 ~ 66.111, 54.215 ~ 71.252 Tg; 其中, 生物质碳储量为: 10.458 ~ 10.810, 23.563 ~ 29.096, 29.497 ~ 38.070, 32.120 ~ 42.002, 33.425 ~ 43.917 Tg, 土壤有机碳增量为: 4.555 ~ 4.775, 9.859 ~ 12.199, 14.370 ~ 18.154, 18.881 ~ 24.109, 20.790 ~ 27.335 Tg。

在有采伐模式下的 3 个情景中(图 1, A-2, B-2 和 C-2), 它们的碳储量预测值对应于 2010, 2020, 2030, 2040, 2050 年分别为: 15.013 ~ 15.585, 33.421 ~ 41.296, 40.755 ~ 53.112, 41.640 ~ 55.162, 47.314 ~ 61.048 Tg; 其中生物质碳储量为: 10.458 ~ 10.810, 23.563 ~ 29.096, 26.385 ~ 34.958, 22.759 ~ 31.053, 26.524 ~ 33.713 Tg, 土壤有机碳增量为: 4.555 ~ 4.775, 9.859 ~ 12.199, 14.370 ~ 18.154, 18.881 ~ 24.109, 20.790 ~ 27.335 Tg。

从图 1 中看出, 3 种情景的碳储量在无采伐的模式下, 碳储量逐渐趋近于某一极限值, 且碳储量最多的是情景 A, 这在一定程度上体现了森林覆盖面积与陆地碳汇的直接联系(情景 A 在 2008 ~ 2010 年的造林面积最多), 即面积增加, 其碳储量也相应增加。采伐活动一开始便对当年的碳储量积累造

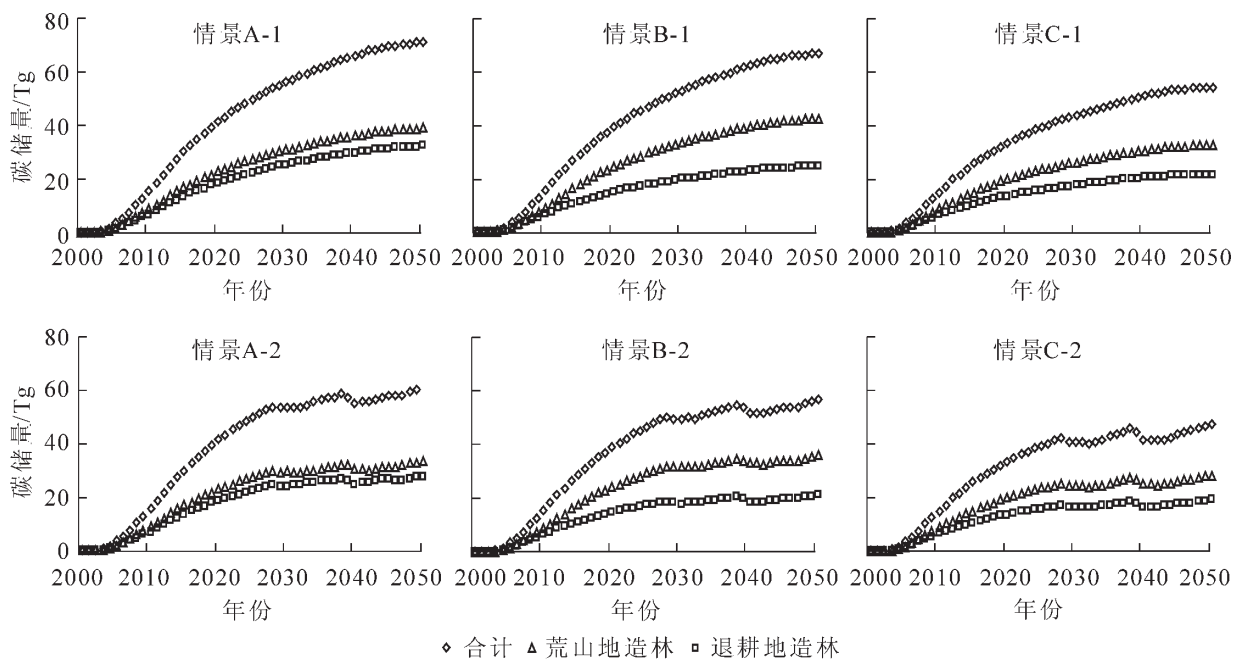


图 1 贵州省退耕还林工程碳储量

Figure 1 Carbon stock of GGP-forests in Guizhou Province

成影响, 但随着树种的及时补种和林木的生长, 使得碳储量又逐渐恢复累积。无采伐和在最小采伐林龄采伐 2 种模式下的土壤碳增量一样, 也就是说 2 种模式的变化不会给土壤有机碳增量带来影响。

3.2 退耕还林工程林碳汇潜力

无采伐的情景下(图 2, A-1, B-1, C-1), 贵州省退耕还林工程的碳汇量预测值对应于 2010, 2020, 2030, 2040, 2050 年分别为: 2.420 ~ 2.819, 1.374 ~ 1.997, 0.844 ~ 1.191, 0.635 ~ 0.864, 0.157 ~ 0.262 Tg。退耕还林工程在实施后的碳汇量呈逐年增加趋势, 特别是在工程开始后的 10 a 间, 碳汇量增加较大, 情景 A, B, C 的碳汇量分别在 2012, 2011, 2009 年达到最大值, 为 3.03, 2.85, 2.44 Tg·a⁻¹ (图 2), 而后工程林碳汇量逐渐降低, 在造林 40 a 后明显减少, 证明了在不采伐的情景下, 退耕还林工程林的碳汇潜力呈先增强后减弱的趋势。

对于有采伐情景(图 2, A-2, B-2, C-2), 碳汇量预测值对应于 2010, 2020, 2030, 2040, 2050 年分别为: 2.420 ~ 2.819, 1.374 ~ 1.997, -0.265 ~ -0.212, -2.470 ~ -2.124, 0.708 ~ 1.022 Tg。从图 2 上看出, 与在未发生采伐活动时碳汇量一样, 发生采伐活动后有较大波动。且由于各树种的轮伐期不

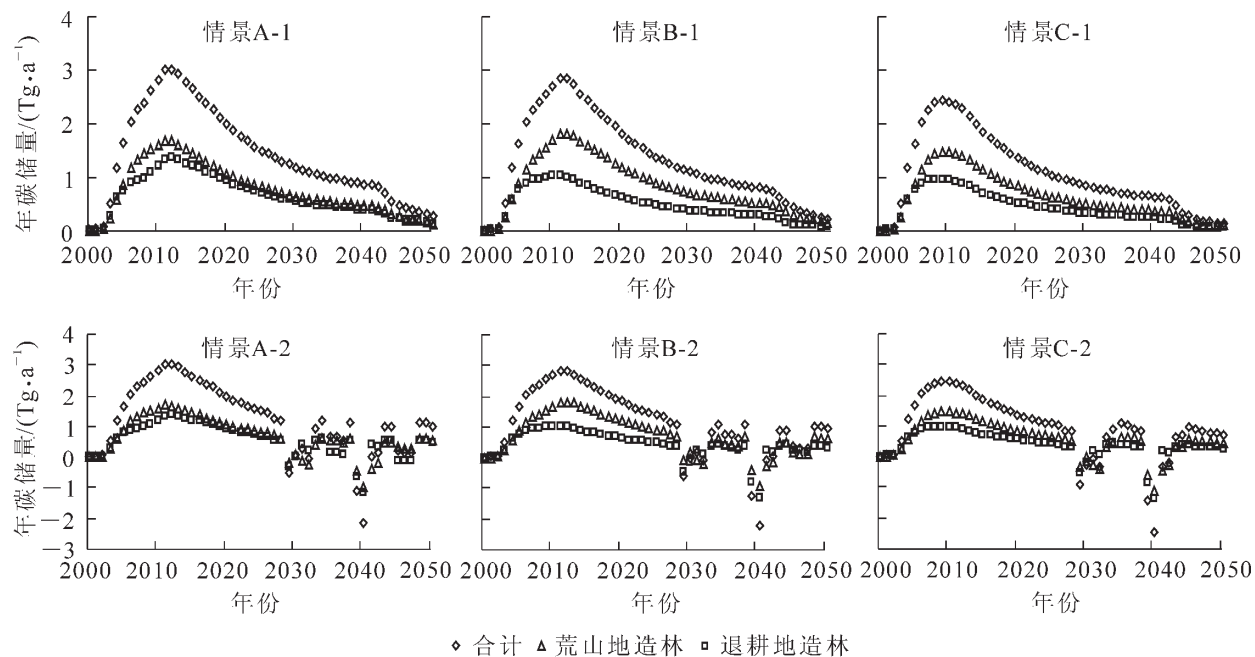


图 2 贵州省退耕还林碳汇潜力

Figure 2 Carbon sequestration potential of GGP-forests in Guizhou Province

一致, 因此, 出现了 2 次波动。退耕还林工程林在采伐期间 CO_2 为净排放(即年碳储量增量为负数), 采伐后碳汇量降低了 1.1 ~ 3.1 Tg , 说明此时森林对 CO_2 的吸收功能有所减弱, 并且这种排放在 2040 年时达到了最大。采伐之后由于树种的及时补种, 随着林木的生长碳汇能力又开始显现, 使得碳排放变为碳吸存, 甚至在 2050 年时有采伐情景比无采伐情景下的碳汇量大。

4 讨论

4.1 与其他计算结果的对比

根据贵州省退耕还林工程的复查资料及中国林业工程建设规划目标, 估算出贵州省到 2010 年规划完成时, 退耕还林工程的固碳潜力为 $2.82 \text{ Tg} \cdot \text{a}^{-1}$, 虽然这与吴庆标等^[16]计算出的 $3.92 \text{ Tg} \cdot \text{a}^{-1}$ 略有差距, 但是由于后者是利用最近前 3 次森林资源清查(1989 – 2003), 而本文是利用了 2000 – 2007 年的资料, 再加上参数的选取和修正因子的差异, 所以在数据上有所差别, 但总的来说都证明了退耕还林工程有着较大的碳汇潜力。

4.2 土壤有机碳增量

研究数据表明, 情景 A, B, C 中, 土壤有机碳增量都呈逐年增长的状态, 最后趋于某一极值。采伐情景下的土壤有机碳增量与不采伐情景的相比并无区别, 证明在多数情况下, 森林采伐后土壤碳含量没有明显的变化^[17]。造林后 4 a, 也就是 2004 年土壤有机碳增量显著提高, 这与李跃林等^[18]研究发现造林 14 a 后土壤有机碳储量显著提高的结论在年份上有差别, 但是不排除由于地理条件、造林树种本身的蓄积量和碳密度等各方面的因素存在差异这方面的原因。

4.3 采伐的木质林产品

有研究表明, 木质林产品中的碳储量占采伐的生物质碳储量的比例可高达 32%^[19]。本研究假定在有采伐情景下, 采伐的林木立即计为排放, 而忽略了木质林产品中保存的碳储量, 所以本研究采伐活动对固碳潜力有一定的影响, 但是适时对森林进行更新, 随着新培育的幼龄林不断成熟, 其碳汇功能也将进一步加强, 从长远的效益上来说采伐活动也是一种促进森林碳汇潜力的有效方式。

4.4 碳基线

造林或再造林项目活动的基线是指能合理地代表在没有造林或再造林项目活动情况下, 项目边

界内碳库碳储量变化之和的情景，即基线能合理地代表没有项目活动时可能出现的碳排放或碳吸收水平^[20]。退耕还林工程的目的是在宜林荒山和部分耕地上恢复植被，退耕地仅限于偏远山区坡度 25°以上或严重退化的土地。因此，在退耕还林活动发生前这些地方基本没有生物量积累，即碳基线为 0，表明所预测的碳汇量不会有基线的折扣。

4.5 碳泄漏

工程碳泄漏是指发生于项目边界之外的、由造林或再造林项目活动引起的、可测量的温室气体源排放的增加^[21]。根据目前中国的国情及贵州当地的生产力状况，在造林项目实施的过程中多以人工为主，并且造林的目的—一般情况下为解决生态方面的需要，并不涉及大规模的商业造林活动。这样既不存在由于活动转移导致的泄漏也不存在市场的泄漏，并且退耕还林多选择耕地生产力较低的偏远山区，所以也基本上消除了排放转移的泄漏，表明所预测的碳汇量不会有基线的折扣。

5 结论

退耕还林工程在贵州省的森林碳汇中有着重要的作用：①预计到 2010，2020，2030，2040 和 2050 年，贵州省退耕还林工程碳储量分别达到 15.013 ~ 15.585，33.421 ~ 41.296，40.755 ~ 56.224，41.640 ~ 66.111 和 47.314 ~ 71.252 Tg，退耕地造林碳储量占贵州省退耕还林工程碳储量的 38% ~ 45%。②情景 A 是最为乐观的预测，不仅是造林面积在 3 种情景中达到最大，而且其碳储量到 2050 年达 61.05 ~ 71.25 Tg。情景 C 是最为保守的预测，年固碳量最高为 2.44 Tg，占贵州省 20 世纪 90 年代全省森林生态系统年固碳量(4.0 Tg)的 61%。③贵州省的退耕还林工程的固碳潜力在 2004 - 2025 年表现最为明显，占整个未来 50 a 固碳量的 68.91% ~ 71.35%。退耕还林工程在实施后的碳储量呈增加的趋势，即面积增加，其碳储量也相应增加，且有采伐和无采伐 2 种模式下的土壤碳增量不受影响。

参考文献：

- [1] DIXON R K, SOLOMON A M, BROWN S, *et al.* Carbon pools and flux of global forest ecosystems [J]. *Science*, 1994, **263**: 185 - 190.
- [2] DETWILER R P, HALL C A S. Tropical forests and the global carbon cycle [J]. *Science*, 1988, **239**: 42 - 47.
- [3] RODHE H A. Comparison of contribution of various gases to the greenhouse effect [J]. *Science*, 1990, **248**: 1217 - 1219.
- [4] NEWELL R G, STAVINS R N. Climate change and forest sinks: factors affecting the cost of carbon sequestration [J]. *J Environ Econ Manage*, 2000, **40**: 211 - 235.
- [5] 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[J]. 植物生态学报, 2000, **24** (5): 518 - 522.
ZHOU Yurong, YU Zhenliang, ZHAO Shidong. Carbon storage and budget of major Chinese forest types [J]. *Acta Phytocol Sin*, 2000, **24** (5): 518 - 522.
- [6] 王效科, 冯宗炜, 欧阳志云. 中国森林生态系统的植物碳储量和碳密度研究[J]. 应用生态学报, 2001, **12** (1): 13 - 16.
WANG Xiaoke, FENG Zongwei, OUYANG Zhiyun. Vegetation carbon storage and density of forest ecosystem in China [J]. *J Appl Ecol*, 2001, **12** (1): 13 - 16.
- [7] 陈亮中, 谢宝元, 肖文发, 等. 三峡库区主要森林植被类型土壤有机碳贮量研究[J]. 长江流域资源与环境, 2007, **16** (5): 640 - 643.
CHEN Liangzhong, XIE Baoyuan, XIAO Wenfa, *et al.* Organic carbon storage in soil under the major forest vegetation types in the Three Gorges Reservoir Area [J]. *Resour Environ Yangtze Basin*, 2007, **16** (5): 640 - 643.
- [8] 李育才. 中国的退耕还林工程[M]. 北京: 中国林业出版社, 2005.
- [9] 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[J]. 林业科学, 2008, **44** (5): 24 - 29.
CHEN Xiangang, ZHANG Yiping, ZAN Hui. Biomass carbon sequestration potential of trees under the Grain for Green Program in Yunnan Province [J]. *Sci Silv Sin*, 2008, **44** (5): 24 - 29.
- [10] 方精云, 陈安平. 中国森林植被碳库的动态变化及其意义[J]. 植物学报, 2001, **43** (9): 967 - 973.
FANG Jingyun, CHEN Anping. Changes in forest biomass carbon storage in China [J]. *Acta Ecol Sin*, 2001, **43** (9):

967 – 973.

- [11] 张小全, 侯振宏. 森林、造林、再造林和毁林的定义与碳计量问题[J]. 林业科学, 2003, **39** (2): 145 – 152.
ZHANG Xiaoquan, HOU Zhenhong. Definitions of afforestation, reforestation and deforestation in relations to carbon accounting [J]. *Sci Silv Sin*, 2003, **39** (2): 145 – 152.
- [12] 雷丕锋, 项文化, 田大伦, 等. 樟树人工林生态系统碳素贮量与分布研究[J]. 生态学杂志, 2004, **23** (4): 25 – 30.
LEI Pifeng, XIANG Wenhua, TIAN Dalun, *et al.* Carbon storage and distribution in *Cinnamomum camphora* plantation [J]. *Chin J Ecol*, 2004, **23** (4): 25 – 30.
- [13] 刘国华, 傅伯杰, 方精云. 中国森林碳动态及其对全球碳平衡的贡献[J]. 生态学报, 2000, **20** (5): 733 – 740.
LIU Guohua, FU Bojie, FANG Jingyun. Carbon dynamics of Chinese forests and its contribution to global carbon balance [J]. *Acta Ecol Sin*, 2000, **20** (5): 733 – 740.
- [14] 刘华, 雷瑞德. 我国森林生态系统碳储量和碳平衡的研究方法及进展[J]. 西北植物学报, 2005, **25**(4): 835 – 843.
LIU Hua, LEI Ruide. Research methods and advances of carbon storage and balance in forest ecosystems of China [J]. *Acta Bot Boreal-Occident Sin*, 2005, **25** (4): 835 – 843.
- [15] NIU Xiaozeng, DUIKER S W. Carbon sequestration potential by afforestation of marginal agricultural land in the Mid-western U.S [J]. *For Ecol Manage*, 2006, **223**: 415 – 427.
- [16] 吴庆标, 王效科, 段晓男, 等. 中国森林生态系统植被固碳现状和潜力[J]. 生态学报, 2008, **28** (2): 517 – 524.
WU Qingbiao, WANG Xiaoke, DUAN Xiaonan, *et al.* Carbon sequestration and its potential by forest ecosystems in China [J]. *Acta Ecol Sin*, 2008, **28** (2): 517 – 524.
- [17] 徐德应. 人类经营活动对森林土壤碳的影响[J]. 世界林业研究, 1994 (5): 26 – 32.
XU Deying. Impact of human activity on forest soil carbon [J]. *World For Res*, 1994 (5): 26 – 32.
- [18] 李跃林, 彭少麟, 赵平, 等. 鹤山几种不同土地利用方式的土壤碳储量研究[J]. 山地学报, 2002, **20** (5): 548 – 552.
LI Yuelin, PENG Shaoling, ZHAO Ping, *et al.* A study on the soil carbon storage of some land use types in Heshan, Guangdong, China [J]. *J Mount Sci*, 2002, **20** (5): 548 – 552.
- [19] UNFCCC. Modalities and procedures for afforestation project activities under the clean development mechanism in the first commitment period of the Kyoto Protocol[EB/OL]. [2004-03-03]. <http://unfccc.int/resource/docs/cop9/06a02.pdf>.
- [20] 武曙红, 张小全, 李俊清. CDM 林业造林或再造林项目的基线问题[J]. 林业科学, 2006, **42** (4): 112 – 116.
WU Shuhong, ZHANG Xiaoquan, LI Junqing. Baseline issues for forest_based Carbon Sink Project on clean development mechanism(CDM)[J]. *Sci Silv Sin*, 2006, **42** (4): 112 – 116.
- [21] 武曙红, 张小全, 李俊清. CDM 林业碳汇项目的泄漏问题分析[J]. 林业科学, 2006, **42** (2): 98 – 104.
WU Shuhong, ZHANG Xiaoquan, LI Junqing. Analyses on leakage issues of forestry sequestration project [J]. *Sci Silv Sin*, 2006, **42** (2): 98 – 104.