

重庆市退耕还林工程林固碳潜力估算^{*}

陈先刚¹, 张一平², 潘昌平³, 陈本文³, 蔡丽莎¹

(1. 西南林学院 环境科学与工程系, 云南 昆明 650224;
2. 中国科学院 西双版纳热带植物园, 云南 昆明 650223; 3. 重庆市林业局, 重庆 401147)

摘要: 为估算重庆市退耕还林工程林固碳潜力, 调查收集重庆市2000~2007年退耕还林工程逐年造林的树种、面积等数据资料, 利用国家森林资源清查资料中该市人工林生长历史数据模拟人工林生长曲线, 借助该曲线并结合经调研国内外文献所得林分树种的生物质密度、碳含量、生物量开展系数等生物物理参数, 设计林分碳储量变化计算模型。结果表明, 重庆市退耕还林工程林的稳定碳积累量在2010、2020、2030、2040及2050年分别为14. 276~14. 740、33. 463~41. 059、43. 796~57. 915、50. 254~70. 124和54. 024~77. 655 Tg($T=10^{12}$); 退耕还林工程林未来40年内具有显著碳汇功能, 其年碳汇量在未来5年左右将达到高峰, 2005~2020年是退耕还林工程林年碳汇能力的强盛期。

关键词: 生态学; 退耕还林; 碳汇; 重庆市
中图分类号: Q 146 **文献标志码:** A

Carbon Sequestration Potential of Forest Stands Under GGP in Chongqing Municipality

CHEN Xian-gang¹, ZHANG Yi-ping², PAN Chang-ping³, CHEN Ben-wen³, CAI Li-sha¹

(1. Department of Environmental Science and Engineering, South West Forestry College, Kunming 650224, Yunnan, China;
2. Tropical Botanic Garden of Xishuangbanna Chinese Academy of Science, Kunming 650224, Yunnan, China;
3. Chongqing Forestry Bureau, Chongqing 401147, China)

Abstract: To estimate the carbon sequestration potential of forest stands under Grain for Green Programs (GGP) in Chongqing Municipality, the paper conducted a survey of all the areas and tree species afforested under GGP during the years from 2000 to 2007. By making use of the data from the survey, the empirical growth curves from National Forestry Inventory, and the biophysical parameters obtained from national and foreign literatures concerning the species' biomass density, carbon content and biomass, the paper further designed a calculation model for the variation of carbon accumulation in the GGP-stands in combination with wood density, biomass expansion factors and carbon fraction. Results show that the carbon stocks in the GGP-stands in Chongqing Municipality will be up to 14. 276~14. 740, 33. 463~41. 059, 43. 796~57. 915, 50. 254~70. 124 and 54. 024~77. 655 Tg respectively by the year 2010, 2020, 2030, 2040 and 2050. This proves that GGP-stands have an obvious function for carbon sequestration.

Key words: ecology; Grain for Green Programs (GGP); carbon sequestration; Chongqing Municipality

为了控制大气中温室气体浓度大幅度增加, 减缓全球气候变暖, 定量研究CO₂在全球各主要系统(大气、陆地、海洋生态系统)中的收收支平衡问题成为当今热点和难点问题^[1, 2]。以森林为主体的陆地生态系统, 受人为活动影响和干扰最大, 与大气间的碳循环变化较为明显。过去的大量研究表明, 中国森林是一个潜在巨大碳库,

^{*} 收稿日期: 2009-03-17
基金项目: 国家自然科学基金项目(40571163); 云南省应用基础研究面上项目。
作者简介: 陈先刚(1959-), 男, 贵州金沙人, 副教授, 博士, 主要从事林业气象和生态环境方面的教学与研究。
© 1994-2012 China Academic Electronic Publishing House. All rights reserved. <http://www.cnki.net>

具有很明显的碳汇功能^[3~9]。然而目前已有的森林碳汇研究大多集中在大区域尺度,面临的问题是缺乏大量直接观测数据的支持,使估算值存在较大的不确定性。因此,对森林生态系统碳库及其固碳能力的准确估算,应该立足于中小尺度区域和生态系统单元碳汇研究基础之上。开展对重庆市退耕还林工程林固碳潜力研究,既可为提高森林生态系统碳汇估算准确性探索新途径,又为实现对“碳汇”的有效管理提供科技支撑。同时,还可为建立完善森林生态功能评价体系奠定科学基础。

1 材料与方法

1.1 研究区概况

重庆市地处青藏高原与长江中下游平原的过渡地带,地跨 105°17′~110°11′E 与 28°10′~32°13′N 之间,全市海拔 75~2 797 m,国土面积 82 300 km²,山地占 75.8%,丘陵占 18.2%,台地占 3.6%,平原占 2.4%。重庆属北半球副热带内陆地区,年平均气温为 18℃;1 月份气温最低,月均值为 7℃,最低极限气温为 -3.8℃;7~8 月份气温最高,多在 27~38℃ 之间,最高极限气温可达 43.8℃;雨季集中在夏秋,年降雨量为 1 000~1 100 mm,尤以夜雨为多;秋末至春初多雾,年均雾日 68 d。地带性植被为亚热带常绿阔叶林,主要由栲属 *Castanopsis*、青冈栎属 *Cyclobalanopsis*、栎属 *Quercus*、木兰属 *Magnolia* 等树种构成。

1.2 造林树种与造林面积

根据国家历年退耕还林工程造林实际核查结果,重庆市退耕还林工程涉及 39 个区县的 920 个乡镇,自 2000 年试点到 2007 年底,已完成造林面积 1 051 333 hm²,包含退耕还林 440 666 hm²、荒山荒地造林 564 000 hm²、封山育林 46 666 hm²,其中生态林占 94%、经济林占 6%,合格率均在 93% 以上(数据源于西北林业勘测规划设计院编辑的重庆市 2001 至 2008 逐年退耕还林工程计划任务及复查报告)。全市退耕还林工程逐年造林面积分布见图 1。

按照中国林业可持续发展战略规划目标^[10],以重庆市已完成面积占全国已完成面积的比例来推算,未来 3 年内重庆市预计还须完成总面积 3 621 433 hm²,

其中退耕造林(草) 166 667 hm²,荒山造林(草) 195 476 hm²。基于之前逐年造林面积的变化背景,考虑到国家每年给各省(市、区)下达的退耕还林工程造林任务在不断调整之中,故对未来 3 年的年度造林任务面积预设如下 4 种情景:情景 A,根据规划目标平均安排年度造林面积;情景 B,根据最近 3 年已造林面积的平均值安排年度造林面积;情景 C,根据最近 3 年已造林面积的递减率递减安排年度造林面积;情景 D,不再安排任何造林面积。

1.3 林分固碳潜力

森林生态系统中的碳一般分为 5 个库,即:地上林木生物质碳库(包括树杆、树枝和树叶);根生物质碳库(包括粗根和树桩);林下枯落层碳库(林下土壤表面上直径小于 10 cm 或其它规定直径的可区分的枯死、腐烂植物残体层);粗木质残体碳库(包括死的站立木、枯倒木、树桩及其根以及直径大于 10 cm 或其它规定直径的植物残体)和土壤有机物碳库(矿质土壤中包括微生物残体在内的所有死有机物)^[11~18]。在本研究中为了计算方便,将上述诸碳库中的前两个碳库合二为一,称其为林木生物质碳库(包括树杆、树枝、树叶、树桩和粗根)。并且,由于研究对象是时间尺度不长的人工林分(10¹ 年),其枯落物积累量与林木生物量相比太小,遵循《PCC 关于土地利用、土地利用变化与林业优良做法指南》^[17]中关于碳汇计量的保守性原则,可忽略不计林下枯落层碳库。于是,需要研究的碳库为林木生物质碳库、粗木质残体碳库和土壤有机物碳库。

1.3.1 林木生物质碳库碳储量变化 对于林木生物质碳库碳储量变化估算,涉及林分生物量变化估算问题,本研究依据人工林生长曲线估算林分林木生物质库碳储量变化。采用计算公式:

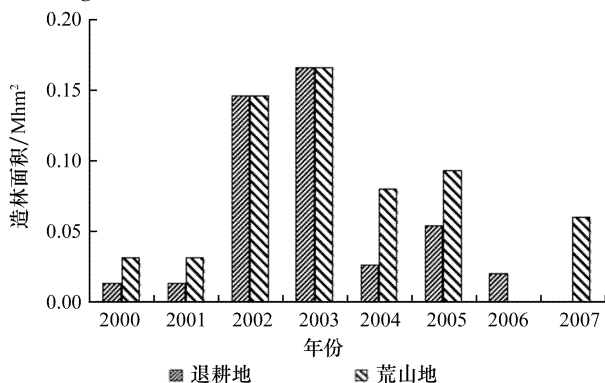


图1 重庆市退耕还林工程已造林面积(M = 10⁶)

Fig. 1 Planted area under the Grain for Green Programs (GGP) in Chongqing Municipality

式(1)中: A_{CST_i} 代表第*i*目标年林木生物质碳库中的碳储量(Mg) ($M = 10^6$, 下同); S_{jk} 代表*j*树种在第*k*年的造林面积(hm^2); V_{ijk} 表示第*k*年造林的*j*树种到第*i*目标年时的林分蓄积量(m^3/hm^2); D_j 表示*j*树种的商品材密度($1\ 000\ kg/m^3$); $C_{BEF_{ij}}$ 表示*j*树种由林分材积生物量换算为全林分生物量的扩展系数(无量纲); A_{CF_j} 表示*j*树种的碳含量(g).

1. 3. 1. 1 逐年造林各树种在目标年的林分蓄积量(V_{ijk})估算

上述林木生物质库碳储量变化估算模型中, 林分蓄积量因子 V_{ijk} 是时间的函数. 本研究借鉴森林生产力模型估算方法思路, 引入较为常用的生物生长曲线-理查德函数(Richards Equation):

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

(2)

式(2)中: A 代表林龄($A = i - k$), a 、 b 和 c 为拟合参数. 假设造林当年的林龄为零, 采用国家森林资源连续清查资料中人工林蓄积量历史纪录数据, 经‘SPSS’拟合得出表征退耕还林工程造林地人工林蓄积量的增长曲线模型. 由于现有森林资源连续清查资料中人工林各树(林)种的相关数据不全, 所得数据只能拟合几组代表有人工林主体类型的经验曲线. 基于现状, 在实际处理中除少数几个树种可直接用对应曲线外(见图2), 其余树种则采用近似替代: 针叶类树种用针叶混的曲线替代; 硬阔叶类树种用阔叶混的曲线替代; 软阔叶类树种用多树种混合曲线替代. 根据《PCC关于土地利用、土地利用变化与林业优良做法指南》的保守评性原则, 不将工程中营造的生物量较小且易于变化的灌木、藤本植物纳入估算.

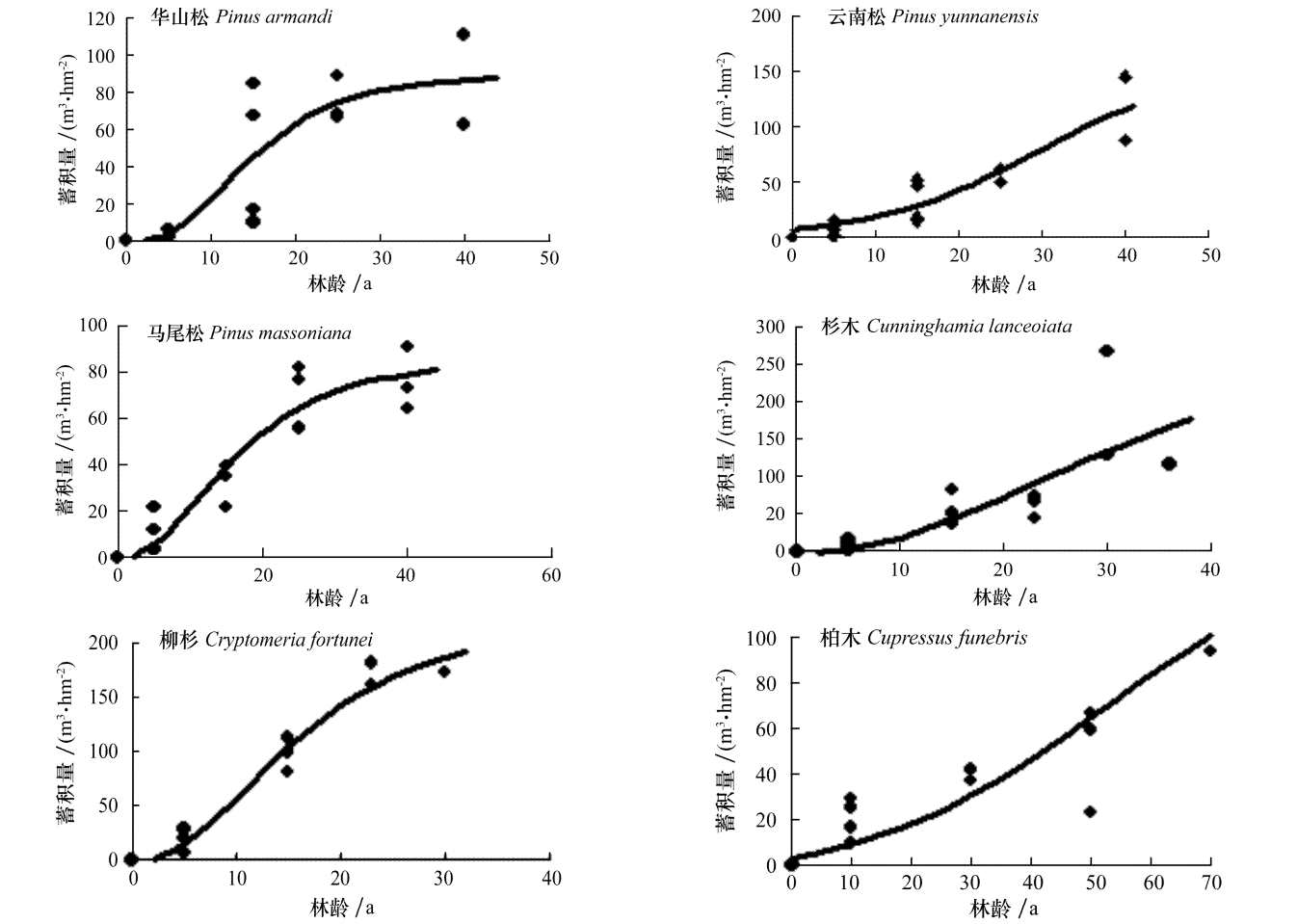


图2 重庆市现有人工林几个主要树种和林种的拟合生长曲线

Fig. 2 Fitted growth curves for different species (groups) of plantations in Chongqing municipality

对人工林生长模型拟合过程中, 如遇某树种不适宜理查德函数拟合, 便换用另一常用生物生长曲线-逻辑斯蒂函数(Logistic Equation):

$$V_{ijk}=a/[1-b[\exp(-cA)]]$$

(3)

1. 3. 1. 2 各树种逐年造林面积(S_{ij})的确定 根据重庆市退耕还林工程历年复查报告, 可整理得到 2000 ~

2007 年各树种年度造林面积. 遵循前述对未来造林面积预置的 4 种情景, 依据重庆市退耕还林工程林各树种林分面积与总面积比例, 推算出本市在未来 3 年各树种林分的年度造林面积(见表 1).

表 1 重庆市退耕还林工程林未来造林面积

Table 1 Afforestation area for each tree species under the Grain for Green Programs in Chongqing Municipality in the future

林分树种	情景 A	情景 B	情景 C			情景 D
	年均面积/hm ² (2008~2010)	年均面积/hm ² (2008~2010)	2008/hm ²	2009/hm ²	2010/hm ²	年均面积/hm ² (2008~2010)
马尾松 <i>Pinus massoniana</i>	11 185.0	8 889.5	5560.5	5 165.7	4 798.9	0
杉木 <i>Cunninghamia lanceolata</i>	9 541.7	7 583.4	4 743.5	4 406.7	4 093.9	0
柏木类 <i>Cupressus</i> spp.	17 474.2	13 887.9	8 687.1	8 070.3	7 497.3	0
其他硬阔叶树种	15 655.3	12 442.3	7 782.8	7 230.3	6 716.9	0
其他软阔叶树种	9 241.1	7 344.5	4 594.1	4 267.9	3 964.9	0
针阔混	43 701.2	34 732.3	21 725.5	20 183.0	18 750.0	0
合计	106 798.6	84 880.0	53 093.4	49 323.8	45 821.8	0

1. 3. 1. 3 树种商品材密度(WD_j)的确定 本研究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所列的商品材密度(见表 2).

1. 3. 1. 4 林分生物量扩展系数(BEF_y)的确定 本研究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所列的材积生物量换算全林分生物量扩展系数(见表 2).

1. 3. 1. 5 树种碳含量(CF_j)的确定

对于各树种碳含量 CF_j , 则通过文献调研获得^[19~25](见表 2).

1. 3. 1. 6 考虑采伐选项 重庆市退耕还林工程林中, 因 94% 林分属于生态公益林, 一般情况下不进行采伐. 但如果是在采伐后能够及时更新造林且提供妥善管理的前提下, 进行方式合理的采伐, 可实现对生态环境无大扰动前提下的森林资源永续利用. 根据《生态公益林技术规程》, 只当生态公益林进入过熟林后才进行采伐, 部分主要树种的最小采伐林龄(MR)列入表 2. 有鉴于此, 为充分考虑预测结果的适应性, 有必要在 2008~2010 年造林面积预设情景 A、B、C 和 D 基础上, 进一步细划为以下 8 种预设情景:

情景 A- 1: 无采伐的情景 A; 情景 A- 2: 在最小采伐林龄采伐的情景 A; 情景 B- 1: 无采伐的情景 B; 情景 B- 2: 在最小采伐林龄采伐的情景 B; 情景 C- 1: 无采伐的情景 C; 情景 C- 2: 在最小采伐林龄采伐的情景 C; 情景 D- 1: 无采伐的情景 D; 情景 D- 2: 在最小采伐林龄采伐的情景 D.

对于有采伐情景, 假设所有采伐迹地在采伐当年便完成更新造林, 且地上部分采伐残留物已全部移出采伐迹地.

1. 3. 2 粗木质残体碳库碳储量变化 对于人工林的幼、中龄林乃至成熟林, 如果管理较好且未进行过采伐, 其粗木质残体是很少的. 因此, 本文所研究的林分, 在无采伐的情景下可将其粗木质残体碳库忽略不计. 对于有采伐的情景(即情景 A- 2、情景 B- 2、情景 C- 2、情景 D- 2), 考虑到既防止水土流失又便于立即更新造林, 引入全树采伐方式(即地上部分的树杆、树枝和树叶全部移出采伐地, 仅保留地下部分的树桩和树根)^[26, 27]. 如果忽略不计埋在土壤中的粗木质残体缓慢分解的碳释放, 采伐后粗木质残体碳库的碳储量可由下式计算:

$$A_{CWC_i} = \sum_j \sum_k \sum_n A_{CST_{jkl}} \times (1 - C_{BEF_{2j}} \div C_{BEF_{1j}})$$

when $i > R_{min_j} + k, n = \text{floor}[(i - k) \div R_{min_j}], l = k + R_{min_j} \times n$

(4)

式(4)中: A_{CWC_i} 代表第 i 目标年粗木质残体碳库碳储量(1 000 kg); $A_{CST_{jkl}}$ 表示 k 年造林的 j 树种在 l 年的林木生物量碳库碳储量(1 000 kg); $C_{BEF_{1j}}$ 与 1 式中的相同; $C_{BEF_{2j}}$ 代表 j 树种从树杆生物量到地上生物量转换系数(无量纲); R_{min_j} 表示 j 树种的最小采伐周期(年); n 表示 j 树种的采伐次数; l 表示 j 树种的采伐年.

1.3.3 土壤有机质碳库碳储量增量 研究表明,长期来看造林后的土壤表现为潜在碳汇^[15,28].最好的估算得出,农用地造林后50~100年间的土壤碳增长率为 $0.6\sim0.7\text{ Mg}/(\text{hm}^2\cdot\text{a})$ ^[15,29].通常情况下,土壤有机碳储量与造林后的时间存在非线性关系^[15,28,30,31],一般来说,具有较高有机碳初始含量的土壤在造林后的头5~10年内表现为碳损失^[28,32,33];而具有较低有机碳初始含量的土壤则在造林后立即表现为碳获得^[34~37].

中国是世界上土壤有机碳库较为贫乏的国家之一,而其西南地区又是中国土壤有机碳储量较少的地区之一^[38].与美国的边缘农地^[11]相类似,重庆市的退耕还林工程造林地绝大部分是退化的农作物地或者荒山地,它们通常只有很低的初始有机碳含量.因此,造林后土壤有机碳会出现随即增加的情况.有鉴于此,在估算重庆市退耕还林工程造林地土壤有机碳储量变化时,采用美国学者Niu的趋势模型(图3)(Paul趋势模型的改进型)^[11,31].于是,退耕还林地土壤有机碳库中的增量可用如下的公式计算:

$$\Delta A_{\text{SOC}_i} = \sum_j \sum_k (i-k) S_{jk}$$

(5)

式(5)中: ΔA_{SOC_i} 表示在第*i*目标年土壤有机物碳库中碳增量; S_{jk} 代表*j*树种在第*k*年造林面积;*r*为造林后对应时段土壤有机碳储量年变化,取图3中的对应值.

综合上述各项,可得出退耕还林工程林的固碳潜力的估算公式如下:

$$A_{\text{CSP}_i} = A_{\text{CST}_i} + A_{\text{CWC}_i} + \Delta A_{\text{SOC}_i}$$

(6)

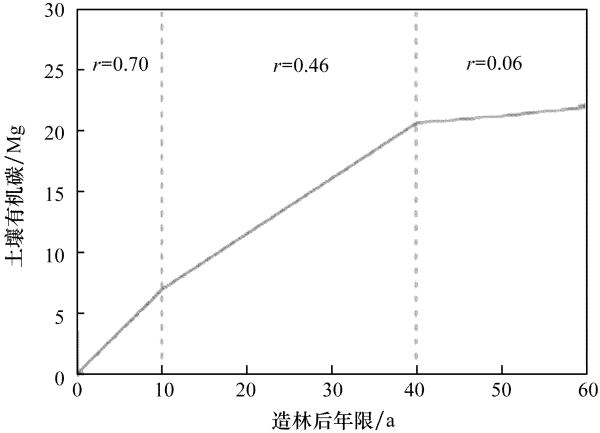


图3 退耕还林工程地造林后土壤有机碳变化率(*Y*) (引自美国学者Niu and Duitier (2006)的模型)

Fig. 3 Changes of soil organic carbon (SOC) over time following afforestation of GGP-lands (quoted from a model of Niu and Duitier (2006), *Y* represents the SOC change rate)

2 结果与分析

2.1 工程林最大固碳潜力

图4给出了2050年之前重庆退耕还林工程林在8种情景下3个相关碳库碳积累量变化预测,代表全市退耕还林工程林最大固碳潜力.从中可看出:退耕还林工程林碳积累以林木生物质库和土壤有机质库为主,林木生物质库碳积累量多于土壤有机质库碳积累量;在未来50年内,发生采伐的林分面积很少,因而林木生物质碳库的损失量也很小;粗木质残体库只在有采伐时存在,其碳积累量非常之小(见图4).

2.2 工程林稳定固碳潜力

林内粗木质残体会随时间而逐步降解,并通过异养呼吸释放碳,因而粗木质残体库是不稳定库.根据《PCC关于土地利用、土地利用变化与林业优良做法指南》中保守性原则,也可不将其计入固碳潜力.于是,只用造林后林木生物质库和土壤有机质库的碳积累来表征退耕还林工程林的固碳潜力,这个潜力是比较稳定的.

基于8种情景计算得出,重庆退耕还林工程林稳定的碳积累量在2010、2020、2030、2040及2050年分别为14.276~14.740、33.463~41.059、43.796~57.915、50.254~70.124和54.024~77.655 Tg($T=10^{12}$,下同).图5给出各情景碳积累量变化对比.退耕还林工程林年碳积累量在实施造林后先逐年增加,2012年情景A-1和情景A-2达到最大值2.983 Tg/a,情景B-1和情景B-2达到最大值2.848 Tg/a,2011年情景C-1和情景C-2达到最大值2.636 Tg/a,2010年情景D-1和情景D-2在达到最大值2.402 Tg/a.之后年碳积累量均逐渐减小.对于有采伐情景,在采伐期间年碳积累量将出现负值(即碳排放),情景A-2、情景B-2、情景C-2及情景D-2的最小年碳积累量均出现在2040年,分别为-0.146、-0.217、-0.332及-0.492 Tg/a.到2050年,各种情景下的年碳积累量虽然已大幅度下降,但并未接近于零(图6),这是由于在重庆市退耕还林工程林中柏木类(*Cupressus* spp.)占了很大比例,而柏树到50年林龄时还处于近熟林,仍有较大的生产力,因而使得退耕还林工程林还具有明显的年碳积累量.整个工程林中退耕地林分碳积累量占总碳积累量的比例在2010年为44%、2020年为42%~43%、2030、2040与2050年均均为41%~43%.

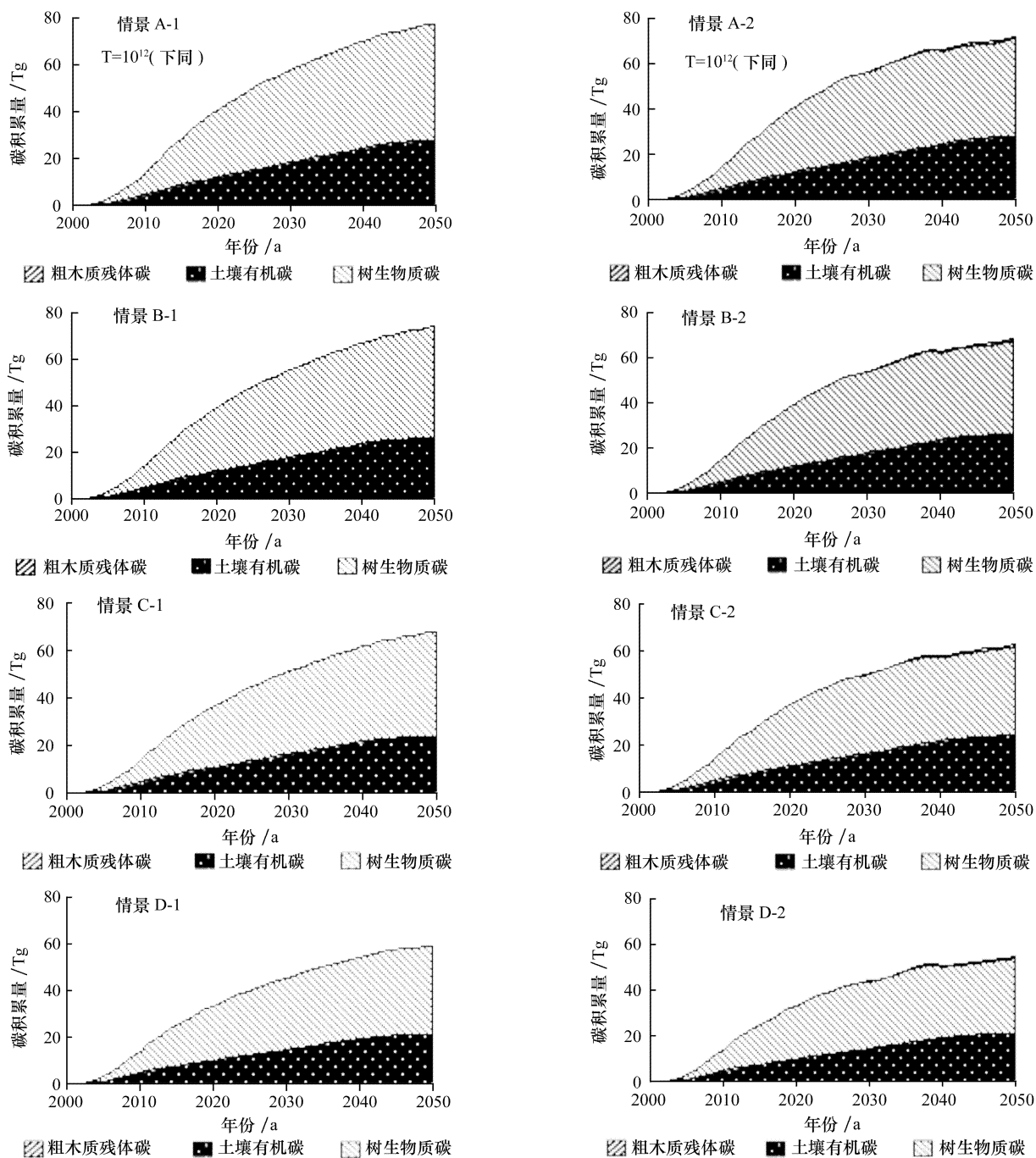
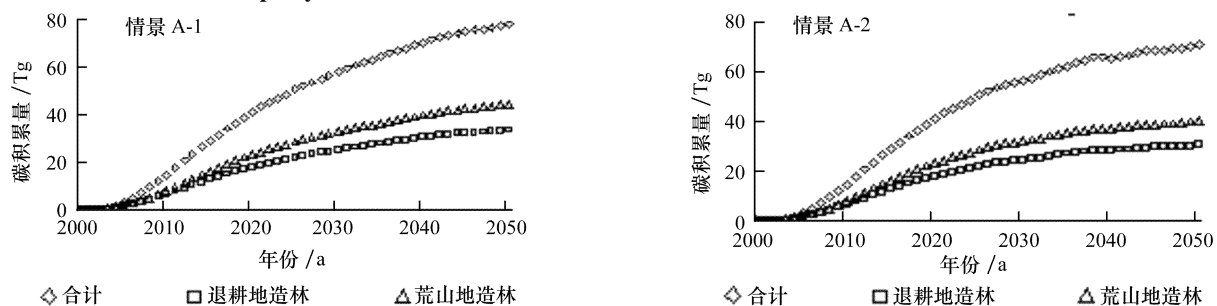


图4 重庆市退耕还林工程林最大碳积累量预测

Fig. 4 Changes of the optimal carbon stock of the Grain for Green Program stand in Chongqing Municipality in the future



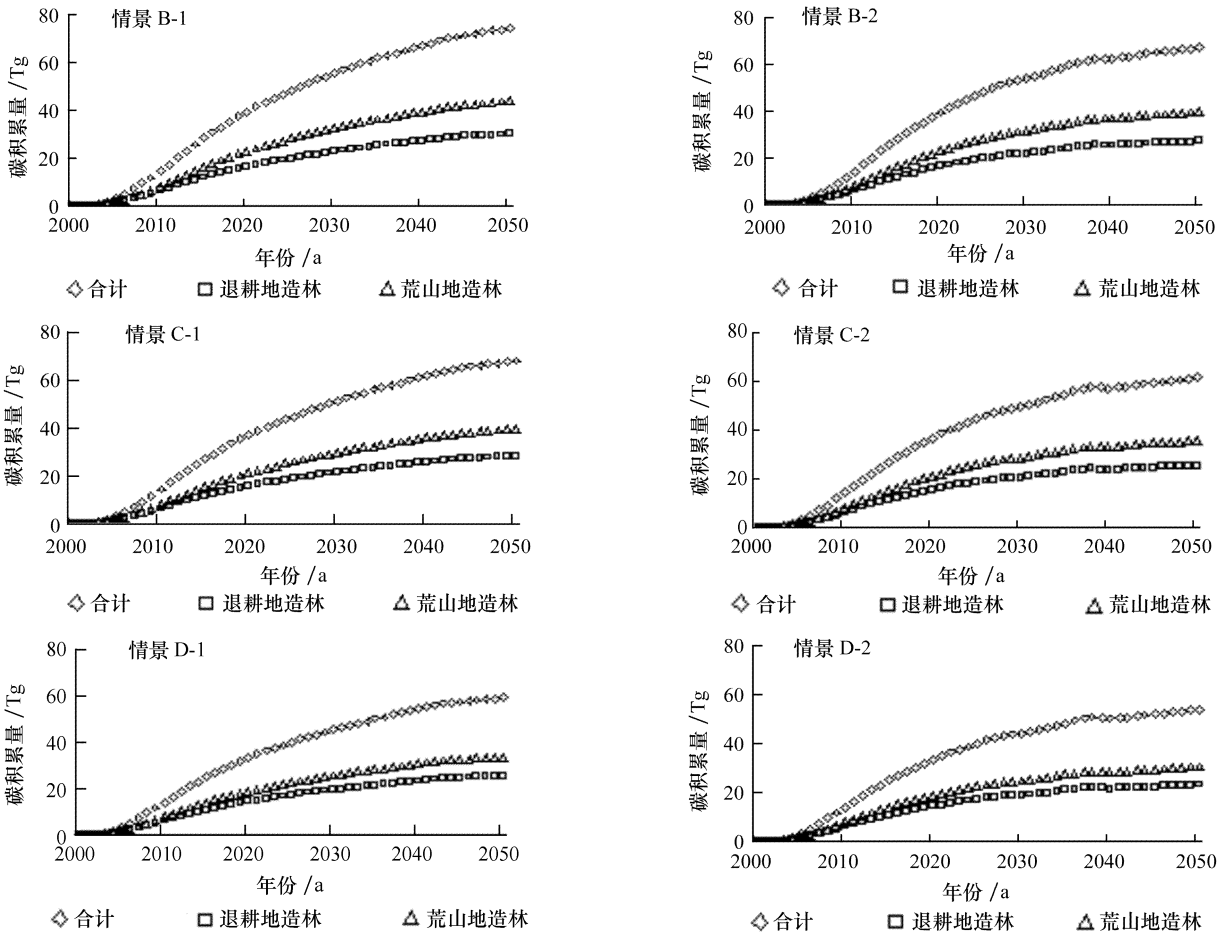
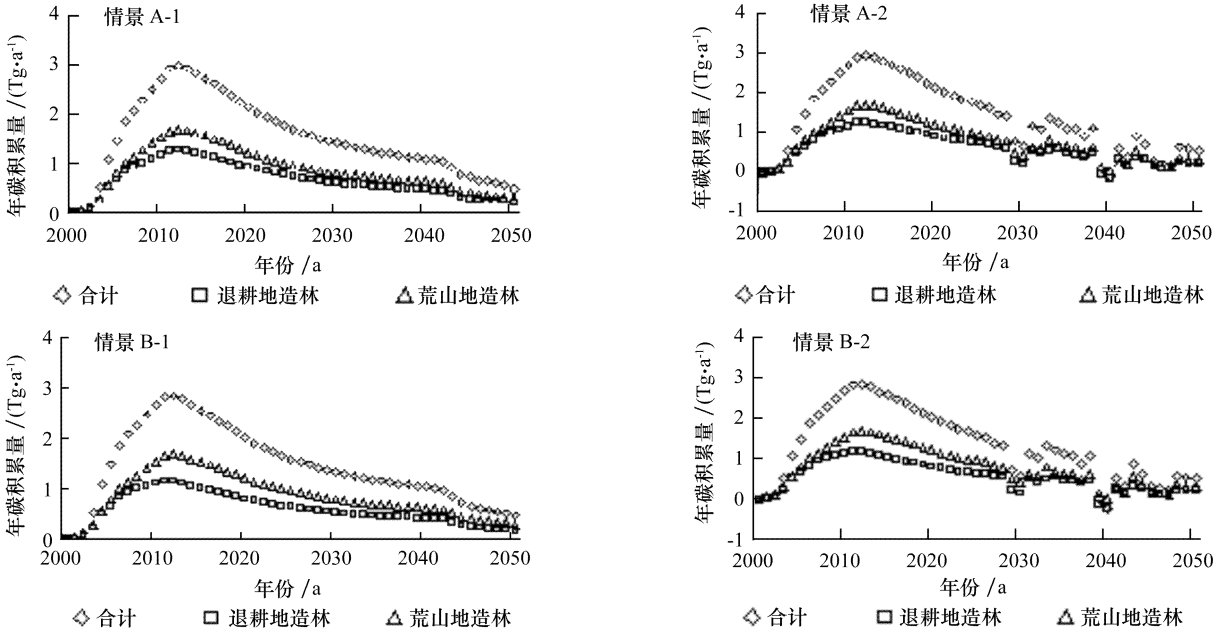


图5 重庆市退耕还林工程林碳积累量预测

Fig. 5 Changes of the carbon stock of the Grain for Green Program stand in Chongqing Municipality in the future



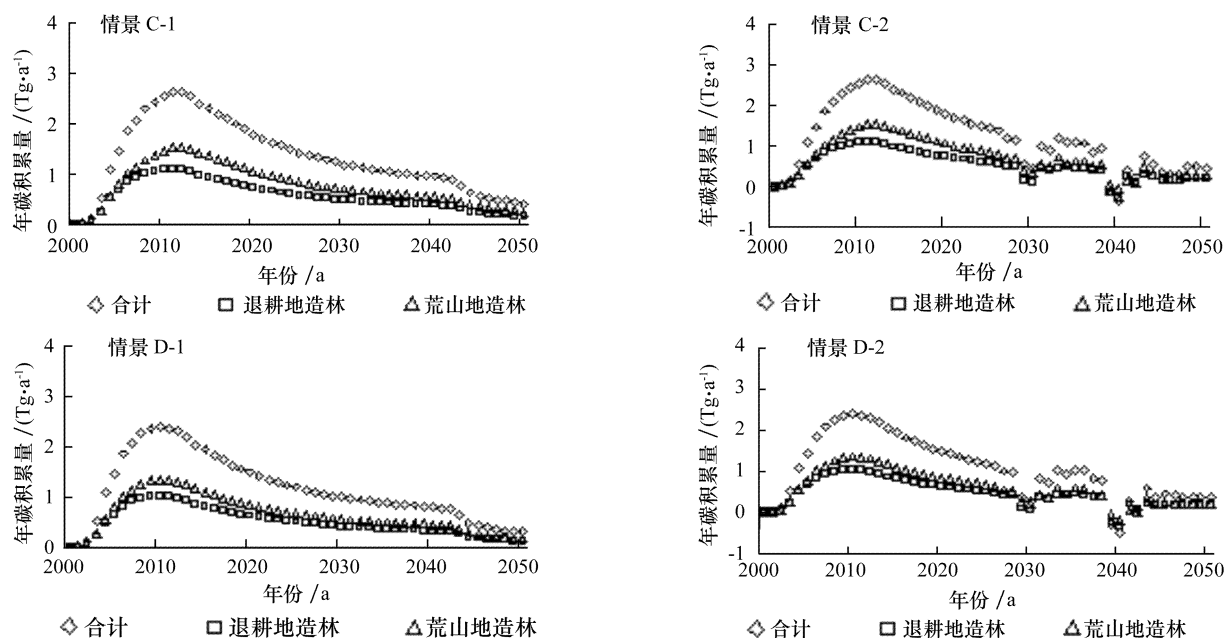


图6 重庆市退耕还林工程林固碳潜力

Fig. 6 Carbon sequestration potential of the Grain for Green Program stand in Chongqing Municipality in the future

3 结论与讨论

本研究采用国家森林资源连续清查资料中当地人工林历史生长数据模拟退耕还林主要林分生长曲线,以其为基础设计林分碳储量预测模型,所得估算结果能够比以往的其它方法更近于客观实际,有较好的可信度。研究表明,重庆市退耕还林工程在未来40年内具有显著的固碳潜力,其年碳汇量在未来5年左右将达到高峰,2005~2020年是退耕还林工程林年碳汇能力强盛期。退耕还林工程林固碳潜力的变化受造林树种的影响比较大,一般说来造林树种生长期长的,其固碳潜力变化速度较慢、持续时间较长。如与云南研究结果相比,到2050年时两省退耕还林工程林的年碳汇能力已快接近于零,而重庆的年碳汇能力还比较明显,其原因就是重庆的工程林中生长期长的树种(如柏木)所占比例比云南的大^[39]。

对于大时间尺度,本研究涉及的林下枯落物层碳库在无采伐情景下积累的碳储量所占比例会明显增加,故不能被忽略;另所涉及的粗木质残体碳库也不仅包含采伐后的地下残留物,而是会逐渐出现死立木、枯倒木、大直径枯落枝等粗木质残体,成为林分中的重要碳库。因而这两个碳库碳储量的变化都将会明显影响退耕还林工程林固碳潜力。

随着人们对木质原料的利用越来越充分以及循环经济活动的不断发展,森林采伐物多半都不会立即转为碳排放,而是衍生出一个具有一定存留期的林产品碳库,这个碳库的存在形式包括建筑木料、装饰用材、家具用材、纸张等。因此,对退耕还林工程林的适当采伐会有利于延展其碳汇能力。若对退耕还林工程林固碳潜力作大时间尺度的预测时,对枯落物层碳库、粗木质残体碳库和林产品碳库碳储量变化的深入研究将是不可或缺的内容。

参考文献:

- [1] Sundquist E T. The global carbon dioxide budget[J]. Science, 1993, (259): 934- 941.
- [2] Schindler D W. The mysterious missing sink[J]. Nature, 1999, (398): 105- 106.
- [3] 周玉荣,于振良,赵士洞. 我国主要森林生态系统碳储量和碳平衡[J]. 植物生态学报, 2000, 24(1): 50- 54.
- [4] 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.
- [5] 王效科,冯宗炜. 中国森林生态系统中植物固定大气碳的潜力[J]. 生态学杂志, 2000, 19(4): 72- 74.
- [6] 赵敏,周广胜. 中国森林生态系统的植物碳储量及其影响因子分析[J]. 地理科学, 2004, 24(1): 50- 54.
- [7] Xu Deying. Forestry and land use change assessment[R]. Asian Development Bank Report (Chapter 4), Manila, Philippines. 1999: 73- 97.

[8] Fang J, Chen A, Peng C, *et al.* Changes in forest biomass carbon storage in China between 1949 and 1998[J]. Science, 2001, (292): 2320 – 2322.

[9] Zhang X O, Xu D Y. Potential carbon sequestration in China’s forests[J]. Environmental Science & Policy, 2003, (6): 421– 432.

[10] 中国可持续发展林业战略研究项目组. 中国可持续发展林业战略研究战略卷[M]. 北京: 中国林业出版社, 2002. 135– 177.

[11] Niu X, Duiker S W. Carbon sequestration potential by afforestation of marginal agricultural land in the Midwestern U .S [J]. Forest Ecology and Management, 2006, (223): 415– 427.

[12] Marland G. , Marland S. Should we store carbon in trees[J]. Water, Air Soil Pollution, 1992, (64): 181– 195.

[13] Laclau P. Biomass and carbon sequestration of ponderosa pine plantation and native cypress forests in northwest Patagonia[J]. Forest Ecology and Management, 2003, (180): 317– 333.

[14] Smith J E, Heath L S. A modal of forest floor carbon mass for United States forest types[R]. Res. Pa NE– 722 U.S. Department of Agriculture, Forest Service, Northeastern Research Station: Newtown Square, PA, 2002: 37.

[15] Post W M, Kwon K C. Soil carbon sequestration and land-use change: processes and potential[J]. Glob. Change Boil. , 2000, (6): 317– 327.

[16] Paul K I, Polglase P J, Ricards G P. Predicted change in soil carbon following afforestation or reforestation, and analysis of controlling factors by linking a C accounting modal (CAMFor) to modals of forest growth (3PG), litter decomposition (GENDEC) and soil C turnover (Roth C) [J]. Forest Ecology and Management, 2003, (177): 485– 501.

[17] Freibauer A, Hohenstein W, Makundi W, *et al.* LU CF sector good practice guidance[Z]. In: IPCC good practice for LU LUCF. The Institute for Global Environmental Strategies (IGES) for the IPCC, Hayama, Kanagawa, Japan, 2004. 3. 1– 3. 317.

[18] Woodbury P B, Smith J E, Heath L S. Carbon sequestration in the U .S. forest sector from 1990 to 2010[J]. Forest Ecology and Management, 2007, (241): 14– 27

[19] 中国林业温室气体清单项目组. 中国土地利用变化和林业温室气体排放清单[R]. 2004. 30– 49.

[20] 程根伟, 罗 辑. 嘎贡山亚高山林地碳的积累与耗散特征[J]. 地理学报, 2003, 58(2): 179– 185.

[21] 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.

[22] 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.

[23] 丁圣彦, 梁国付. 近 20 年来洛宁县森林植被碳储量及动态变化[J]. 资源科学, 2004, 26(3): 105– 108.

[24] 方 晰, 田大伦, 项文化, 等. 不同密度湿地松人工林中碳的积累与分配[J]. 浙江林学院学报, 2003, 20(4): 374– 379.

[25] 何宗明, 李丽红, 王义祥, 等. 33 年生福建柏人工林碳库与碳吸存[J]. 山地学报, 2003, 21(3): 298– 30.

[26] Jiang H, Apps M J, Peng C H, *et al.* Modelling the influence of harvesting on Chinese boreal forest carbon dynamics[J]. Forest Ecology and Management, 2002, (169): 65– 82.

[27] Mclaughlin J W, Phillips S A. Soil carbon, nitrogen, and base carbon cycling 17 years after whole-tree harvesting in a low-elevation red spruce (*Picea rubens*) –balsam fir (*Abies balsamea*) forested watershed in central Maine, USA[J]. Forest Ecology and Management, 2006, (222): 234– 253.

[28] Paul K I, Ploglase P J, Nyakuenguma J G, *et al.* Change in soil carbon following afforestation[J]. Forest Ecology and Management, 2002, (168): 241– 257.

[29] Heath L S, Birdsey R A, Williams D W. Methodology for estimating soil carbon for the forest carbon budget model of the United States, 2001[J]. Environmental Pollution 2002, (116): 372– 380.

[30] Bateman I J, Lovett A A. Estimating and valuing the carbon sequestered in softwood and hardwood trees, timber products and forest soil in Wales [J]. Environmental Management, 2000, (60): 301– 323.

[31] Paul E I, Morris S J, Six J, *et al.* Interpretation of soil carbon and nitrogen dynamics in agricultural and afforested soils[J]. Soil Science Society of America Journal, 2003, (67): 1620– 1628.

[32] Vesterdal L, Ritter E, Gundersen P. Change in soil organic carbon following afforestation of former arable land[J]. Forest Ecology and Management, 2002, (169): 137– 147.

[33] 王春梅, 刘艳红, 邵 彬, 等. 量化退耕还林后土壤碳变化[J]. 北京林业大学学报, 2007, 29(3): 112– 119.

[34] Bouwman A F, Leemans R. The Role of Forest Soil in the Global Carbon Cycle. In: McFee W W, Kelly J M. (eds.) Carbon Forms and Function in Forest Soils[M]. Soil Science society of America, Wisconsin, USA: Inc. Madison, 1995. 503– 525.

[35] Garten Jr. C T. Soil carbon storage beneath recently established tree plantation in Tennessee and South Carolina, USA[J]. Biomass Bioenergy, 2002, (23): 93– 102.

[36] Lima M N, Silva I R, Neves C L, *et al.* Soil organic carbon dynamics following afforestation of degraded pastures with eucalyptus in southeastern Brazil[J]. Forest Ecology and Management, 2006, (235): 219– 231.

[37] 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, 25(3): 94– 99.

[38] 潘根兴. 中国土壤有机碳和无机碳库量研究[J]. 科技通报, 1999, 15(2): 330– 332.

[39] 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– 30.