

DOI: 10.5846/stxb201307281964

廖明蓉, 邵景安, 郭跃, 黄志霖, 吴朝平. 重大森林恢复计划下的碳增汇效应——基于石柱县两次森林资源二类清查的分析. 生态学报, 2014, 34 (16): 4707-4719.

Liao M R, Shao J A, Guo Y, Huang Z L, Wu Z P. Estimating carbon sequestration of the major forest recovery plan: based on the analysis of forest inventory data of Shizhu County. Acta Ecologica Sinica, 2014, 34 (16): 4707-4719.

重大森林恢复计划下的碳增汇效应 ——基于石柱县两次森林资源二类清查的分析

廖明蓉¹, 邵景安^{1,*}, 郭 跃¹, 黄志霖², 吴朝平¹

(1. 重庆师范大学 地理与旅游学院, 重庆 400047;

2. 中国林业科学研究院森林生态环境与保护研究所/国家林业局森林生态环境重点实验室, 北京 100091)

摘要: 利用两次森林资源二类调查数据和林业工程数据, 运用换算因子连续函数法, 基于林分(小班)尺度测定森林含碳量, 估算 2002—2012 年的 10 年间样区恢复计划实现的碳增汇贡献。结果表明: (1) 近 10 年样区森林资源碳贮量和碳密度均获得较大程度的增加, 碳贮量增加 1.00TgC, 平均碳密度增加 2.13MgC/hm²; (2) 森林碳贮量和碳密度的增加因重大森林恢复计划实施的非均衡性在空间上呈现显著差异, 尤其方斗-七曜所夹槽谷区和七曜山南部中山区增幅较快; (3) 关键林分因子, 碳增汇能力最强的是松、杉、柏及针阔混, 累计达 1.36TgC, 且主要集中于中、幼龄林阶段, 累计碳增量 0.94TgC; (4) 近 10 年样区重大森林恢复计划共实现碳增汇 0.97TgC, 占同期森林碳增量的 97.66%; 平均碳密度增量 7.64MgC/hm², 明显高于恢复计划未覆盖范围的森林碳密度增加值, 尤其是天然林保护工程碳增量最大, 占恢复计划实现碳增汇总量的 85.57%; (5) 更为重要的, 因碳增汇主要发生在中、幼龄林阶段, 在中、幼龄林向近、成熟林演化过程中, 伴随森林碳密度的增加, 仍会展现出较大的碳增汇潜力; (6) 研究有助于丰富人们对现已开展的重大森林恢复计划成效的理解和认识, 为未来应对和减缓气候变化适应性对策的制定提供科学依据。

关键词: 重大森林恢复计划; 碳增汇效应; 关键林分因子; 森林资源二类清查; 石柱县

Estimating carbon sequestration of the major forest recovery plan: based on the analysis of forest inventory data of Shizhu County

LIAO Mingrong¹, SHAO Jing'an^{1,*}, GUO Yue¹, HUANG Zhilin², WU Zhaoping¹

1 Chongqing Normal University, Geography and Tourism College, Chongqing 400047, China

2 Key Laboratory of Forest Ecology and Environment, State Forestry Administration, Research Institute of Forest Ecology Environment and Protection, Chinese Academy of Forestry, Beijing 100091, China

Abstract: Since the late 1990s, the Chinese government has implemented six major forestry projects to increase forest carbon sequestration through afforestation, reforestation, and forest restoration. This paper estimated the amount of forest carbon sinks, using forest resource inventory data and forestry engineering data and conversion factors continuous function method. The amount of carbon sequestration of the last 10 years has been estimated to find out the major forest recovery plan's effect of carbon sinks. The results showed that: (1) In the past 10 years, carbon storage and density forest resources in sample have greatly increased. Carbon sequestration of forest has increased 1.00TgC and average carbon density of forest has increased 2.13MgC/hm². (2) There was a significant regional difference in the forest carbon sequestration and carbon density increases due to the non-equilibrium of the major forest recovery plan. The increase of the forest carbon sequestration

基金项目: 国家科技支撑计划项目(2011BAD38B04); 教育部科学技术研究重点项目(210181); 重庆市科委自然科学基金(2009BB7239)

收稿日期: 2013-07-28; **修订日期:** 2014-06-13

* 通讯作者 Corresponding author. E-mail: shao_ja2003@sohu.com

and carbon density was occurred mainly in the valley between the Fangdou Mountain and Qiyao Mountain, because the Natural Forest Protection Project and the Grain for Green Project carried out more here. (3) Carbon sinks of pine, cedar, cypress and mixed coniferous increased as many as 1.36TgC. Carbon sinks of nearly mature forest and middle-aged forest and young forest increased more. Carbon sinks of middle-aged and young forest increased as many as 0.94TgC. Natural forest can save more carbon the plantation. (4) In the past 10 years, 97.66% carbon sequestration was caused by the major forest recovery plan. The average carbon density has increased 7.64MgC/hm² and it was higher than areas not covered by the major forest recovery plan. Carbon sequestration caused by the Natural Forest Protection Project was the most and it accounted for 85.57% of the total. Carbon sequestration caused by the Grain for Green Project was just 0.05TgC because of the late implementation time and bad effectiveness. (5) Carbon sequestration caused by the major forest recovery plan was mainly focus on middle-aged forest and young forest. Middle-aged forest and young forest have great potential to increase carbon sinks when they evolve into nearly mature forest and mature forest. (6) This study helps people to understand and recognize the effectiveness of the major forest recovery plan, and provides a scientific basis for developing policy to respond to and slow down global change.

Key Words: major forest recovery plan; carbon sequestration; key stand factors; forest resource inventory; Shizhu

森林生态系统作为陆地生态系统的主体,在维持全球碳平衡和应对气候变化中占有特殊地位^[1-5]。造林、再造林以及加强对现有森林资源的管护是国际社会公认的森林碳增汇基本途径^[6-10]。中国自1998年以来相继开展六大林业工程,如基于农耕地的造林-退耕还林,恢复森林植被的再造林和对现有森林的管护-天然林保护。无论是在未种植过树木的土地上造林,还是在已造林砍伐迹地上重新造林,亦或是对现有退化森林生态功能完整性的恢复,都将对大气中的CO₂起到很好的消纳作用,对中国林业碳增汇贡献巨大^[11-12],有助于国家层面政府承诺的“413”目标的实现(“413”是中国林业应对全球气候变化的国家承诺之一,即以2005年为基期年,2020年为目标年,2020年森林面积较2005年增加4000万hm²,蓄积量较2005年增加13亿m³,简称为“413”目标)。

已有文献对国家和地区尺度某一林业工程的碳增汇潜力或效应评价的研究较多,如王效科等^[13]基于近三次森林资源清查资料和六大林业规划估算中国森林植被的固碳现状和潜力,胡会峰和刘国华等^[14]基于第四次清查资料估算天然林保护工程实施头5年的固碳能力,等等。但对区域林业工程碳增汇效应的系统估算、评价较少。重庆森林作为西南林区的主体之一,大多分布于长江上游地区,具有重要的水源涵养与防护功能,是维系长江流域生态平衡的主要天然屏障^[15]。在区域上,重庆主要实施

天然林保护、退耕还林、石漠化治理、重庆森林工程、自然保护区建设等林业工程。本研究选取重庆市森林大县之一的石柱县为样区,通过对各大林业工程的碳增汇数据分析,评估各林业工程的碳增汇效应与潜力,为今后重庆乃至中国森林碳汇管理提供科学决策依据。

1 材料与方法

1.1 区域概况

石柱县(108°00′—108°29′E, 29°39′—30°33′N)地处渝东地区,幅员3012.24km²。地势东高西低,拥有“两山夹一槽”的地貌格局,境内以中低山占93.79%。气候属盆周山地中亚热带湿润季风气候区。植物类型主要为亚热带、温带植被,在原四川省植被区划中属达县-涪陵植被区。海拔1000m以下为亚热带偏湿性常绿阔叶林、亚热带竹林,海拔1000—1500m地带为亚热带常绿阔叶林,海拔1200m以下槽洼地带带有马尾松。海拔1500m以上地带为亚热带常绿与落叶阔叶混交林带(图1)。

石柱县森林资源较为丰富,是重庆市森林资源大县之一,位居第四位。自1998年以来,先后实施以天然林保护、自然保护区建设、退耕还林、石漠化治理、重庆森林工程等为主的五大林业建设工程。现有林地20.72万hm²,森林覆盖率52.8%,林木覆盖率71.3%,活立木蓄积113万m³。

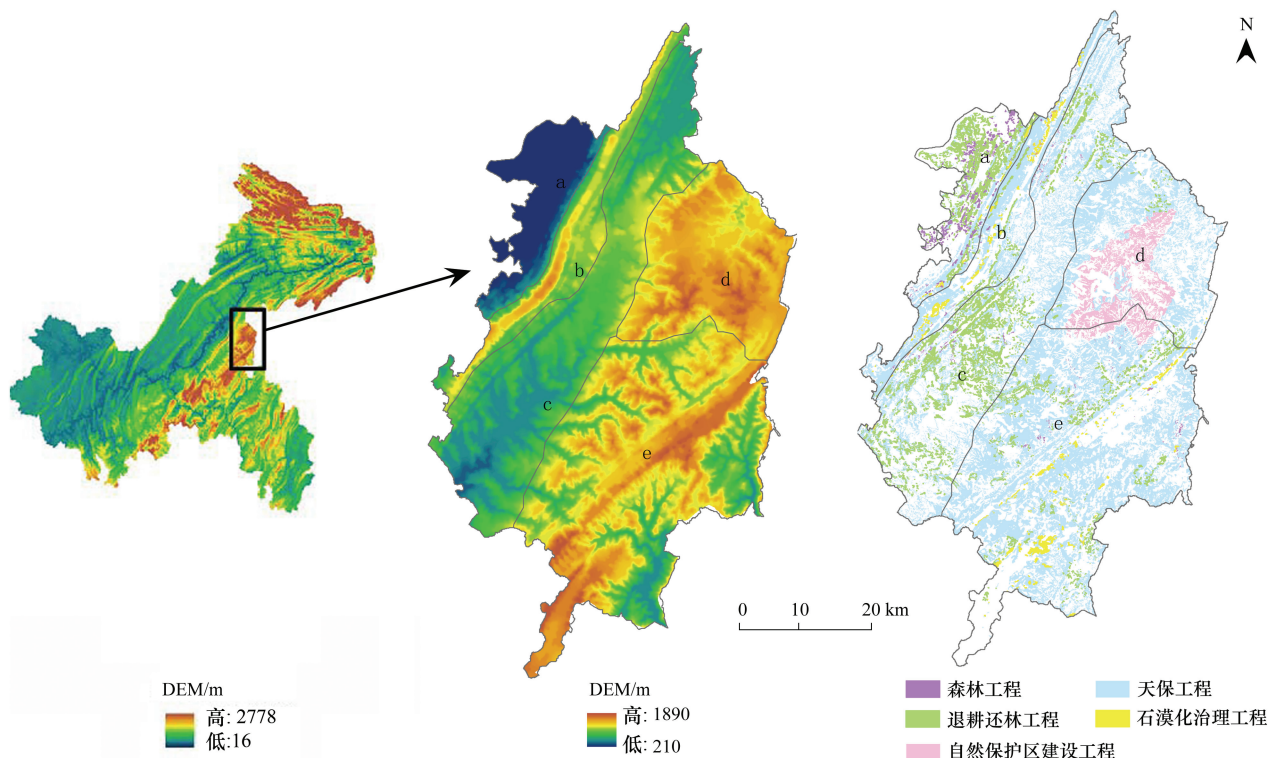


图1 样区位置、地貌格局、重大森林恢复计划的空间分布

Fig.1 The sampling site, its relief patterns and the spatial distribution of major forest recovery plan

a 为沿江一层山脊平坦区, b 为方斗-七曜所夹槽谷区, c 为方斗山中低山区, d 为七曜山南部中山区, e 为七曜山北部高山区

1.2 数据来源

基础数据来源 经矫正处理的 2010 年 11 月的 SPOT-5 遥感影像图(2.5m 分辨率, 145 景)来源于重庆市森林资源监测中心; 1:1 万标准分幅地形图(.dwg 格式, 136 幅)、分社行政区划矢量图、以乡镇为单位的 2010 年森林分类经营区划成果图(.psd 格式, 32 幅)来源于样区林业局。

森林资源二类调查数据 2002 年 1:1 万森林资源二类清查矢量图和调查报告来源于样区林业局, 包括林分(小班)类型、组成树种、林分面积以及林分立木蓄积信息, 同时还提供样区 1988 年森林资源的总面积、总蓄积。2012 年森林资源二类清查资料由本课题组与重庆市林业科学研究院、重庆市林业规划设计院历时 16 月共同完成, 涉及 2012 年森林调查矢量图、调查报告、DEM 数字高程模型。

林业工程数据 石漠化治理工程矢量图来源于重庆市森林资源监测中心; 天然林保护工程图(.jpg 格式), 自然保护区建设工程图(.jpg 格式), 用于提取退耕还林工程(371 幅)、森林工程(215 幅)的 1:1 万工程竣工验收图(.psd 格式, A4 纸大小, 北京 54

坐标)来源于样区林业局。

1.3 数据处理

(1) 2012 年清查资料处理 首先, 野外实地调查, 建立遥感解译标志, 在此基础上, 结合地形图开展室内人工目视解译(小班区划), 尤其对影像去云后仍不易判别的则依据等高线的疏密和地类分布间的关系进行区划; 其次, 开展外业核查, 将解译完成后按村生成小班区划图, 实地进行到社小班界核实、修正、调绘, 填写小班测树因子信息, 拍摄小班照片; 最后, 对照野核查结果给予室内小班区划的修正和补充, 录入并导入小班卡片数据, 最终生成 2012 年森林资源调查矢量图。关键林分因子既包括林分(森林)类型又囊括主要的小班的主要因子(尤其林龄和起源), 为便于分析不同森林类型、林龄和起源的碳增汇效应, 研究将它们归结为关键林分因子。

(2) 2002 年清查资料处理 坐标转换, 2002 年森林调查矢量图采用北京 54 坐标, 而 2012 年森林调查矢量图采用西安 80 坐标, 为方便数据分析, 对 2002 年森林调查矢量图进行坐标转换; 空间矫正, 根据最新 1:1 万地形图对 2002 年森林调查矢量图进行

七曜山南部中山区为 0.34TgC,而最低的是沿江一层山脊平坝区和七曜山北部高山区。样区近 10 年森林碳贮量增加量和变率最大的均出现在基底植被较差且生态环境较为脆弱的方斗-七曜所夹槽谷区,而植被本身较好的七曜山北部高山区相对较低,即森林碳储量基底较多的七曜山北部高山区则基本处于平衡状态。植被基底本身较好的七曜山北部高山

区,海拔最高、植被保存完整,又是大风堡市级自然保护区的腹地,人为扰动强度较低,以增加森林面积为主的退耕还林、森林重庆、石漠化治理等重大森林恢复计划很少布局,而植被相对较差的方斗-七曜所夹槽谷区则较多,从而导致森林碳贮量和变化率的大幅度增加。

表 1 样区不同区域森林碳贮量、碳密度及其动态变化

Table 1 Carbon sequestration, carbon density and their dynamic changes under different regions in the study site

分区 Partition	2002a			2012a			2002—2012a	
	面积 Area /(10 ³ hm ²)	碳贮量 Carbon Sequestration /TgC	碳密度 Carbon Density/ (MgC/hm ²)	面积 Area /(10 ³ hm ²)	碳贮量 Carbon Sequestration /TgC	碳密度 Carbon Density/ (MgC/hm ²)	碳贮量动态 Dynamic of Carbon Sequestration /TgC	碳密度动态 Dynamic of Carbon Density/ (MgC/hm ²)
沿江一层山脊平坝区 Riverside plains	9.48	0.11	11.61	10.6	0.14	13.73	0.03	2.12
方斗-七曜所夹槽谷区 Valley between the Fangdou-Qiyao Mountain	23.1	0.3	12.98	42.6	0.72	16.94	0.42	3.96
方斗山中低山区 Middle-low mountainous area of Fangdou Mountain	11.3	0.2	17.74	17.2	0.36	20.9	0.16	3.16
七曜山南部中山区 Middle mountainous area of southern Qiyao Mountain	33.8	0.61	18.04	44.3	0.95	22.11	0.34	4.08
七曜山北部高山区 High mountainous area of northern Qiyao Mountain	40	0.94	23.5	39.4	0.98	24.12	0.03	0.62

样区森林碳密度增加在空间上呈现明显的区域差异性。2002—2012 年,样区森林碳密度变化较大的出现在七曜山南部中山区和方斗-七曜所夹槽谷区,分别增加 4.08MgC/hm²和 3.96MgC/hm²,其次是方斗山中低山区为 3.16MgC/hm²,而增加最少的发生在七曜山北部高山区,仅为 0.62MgC/hm²(表 1 和图 3)。较 2002 年的变率看,最大的是方斗-七曜所夹槽谷区,为 30.51%,其次是七曜山南部中山区(22.62%),而最低的是七曜山北部高山区,仅为 2.64%。整体上看,森密度增加量和变化率,七曜山南部中山区和方斗-七曜所夹槽谷区高于方斗山中低山区和沿江一层山脊平坝区,而最低的均是七曜山北部高山区。产生样区近 10 年森林碳密度增加的原因与碳贮量变化的类似。

分析发现,样区多属水土流失和石漠化严重的

生态脆弱区,尤其沿长江及主要支流流域的生态治理和水土保持压力巨大,为营造良好的生态屏障,提高林农福祉,大量森林恢复计划在此开展和示范,特别是速生丰产林的种植,对样区森林碳增汇的贡献巨大。特别是,天然林保护工程实施后,因禁扰封育,林农及相关林业生产与占用行为的扰动大大减弱,在湿热气候条件下,大量无立木林地、宜林荒山地、疏林地朝灌木林地向有林地方向演化,这一过程对森林碳增汇效应有显著影响。加之,偏远区未实施天保工程封山育林的宜林地因人为扰动的减少或程度的降低,逐渐演化为林地,也有助于森林碳汇的增加。然而,高山区因多为天然林,长势较好,生态系统完整,成熟林或过熟林主要分布在这一地区,当然,碳增汇的空间和势头(潜力)较人工林区相对较少。

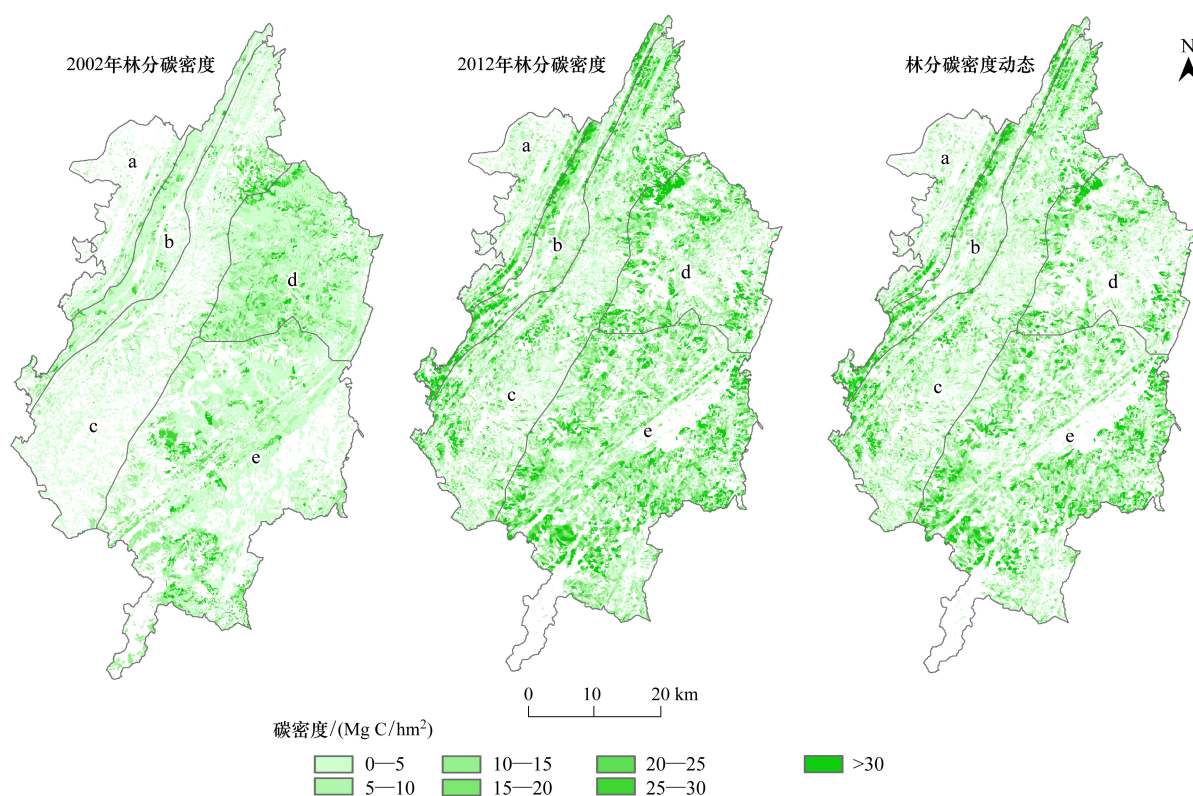


图3 样区 2002 和 2012 年森林碳密度及其动态变化

Fig.3 Carbon density in 2002 and 2012, and its dynamic changes during 2002–2012 in the study site

2.2 关键林分因子碳增汇效应

主要森林类型碳增汇能力以松、杉、柏及针阔混较显著。近 10 年样区松、杉、柏及针阔混累计增加碳贮量 1.36TgC, 但增汇最大的不是面积大、分布广的马尾松, 而是针阔混, 增加 0.68TgC, 杂木林因面积急剧萎缩 (10.18hm²), 碳贮量减少 0.57TgC (表 2)。碳密度增加量较大的是柏木类和落叶松, 分别增加 16.84MgC/hm² 和 16.29MgC/hm², 其次是杉木 10.84MgC/hm², 而增量最低的则是优势树种马尾松, 仅增加 3.22MgC/hm²。不同森林类型碳贮量和碳密度增幅看, 近 10 年碳贮量增幅最大的是针阔混, 为 2002 年的 8.5 倍, 其次是柳杉、水杉等为 7.0 倍, 而再次是杉木和柏木类分别为 2.6 倍和 2.8 倍。马尾松因 2002 年本身的基数较大, 仅增加 35.52%。尽管主要森林类型碳贮量和碳密度总体均有一定程度的增加, 但不同森林类型的增幅与增量因基底数值的差异并不呈相同趋势。

主要森林类型碳贮量和碳密度的增加不是由单一的重大森林恢复计划的作用所诱发, 而是其中一个或两个工程主导, 其他工程协同作用的结果。天

然林保护和自然保护区建设, 促使大量灌木林正向演化为针阔混; 退耕还林和森林重庆驱使马尾松面积的增加, 而天然林保护和自然保护区建设又使其质量大大提升。然而, 柏木类因对困难立地 (立地条件较差, 如土层较薄、土壤贫瘠、坡度较陡等, 常常是造林的难点地区) 的适应性较强, 成为退耕还林、石漠化治理和森林重庆 (尤其通道森林) 的适生植物种类, 柳杉较为适宜于在水系周围布局而成为森林重庆 (特别水系森林) 的首选。而且, 受经济利益驱动, 部分杂木林被开发用作材林或经济林种植。这样, 在主要森林类型面积和质量双重提高的情况下, 碳贮量和碳密度定会获得较大程度的增加。

不同龄级森林碳增汇能力主要集中于近熟林及以下龄级。近 10 年样区幼龄林、中龄林和近熟林累计碳增量 0.94TgC, 占总碳贮量动态的 94.00%, 尤其是幼龄林碳增量占 63.00% (表 3)。但是, 碳密度动态随龄级的演替呈先升高至成熟林阶段而至过熟林时期降低的倒“U”型格局, 在成熟林处增量达到最高 8.09MgC/hm², 其次是近熟林 4.13MgC/hm², 而过熟林因处演化后期则增量降低 2.03MgC/hm²。不同

龄级森林碳贮量和碳密度增幅趋势一致,但呈后者 41.07%,其次是近熟林增幅分别为 1.43 倍和 低于前者的态势。10 年间样区碳贮量和碳密度增幅 19.69%,而增幅最小的是中龄林,仅分别为 7.97%和 最大的是成熟林,分别为 2002 年的 2.67 倍和 11.39%。

表 2 样区不同森林类别碳贮量、碳密度及其动态变化
Table 2 Carbon sequestration, carbon density and their dynamic changes under different forest types in the study site

森林类型 Forest Types	2002a			2012a		
	面积 Area/ (10 ³ hm ²)	碳贮量 Carbon Sequestration/ (TgC)	碳密度 Carbon density /(MgC/hm ²)	面积 Area/ (10 ³ hm ²)	碳贮量 Carbon Sequestration/ (TgC)	碳密度 Carbon density /(MgC/hm ²)
杉木 Cunninghamialanceolata	4.53	0.05	11.39	8.03	0.18	22.23
马尾松 P.massoniana	76.6	1.16	15.1	85.6	1.57	18.32
柏木类 Cypress	5.67	0.05	8.45	7.7	0.19	25.29
柳杉、水杉等 Tsuga, Keteleeria, etc.	4.49	0.03	7.56	16	0.24	14.77
针阔混交林 Mixed conifer and deciduous	3.78	0.08	22.49	24.4	0.76	31.27
杂木林 Nonmerchantable woods	22.6	0.79	34.91	12.4	0.22	17.47
合计 Total	118	2.16	18.39	154	3.16	20.48

幼林龄和中龄林在面积上的增幅占据样区森林 木类等朝成熟林和近熟林方向演进,碳密度增加较 主要龄级动态的基本格局,但因大多属 2002 年以来 快。过熟林碳密度增加处“峰”值后的下滑阶段,10 退耕还林、森林重庆和石漠化治理中造林或天然林 年间除部分过熟林被砍伐外尚有部分已经老化,结 保护和自然保护区建设中森林恢复的结果,未来朝 果出现在面积减少的同时碳密度增加也呈降低趋 以下逐龄级演化的空间较大,碳密度增加潜力显著。 势。为此,提升样区森林的碳增汇能力,最为重要的 成熟林和近熟林固然碳密度较高,但在天然林保护 是实施人工促进更新,加快中、幼龄林向近熟林及 和自然保护区建设中伴随高碳密度马尾松、杉木、柏 下龄级的演变。

表 3 样区不同森林龄级碳贮量、碳密度及其动态变化
Table 3 Carbon sequestration, carbon density and their dynamic changes under different forest age classes in the study site

龄级 Forest age	2002a			2012a			2002—2012a	
	面积 Area /(10 ³ hm ²)	碳贮量 Carbon Sequestration /TgC	碳密度 Carbon Density/ (MgC/hm ²)	面积 Area /(10 ³ hm ²)	碳贮量 Carbon Sequestration /TgC	碳密度 Carbon Density/ (MgC/hm ²)	碳贮量动态 Dynamic of Carbon Sequestration /TgC	碳密度动态 Dynamic of Carbon Density/ (MgC/hm ²)
幼龄林 Young forest	40.5	0.58	14.39	71	1.21	17.04	0.63	2.65
中龄林 Middle-aged forest	67.7	1.38	20.46	65.5	1.49	22.79	0.11	2.33
近熟林 Nearly Mature forest	6.91	0.14	20.98	13.6	0.34	25.11	0.2	4.13
成熟林 Mature forest	1.65	0.03	19.7	4.03	0.11	27.79	0.08	8.09
过熟林 Over Mature forest	1	0.02	19.41	0.01	0	17.38	-0.02	-2.03

不同起源森林碳增汇能力呈天然林显著高于人 增加上天然林高达 1.69MgC/hm²,人工林仅为天然 工林。近 10 年样区无论是碳贮量还是碳密度动态, 林增量的 41.42%(表 4)。比较不同起源森林碳贮量 天然林均是碳增汇的主要贡献者,在碳贮量增加中 和碳密度的增幅发现,碳贮量增幅人工林高于天然 占 85.00%,人工林增量仅是天然林的 1/6,而碳密度 林,而碳密度则相反。10 年间人工林碳贮量增幅为

58.85%,碳密度增幅为 3.92%,而天然林的相应增幅分别为 44.74%和 8.83%。

人工林碳贮量增幅快于天然林主要源于 10 年间退耕还林、森林重庆和石漠化治理的实施,驱使 $6.68 \times 10^3 \text{ hm}^2$ 人工林的种植(尤其是经济林木),为 2002 年面积的 44.30%,而尽管天然林的面积因天然林保护和自然保护区建设的开展也获得很大程度的增加,达 $2.97 \times 10^3 \text{ hm}^2$,但因本底基数大,增幅仅为

28.96%。天然林碳密度增幅高于人工林的原因在于,在天然林保护和自然保护区建设下不同龄级森林逐渐向下一级演化,如幼龄林转换为中龄林、中龄林转换为近熟林等,从而促使碳密度的增加,而人工林因由林业工程而来,种植时间段,如 2002 年退耕还林、2008 年森林重庆等,致使大部分人工林处于幼、中龄阶段,碳密度增长幅度较低,但未来碳增汇潜力较大。

表 4 样区不同森林起源碳贮量、碳密度及其动态变化

Table 4 Carbon sequestration, carbon density and their dynamic changes under different forest origin in the study site

起源 Origin	2002			2012			2002—2012	
	面积 Area /(10^3 hm^2)	碳贮量 Carbon sequestration /TgC	碳密度 Carbon density/ (MgC/hm^2)	面积 Area /(10^3 hm^2)	碳贮量 Carbon sequestration /TgC	碳密度 Carbon density/ (MgC/hm^2)	碳贮量动态 Dynamic of carbon sequestration /TgC	碳密度动态 Dynamic of carbon density/ (MgC/hm^2)
天然林 Natural forest	103	1.9	19.15	132	2.75	20.84	0.85	1.69
人工林 Artificial forest	15.1	0.26	17.84	21.8	0.4	18.54	0.14	0.7

3 讨论

表 5 可看出,近 10 年样区重大森林恢复计划共实现碳增汇 0.97TgC,占同期森林碳增加量的

97.66%;平均碳密度增量 $7.64 \text{ MgC}/\text{hm}^2$,明显高于恢复计划未覆盖范围的森林碳密度增加值。可以说,重大森林恢复计划对样区森林碳增汇功能的发挥起到关键作用,碳增汇效应十分显著。

表 5 样区重大森林恢复计划下的碳增量和碳密度变化

Table 5 Carbon sequestration and carbon density change under major forest recovery plan in the study site

工程类型 Project type	实施起止年 The beginning and ending years	面积 Area/ (10^3 hm^2)	碳贮量 Carbon sequestration/ (TgC)	碳密度 Carbon density/ (MgC/hm^2)
退耕还林工程 Grain for Green Project	2002—2006	5.09	0.05	9.81
森林重庆工程 Forest Chongqing Engineering	2008—2011	1.14	0.01	8.34
石漠化治理工程 Rocky desertification control project	2005—2011	0.87	0.01	7.4
天然林保护工程 Natural Forest Protection Project	1998—2011	111.24	0.83	7.45
自然保护区建设工程 Nature Reserve Project	2001—2011	8.23	0.07	8.72

3.1 天然林保护工程的碳增汇贡献

天然林保护工程碳增量最大,达 0.83TgC,占恢复计划实现碳增汇总量的 85.57%。天然林保护工程属实施最早、覆盖范围最广的林业工程,达 $1.11 \times 10^5 \text{ hm}^2$,占森林恢复计划实施面积的 87.89%,主要发生于“两山”区,尤其是七曜山北部高山区(扣除大风堡自然保护区)和南部低山区最为集中。不同工程上封山育林碳增汇贡献最大(占 61.20%),不同龄级上中、幼龄林是碳增汇的主要贡献者(占

84.15%)。中、幼龄林主导,表明未来天然林保护区未来碳增汇潜力巨大。

对难依靠自然恢复的天然林施加人工促进更新造林是最直接、最有效的恢复路径,且这一过程森林碳增汇效应显著高于天然林保护工程实现碳增量的平均水平。表 6 可看出,10 年间样区天然林保护工程实施人工造林 $7.70 \times 10^3 \text{ hm}^2$,碳增量 0.13TgC,占天然林保护工程碳增汇的 15.85%。困难立地和种源匮乏条件下,特殊生态脆弱区的森林不能通过保护、

封禁措施提高生态系统完整性,需要借助适生乡土树种补植实施外界人为的促进,达到林地健康演替和生态完整性提升。

封山育林是基于立地条件较好、种源较丰富且能依托保护促进幼树更新的恢复措施,因实施范围广,且封山前植被长势较差,碳增汇效应最大,贡献率最高。10 年间样区封山育林 $2.02\times 10^4\text{hm}^2$,碳增量 0.51TgC ,占天然林工程碳增汇的 62.20%(表 6)。

不同林龄级的碳增汇贡献上,中、幼龄林显著高于近、成熟林,分别为(43.14%和 41.18%)和(7.84%和 7.84%)。封山育林主要发生在无立木林地、宜林荒山荒地区,森林恢复后的自然演化较慢,需要很长时间才能由中、幼龄林发展到近、成熟林,致使封山育林区近、成熟林相对较少,碳增量较低。然而,伴随封山育林时间的延伸,未来中、幼龄林朝近、成熟林演化的空间较大,能够实现更大的碳增汇贡献。

表 6 样区天然林保护工程碳增量及其在不同龄组下的分布
Table 6 Carbon sequestration of natural forest protection project and its distribution in different age groups

工程类型 Project type	龄组 Age group	面积 Area/ (10^3hm^2)	碳储量 Carbon sequestration/ (TgC)	工程类型 Project type	龄组 Age group	面积 Area/ (10^3hm^2)	碳储量 Carbon sequestration/ (TgC)
人工造林 Afforestation	幼龄林	3.821	0.06	封山育林	近熟林	1.448	0.04
	中龄林	2.97	0.05	Forest conservation	成熟林	0.775	0.04
	近熟林	0.657	0.01	森林管护	幼龄林	48.499	0.06
	成熟林	0.248	0.01	Forest management	中龄林	48.605	0.09
封山育林 Forest conservation	幼龄林	10.093	0.21		近熟林	11.251	0.02
	中龄林	7.999	0.22		成熟林	2.359	0.01

森林管护是实现对现有天然林实施保护、减少商品性砍伐、降低资源消耗的最佳人为措施,覆盖范围广,因管护前植被长势较好且多处于中、幼龄林阶段,碳增汇效应低于森林恢复计划的平均水平。表 6 发现,10 年间样区天然林保护工程中实施森林管护 $1.11\times 10^5\text{hm}^2$,碳增量 0.18TgC ,占天然林工程碳增汇的 21.95%。而且,中、幼龄林仍然是碳增汇的主要贡献者,分别占 50.00%和 33.33%,过、成熟林因面积较小,碳增汇效应不显著,但类似于封山育林,未来碳增汇的空间较大。

3.2 退耕还林工程的碳增汇贡献

退耕还林碳增量 0.05TgC ,占恢复计划实现碳增汇总量的 5.15%。退耕还林工程覆盖样区 24 个乡镇,重点分布在沿江一层山脊平坝区、方斗山中低山区和方斗-七曜所夹槽谷区,主要树种有马尾松、柏木、柳杉、桉木、白杨等(表 7)。退耕还林工程起止于 2002—2006 年,森林龄级至目前多以中、幼龄林为主,达 $4.65\times 10^3\text{hm}^2$,占退耕还林工程中已演化为森林面积的 93.15%,近、成熟林仅占 6.85%。这样,中、幼龄林碳储量达 45088.17MgC ,占退耕还林工程总碳增量的 90.18%,近、成熟林的碳储量仅占 9.82%。然而,退耕还林工程森林平均碳密度

$10.02\text{MgC}/\text{hm}^2$,其中,中、幼龄林平均碳密度 $9.70\text{MgC}/\text{hm}^2$,近、成熟林平均碳密度 $14.33\text{MgC}/\text{hm}^2$ 。不难看出,对于退耕还林工程而言,伴随大量中、幼龄林朝近、成熟林的演化,未来仍有较大碳增汇潜力和空间。

不同森林类型看,退耕还林工程中马尾松实现碳增汇最多,达 22881.52MgC ,占工程总碳增汇的 45.76%,平均碳密度为 $13.68\text{MgC}/\text{hm}^2$,较样区平均水平高出 $3.66\text{MgC}/\text{hm}^2$ 。而且,中、幼林马尾松的碳储量占马尾松全龄级的比重分别为 65.25%和 32.04%。即是说,中龄林马尾松是样区退耕还林工程碳增汇的主要贡献者。柏木林属退耕还林工程中仅次于马尾松的碳增汇提供者,占工程总碳增汇的 30.92%,平均碳密度 $17.12\text{MgC}/\text{hm}^2$,显著高于样区平均水平 70.01%。柏木类幼龄林占据退耕还林工程中柏木类种植面积的 98.23%,而且,中龄林碳密度较幼龄林高 6.01%,伴随柏木幼龄林朝中龄林及以下龄级转化,退耕还林工程中的柏木类仍有较大的碳增汇空间。其他森林类型碳增汇效应较小,累计占工程总碳增汇的 23.32%,平均碳密度仅为 $4.83\text{MgC}/\text{hm}^2$,约是样区平均水平的 1/2。当然,伴随森林龄级由幼龄林向成熟林的演化,其他森林类

型未来也有一定的碳增汇潜力。

表 7 样区退耕还林工程碳增量在不同树种和龄组下的分布

Table 7 Carbon sequestration of Grain to Green project and its distribution under different tree species and age groups							
树种 Tree species	龄组 Age groups	面积 Area/ (10 ² hm ²)	碳贮量 Carbon sequestration/ (MgC)	树种 Tree species	龄组 Age groups	面积 Area/ (10 ² hm ²)	碳贮量 Carbon sequestration/ (MgC)
针阔混交林 Mixed conifer and deciduous	幼龄林	4.21	4130.2	杂木林 Hardwood	幼龄林	5.51	5405.62
	中龄林	2.15	2109.3		中龄林	9.47	9290.6
	近熟林	0.44	431.66		近熟林	1.38	1353.86
	成熟林	0.38	372.8		成熟林	1.73	1697.23
柳杉、水杉等 Tsuga, Keteleeria, etc.	幼龄林	4.35	4267.6	马尾松 P. massoniana	幼龄林	6.51	6386.67
	中龄林	0.51	500.34		中龄林	7.28	7142.08
	近熟林	0.05	49.05		近熟林	0.35	343.37
杉木 Cunninghamialanceo- lata	幼龄林	0.24	235.45	柏木类 Cypress	幼龄林	5.91	5798.04
	中龄林	0.17	166.78		中龄林	0.13	127.54
	近熟林	0.16	156.97		合计 Total	50.93	49965.16

样区林业局数据显示,退耕还林工程实施总面积(实际补偿给农户的)共 10771.57hm²。但本文使用的具有一定碳增汇效应的成林面积尚未占到工程实施规模的一半(46.32%),且以幼龄林为主,这在很大程度削弱了退耕还林工程理应可能发挥的碳增汇效应。样区农民外出胁迫下退耕还林的森林经理欠账太大,造林成效较差,成林缓慢,是诱发退耕还林工程成林面积较小的主要动因。而且,实施过程中“适地适树”把握欠佳,造成的退耕还林树种因不适合特定的立地条件而展开更换或补植,从而出现树种林龄较小,达不到成林统计的要求。因此,加强退耕还林的经营和管理,强化和巩固退耕还林工程成效,有助于增强样区退耕还林工程碳增汇效应的

人为调控。

3.3 其他恢复计划的碳增汇贡献

样区其他恢复计划共产生碳增汇 0.10TgC,占恢复计划实现碳增汇总量的 9.28%,其中,自然保护区建设碳增汇 0.07TgC,石漠化治理碳增汇 0.01TgC,重庆森林工程碳增汇 0.01TgC(表 5)。

自然保护区建设中的碳增汇以马尾松和柳杉、水杉为主,分别分解保护区建设碳增汇的 46.14%和 46.49%,其他森林类型碳增汇仅占 7.37%(表 8)。不同龄级看,中、幼龄林碳增汇达 63111.63MgC,占保护区总碳增汇的 87.97%,近、成熟林碳增汇比重较小。为此,自然保护区内伴随中、幼龄林向近、成熟林的演化,将释放较大的碳增汇潜力和空间。目前,

表 8 样区自然保护区建设工程碳增量在不同树种和龄组下的分布

Table 8 Carbon sequestration of nature reserve construction and its distribution under different tree species and age classes							
树种 Tree species	龄组 Age groups	面积 Area/ (10 ² hm ²)	碳贮量 Carbon sequestration/ (MgC)	树种 Tree species	龄组 Age groups	面积 Area/ (10 ² hm ²)	碳贮量 Carbon sequestration/ (MgC)
针阔混交林 Mixed conifer and deciduous	幼龄林	0.71	619.23	柳杉、水杉等 Tsuga, Keteleeria, etc.	幼龄林	0.31	581.62
	中龄林	2.08	1814.1		中龄林	29.25	25210.57
	近熟林	0.49	427.36		近熟林	8.18	7134.22
马尾松 P. massoniana	幼龄林	24.46	21333	成熟林	成熟林	0.49	427.36
	中龄林	13.37	11661		幼龄林	1.36	1186.13
	近熟林	0.13	113.38		中龄林	0.13	113.38
杉木 Cunninghamialanceo- lata	中龄林	0.68	593.06	近熟林	近熟林	0.05	43.61
	近熟林	0.56	488.41		合计 Total	82.25	71745.96

自然保护区内受到来自两个方面的扰动胁迫,对碳增汇能力的发挥构成较大影响,如国家重点工程-万胜坝水库建设对林地的淹没且就地后靠移民产生的相对集中对林地保护的壓力、沪蓉高速与冷黄路的连接贯通对林地的破坏等。

石漠化治理工程中的碳增汇以马尾松和杉木林为主,分别占治理工程碳增汇的 45.33%和 35.91%,其他森林类型占 18.76%(表 9)。不同龄级看,中、幼龄林碳增汇达 6223.68MgC,占治理工程总碳增汇的

96.45%,近、成熟林所占比重甚微。而且,中、幼龄林高达 $8.27\times 10^2\text{hm}^2$,平均碳密度的增量为 $7.53\text{MgC}/\text{hm}^2$,近、成熟林 $0.76\times 10^2\text{hm}^2$,平均碳密度的增量为 $6.01\text{MgC}/\text{hm}^2$ 。石漠化治理工程中,在中、幼龄林朝近、成熟林龄级演化时,将实现巨大的碳增汇潜力。但是,因样区石漠化重点发生在乌江水系和“两山区”,尤其是七曜山海拔 1400m 以上区最为严重,这里,土壤瘠薄、水土流失和漏失突出,治理后树木生长缓慢,“小老树”普遍出现,致使碳增汇能力较弱。

表 9 样区石漠化治理工程碳增量在不同树种和龄组下的分布

Table 9 Carbon sequestration of rocky desertification control project and its distribution under different tree species and age classes

树种 Tree species	龄组 Age groups	面积 Area/ (10^2hm^2)	碳贮量 Carbon sequestration/ (MgC)	树种 Tree species	龄组 Age groups	面积 Area/ (10^2hm^2)	碳贮量 Carbon sequestration/ (MgC)
针阔混交林 Mixed conifer and deciduous	幼龄林	0.31	227.9	杂木林 Hardwood	幼龄林	0.23	28.07
	中龄林	0.41	386.69		中龄林	0.61	59.91
	近熟林	0.07	65.32		近熟林	0.12	51.9
	成熟林	0.02	6.4		成熟林	0.07	45.2
柳杉、水杉等 Tsuga, Keteleeria, etc.	幼龄林	0.08	5.92	杉木 Cunninghamialanceo-lata	中龄林	2.49	2267.67
	中龄林	0.23	32.63		近熟林	0.09	35.61
马尾松 P. massoniana	近熟林	0.06	11.01	柏木类 Cypress	成熟林	0.02	13.68
	幼龄林	2.81	2575		幼龄林	0.45	290.1
	中龄林	0.65	349.83	合计 Total		8.72	6452.8

重庆森林工程碳增汇以杂木林和马尾松为主,分别占森林工程碳增汇的 41.99%和 28.71%,其他森林类型占 29.30%(表 10)。不同龄级看,中、幼龄林碳增汇 8922.13MgC,占工程碳增汇总量的 93.95%,近、成熟林仅占 6.05%。而且,中、幼龄林 1.07×10^3

hm^2 ,平均碳密度的增量为 $8.34\text{MgC}/\text{hm}^2$,近、成熟林 $0.69\times 10^2\text{hm}^2$,平均碳密度的增量为 $8.32\text{MgC}/\text{hm}^2$ 。这样,在中、幼龄林演化为近、成熟林也将释放较大的碳增汇潜力。但是,重庆森林工程因实施时间较短,新造林多为中、幼龄林,而且,除石漠化治理工程

表 10 样区重庆森林工程碳增量在不同树种和龄组下的分布

Table 10 Carbon sequestration of Chongqing forest engineering and its distribution under different tree species and age classes

树种 Tree species	龄组 Age groups	面积 Area/ (10^2hm^2)	碳贮量 Carbon sequestration/ (MgC)	树种 Tree species	龄组 Age groups	面积 Area/ (10^2hm^2)	碳贮量 Carbon sequestration/ (MgC)
杂木林 Hardwood	幼龄林	3.16	2637	针阔混交林 Mixed conifer and deciduous	幼龄林	0.85	711.83
	中龄林	1.29	1075.8		中龄林	0.14	113.25
	近熟林	0.17	145.6		近熟林	0.18	153.69
	成熟林	0.16	129.42		成熟林	0.02	16.18
马尾松 P. massoniana	幼龄林	1.33	1108.2	柳杉、水杉等 Tsuga, Keteleeria, etc.	幼龄林	0.66	550.05
	中龄林	1.79	1496.5		中龄林	0.32	266.94
	近熟林	0.15	121.33		近熟林	0.01	8.09
杉木 Cunninghamialanceo-lata	幼龄林	0.01	8.09	柏木类 Cypress	幼龄林	1.08	897.87
	中龄林	0.05	40.44		中龄林	0.02	16.18

外,一旦重庆森林工程与其他工程重叠时都归并到其他工程范围内,使得本文重庆森林工程碳增汇效应测算面积较实际实施面积小,进而体现为森林工程碳增汇能力较弱。

4 结语

2002—2012 年的 10 年间,样区实现碳增汇 1.00TgC,年均增长率 3.88%,平均碳密度增加 2.13MgC/hm²,年均增长率 1.08%。样区碳增汇(碳贮量和碳密度)呈现显著的区域差异,尤其是天然林保护和退耕还林工程实施较多的方斗-七曜所夹槽谷区和七曜山南部中山区。

关键林分因子,碳增汇能力最强的是松、杉、柏及针阔混,累计达 1.36TgC,而单一针阔混的碳增量占 50.00%,碳密度增加最大的是柏木和杉木,优势树种马尾松增加最低。而且,中、幼龄林及以下龄级累计碳增量 0.94TgC,占总碳贮量动态的 94.00%,尤其是幼龄林碳增量达 0.63TgC,占 63.00%,碳密度动态随龄级的演替呈倒“U”型格局,在成熟林处增量达到最高 8.09MgC/hm²。

近 10 年,样区重大森林恢复计划实现碳增汇 0.97TgC,占该时期总碳增汇的 97.66%,且平均碳密度增量 7.64MgC/hm²,明显高于恢复计划未覆盖范围的森林碳密度增加值。其中,天然林保护工程碳增量最大,达 0.83TgC,占恢复计划实现碳增汇总量的 85.57%,其次是退耕还林工程,碳增汇 0.05TgC,占恢复计划实现碳增汇总量的 5.15%,而其他恢复计划共产生碳增汇 0.10TgC,占恢复计划实现碳增汇总量的 9.28%。更为重要的,样区重大森林恢复计划的碳增汇主要发生在中、幼龄林阶段,在中、幼龄林向近、成熟林演化过程中,随着森林碳密度的增加,仍会展现出较大的碳增汇潜力。

本研究的数据基础主要使用样区两次“森林二类清查”信息,虽然在清查的过程中注重样方调查和抽样调查验证,但这里的样方和抽样与严格意义上的森林生物量或蓄积量的样方调查有很大不同。为此,未来的工作重点即是在样区针对特定立地条件,布局森林生物量计量测算样方,同时,增补资源类型核查野外踏勘点,进一步矫正二类清查资源分布图。但是,本研究获得的基本结果和结论总体上反映样区森林碳增汇的宏观格局,尤其是重大森林恢复计

划在其中的贡献和未来潜力,它不会因数据精度的核查而发生较大的变化。因此,研究有助于提高人们对人为调控气候变化的理解和认识,为未来从国家或区域层面制定人为应对气候变化的措施提供科学依据和数据支撑。

References:

- [1] Ge Q S, Chen P Q, Fang X Q, Lin H, Ye Q. Adaptation to global change: challenge and research strategy. *Advances in Earth Science*, 2004, 19(4): 517-524.
- [2] Deng S H, Shi Y Q, Jin Y, Wang L H. A GIS-based approach for quantifying and mapping carbon sink and stock values of forest ecosystem: A case study. *Energy Procedia*, 2011, 5: 1535-1545.
- [3] Woodbury P B, Smith J E, Heath L S. Carbon sequestration in the U. S. forest sector from 1990 to 2010. *Forest Ecology and Management*, 2007, 241(1/3): 14-27.
- [4] Ye D Z, Wei Y Z, Ma Z G. Addressing climate change for sustainable development. *Bulletin of Chinese Academy of Sciences*, 2012, 27(3): 332-335.
- [5] Wang Q F, Liu Y H, He N P, Fang H J, Fu Y L, Yu G R. Demands and key scientific issues in the synthesis research on regional terrestrial ecosystem carbon budget in China. *Progress in Geography*, 2012, 31(1): 78-87.
- [6] Ke S F, Li Z, Zhang Y. Aforestation action to tackle climate change and green employment potential estimation. *Forestry Economics*, 2012, 240(7): 34-40.
- [7] Bhattacharya P, Pradhan L, Yadav G. Joint forest management in India: Experiences of two decades. *Resources, Conservation and Recycling*, 2010, 54(8): 469-480.
- [8] Li N Y, Yang Y C, Chen X T. Develop carbon sequestration forestry for combating climate change: The practice and management of carbon sequestration forestry in China. *Science of Soil and Water Conservation*, 2010, 8(1): 13-16.
- [9] Masera O R, Garza-Caligaris J F, Kanninen M, Karjalainen T, Liski J, Nabuurs G J, Pussinen A, de Jong B H J, Mohren G M J. Modeling carbon sequestration in afforestation, agroforestry and forest management projects: the CO₂ FIX V. 2 approach. *Ecological Modelling*, 2003, 164(2/3): 177-199.
- [10] Li N Y, Xu Z H, Wang C F, Chen J, Zhang S D, Zhang S, Hou R P. Selection and evaluation of preferential development area for afforestation and reforestation project under CDM in China. *Scientia Silvae Sinicae*, 2007, 43(7): 5-9.
- [11] Fan H B, Huang Y Z, Yuan Y H, Li Y Y, Huang R Z, Fan H Y. Carbon cycling of forest ecosystems in response to global nitrogen deposition: A review. *Acta Ecologica Sinica*, 2007, 27(7): 2997-3009.
- [12] Lü J W, Yue Q, Wang Z, Zhang G J. Carbon sequestration

- potential in Fujian's forest ecosystems. *Acta Ecologica Sinica*, 2010, 30(8): 2188-2196.
- [13] Wu Q B, Wang X K, Duan X N, Deng L B, Lu F, Ouyang Z Y, Feng Z W. Carbon sequestration and its potential by forest ecosystem s in China. *Acta Ecologica Sinica*, 2008, 28(2): 517-524.
- [14] Hu H F, Liu G H. Carbon sequestration of China's national natural forest protection project. *Acta Ecologica Sinica*, 2006, 26(1): 291-296.
- [15] Huang C D, Zhang J, Yang W Q, Tang X, Zhao A J. Dynamics on forest carbon stock in Sichuan Province and Chongqing City. *Acta Ecologica Sinica*, 2008, 28(3): 966-975.
- [16] Fang J Y, Guo Z D, Pu S L, Chen A P. Carbon sequestration of terrestrial vegetation in China from 1991 to 2000. *Science in China*, 2007, 37(6): 804-812.
- [17] Fang J Y, Chen A P, Zhao S Q, Ci L J. Estimating biomass carbon of china's forest: supplementary notes on report published in science (291: 2320—2322) by Fang et al. (2001). *Acta Phytocologica Sinica*, 2002, 26(2): 243-249.
- [18] Liu G H, Fu B J, Fang J Y. Carbon dynamics of Chinese forests and its contribution to global carbon balance. *Acta Ecologica Sinica*, 2000, 20(5): 733-740.
- [19] Ma Q Y, Xie Z M. Estimation of the carbon stored in Chinese Pine forests. *Journal of Beijing Forestry University*, 1996, 18(3): 23-27.
- [5] 王秋凤, 刘颖慧, 何念鹏, 方华军, 伏玉玲, 于贵瑞. 中国区域陆地生态系统碳收支综合研究的科技需求与重要科学问题. *地理科学进展*, 2012, 31(1): 78-87.
- [6] 柯水发, 李周, 张莹. 中国应对气候变化的造林行动及绿色就业潜力测算. *林业经济*, 2012, 240(7): 34-40.
- [8] 李怒云, 杨炎朝, 陈叙图. 发展碳汇林业应对气候变化—中国碳汇林业的实践与管理. *中国水土保持科学*, 2010, 8(1): 13-16.
- [10] 李怒云, 徐泽鸿, 王春峰, 陈健, 章升东, 张爽, 侯瑞萍. 中国造林再造林碳汇项目的优先发展区域选择与评价. *林业科学*, 2007, 43(7): 5-9.
- [11] 樊后保, 黄玉梓, 袁颖红, 李燕燕, 黄荣珍, 樊海燕. 森林生态系统碳循环对全球氮沉降的响应. *生态学报*, 2007, 27(7): 2997-3009.
- [12] 吕劲文, 乐群, 王铮, 张国君. 福建省森林生态系统碳汇潜力. *生态学报*, 2010, 30(8): 2188-2196.
- [13] 吴庆标, 王效科, 段晓男, 邓立斌, 逮非, 欧阳志云, 冯宗炜. 中国森林生态系统植被固碳现状和潜力. *生态学报*, 2008, 28(2): 512-524.
- [14] 胡会峰, 刘国华. 中国天然林保护工程的固碳能力估算. *生态学报*, 2006, 26(1): 291-296.
- [15] 黄从德, 张健, 杨万勤, 唐宵, 赵安玖. 四川省及重庆地区森林植被碳储量动态. *生态学报*, 2008, 28(3): 966-975.
- [16] 方精云, 郭兆迪, 朴世龙, 陈安平. 1981—2000 年中国陆地植被碳汇的估算. *中国科学(D 辑)*, 2007, 37(6): 804-812.
- [17] 方精云, 陈安平, 赵淑清, 慈龙骏. 中国森林生物量的估算: 对 Fang 等 Science 一文(Science, 2001, 291: 2320-2322)的若干说明. *植物生态学报*, 2002, 26(2): 243-249.
- [18] 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. *生态学报*, 2000, 20(5): 733-740.
- [19] 马钦彦, 谢征鸣. 中国油松林储碳量基本估计. *北京林业大学学报*, 1996, 18(3): 23-27.

参考文献: