

DOI: 10.5846/stxb201407091403

王艳芳, 刘领, 邓蕾, 上官周平. 采伐对豫西退耕还林工程固碳的影响. 生态学报, 2016, 36(5): - .

Wang Y F, Liu L, Deng L, Shangguan Z P. Evaluation of carbon storage and the carbon sequestration potential under cutting and no-cutting scenarios for the Grain for Green Project in Western Henan, China. Acta Ecologica Sinica, 2016, 36(5): - .

## 采伐对豫西退耕还林工程固碳的影响

王艳芳<sup>1,2</sup>, 刘 领<sup>2</sup>, 邓 蕾<sup>1</sup>, 上官周平<sup>1,\*</sup>

1 西北农林科技大学黄土高原土壤侵蚀与旱地农业国家重点实验室, 杨陵 712100

2 河南科技大学农学院, 洛阳 471003

**摘要:**以豫西退耕还林工程重点县嵩县为研究对象, 收集了嵩县 2002—2010 年退耕还林工程逐年实施的造林面积、树种等数据, 利用合适的人工林蓄积量生长方程和中国退耕还林后的土壤有机碳变化的研究结果, 结合各树种的木材密度、生物量扩展因子、碳含量等参数, 在采伐和无采伐两种情景模式下对其退耕还林工程在 2002—2050 年的碳储量及其变化进行估算。结果表明: 2010 年, 工程林总碳储量为 0.470 Tg ( $Tg = 10^{12} g$ ), 工程实施期间, 工程前期碳储量高于后期; 土壤有机碳库在 2002—2010 年期间年固碳量均为负值, 表现为碳排放, 2011 年后土壤年固碳量开始增加; 在两种情境模式下, 工程林年固碳量最高峰都在 2015 年, 2033 年以后采伐情景的年固碳量大于无采伐情景。预计到 2020、2030、2040 和 2050 年, 嵩县退耕还林工程在无采伐情境下的固碳增汇潜力分别为 0.760、1.464、1.852 和 1.985 Tg, 在采伐情景下的固碳增汇潜力分别为 0.760、1.240、1.657 和 2.000 Tg, 从长时间来看, 豫西退耕还林工程林在采伐情景下具有较大的碳汇潜力, 因此, 对退耕还林工程林实施适度的采伐可以提高工程的碳汇能力。

**关键词:**退耕还林工程; 碳储量; 固碳潜力; 采伐情景

## Evaluation of carbon storage and the carbon sequestration potential under cutting and no-cutting scenarios for the Grain for Green Project in Western Henan, China

WANG Yanfang<sup>1,2</sup>, LIU Ling<sup>2</sup>, DENG Lei<sup>1</sup>, SHANGGUAN Zhouping<sup>1,\*</sup>

1 State Key Laboratory of Soil Erosion and Dryland Farming on the Loess Plateau, Northwest Agriculture and Forestry University, Yangling 712100, China

2 College of Agriculture, Henan University of Science and Technology, Luoyang 471003, China

**Abstract:** The Grain for Green Project (GGP), one of the most ambitious ecological projects to be launched in China, was aimed at converting low-yield slope cropland, barren hills, and wasteland into grassland and woodland. The objective of this study was to calculate the carbon stock changes and carbon sequestration potential of the GGP in Western Henan under cutting and no-cutting scenarios, in order to develop a method for further estimation of the carbon sequestration potential of the national GGP and produce a scientific reference for the ecological system management of the GGP in the long run. The Western Henan, one of the major districts that implemented the GGP in China, initiated the GGP in 2002. We analyzed Songxian, which is a major county in terms of implementation of the GGP in Western Henan, as a case to evaluate carbon storage and the carbon sequestration potential under cutting and no-cutting scenarios. We collected data on each year from 2002 to 2010, such as tree species, the planted area of the project in Songxian, the use of a growth curve suitable for China's planting volume, the findings about the soil organic carbon changes after the GGP together with biomass density of

**基金项目:**中国科学院战略性先导科技专项(XDA05060300); 中国科学院科技服务网络计划(STS)项目(KFJ-EW-ST5-005)

**收稿日期:**2014-07-09; **网络出版日期:**2015- -

\* 通讯作者 Corresponding author. E-mail: shangguan@ms.iswc.ac.cn

various species, carbon content, the biomass expansion factor, and the estimated carbon storage and annual carbon sequestration for the GGP from 2002 to 2050. The results showed that total carbon storage was 0.470 Tg in 2010, when the project was completed. Total carbon sequestration in the former period is larger than that in the latter period during the project's implementation. The annual carbon sequestration of the soil organic-carbon pool was negative and released carbon from 2002 to 2010, then an increase in the annual carbon sequestration of soil organic-carbon pool was observed, along with net carbon gains after 2011; the project's annual carbon sequestration peaked in 2015 under no-cutting and cutting scenarios. The annual carbon sequestration under the cutting scenario is greater than that under the no-cutting scenario after 2033. The potential increment of the carbon sink of the GGP-covered Songxian will reach 0.760, 1.464, 1.852, and 1.985 Tg by the year 2020, 2030, 2040, and 2050 under the no-cutting scenario; it will reach 0.760, 1.240, 1.657, and 2.000 Tg under the cutting scenario. The potential increment of the carbon sink under the cutting scenario will exceed that of the no-cutting scenario after 2050. In the long run, the GGP in Western Henan has a greater carbon sequestration potential under the cutting scenario than that under the no-cutting scenario. Our results suggest that moderate forest harvesting for the GGP can increase the capacity for carbon sequestration.

**Key Words:** Grain for Green Project; carbon storage; carbon sequestration potential; cutting scenario

大气中以  $\text{CO}_2$  为主的温室气体含量的增加是引起全球气候变化的重要因素。森林是陆地上最大的碳库, 储存了陆地生态系统中 50%—60% 的碳<sup>[1]</sup>, 增加森林面积无疑成为增强陆地碳汇、减少对大气碳排放的重要举措。

退耕还林工程是目前我国政策性最强、投资量最大、涉及面最广的生态建设工程, 范围涉及全国 25 个省(自治区、直辖市)和新疆生产建设兵团, 共 2279 个县(含市、区、旗), 退耕还林工程包括退耕地造林、荒山荒地造林和封山育林 3 种植被恢复类型<sup>[2]</sup>。截止 2012 年底, 我国已累计投入 3247 亿元, 共完成退耕地造林与宜林荒山荒地造林 2940 万  $\text{hm}^2$ , 退耕还林工程对我国土地利用/覆盖变化产生了重大影响<sup>[3]</sup>, 退耕还林工程种植的大部分人工林仍处于幼、中龄林阶段, 具有较高的固碳潜力<sup>[4-6]</sup>。近年来, 世界各国科学家都在不断探讨和估算全球和区域的森林生态系统的固碳能力<sup>[7-9]</sup>, 我国一些学者<sup>[10-13]</sup>对云南、贵州、重庆等地区退耕还林工程的碳汇潜力进行了初步估算, 然而目前对于生态工程固碳的核算方法以及核算的参数还存在较大的争议, 国际上也没有统一的标准, 目前亟需加强该方面方法以及指标的研究。而且, 退耕还林工程中的林木多为生态公益林, 其都有最佳的轮伐期, 《生态公益林技术规程》规定了各林木类型的最佳的轮伐周期, 所以, 对我国退耕还林工程的固碳潜力评估时, 有必要考虑林木的最佳轮伐期。

豫西(河南省西部)是我国实施退耕还林工程的重点区域之一。为了对豫西退耕还林工程固碳现状和潜力进行评估, 本文以豫西退耕还林工程重点县、黄土高原综合治理林业示范建设县嵩县为研究对象, 在采伐和无采伐两种情景模式下对其退耕还林工程在 2002—2050 年的碳储量及其变化进行研究, 进而探索全国退耕还林工程碳汇潜力的预测方法, 为今后我国退耕还林工程的生态评价体系建设和履约《京都议定书》提供依据, 并为我国退耕还林工程的生态系统管理提供科学参考。

## 1 材料与方法

### 1.1 研究地概况

嵩县位于河南省洛阳市西南部伏牛山区, 地理位置为  $111^{\circ}24'$ — $112^{\circ}22'E$  和  $33^{\circ}35'$ — $34^{\circ}21'N$  之间, 属北亚热带向暖温带过渡气候, 年均气温  $14.1^{\circ}\text{C}$ , 年均降雨量为 812 mm。嵩县为山地丘陵地貌形态, 土地总面积  $3008\text{ km}^2$ , 其中林业用地面积  $2141\text{ km}^2$ , 森林资源丰富, 全县森林覆盖率 62.96%, 活立木蓄积  $1064\text{ 万 m}^3$ 。嵩县退耕还林工程覆盖全县 16 个乡镇, 307 个行政村, 退耕农户 3.2 万户, 12.8 万人。嵩县是河南省退耕还林工程实施重点县, 也是国家林业局近期启动的黄土高原综合治理林业示范建设县。

## 1.2 退耕还林工程实施情况

根据河南省林业厅整理的退耕还林工程计划任务及复查报告,2002—2010 年是嵩县退耕还林工程的实施期,在此期间累计完成造林 13713.33 hm<sup>2</sup>,其中退耕地造林 3980.00 hm<sup>2</sup>、荒山荒地造林 7400.00 hm<sup>2</sup>、封山育林 2333.33 hm<sup>2</sup>;主要造林树种有:杨树、刺槐、杉木、侧柏等生态树种和李、杏、桃等经济树种;造林面积核实率为 100%,合格面积保存率为 98%。2002—2010 年逐年造林树种和面积来源于嵩县退耕还林工程工作报告,嵩县退耕还林工程不同植被恢复类型下逐年造林面积分布见图 1。

## 1.3 碳储量的计算

森林生态系统的碳一般分为 4 个库,即林木生物质碳库、林下枯落层碳库、粗木质残体碳库和土壤碳库<sup>[14]</sup>。造林后经过一段时间会引起枯落物层碳库增

加,但其枯死木和枯落物所占的生物量碳储量与林木生物量碳库相比太小,且缺乏枯死木和枯落物的数据;粗木质残体碳库只有在有采伐时存在,且其碳储量较小<sup>[13]</sup>。遵循《IPCC 关于土地利用、土地利用变化与林业优良做法指南》中关于碳汇计量的保守性原则,所以本文忽略这两部分碳储量,于是需要研究的碳库为林木生物质碳库和土壤碳库。据河南省林业厅核查嵩县退耕还林工程造林合格面积保存率为 98%,因此取 0.98 作为修正因子乘以造林面积得到有效的造林面积。

### 1.3.1 林木生物质碳储量的计算

本研究依据“人工林生长曲线法”估算林木生物质碳储量的变化<sup>[11]</sup>。计算公式为:

$$C_{Bi} = \sum_j \sum_k S_{jk} V_{ijk} D_j BEF_j CF_j \quad (1)$$

式中: $C_{Bi}$ 代表第  $i$  目标年林木生物质碳储量 (Mg) ( $\text{Mg} = 10^6 \text{ g}$ ,下同); $S_{jk}$ 代表  $j$  树种在第  $k$  年的造林面积 ( $\text{hm}^2$ ); $V_{ijk}$ 表示第  $k$  年造林的  $j$  树种到第  $i$  目标年时的林分蓄积量 ( $\text{m}^3/\text{hm}^2$ ); $D_j$ 表示  $j$  树种的木材密度 ( $\text{Mg}/\text{m}^3$ ); $BEF_j$ 表示  $j$  树种由林分蓄积生物量换算为全林分生物量的生物量扩展因子; $CF_j$ 表示  $j$  树种的碳含量 (g)。

#### 1.3.1.1 林分蓄积量 ( $V_{ijk}$ ) 的估算

林木生物质碳储量变化的估算模型中,林分蓄积量是时间(林龄)的函数。本研究中借鉴已发表的适合中国本土的人工林各树种的蓄积量生长方程对嵩县退耕还林工程种植树木的蓄积量进行估算。由于现有的人工林各树种的蓄积量生长方程不全,只能得到几组能代表人工林主要类型的方程。基于现状,在实际处理中除少数几个树种可直接用对应方程外,其余树种则采用近似生长方程估算蓄积量:针叶类树种用针叶树和针叶混蓄积量生长方程计算后取平均值;硬阔类树种用阔叶树和阔叶混的蓄积量生长方程计算后取平均值;多树种混交林采用多树种综合和针叶、阔叶树混合蓄积量生长方程计算后取平均值;软阔类树种用软阔混生长方程替代;嵩县退耕还林工程种植一定面积的经济树种,经济树种蓄积量采用阔叶类树种蓄积量生长方程进行估算。主要树种的蓄积量生长方程见表 1。

#### 1.3.1.2 木材密度 ( $D_j$ )、生物量扩展因子 ( $BEF_j$ ) 和碳含量 ( $CF_j$ ) 的确定

木材密度 ( $D_j$ ) 和生物量扩展因子 ( $BEF_j$ ) 的计算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,碳含量 ( $CF_j$ ) 来自文献资料<sup>[20]</sup>(表 2)。

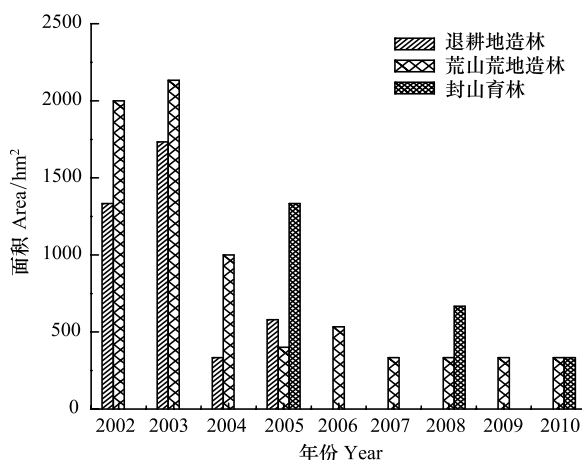


图 1 豫西嵩县退耕还林工程造林面积

Fig. 1 Planted area under the Grain for Green Project (GGP) in Songxian of west Henan Province

表 1 主要树种的蓄积量生长方程  
Table 1 Stand volume growth equation of main tree species

| 树种<br>Species                                   | 生长方程<br>Growth equation                         | 相关系数<br>Correlation coefficient | 文献<br>Reference |
|-------------------------------------------------|-------------------------------------------------|---------------------------------|-----------------|
| 马尾松<br><i>Pinus massoniana</i>                  | $V = 23.3729377(1 - e^{-0.102277t})^{3.913496}$ | 0.998                           | [15]            |
| 杉木<br><i>Cunninghamia lanceolata</i>            | $V = 308.64906(1 - e^{-0.12163t})^{4.21772}$    | 0.962                           | [16]            |
| 杨树<br><i>Populus</i>                            | $V = 365.5(1 - e^{-0.1848t})^{3.9547}$          | 0.999                           | [17]            |
| 阔叶树<br>Broadleaf                                | $V = 61.906(1 - e^{-0.134t})^{163}$             | 0.447                           | [11]            |
| 阔叶混<br>Mixed broadleaf species                  | $V = 135.317303(1 - e^{-0.014388t})^{0.885853}$ | —                               | [18]            |
| 针叶树<br>Conifer                                  | $V = 86.721(1 - e^{-0.145t})^{3.007}$           | 0.519                           | [11]            |
| 针叶混<br>Mixed coniferspecies                     | $V = 178.063256(1 - e^{-0.018132t})^{0.913334}$ | —                               | [18]            |
| 多树种综合<br>Mixed many tree species                | $V = 113.356202(1 - e^{-0.048592t})^{1.252645}$ | —                               | [18]            |
| 针叶、阔叶树混合<br>Mixed conifer and broadleaf species | $V = 83.275(1 - e^{-0.12t})^{2.119}$            | 0.525                           | [11]            |
| 软阔混<br>Mixed softwood species                   | $V = 177.320(1 - e^{-0.061t})^{2.411}$          | 0.675                           | [19]            |

V 为蓄积量、t 为林龄。

表 2 不同树种的木材密度、生物量扩展因子、碳含量和轮伐期  
Table 2 Wood density, biomass expansion factor, carbon fraction and harvest rotation for different tree species

| 树种 Species                        | 木材密度<br>Wood density/<br>(Mg/m <sup>-3</sup> ) | 生物量扩展因子<br>Biomass expansion<br>Factor/(BEF) | 碳含量<br>Carbon fraction(CF)/<br>g | 轮伐期<br>Harvest rotation/<br>a |
|-----------------------------------|------------------------------------------------|----------------------------------------------|----------------------------------|-------------------------------|
| 马尾松 <i>Pinus massoniana</i>       | 0.38                                           | 1.8                                          | 0.54                             | 61                            |
| 杉木 <i>Cunninghamia lanceolata</i> | 0.307                                          | 1.92                                         | 0.5201                           | 36                            |
| 柏树 <i>Cupressaceae</i>            | 0.478                                          | 2.11                                         | 0.5034                           | 101                           |
| 杨树 <i>Populus</i>                 | 0.378                                          | 2.16                                         | 0.4956                           | 26                            |
| 泡桐 <i>Paulownia</i>               | 0.239                                          | 3.69                                         | 0.4695                           | 26                            |
| 栎类 <i>Quercus</i>                 | 0.676                                          | 2.09                                         | 0.5004                           | 71                            |
| 针叶混 Mixed conifer species         | 0.405                                          | 2                                            | 0.5101                           | —                             |
| 硬阔类 Hardwood species              | 0.598                                          | 2.34                                         | 0.4834                           | 71                            |
| 软阔类 Softwood species              | 0.443                                          | 2.5                                          | 0.4956                           | 26                            |
| 阔叶混 Mixed broadleaf species       | 0.482                                          | 1.95                                         | 0.49                             | 51                            |

1.3.1.3 采伐情景设置

嵩县退耕还林工程造林地为生产力低下的坡耕地和荒山地,所营造的林分多为生态公益林,也有部分是具有生态保护作用的经济林<sup>[21]</sup>。根据《生态公益林技术规程》,只有当生态公益林进入过熟林后才进行采伐<sup>[11]</sup>,部分树种最短轮伐期见表 2。工程营造的树木也可能不采伐,因为工程营造的树木大多种植在坡地和偏远的山区。为充分考虑预测结果的适用性,可设置两种情景模式:无采伐情景、最小采伐林龄采伐情景。本研究把在林分成熟后不进行采伐的模式定义为情景 A,把在工程林最小采伐林龄进行采伐的模式定义为情景 B。在情景 B 条件下,假设采伐的林木计为碳排放,所有采伐地在采伐当年便完成更新造林,且采伐残留物已全部移出采伐地。

1.3.2 土壤碳储量的计算

许多研究表明,退耕还林具有显著的土壤碳增汇效应<sup>[22-24]</sup>,退耕还林早期阶段土壤碳储量下降,随后恢

复到农田水平并逐渐升高<sup>[25-27]</sup>,嵩县属于黄土高原丘陵区,退耕还林工程造林地多为贫瘠的坡耕地或荒山荒地,它们通常只有较低的初始有机碳含量。本研究在嵩县无造林坡耕地和荒山荒地 1 m 土层取土样 35 组,测得土壤平均有机碳密度为 30.57 Mg/hm<sup>2</sup>,作为嵩县退耕还林工程造林地的初始有机碳密度。在估算嵩县退耕还林工程造林地土壤有机碳储量变化时,可采用我国学者 Deng 等<sup>[28]</sup>的中国退耕还林工程实施后 1 m 土层的土壤碳储量变化结果(表 3)。

于是,退耕还林工程造林地土壤碳库的增量可用如下公式表示:

$$C_{si} = \sum_j \sum_k r(i-k) S_{jk} \quad (2)$$

式中: $C_{si}$ 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 1 m 土层内土壤有机碳储量年变化,取表 3 中的对应值。

### 1.3.3 碳储量现状和固碳潜力估算

2002—2010 年是嵩县退耕还林工程的实施期,本文以 2010 年退耕还林生态系统的碳储量作为碳储量现状。生态系统固碳增汇潜力 (potential increment of carbon sink) 定义为通过某种自然因素或人为因素组合,而使得生态系统在基准固碳水平基础上可能增加的净固碳总量<sup>[29]</sup>。本文以 2010 年为基准年,预测未来 40 年的固碳增汇潜力。

## 2 结果与分析

### 2.1 退耕还林工程碳储量现状

由表 4 可知,2010 年,退耕还林工程总碳储量共累积 0.470 Tg( $Tg = 10^{12} g$ ,下同)。工程后期林木生物质碳储量高于前期,主要是因为随着时间的推移所造林木不断生长引起林木生物质碳储量增加;工程后期土壤碳储量低于前期,主要原因是工程后期的造林面积低于前期造成的;工程林总碳储量表现为实施前期高于后期。

表 4 豫西嵩县退耕还林工程实施期间的碳储量

Table 4 Carbon storage during the period of GGP in Songxian of west Henan Province

| 时期<br>Period/<br>a | 造林面积<br>Afforested area/<br>hm <sup>2</sup> | 林木碳储量<br>Forest carbon storage/<br>(Tg) | 土壤碳储量<br>Soil carbon storage/<br>(Tg) | 总碳储量<br>Total carbon storage/<br>(Tg) |
|--------------------|---------------------------------------------|-----------------------------------------|---------------------------------------|---------------------------------------|
| 2002—2005          | 10846.67                                    | 0.039                                   | 0.237                                 | 0.276                                 |
| 2006—2010          | 2866.67                                     | 0.185                                   | 0.009                                 | 0.194                                 |
| 2002—2010          | 13713.33                                    | 0.224                                   | 0.246                                 | 0.470                                 |

### 2.2 退耕还林工程固碳增汇潜力

#### 2.2.1 林木生物质碳库的固碳增汇潜力

在情景 A 条件下,退耕还林工程林木生物质碳库的固碳增汇潜力是不断增加的(图 2)。2020、2030、2040、2050 年的林木生物质碳库的固碳增汇潜力分别为 0.41、0.62、0.75、0.83 Tg;在情景 B 条件下,林木生物质碳库的固碳增汇潜力呈先增加后下降再增加的趋势,2020、2030、2040、2050 年的林木生物质碳库的固碳增汇潜力分别为 0.41、0.44、0.55、0.71 Tg。在两种情境下,2002—2026 年林木生物质的固碳增汇潜力一样,2027 年后情景 B 的固碳增汇潜力小于情景 A。这是由于 2027 年后一些树种达到采伐林龄而进行采伐,本文假设树木采伐后即计为碳排放,而重新种植的树木固碳增汇潜力未赶上情景 A 水平。

### 2.2.2 土壤碳库的固碳增汇潜力

在两种情境下,退耕还林工程土壤碳库的固碳增汇潜力是不断增加的(图2)。估计到2020、2030、2040、2050年,在情境A条件下,土壤碳库的固碳增汇潜力分别为0.35、0.84、1.10、1.16 Tg;在情境B条件下,土壤碳库的固碳增汇潜力分别为0.35、0.80、1.11、1.29 Tg。从2040年后情景B的土壤碳库的固碳增汇潜力大于情景A。在两种情境下,土壤碳库的固碳增汇潜力在2024年超过林木的固碳增汇潜力。

### 2.2.3 工程林的固碳增汇潜力

在情景A条件下,退耕还林工程的固碳增汇潜力是不断增加的(图2)。2020、2030、2040、2050年的工程林的固碳增汇潜力分别为0.76、1.46、1.85、1.99 Tg;在情景B条件下,工程林的固碳增汇潜力呈先增加后下降再增加的趋势,2020、2030、2040、2050年工程的固碳增汇潜力分别为0.76、1.24、1.66、2.00 Tg。工程林在2050年后情景B的固碳增汇潜力大于情景A。

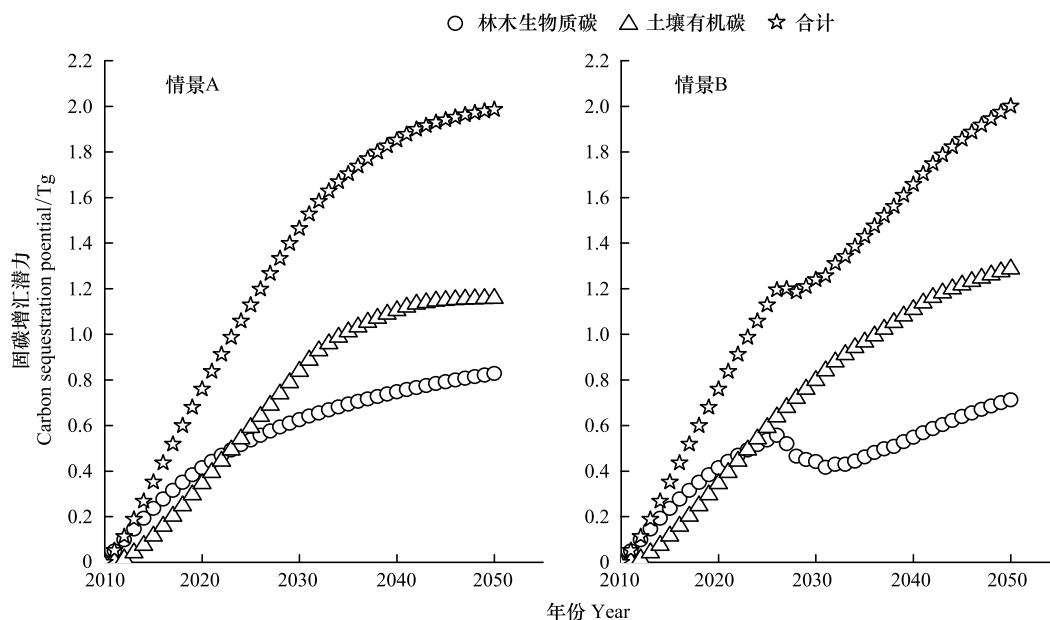


图2 豫西嵩县退耕还林工程固碳增汇潜力

Fig. 2 Carbon sequestration potential under GGP in Songxian of west Henan Province

## 2.3 退耕还林工程年固碳量

### 2.3.1 林木生物质碳库的年固碳量

由图3可知,在情境A条件下,退耕还林工程自2002至2050年间,林木年固碳量表现为先增加后降低的趋势,林木年固碳量最高峰在2011年,年固碳量为0.05 Tg/a,自2011年以后林木年固碳量逐渐降低,2002—2050年林木年均固碳量为0.02 Tg/a。退耕还林工程完成以后的2020、2030、2040、2050年,林木年固碳量分别为0.030、0.016、0.010、0.007 Tg/a。

在情境B条件下,林木年固碳量最高峰也在2011年,自2011年以后林木年固碳量开始降低,2027—2031年林木年固碳量出现负值,是因为2027年一些软阔类树木达到最小采伐林龄进行采伐,本文假设树木采伐后即计为碳排放。2029年后林木年固碳量又逐渐升高,在2037年又出现下降,林木年固碳量出现起伏与一些树木达到最小采伐林龄进行采伐有关。退耕还林工程完成以后的2020、2030、2040、2050年,林木年固碳量分别为0.030、0.009、0.020、0.014 Tg/a。2002—2050年林木年均固碳量为0.019 Tg/a。2033年后情景B的林木年固碳量大于情景A。

### 2.3.2 土壤碳库的年固碳量

退耕还林工程林自2000年至2050年间,1 m土层中土壤碳库年固碳量表现为先降低再增加然后又降低

的总体趋势(图3)。在两种情境下,2002—2010年土壤年固碳量均为负值,在退耕还林工程的早期阶段土壤碳库表现为碳排放。在情景A条件下,2011年后土壤年固碳量出现正值,土壤开始存储有机碳,2050年土壤年固碳量为0.00274 Tg/a;但在情景B条件下,2027年土壤年固碳量开始下降,2029年后开始升高,2050年土壤年固碳量为0.0127 Tg/a。随着采伐的发生,2033年后情景B的土壤年固碳量大于情景A。

### 2.3.3 工程林的年固碳量

退耕还林工程自2002年至2050年间,年固碳量表现为先降低后增加然后再降低的趋势(图3)。在两种情境下,退耕还林工程自2002至2050年间,年固碳量最高峰都在2015年,为0.085 Tg/a。2027年—2032年工程林年固碳量在情境B条件下低于情景A,2033年以后情景B的年固碳量大于情景A。

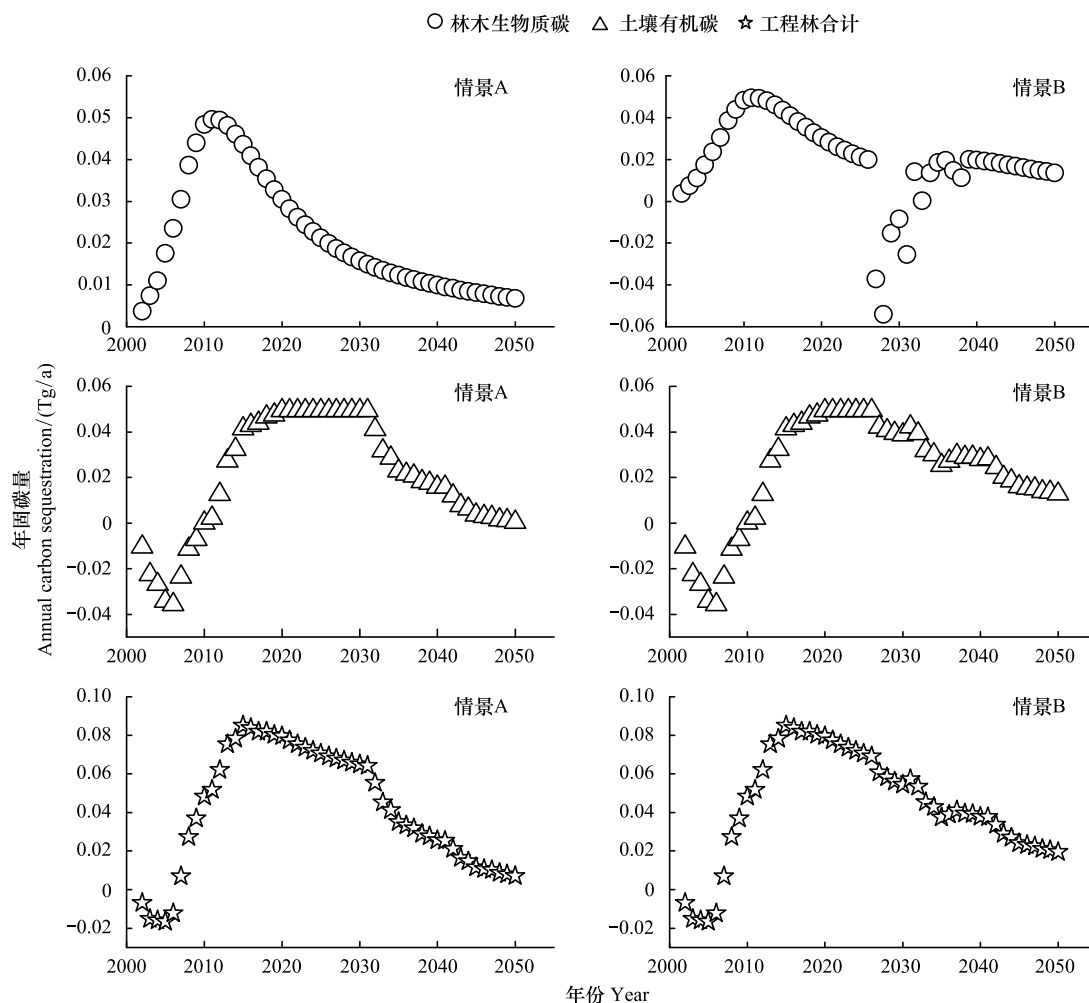


图3 豫西嵩县退耕还林工程年固碳量

Fig. 3 Annual carbon sequestrations under GGP in Songxian of west Henan Province

## 3 讨论

本研究估算的河南省嵩县2010年退耕还林工程年固碳量为0.049 Tg/a,吴庆标等<sup>[30]</sup>估算的2010年河南省退耕还林工程年固碳量为1.33 Tg/a,经过换算得到单位面积年固碳量分别为:357.32 g m<sup>-2</sup> a<sup>-1</sup>、126.81 g m<sup>-2</sup> a<sup>-1</sup>,嵩县单位面积年固碳量大于河南省单位面积年固碳量,一是由于吴庆标等未计算土壤有机碳库和经济林碳汇;二是因为嵩县蓄积量增长较快的杨树种植面积较大,引起单位面积年固碳量较大。于建军等<sup>[31]</sup>利用河南省第二次土壤普查结果计算河南土壤平均碳密度7.46 kg/m<sup>2</sup>,本文估算嵩县退耕还林土壤有机碳密度在2050年时达到17.50 kg/m<sup>2</sup>,达到河南土壤平均碳密度的2.35倍,嵩县退耕还林工程土壤具有较大的碳汇

能力。

本研究采用已发表的适合中国本土的人工林各树种的蓄积量生长方程估算不同树木在不同生长时间的蓄积量。所采用的树木蓄积量生长方程为我国云南、四川、山东、湖南等地区的,这些地区和豫西地区的自然条件存在差异,会造成估算结果的存在一定的误差,但每一树种的生长发育特点主要由其内在的生物学特性所决定的。由于受区域、气候、管理措施等的影响,本文采用的生长方程可能造成立地条件差的区域估算结果偏大而使立地条件较好的区域偏小,但是,从整体上来看,以其为基础设计的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<sup>[10]</sup>。不同树木的木材密度、生物量扩展因子和碳含量查阅文献资料易于获得,此方法可用于对退耕还林工程等林业工程进行碳汇预测。从提高模型预测的精度来看,将来有必要进一步开发区域性的各林分类型的林木蓄积量(生物量)随时间(林龄)变化的生长模型。

本研究中,退耕还林以后土壤有机碳的变化采用 Deng 等<sup>[28]</sup>的通过对收集到的与我国退耕还林(草)工程相关的 135 篇已发表文献数据(包括 181 个样点 844 个样本数据)进行 Meta 分析,总结的中国退耕还林工程实施后 0—1m 土层土壤有机碳变化结果,虽然不同退耕还林地区由于造林树种、立地条件、气候、人为管理等因素造成土壤有机碳变化速率不太一致,但是,从整体上来看,运用 Deng 等<sup>[28]</sup>的土壤有机碳变化模型,所得估算结果能够比以往的其它方法更近于客观实际,可信度较高,可用于估算全国退耕还林工程土壤碳汇能力。但是,为了提高退耕还林后土壤有机碳变化的预测精度,需要各地区开展较长时间尺度上的土壤有机碳变化的数据积累。

本研究只估算了豫西嵩县退耕还林工程林木生物质碳库和土壤有机碳库的碳储量及其变化,由于缺乏相关数据,没有考虑工程中林下枯落层碳库和粗木质残体碳库的变化,而通常情况下退耕还林均会在一定程度上增加这两部分碳库中的碳储量。对于大时间尺度,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;另外,林分内逐渐出现死立木、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<sup>[32]</sup>;另外,随着人们对木材的利用越来越充分和发展循环经济的要求,森林采伐物多半都不会立即转为碳排放,而是被用做建筑材料、纸张、家具等,可以长期固存碳,形成林产品碳库。固存在林产品中的碳量对森林生态系统碳储量的估算具有一定的影响<sup>[13]</sup>。Niu 等<sup>[14]</sup>研究表明,木质林产品中的碳储量占采伐的生物质碳贮量的比例可高达 32%,对退耕还林工程林的适当采伐会有利于延展其碳汇能力。因此,若考虑枯落层碳库、粗木质残体碳库和林产品碳库,退耕还林工程的固碳增汇潜力将会更大。因此,需要进一步对退耕还林工程林下枯落层碳库、粗木质残体碳库和林产品碳库进行调查研究,以便能够更全面的估算退耕还林工程的固碳效益。

#### 4 结论

嵩县退耕还林工程总碳储量表现为工程实施前期高于后期。2002 至 2050 年,工程林年固碳量表现为先降低后增加然后再降低的趋势,2033 年以后采伐情景的年固碳量高于无采伐情景,对森林进行采伐后,会使其在短期内成为碳源,但是在采伐林地上进行及时的造林,林木经过一段时间的生长,其年固碳能力将会赶上甚至超过未采伐地。

退耕还林工程的固碳增汇潜力是不断增加的。采伐情景的固碳增汇潜力在 2050 年后超过无采伐情景,若考虑粗木质残体碳库和林产品碳库,采伐情景的固碳增汇潜力将会更大。从长时间来看,豫西退耕还林工程林在采伐情景下具有较大的碳汇潜力,因此,对退耕还林工程林实施适度的采伐可以提高其碳汇能力。

#### 参考文献(References):

- [1] Dixon R K, Solomon A M, Brown S, Houghton R A, Trexler M C, Wisniewski J. Carbon pools and flux of global forest ecosystems. *Science*, 1994, 263(5144): 185-190.
- [2] 国家林业局. 退耕还林工程生态效益监测国家报告(2013). 北京: 中国林业出版社, 2013.

- [ 3 ] Deng L, Shangguan Z P, Li R. Effects of the grain-for-green program on soil erosion in China. *International Journal of Sediment Research*, 2012, 27(1): 120-127.
- [ 4 ] Pregitzer K S, Euskirchen E S. Carbon cycling and storage in world forests: biome patterns related to forest age. *Global Change Biology*, 2004, 10(12): 2052-2077.
- [ 5 ] Zhao M, Zhou G S. Estimation of biomass and net primary productivity of major planted forests in China based on forest inventory data. *Forest Ecology and Management*, 2005, 207(3): 295-313.
- [ 6 ] Wang X K, Feng Z W, Ouyang Z Y. The impact of human disturbance on vegetative carbon storage in forest ecosystems in China. *Forest Ecology and Management*, 2001, 148(1/3): 117-123.
- [ 7 ] Fang J Y, Chen A P, Peng C H, Zhao S Q, Ci L J. Changes in forest biomass carbon storage in China between 1949 and 1998. *Science*, 2001, 292(5525): 2320-2322.
- [ 8 ] Heimann M, Reichstein M. Terrestrial ecosystem carbon dynamics and climate feedbacks. *Nature*, 2008, 451(7176): 289-292.
- [ 9 ] Härkönen S, Lehtonen A, Eerikäinen K, Peltoniemi M, Mäkelä A. Estimating forest carbon fluxes for large regions based on process-based modelling, NFI data and Landsat satellite images. *Forest Ecology and Management*, 2011, 262(12): 2364-2377.
- [ 10 ] Chen X G, Zhang X Q, Zhang Y P, Wan C B. Carbon sequestration potential of the stands under the Grain for Green Program in Yunnan Province, China. *Forest Ecology and Management*, 2009, 258(3): 199-206.
- [ 11 ] 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. *林业科学*, 2008, 44(5): 24-30.
- [ 12 ] 蔡丽莎, 陈先刚, 郭颖, 殷瑶. 贵州省退耕还林工程碳汇潜力预测. *浙江林学院学报*, 2009, 26(5): 722-728.
- [ 13 ] 陈先刚, 张一平, 潘昌平, 陈本文, 蔡丽莎. 重庆市退耕还林工程林固碳潜力估算. *中南林业科技大学学报*, 2009, 29(4): 7-15.
- [ 14 ] Niu X Z, Duiker S W. Carbon sequestration potential by afforestation of marginal agricultural land in the Midwestern U.S. *Forest Ecology and Management*, 2006, 223(1/3): 415-427.
- [ 15 ] 谭著明, 匡樟青, 夏本安, 曾万明, 陶冶现, 龙开平, 陶申绵. 马尾松天然纯林林分生长与结构特征. *湖南林业科技*, 1996, 23(1): 19-25.
- [ 16 ] 章允清. 卫闽林场杉木人工林经验收获表的研制. *福建林业科技*, 2006, 33(3): 47-51.
- [ 17 ] 赵贝贝, 翟文元, 郝克嘉, 陶国良, 鲁法典. Richards 生长函数在 107-杨树速生丰产林生长预测上的应用. *山东农业大学学报: 自然科学版*, 2010, 41(1): 23-26.
- [ 18 ] 陈艺齐, 蔡丽莎. 四川省退耕还林碳汇潜力预测研究. *防护林科技*, 2008, (1): 1-3.
- [ 19 ] 周永锋, 陈先刚, 黄子珊. 西藏自治区退耕还林工程林碳汇潜力研究. *林业资源管理*, 2013, (3): 48-53.
- [ 20 ] 李海奎, 雷渊才. 中国森林植被生物量和碳储量评估. 北京: 中国林业出版社, 2010.
- [ 21 ] 邓建钦, 段绍光. 河南退耕还林. 郑州: 黄河水利出版社, 2005.
- [ 22 ] 许明祥, 王征, 张金, 刘国彬. 黄土丘陵区土壤有机碳固存对退耕还林草的时空响应. *生态学报*, 2012, 32(17): 5405-5415.
- [ 23 ] 刘苑秋, 王芳, 柯国庆, 王迎迎, 郭圣茂, 范承芳. 江西瑞昌石灰岩山区退耕还林对土壤有机碳的影响. *应用生态学报*, 2011, 22(4): 885-890.
- [ 24 ] Guo L B, Gifford R M. Soil carbon stocks and land use change: a meta analysis. *Global Change Biology*, 2002, 8(4): 345-360.
- [ 25 ] Karhu K, Wall A, Vanhala P, Liski J, Esala M, Regina K. Effects of afforestation and deforestation on boreal soil carbon stocks—comparison of measured C stocks with Yasso07 model results. *Geoderma*, 2011, 164(1/2): 33-45.
- [ 26 ] Ritter E. Carbon, nitrogen and phosphorus in volcanic soils following afforestation with native birch (*Betula pubescens*) and introduced larch (*Larix sibirica*) in Iceland. *Plant and Soil*, 2007, 295(1/2): 239-251.
- [ 27 ] Zhang K, Dang H, Tan S, Cheng X, Zhang Q. Change in soil organic carbon following the ‘Grain-for-Green’ programme in China. *Land Degradation & Development*, 2010, 21(1): 136-238.
- [ 28 ] Deng L, Liu G B, Shangguan Z P. Land-use conversion and changing soil carbon stocks in China’s ‘Grain-for-Green’ Program: a synthesis. *Global Change Biology*, 22(11): 3544-3556, doi: 10.1111/gcb.12508.
- [ 29 ] 于贵瑞, 王秋凤, 刘迎春, 刘颖慧. 区域尺度陆地生态系统固碳速率和增汇潜力概念框架及其定量认证科学基础. *地理科学进展*, 2011, 30(7): 771-787.
- [ 30 ] 吴庆标, 王效科, 段晓男, 邓立斌, 逯非, 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): 517-524.
- [ 31 ] 于建军, 杨锋, 吴克宁, 李玲, 吕巧灵. 河南省土壤有机碳储量及空间分布. *应用生态学报*, 2008, 19(5): 1058-1063.
- [ 32 ] Delaney M, Brown S, Lugo A E, Torres-Lezama A, Quintero N B. The quantity and turnover of dead wood in permanent forest plots in six life zones of venezuela. *Biotropica*, 1998, 30(1): 2-11.