

退耕还林工程对河南省森林地上碳储量的影响

王艳芳^{1,2}, 刘 领¹, 悦飞雪¹, 李 冬¹, 上官周平²

(1. 河南科技大学 农学院, 河南 洛阳 471023; 2. 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, 陕西 杨凌 712100)

摘要: 退耕还林工程作为中国重要的植被恢复工程, 其碳汇能力巨大。基于河南省退耕还林实施期间河南省森林资源清查数据(1998-2003年, 2003-2008年, 2008-2013年), 利用生物量转换因子连续函数法, 估算河南省森林及人工林的碳储量, 同时利用2000-2012年河南省退耕还林工程逐年造林树种和面积, 估算退耕还林所种树木的碳储量。结果表明: 河南省森林面积、蓄积、碳储量和碳密度分别从1998年的 $149.77 \times 10^4 \text{ hm}^2$, $5\,258.50 \times 10^4 \text{ m}^3$, 30.49 Tg和 $20.36 \text{ Mg} \cdot \text{hm}^{-2}$ 增加到2013年的 $305.36 \times 10^4 \text{ hm}^2$, $17\,094.56 \times 10^4 \text{ m}^3$, 91.02 Tg和 $29.81 \text{ Mg} \cdot \text{hm}^{-2}$, 其中人工林面积、碳储量、碳密度增幅较大。人工林碳储量占林分总碳储量的比例由1998年的29.26%提高到2013年的58.46%。人工林在河南省森林碳汇中发挥着越来越重要的作用, 是河南省森林碳汇的主要贡献者, 这主要归因于退耕还林工程的实施引起人工林碳储量的增加。2003, 2008和2013年退耕还林工程碳储量分别占森林总碳储量的1.58%, 15.40%和30.95%。河南省实施退耕还林工程具有较大的碳汇能力。图3表5参32

关键词: 森林生态学; 退耕还林; 人工林; 森林碳储量; 河南省

中图分类号: S718.5 **文献标志码:** A **文章编号:** 2095-0756(2019)03-0507-08

Forest aboveground carbon storage with the Grain for Green Program in Henan Province

WANG Yanfang^{1,2}, LIU Ling¹, YUE Feixue¹, LI Dong¹, SHANGGUAN Zhouping²

(1. College of Agriculture, Henan University of Science and Technology, Luoyang 471023, Henan, China; 2. State Key Laboratory of Soil Erosion and Dryland Farming on the Loess Plateau, Northwest A&F University, Yangling 712100, Shaanxi, China)

Abstract: The Grain for Green Program (GGP), an important ecological restoration project in China, has great carbon sequestration capacity. To estimate the carbon storage of Henan Province's forests, based on forest inventory data (1998-2003, 2003-2008, and 2008-2013) in Henan Province, as GGP was being implemented, carbon storage was estimated using the continuous biomass expansion factor (BEF) method. Meanwhile, the planted area for different tree species under the GGP in Henan Province from 2000-2012 was compiled using empirical growth equations to estimate the carbon stock in living tree biomass. Results showed that from 1998 to 2013 in Henan Province, increases were found for forest area from $149.77 \times 10^4 \text{ hm}^2$ to $305.36 \times 10^4 \text{ hm}^2$, volume $5\,258.50 \times 10^4 \text{ m}^3$ to $17\,094.56 \times 10^4 \text{ m}^3$, carbon storage 30.49 Tg to 91.02 Tg, and carbon density $20.36 \text{ Mg} \cdot \text{hm}^{-2}$ to $29.81 \text{ Mg} \cdot \text{hm}^{-2}$. Plantation areas, carbon storage, and carbon density greatly increased as the proportion of carbon storage in plantation increased from 29.26% in 1998 to 58.46% in 2013. For the percent of carbon storage from total forest carbon, GGP accounted for 1.58% in 2003, 15.40% in 2008, and 30.95% in 2013. Thus, plantation played an increasingly important role in forest carbon sequestration and were a major

收稿日期: 2018-05-15; 修回日期: 2018-10-17

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(31700367); “十三五”国家重点研发计划项目(2016YFC0501605); 河南科技大学博士科研启动基金资助项目(13480081)

作者简介: 王艳芳, 讲师, 博士, 从事森林植被碳汇研究。E-mail: wyfll1977@126.com。通信作者: 上官周平, 研究员, 从事植物恢复生态研究。E-mail: shangguan@ms.iswc.ac.cn

contributor to forest carbon sink in Henan Province which was mainly attributed to implementation of the GGP. [Ch, 3 fig. 5 tab. 32 ref.]

Key words: forest ecology; Grain for Green Program; plantation; forest carbon storage; Henan Province

土地利用方式的变化对全球碳循环以及耕地资源的数量和质量产生重要的影响^[1-2]。退耕还林工程作为中国一项重要的土地利用方式改变工程,国家高度重视,全民参与度高。该工程主要是在坡耕地和荒山荒地上植树造林,增加了植被覆盖率,进而控制水土流失^[3]。退耕还林工程主要包括退耕地造林、荒山荒地造林和封山育林3种植被恢复类型。截止2013年,全国实施退耕还林面积达 $2\,981.91\times 10^4$ hm^2 ,其中退耕地造林面积为 926.41×10^4 hm^2 ,荒山荒地造林面积为 $1\,745.50\times 10^4$ hm^2 ,封山育林面积为 310.00×10^4 hm^2 ^[4]。河南省退耕还林工程自2000年开始首先在洛阳、三门峡、济源3个地区进行试点,2002年全省全面启动退耕还林工程。工程范围涉及全省18个省辖市的137个县(市、区),覆盖了全省85%以上的县级单位和90%的国土面积。其中退耕地造林涉及106个县(市、区),129.1万退耕农户,488.9万农民^[5]。近年来,退耕还林工程的实施已带来显著的生态、经济和社会效益。土地利用方式的变化通过改变土壤碳和植被生物量对全球碳循环产生重要的影响^[2,6-8],通过植树造林来减少温室气体排放已经成为当前减缓全球气候变化的主要策略之一^[9-11]。一些学者针对中国人工林碳储量和分配格局进行了研究^[12-13],特别是一些学者在全国和地区尺度上针对退耕还林工程实施对地上植被碳汇和土壤碳汇的影响也进行了研究。蔡丽莎等^[14]研究了贵州省退耕还林工程的碳汇潜力。DENG等^[3]利用整合分析方法研究了全国退耕还林工程实施对土壤碳库的影响。刘博杰等^[15]研究了中国退耕还林工程净固碳量。SONG等^[16]研究了中国退耕还林土壤碳储量变化。CHEN等^[17]研究了云南省退耕还林工程碳汇能力。这些研究均表明退耕还林工程的实施具有较大的碳汇潜力。河南省作为中部退耕还林工程重点实施地区,实施退耕还林工程对森林植被碳储量的影响研究较薄弱。本研究对河南省实施退耕还林工程后森林碳储量的影响进行了研究,一方面为研究河南省退耕还林地上植被碳储量提供基础数据,另一方面为评估人工林的碳汇效益提供参考。

1 研究地区与方法

1.1 研究区概况

河南省($31^{\circ}23'\sim 36^{\circ}22'N$, $110^{\circ}21'\sim 116^{\circ}39'E$)位于中国中东部,黄河中下游、黄淮海大平原的西南部。河南省土地总面积为 16.70×10^4 km^2 ,约占全国土地总面积的1.74%。全省年平均气温约 $14.0\text{ }^{\circ}\text{C}$,具有由东向西递减、由北向南递增的趋势。全省年平均降水量为 $600.0\sim 1\,200.0$ mm,淮河以南降水达 $1\,000.0\sim 1\,200.0$ mm,黄河淮河之间为 $700.0\sim 900.0$ mm,豫北和豫西丘陵区为 $600.0\sim 700.0$ mm。

1.2 数据来源

1.2.1 河南省退耕还林工程主要造林树种和造林面积 河南省退耕还林工程主要包括退耕地造林、荒山荒地造林和封山育林3种植被恢复类型^[3],主要造林树种有杨树 *Populus*, 刺槐 *Robinia pseudoacacia*, 泡桐 *Paulownia*, 楸树 *Catalpa bungei*, 栎类 *Quercus* spp., 柏木 *Cupressus funebris*, 马尾松 *Pinus massoniana* 和杉木 *Cunninghamia lanceolata* 等生态树种; 柿树 *Diospyros kaki*, 枣树 *Ziziphus jujuba*, 核桃 *Juglans regia* 和板栗 *Castanea mollissima* 等干果类生态经济兼用树种; 苹果 *Malus pumila*, 梨 *Pyrus*, 杏 *Armeniaca vulgaris*, 桃 *Amygdalus persica* 等水果类经济树种。通过河南省林业厅历年安排退耕还林任务和复查结果,得到2000–2012年河南省退耕还林工程实施期不同树种逐年有效造林面积(表1),河南省不同地区的造林总面积和不同植被恢复类型下的造林面积。

1.2.2 河南省森林清查资料 本研究采用河南省6~8期(1998–2003年,2003–2008年,2008–2013年)森林清查资料数据,根据国家林业局的安排,河南省隔5 a进行1次森林资源复查,森林清查资料提供了主要森林类型不同林龄、林分起源、林种的面积和蓄积量信息。本研究主要采用不同林分起源(人工林和天然林)的面积和蓄积信息。

1.2.3 地理区域划分 根据地理因素和行政区划将河南省18个地区分为5个地理综合区:豫中(郑州、许昌、漯河),豫南(南阳、信阳、驻马店),豫东(开封、商丘、周口),豫西(平顶山、洛阳、三门峡),

表 1 河南省退耕还林工程不同树种/森林类型有效造林面积

Table 1 Effective planted area for each tree species/forest types under the GGP in Henan Province

树种/森林类型	2000-2012 年不同树种有效造林面积/hm ²												
	2000	2001	2002	2003	2004	2005	2006	2007	2008	2009	2010	2011	2012
杨树	13 160.7	13 352.9	68 803.6	114 281.5	75 699.1	72 351.2	17 320.2	23 866.5	24 755.8	15 139.8	15 572.4	6 338.0	6 770.9
刺槐	2 207.4	2 239.7	11 540.3	19 168.2	12 696.9	12 135.3	2 905.1	4 003.1	4 152.2	2 539.4	2 611.9	1 063.1	1 135.7
泡桐	447.1	453.6	2 337.3	3 882.2	2 571.5	2 457.8	588.4	810.8	841.0	514.3	529.0	215.3	230.0
楸树	27.9	28.4	146.1	242.6	160.7	153.6	36.8	50.7	52.6	32.1	33.061	13.5	14.4
阔叶混	3 012.2	3 056.1	15 747.4	26 156.1	17 325.6	16 559.4	3 964.2	5 462.4	5 666.0	3 465.1	3 564.1	1 450.6	1 549.7
干果类经济树种	3 856.0	3 912.3	20 159.0	33 483.8	22 179.4	21 198.4	5 074.7	6 992.7	7 253.3	4 435.9	4 562.6	1 857.0	1 983.8
水果类经济树种	1 285.3	1 304.1	6 719.7	11 161.3	7 393.1	7 066.2	1 691.6	2 330.9	2 417.8	1 478.6	1 520.9	619.0	661.3
硬阔混	1 793.9	1 820.1	9 378.3	15 577.2	10 318.2	9 861.9	2 360.9	3 253.2	3 374.4	2 063.6	2 122.6	863.9	922.9
马尾松	1 002.6	1 017.2	5 241.3	8 705.8	5 766.6	5 511.6	1 319.4	1 818.1	1 885.9	1 153.3	1 186.3	482.8	515.8
杉木	610.3	619.2	3 190.4	5 299.2	3 510.1	3 354.9	803.1	1 106.7	1 147.9	702.0	722.1	293.9	314.0
其他针叶树种	566.7	574.9	2 962.5	4 920.7	3 259.4	3 115.3	745.8	1 027.6	1 065.9	651.9	670.5	272.9	291.5
合计	27 970.1	28 378.4	146 225.8	242 878.5	160 880.7	153 765.5	36 810.1	50 722.7	52 612.6	32 176.1	33 095.5	13 470.0	14 390.0

豫北(安阳、鹤壁、新乡、焦作、濮阳、济源)。

1.3 研究方法

1.3.1 林木碳储量的估算 利用生物量转换因子连续函数法^[7]计算林木生物量： $B=aV+b$ 。其中： B 为某树种(组)的单位面积生物量($\text{Mg}\cdot\text{hm}^{-2}$)； V 为某一树种(组)的单位面积蓄积量($\text{m}^3\cdot\text{hm}^{-2}$)； a 和 b 为将不同树种(组)的蓄积量转换为生物量的参数。河南省林木资源主要包括 12 种优势树种，其中落叶松 *Larix gmelinii*，杉木，杨树和泡桐这 4 种树木在河南省已有学者进行了研究^[18-21]，所以，采用文献已有的参数对这 4 类树种进行生物量的研究。FANG 等^[7]构建了中国 21 种树木蓄积量转换生物量的参数，其中有 5 类树种：栎类，侧柏 *Platycladus orientalis*，油松 *Pinus tabulaeformis*，马尾松和硬阔类的转换参数应用于河南省较合适，另外 3 类树木针叶混、阔叶混和针阔混的转换参数可以采用曾伟生^[22]的研究结果，其转换参数适合在河南省应用。林木碳储量通过林木生物量乘以其含碳系数(C_F)获得，不同树种的含碳系数来自文献^[23]。表 2 为本研究采用的蓄积量与生物量的转换参数及不同树种的含碳系数。

1.3.2 退耕还林所种树木碳储量的估算 依据“人工林生长曲线法”估算退耕还林工程林木生物质碳储量的变化，林木生物质碳储量的计算通常是通过树木的生物量乘以含碳系数(C_F)获得，估算树木生物质

碳储量公式为： $C_{Bj} = \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^m (A_{ijk} \times B_{ijk} \times C_{Fj})$ 。其中： C_{Bj} 代表第 i 目标年林木生物质碳储量(Mg)； i 代表研究目标年； j 代表造林树种； n 和 m 分别代表目标年和造林树种的数量； A_{ijk} 代表 j 树种在第 k 年的造林面积(hm^2)； C_{Fj} 表示 j 树种的含碳系数； B_{ijk} 表示第 k 年造林的 j 树种到第 i 目标年时的生物量($\text{Mg}\cdot\text{hm}^{-2}$)。

人工林生物量生长方程采用 XU 等^[24]利用 Logistic 生长方程拟合的各森林类型生物量密度与林龄的关系(表 3)。河南省退耕还林工程中栽植一定面积的经济树木，大多属于阔叶类树种。因此，经济树种的蓄积量采用阔叶类树种生物量生长方程进行估算。本研究中，假设造林当年的林龄为 1 a。

2 结果与分析

2.1 河南省不同地区退耕还林生态工程实施动态

河南省退耕还林工程自 2000 年实施以来，不同地区造林面积差异较大。西南部地区的洛阳、三门峡、南阳和信阳地区造林面积最大，造林面积在 $60.01 \times 10^3 \sim 180.00 \times 10^3 \text{ hm}^2$ ，中东部地区造林面积较小，其中商丘和漯河造林面积最小，造林面积在 $9.00 \times 10^3 \sim 18.00 \times 10^3 \text{ hm}^2$ (图 1)。

表2 不同树种生物量转换参数和含碳系数

Table 2 Parameters used to calculate biomass of forest stands and carbon fraction for different dominant tree species

优势树种	<i>a</i>	<i>b</i>	<i>N</i>	<i>R</i> ²	参考文献	含碳系数	优势树种	<i>a</i>	<i>b</i>	<i>N</i>	<i>R</i> ²	参考文献	含碳系数
栎类	1.145 3	8.547 3	12	0.98	[7]	0.500 4	泡桐	0.895 6	0.004 8	22	0.99	[21]	0.469 5
硬阔	0.756 4	8.310 3	11	0.98	[7]	0.483 4	杉木	0.537 1	11.985 8	29	1.00	[22]	0.520 1
侧柏	0.612 9	46.145 1	11	0.98	[7]	0.503 4	落叶松	0.544 2	16.123 5	35	1.00	[23]	0.521 1
油松	0.755 4	5.092 8	82	0.98	[7]	0.520 7	针叶混	0.589 4	24.515 1			[24]	0.510 1
马尾松	0.510 1	1.045 1	12	0.92	[7]	0.459 6	阔叶混	0.836 2	9.415 7			[24]	0.490 0
杨树	0.981 0	0.004 0	10	0.99	[20]	0.495 6	针阔混	0.714 3	16.965 4			[24]	0.497 8

说明：*a*和*b*为不同树种的蓄积量转换为生物量的参数；*N*为样本数量；*R*²为生物量生长方程的拟合优度系数

表3 人工林生物量生长方程

Table 3 Empirical growth equations of plantations biomass

树种/森林类型	方程	<i>R</i> ²	树种/森林类型	方程	<i>R</i> ²
柏木	$B=155.72/(1+10.568 1e^{-0.044 3t})$	0.912	杨树	$B=70.76/(1+1.492 0e^{-0.143 4t})$	0.934
落叶松	$B=130.20/(1+2.659 4e^{-0.069 6t})$	0.981	泡桐	$B=110.42/(1+4.094 6e^{-0.050 5t})$	0.876
油松	$B=87.98/(1+12.236 0e^{-0.114 4t})$	0.977	软阔类	$B=132.24/(1+5.275 5e^{-0.130 2t})$	0.956
马尾松	$B=81.67/(1+2.173 5e^{-0.052 2t})$	0.996	针叶混	$B=158.94/(1+20.804 2e^{-0.101 7t})$	0.949
杉木	$B=69.61/(1+2.436 9e^{-0.096 3t})$	0.963	针阔混	$B=290.96/(1+8.577 4e^{-0.056 0t})$	0.993
栎类	$B=197.09/(1+8.490 7e^{-0.042 2t})$	0.992	阔叶混	$B=237.57/(1+12.272 1e^{-0.167 7t})$	0.980
硬阔类	$B=160.99/(1+10.313 0e^{-0.049 2t})$	0.990			

说明：*B*为生物量密度(Mg·hm⁻²)，*t*为林龄(a)

由图2可知：2000–2012年，河南省5个地区中豫东没有安排封山育林任务，且造林面积在5个地区中是最少的，仅占全省造林面积的6.27%，其中退耕地造林为10.40×10³ hm²，荒山造林为57.21×10³ hm²。豫南地区造林面积最大，占全省造林面积的30.96%，其中退耕地造林为87.99×10³ hm²，荒山造林为234.21×10³ hm²，封山育林为53.83×10³ hm²。另外，豫西地区退耕地造林为87.45×10³ hm²，荒山造林为198.30×10³ hm²，封山育林为48.35×10³ hm²；豫北地区退耕地造林为44.55×10³ hm²，荒山造林为161.66×10³ hm²，封山育林为20.40×10³ hm²；豫中地区退耕地造林为20.74×10³ hm²，荒山造林为48.35×10³ hm²，封山育林为5.71×10³ hm²。2000–2012年河南省退耕还林工程共完成造林面积为1 079.15×10³ hm²，其中退耕地造林为251.13×10³ hm²，荒山造林为699.72×10³ hm²，封山育林为128.30×10³ hm²。

2.2 实施退耕还林后森林碳储量

2.2.1 退耕还林后不同时期森林碳储量和碳密度 由表4可知：实施退耕还林后，1998–2013年河南省森林面积、蓄积、碳储量和碳密度均呈增加趋势，其中森林面积从1998年149.77×10⁴ hm²增加到2013年的305.36×10⁴ hm²，增加了103.89%；森林蓄积由1998年5 258.50×10⁴ m³提高到2013年的17 094.56 10⁴ m³，提高比例为225.10%；碳储量由1998年30.49 Tg提高到2013年的91.02 Tg，提高比例为198.52%；碳密度由1998年20.36 Mg·hm⁻²提高到2013年的29.81 Mg·hm⁻²，提高比例为46.41%。特别

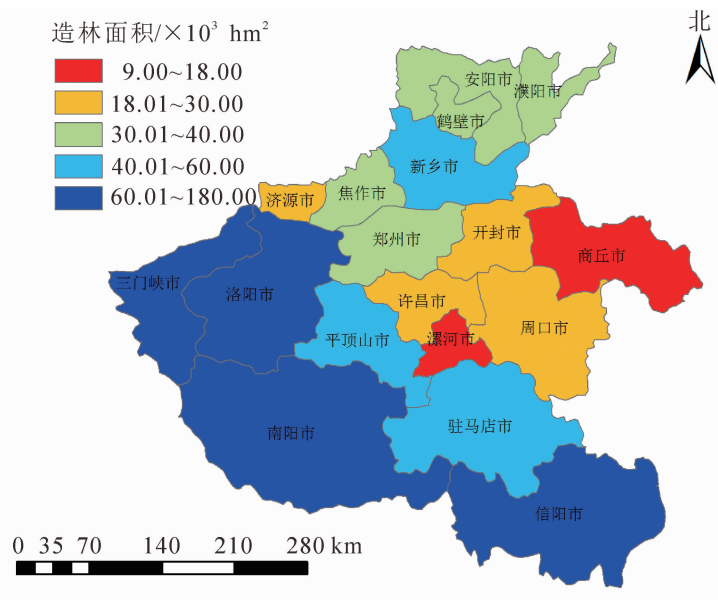


图1 河南省退耕还林工程各地区造林面积示意图

Figure 1 Afforestation area in different regions of Grain for Green Program (GGP) in Henan Province

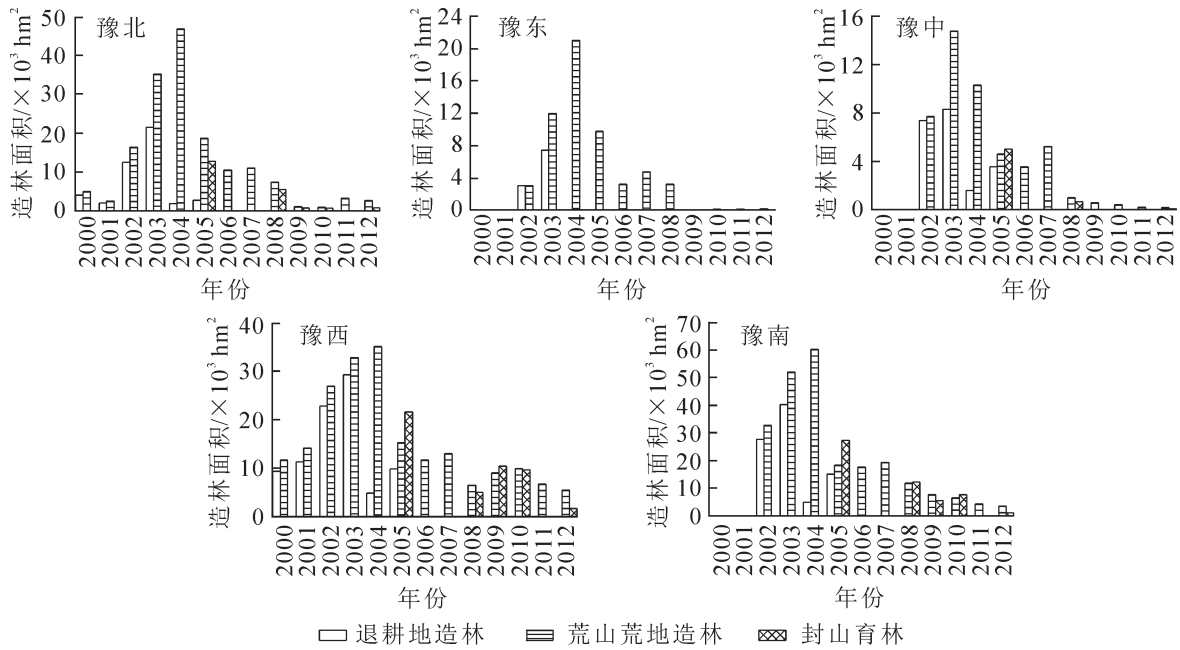


图 2 河南省 5 个地区不同退耕还林方式造林面积

Figure 2 Area of different afforestation types under Grain for Green Program (GGP) in five regions of Henan Province

是 2008–2013 年森林碳密度提高较多，提高了 22.12%，主要是由于退耕还林工程所种植的主要树种杨树等软阔类树木达到中龄林阶段，中龄林较幼龄林具有较高的碳密度。2003，2008 和 2013 年退耕还林造林面积分别占森林总面积的 22.53%，31.77%和 32.53%；退耕还林工程碳储量占森林总碳储量的 1.58%，15.40%和 30.95%。造林面积和碳储量均呈增加趋势，碳储量增加幅度要高于造林面积，因为随着树龄的增加林木碳汇能力逐渐增强。

表 4 河南省退耕还林实施期间森林面积、蓄积及碳储量

Table 4 Area, volume, carbon storage and density of forest stand during implementing GGP in Henan Province

年份	总面积/ ×10 ⁴ hm ²	退耕还林面 积/×10 ⁴ hm ²	总蓄积/ ×10 ⁴ m ³	总碳储 量/Tg	退耕还林 碳储量/Tg	森林碳密度/ (Mg·hm ⁻²)
1998	149.77	0	5 258.50	30.49	0	20.36
2003	197.72	44.54	8 404.64	46.28	0.73	23.41
2008	283.36	90.02	12 936.12	69.16	10.65	24.41
2013	305.36	99.34	17 094.56	91.02	28.17	29.81

2.2.2 退耕还林后不同林分起源碳储量和碳密度 根据林分起源的不同，将森林分为天然林和人工林。由表 5 可知：1998–2013 年，天然林和人工林的面积、蓄积、碳储量和碳密度均有不同程度增加，尤其是人工林增加显著，人工林面积由 1998 年的 53.85×10⁴ hm² 增加到 2013 年的 173.89×10⁴ hm²，增加了 222.92%。在此期间河南省退耕还林工程造林 107.92×10⁴ hm²，对人工林面积的增加起主要作用。人工林蓄积增加了 533.47%，碳储量增加了 496.52%，人工林碳密度由 1998 年的 16.56 Mg·hm⁻² 增加到 2013 年的 30.60 Mg·hm⁻²，增幅较大。随着时间的推移，人工林在河南省森林碳汇中将会发挥越来越显著的作用。人工林占林分总碳储量的比例由 1998 年的 29.26% 提高到 2013 年的 58.46%。人工林在河南省森林碳汇中起着重要的作用，是河南省森林碳汇的主要贡献者，这主要归因于退耕还林工程的实施，大面积人工造林引起碳储量的增加。截止 2013 年，退耕还林工程造林面积占人工林面积的 57.13%，碳储量

表 5 1998–2013 年不同林分起源森林面积、蓄积及碳储量

Table 5 Area, volume, carbon storage and density under different forest origins from 1998 to 2013 in Henan Province

年份	森林类 型	面积/× 10 ⁴ hm ²	蓄积/×10 ⁴ m ³	碳储 量/Tg	比例/%	碳密度/ (Mg·hm ⁻²)	年份	森林类 型	面积/× 10 ⁴ hm ²	蓄积/×10 ⁴ m ³	碳储 量/Tg	比例/%	碳密度/ (Mg·hm ⁻²)
1998	天然林	95.92	3 606.32	21.57	70.74	22.49	2008	天然林	118.72	5 456.00	31.27	45.21	26.34
	人工林	53.85	1 652.18	8.92	29.26	16.56		人工林	160.70	7 480.12	37.89	54.79	23.56
2003	天然林	107.25	4 367.27	26.29	56.81	24.51	2013	天然林	131.47	6 628.80	37.81	41.54	28.76
	人工林	90.47	4 037.37	19.99	43.19	22.10		人工林	173.89	10 465.76	53.21	58.46	30.60

占人工林碳储量的 52.94%。

2.2.3 退耕还林后不同时期、不同林分起源森林年碳汇量 由图 3 可知：1998–2013 年，河南省森林年碳汇量为 $0.63 \text{ Mg}\cdot\text{hm}^{-2}\cdot\text{a}^{-1}$ ，其中 1998–2003，2003–2008 和 2008–2013 年碳汇量分别为 0.61，0.20 和 $1.08 \text{ Mg}\cdot\text{hm}^{-2}\cdot\text{a}^{-1}$ 。1998–2013 年，天然林和人工林的年碳汇量分别为 0.42 和 $0.94 \text{ Mg}\cdot\text{hm}^{-2}\cdot\text{a}^{-1}$ ，其中 1998–2003，2003–2008 和 2008–2013 年天然林的年碳汇量分别为 0.41，0.37 和 $0.48 \text{ Mg}\cdot\text{hm}^{-2}\cdot\text{a}^{-1}$ ，而人工林的年碳汇量分别为 1.11，0.27 和 $1.41 \text{ Mg}\cdot\text{hm}^{-2}\cdot\text{a}^{-1}$ 。2003–2008 年人工林和天然林年碳汇量均低于 1998–2003 和 2008–2013 年。人工林年碳汇量显著高于天然林年碳汇量，主要是由于退耕还林工程的大面积实施以及树木的生长引起人工林碳汇能力的快速增长。

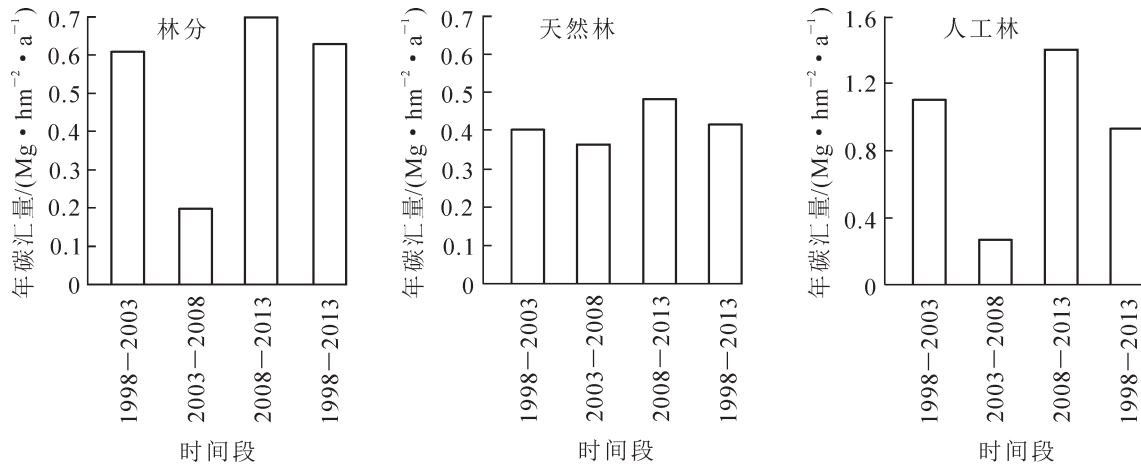


图 3 河南省不同时期森林年碳汇

Figure 3 Carbon accumulation rate of the forests in different periods in Henan Province

3 结论与讨论

1998–2013 年河南省退耕还林工程实施期，森林面积和碳储量逐渐增加，特别是人工林面积和碳储量增加幅度较天然林要大很多。主要是由于在此期间河南省实施了退耕还林工程，人工林面积增加较多，从而引起碳储量增加。2013 年森林碳储量和碳密度较 1998 年分别提高 193.01% 和 22.15%。研究进一步证实了实施造林工程是提高森林碳储量的根本途径^[25–27]。

经过 1998–2013 年 15 a 的森林恢复，森林碳储量持续升高。1998–2013 年，林分年碳汇量为 $0.63 \text{ Mg}\cdot\text{hm}^{-2}\cdot\text{a}^{-1}$ ，其中人工林年碳汇量是天然林年碳汇量的 2.24 倍，人工林碳汇能力要高于天然林，主要是由于退耕还林工程的大面积实施以及对造林地加强了抚育和管理。1998–2003 年，2008–2013 年人工林年碳汇量均高于天然林，只有 2003–2008 年人工林年碳汇量低于天然林，主要是由于在此阶段退耕还林工程造林面积较大，共造林 $758.00 \times 10^3 \text{ hm}^2$ (图 2)，所造林木处于幼龄林阶段，碳汇能力较成熟林而言较弱。随着人工林生长为碳汇能力较强的成熟林河南省森林将具有较大的碳汇潜力。

ZHANG 等^[26]研究表明：2013 年全国森林碳储量和碳密度分别为 6896.3 Tg 和 $41.0 \text{ Mg}\cdot\text{hm}^{-2}$ 。可见，河南省 2013 年森林碳储量占全国 2013 年森林碳储量的 1.32%，河南省森林碳密度低于全国森林植被碳密度，表明河南省森林质量低于全国森林质量平均水平，需要加强抚育和管理，提高森林质量和碳汇能力。李世东等^[28]研究得出：河南省森林碳储量和碳密度分别为 87.96 Tg 和 $31.04 \text{ Mg}\cdot\text{hm}^{-2}$ ，碳密度高于本研究结果，主要是由于运用不同的估算方法计算森林碳储量。河南省 2013 年森林碳储量为 91.02 Tg ，相当于河南省 2010 年碳释放量的 65.86%^[29]，相当于中国年碳释放量 (10000 Tg) 的 0.91%^[30]。森林植被在碳汇和减缓全球变化方面发挥着重要的作用^[31]。

人工林在河南省森林碳汇中发挥越来越重要的作用，其碳储量和碳密度在 2013 年分别为 53.21 Tg 和 $30.60 \text{ Mg}\cdot\text{hm}^{-2}$ 。ZHANG 等^[26]研究的 2013 年全国人工林碳储量和碳密度分别为 1400.0 Tg 和 $29.7 \text{ Mg}\cdot\text{hm}^{-2}$ ，河南省人工林碳储量占全国的 3.80%，河南省人工林碳密度略高于全国人工林碳密度，表明河南省人工林质量较高。主要是由于造林后政府、林业部门和农户加强对林木的抚育和管理，林木生长

状况良好, 具有较强的碳汇能力。

运用生物量转换因子连续函数法计算林分生物量将会产生一定误差。误差主要来源于蓄积量转换为生物量的公式中一些相关参数(a , b)。本研究采用的一些参数在河南省进行过研究, 但多数是采用全国的或相似地区的参数进行估算, 存在一定的误差。REN 等^[32]分析了估算广东省森林植被碳储量的误差, 认为误差主要来源于蓄积量转换为生物量公式中所使用的参数, 在 1992, 1997 和 2002 年森林清查时所产生的误差分别占 97.26%, 96.96%和 95.75%。为了提高蓄积量转换为生物量公式参数使用的可靠性, 需要针对河南省地区不同树种开展研究, 采用适合当地条件的生物量转换参数。

4 参考文献

- [1] 贺金红. 黄土高原地区退耕还林(草)与粮食安全研究[D]. 杨凌: 西北农林科技大学, 2006.
HE Jinhong. *Study of Grain for Green and Grain Safety on Loess Plateau* [D]. Yangling: Northwest A&F University, 2006.
- [2] LI Dejun, NIU Shuli, LUO Yiqi. Global patterns of the dynamics of soil carbon and nitrogen stocks following afforestation: a meta analysis [J]. *New Phytol*, 2012, **195**(1): 172 – 181.
- [3] DENG Lei, LIU Guobin, SHANGGUAN Zhouping. Land-use conversion and changing soil carbon stocks in China's 'Grain-for-Green' Program: a synthesis [J]. *Globe Change Biol*, 2014, **20**(11): 3544 – 3556.
- [4] 国家林业局. 退耕还林工程生态效益监测国家报告(2013)[M]. 北京: 中国林业出版社, 2013.
- [5] WANG Yanfang, LIU Ling, SHANGGUAN Zhouping. Carbon storage and carbon sequestration potential under the Grain for Green Program in Henan Province, China [J]. *Ecol Eng*, 2017, **100**: 147 – 156.
- [6] RICHTER D D, MARKEWITZ D, TRUMBORE S E, *et al.* Rapid accumulation and turnover of soil carbon in a re-establishing forest [J]. *Nature*, 1999, **400**(6739): 56 – 58.
- [7] FANG Jingyun, CHEN Anping, PENG Changhui, *et al.* Changes in forest biomass carbon storage in China between 1949 and 1998 [J]. *Science*, 2001, **292**(5525): 2320 – 2322.
- [8] LAL R. Soil carbon sequestration in China through agricultural intensification and restoration of degraded and desertified ecosystems [J]. *Land Degradation Dev*, 2002, **13**: 469 – 478.
- [9] CANADELL J G, RAUPACH M P. Managing forests for climate change mitigation [J]. *Science*, 2008, **320**(5882): 1456 – 1457.
- [10] MILES L, KAPOS V. Reducing greenhouse gas emissions from deforestation and forest degradation: global land-use implications [J]. *Science*, 2008, **320**(5882): 1454 – 1455.
- [11] WANG Kaibo, DENG Lei, REN Zongping, *et al.* Dynamics of ecosystem carbon stocks during vegetation restoration on the Loess Plateau of China [J]. *J Arid Land*, 2016, **8**(2): 207 – 220.
- [12] 程然然, 关晋宏, 张建国, 等. 甘肃省 5 种典型人工林生态系统固碳现状与潜力[J]. *应用生态学报*, 2017, **28**(4): 1112 – 1120.
CHENG Ranran, GUAN Jinhong, ZHANG Jianguo, *et al.* Carbon storage and sequestration potential of five typical plantation ecosystems in Gansu Province, China [J]. *Chin J Appl Ecol*, 2017, **28**(4): 1112 – 1120.
- [13] 兰斯安, 杜虎, 曾馥平, 等. 不同林龄杉木人工林碳储量及其分配格局[J]. *应用生态学报*, 2016, **27**(4): 1125 – 1134.
LAN Sian, DU Hu, ZENG Fuping, *et al.* Carbon storage and allocation in *Cunninghamia lanceolata* plantations with different stand ages [J]. *Chin J Appl Ecol*, 2017, **27**(4): 1125 – 1134.
- [14] 蔡丽莎, 陈先刚, 郭颖, 等. 贵州省退耕还林工程碳汇潜力[J]. *浙江林学院学报*, 2009, **26**(5): 722 – 728.
CAI Lisha, CHEN Xiangang, GUO Yin, *et al.* Carbon sequestration potential with the Grain for Green Program in Guizhou Province [J]. *J Zhejiang For Coll*, 2009, **26**(5): 722 – 728.
- [15] 刘博杰, 张路, 逯非, 等. 中国退耕还林工程温室气体排放与净固碳量[J]. *应用生态学报*, 2016, **27**(6): 1693 – 1707.
LIU Bojie, ZHANG Lu, LU Fei, *et al.* Greenhouse gas emissions and net carbon sequestration of "Grain for Green" Program in China [J]. *Chin J Appl Ecol*, 2016, **27**(6): 1693 – 1707.
- [16] SONG Xinzhang, PENG Changhui, ZHOU Guomo, *et al.* Chinese Grain for Green Program led to highly increased soil

- organic carbon levels: a meta-analysis [J]. *Sci Rep*, 2014, **4**(3): 4460.
- [17] CHEN Xiangang, ZHANG Xiaoquan, ZHANG Yiping, *et al.* Carbon sequestration potential of the stands under the Grain for Green Program in Yunnan Province, China [J]. *For Ecol Manage*, 2009, **258**(3): 199 – 206.
- [18] 赵体顺. 林农复合生态系统物质循环的研究(I). 农田林网杨树生物量的研究[J]. 农村生态环境, 1989(2): 1 – 5.
- ZHAO Tishun. Study on the nutrient cycling of a compound ecosystem of agro forestry (I). study on the biomass of polar in the farmland shelterbelt forest [J]. *Rural Ecol Environ*, 1989(2): 1 – 5.
- [19] 冯宗伟, 王效科, 吴刚. 农林业系统结果与功能[M]. 北京: 中国科学技术出版社, 1992.
- [20] 王其吉. 河南杉木[M]. 郑州: 黄河水利出版社, 1999.
- [21] 赵体顺, 光增云, 赵义民, 等. 日本落叶松人工林生物量及生产力的研究[J]. 河南农业大学学报, 1999, **33**(4): 350 – 353.
- ZHAO Tishun, GUANG Zengyun, ZHAO Yimin, *et al.* Study on biomass and productivity of *Larix kaempferi* plantation [J]. *J Henan Agric Univ*, 1999, **33**(4): 350 – 353.
- [22] 曾伟生. 云南省森林生物量与生产力研究[J]. 中南林业调查规划, 2005, **24**(4): 1 – 3, 13.
- ZENG Weisheng. Research on forest biomass and productivity in Yunnan [J]. *Cent South For Inventory Plann*, 2005, **24**(4): 1 – 3, 13.
- [23] 李海奎, 雷渊才. 中国森林植被生物量和碳储量评估[M]. 北京: 中国林业出版社, 2010.
- [24] XU Bing, GUO Zaodi, PIAO Shilong, *et al.* Biomass carbon stocks in China's forests between 2000 and 2050: a prediction based on forest biomass-age relationships [J]. *Sci China Life Sci*, 2010, **53**(7): 776 – 783.
- [25] LIU Dan, CHEN Yang, CAI Wenwen, *et al.* The contribution of China's Grain to Green Program to carbon sequestration [J]. *Landscape Ecol*, 2014, **29**(10): 1675 – 1688.
- [26] ZHANG Chunhua, JU Weimin, CHEN Jing, *et al.* Disturbance-induced reduction of biomass carbon sinks of China's forests in recent years [J]. *Environ Res Lett*, 2015, **10**(11): 114021.
- [27] 张春华, 居为民, 王登杰, 等. 2004–2013年山东省森林碳储量及其碳汇经济价值[J]. 生态学报, 2018, **38**(5): 1 – 10.
- ZHANG Chunhua, JU Weimin, WANG Dengjie, *et al.* Biomass carbon stocks and economic value dynamics of forests in Shandong Province from 2004 to 2013 [J]. *Acta Ecol Sin*, 2018, **38**(5): 1 – 10.
- [28] 李世东, 胡淑萍, 唐小明. 中国生态状况报告 2012 森林植被碳储量动态变化研究[M]. 北京: 科学出版社, 2012.
- [29] 李炎丽, 梁浩, 梁保松. 河南省碳排放因素分解及关联分析[J]. 河南农业大学学报, 2011, **45**(5): 605 – 610.
- LI Yanli, LIANG Hao, LIANG Baosong. Factor decomposition and correlation analysis on the carbon emissions in Henan Province [J]. *J Henan Agric Univ*, 2011, **45**(5): 605 – 610.
- [30] FRIEDLINGSTEIN P, ANDREW R M, ROGELJ J, *et al.* Persistent growth of CO₂ emissions and implications for reaching climate targets [J]. *Nat Geosci*, 2014, **7**(10): 709 – 715.
- [31] 李士美, 杨传强, 王宏年, 等. 基于森林资源清查资料分析山东省森林立木碳储量[J]. 应用生态学报, 2014, **25**(8): 2215 – 2220.
- LI Shimei, YANG Chuanqiang, WANG Hongnian, *et al.* Carbon storage of forest stands in Shandong Province estimated by forestry inventory data [J]. *Chin J Appl Ecol*, 2014, **25**(8): 2215 – 2220.
- [32] REN Hai, CHEN Hua, LI Linjun, *et al.* Spatial and temporal patterns of carbon storage from 1992 to 2002 in forest ecosystems in Guangdong, Southern China [J]. *Plant Soil*, 2013, **363**(1/2): 123 – 138.