

中国退耕还林工程固碳现状及固碳潜力估算

吴普侠¹, 汪晓珍², 吴建召², 张晓梅³, 蔺雨阳⁴, 王凯博⁵

(1.陕西省林业科学院黄土高原水土保持与生态修复国家林草局重点实验室,西安 710082;
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;
3.陕西省林木种苗与退耕还林工程管理中心,西安 710082;4.攀枝花市农林科学研究院,
四川 攀枝花 617061;5.中国科学院地球环境研究所,西安 710061)

摘要: 为了科学评估中国退耕还林工程的固碳能力,收集整理了退耕还林一期工程(1999—2010 年)详细的造林资料,结合中国主要树种的蓄积量(生物量)生长曲线和退耕还林前后土壤有机碳变化特征及各种种碳储量计算的相关参数,估算退耕还林工程 1999—2050 年的固碳量及其变化。结果表明:截至 2010 年,退耕还林工程造林总固碳量(土壤和植被)为 355.87 Tg;工程实施期间,造林后期固碳量显著大于造林前期,平均每年固碳量为 29.66 Tg;工程林固碳增汇潜力不断增加,预计到 2050 年中国退耕还林工程的固碳增汇潜力为 1 234.04 Tg。因此,中国的退耕还林工程产生了巨大的碳汇效益。

关键词: 退耕还林; 固碳量; 固碳潜力; 固碳速率

中图分类号: S718.5 **文献标识码:** A **文章编号:** 1009-2242(2022)04-0342-08

DOI: 10.13870/j.cnki.stbcxb.2022.04.042

Estimation of Carbon Stock and Carbon Sequestration Potential for China's Grain for Green Project

WU Puxia¹, WANG Xiaozhen², WU Jianzhao², ZHANG Xiaomei³, LIN Yuyang⁴, WANG Kaibo⁵

(1.Key Laboratory of State Forestry Administration on Soil and Water Conservation and Ecological Restoration of Loess Plateau, Shaanxi Academy of Forestry, Xi'an 710082; 2.State Key Laboratory of Soil Erosion and Dryland Farming on the Loess Plateau, Northwest A&F University, Yangling, Shaanxi 712100; 3.Shaanxi Forest Seedling and Farmland for Forest Project Management Center, Xi'an 710082; 4.Panzhihua Academy of A&F Science, Panzhihua, Sichuan 617061; 5.Institute of Earth Environment, Chinese Academy of Sciences, Xi'an 710061)

Abstract: In order to scientifically evaluate the carbon sequestration capacity of the Grain for Green Project in China, the detailed afforestation data of the first phase of Grain for Green Project were collected. Combined with the growth curve of plantation volume (biomass) of Chinese tree species, the characteristics of soil organic carbon change before and after Grain for Green Project and the relevant parameters of carbon storage calculation of the main tree species, the carbon sequestration capacity and its changes of the Grain for Green Project from 1999 to 2050 were estimated. The results showed that the project's total carbon storage was 355.87 Tg when the project completed in 2010. When the project was implementing, the total carbon sequestration (trees and soil) of the former period was larger than that of the latter period, and the mean annual carbon sequestration was 29.66 Tg. The potential increment of carbon sink for the project increased. It is expected the potential increment of carbon sink of China's project are 1 234.04 Tg in 2050. Therefore, China's Grain for Green Project has produced huge carbon sink benefits.

Keywords: Grain for Green; carbon storage; carbon sequestration potential; carbon sequestration rate

根据 IPCC 预测,到 2050 年,大气 CO₂ 浓度将比 100 年前增加近 1 倍,使全球气温升高 3~4 ℃,导致 极地冻冰层融化,海平面上升,造成沿海陆地淹没等灾难性后果^[1-2]。植树造林被认为是增加陆地生态系

收稿日期:2021-11-23
资助项目:国家自然科学基金项目(42177339);陕西省重点研发计划项目(2021ZDLSF05-02)
第一作者:吴普侠(1972—),女,硕士,高级工程师,主要从事生态修复与林业产业发展研究。E-mail: wupuxia139@163.com
通信作者:王凯博(1982—),男,博士,副研究员,主要从事植被恢复与碳循环研究。E-mail: wangkb@ieecas.cn

统碳汇、减缓全球温室气体效应的重要手段^[3]。森林生态系统的碳汇能力评估是近几十年来学界研究的热点领域^[4-5],关于中国森林生态系统固碳现状与潜力已有不同学者^[6-8]做过估算。但是,已有工作大多把植被和土壤分开,森林作为一个完整的生态系统,植被和土壤关系密切,植被的改变必然引起土壤属性发生相应的改变^[9]。所以,对森林生态系统碳汇的研究需要综合考虑植被和土壤两方面的贡献。

为了治理水土流失和改善生态环境,新中国成立以来,各级政府组织开展了不同规模的人工造林活动。尤其是 1999 年开始实施的退耕还林工程,涉及全国 25 个省的 1 897 个县,计划完成退耕地造林 1 467 万 hm²,宜林荒山荒地造林 1 733 万 hm²,不仅有效控制水土流失,提高我国森林覆盖率,对促进我国陆地生态系统植被和土壤固碳能力的提升也起到积极作用^[10]。退耕还林工程是我国目前实施范围最广、造林面积最大的生态建设活动,其碳汇潜力不容忽视^[11-12]。目前关于中国退耕还林工程碳汇功能的研究,多集中在典型区域,仅考虑植被或土壤固碳功能^[13],如 Zhang 等^[14]对中国退耕还林后土壤有机碳的固碳速率进行研究;Chang 等^[15]对黄土高原实施退耕还林后的土壤有机碳的固碳潜力进行研究。然而,对国家尺度上退耕还林工程固碳潜力的研究^[16]还不多,也缺少对我国不同区域退耕还林工程固碳现状、固碳速率等的估算。因此,本研究对中国退耕还林一期(1999—2010 年)工程林的植被碳储量和土壤碳储量进行估算,并基于树木生长方程评估该工程到 2050 年的固碳潜力,为准确评估退耕还林工程碳汇效益提供科学依据。

1 材料与方法

1.1 中国各地区退耕还林工程的总面积与各树种造林面积的统计

本研究有关 1998—2008 年中国退耕还林工程(包括京津风沙源退耕还林)的数据采集于《中国林业统计年鉴》(2000—2008),2009—2010 年的数据采集于 2010—2011 年《林业发展公报》,包括退耕地造林面积和荒山造林面积 2 部分。本研究将我国造林分为东北、华北、华东、中南、西南、西北六大区域,退耕还林工程中各树种造林面积由各地区的退耕还林工程总面积乘以各树种造林面积的比例估算获得。各林分类型造林分配比例的数据采集于各地区有关退耕还林工程的调查报告、政府的林业发展公告以及已发表的相关文献资料等。

1.2 碳储量的计算

本研究将退耕还林工程林碳库分为植被和土壤

两部分。考虑到退耕还林工程林生长时间不长,其枯死木和凋落物在植被碳库中占比较小,本文计算植被碳库时忽略了这部分碳储量。此外,由于退耕还林工程实施地多为荒山、坡耕地等土壤、水分相对较差的地方,造林成活率不能达到 100%,引入造林成活率修正因子。据国家林业局调查^[17]发现,造林成活率只有 90.2%,本研究退耕还林工程的有效造林面积为在造林面积的基础上乘以修正因子 0.902。

1.2.1 植被碳储量的计算 根据树木生长曲线估算人工林植被碳储量的变化。其中,方程(1)适合于乔木林,方程(2)适合于灌木林。

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

$$\text{或 } C_{Bi} = \sum_j \sum_k S_{jk} B_{ijk} CF_j \quad (2)$$

式中: C_{Bi} 为第 i 目标年植被的碳储量(Mg); S_{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/hm²); B_{ijk} 为第 k 年造林的 j 树种到第 i 目标年时的林分生物量(Mg/hm²); D_j 为 j 树种的木材密度(Mg/m³); BEF_j 为 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 为 j 树种的碳含量。

采用表 1 中收集整理的林木生物量异速生长方程估计各树种的林分蓄积量(V),结合表 2 中不同树种的木材密度(D)、生物量扩展因子(BEF)和碳含量(CF)等参数计算林分生物量碳。此外,本研究中灌木林生物量随林龄的变化关系由查阅文献资料获得,共收集到 96 组灌木生物量与林龄的相对对应数据组,建立了生物量与林龄的一元非线性方程(表 1)。关于林分蓄积量和生物量碳的详细计算方法见参考文献[18]。

1.2.2 土壤碳储量的计算 本研究中土壤碳储量指土壤中的有机碳储量。退耕还林后土壤有机碳固定主要发生在表土层^[14],因此,采用 0—20 cm 土层计算土壤的固碳量。在估算退耕还林工程林地土壤有机碳储量变化时参考表 3 中的研究结果。

退耕还林地土壤碳库的变化计算公式为:

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

式中: C_{si} 为第 i 年的土壤碳库变化量(Mg); S_{jk} 为 j 树种在第 k 年造林面积(hm²); r 为土壤碳储量变化速率(Mg/(hm²·a)),参考表 3 取值。

1.2.3 固碳潜力的计算 退耕还林一期工程截止时间为 2010 年。本研究假设在 2010 年以后退耕还林工程造林面积不变,且国家对工程林不进行采伐的前提下对未来的固碳增汇潜力进行估算。以 2010 年为基准年,预测 2020—2050 年期间的碳汇增长潜力。

表 1 适合中国本土主要树种的生物量异速生长方程

树种	生长方程	相关系数	样本数	误差	文献来源
马尾松	$V=23.3729377(1-e^{-0.102277t})^{3.913496}$	0.998	—	—	[19]
杉木	$V=308.64906(1-e^{-0.12163t})^{4.21772}$	0.962	306	—	[20]
湿地松	$V=1231.86(1-e^{-0.0041t})^{3.39386}$	0.960	223	—	[21]
华山松	$V=139.936931(1-e^{-0.030795t})^{1.985503}$	—	—	2.529	[22]
云南松	$V=161.424562(1-e^{-0.026289t})^{1.695482}$	—	—	5.424	[22]
针叶混	$V=178.063256(1-e^{-0.018132t})^{0.913334}$	—	—	2.071	[22]
阔叶混	$V=135.317303(1-e^{-0.014388t})^{0.885853}$	—	—	5.264	[22]
多树种综合	$V=113.356202(1-e^{-0.048592t})^{1.252645}$	—	—	4.643	[22]
杨树	$V=365.5(1-e^{-0.1848t})^{3.9547}$	0.999	—	—	[23]
桉树	$V=208.2928(1-e^{-0.3320t})^{2.0767}$	0.997	—	—	[24]
灌木	$B=12.0137/(1+e^{(2.5940-1.0823t)})$	0.618	96	4.282	本研究

表 2 不同树种的木材密度(D)、生物量扩展因子(BEF)和碳含量(CF)

树种	$D/(\text{Mg} \cdot \text{m}^{-3})$	BEF	CF
落叶松	0.490	1.74	0.5221
华山松	0.396	2.29	0.5225
云南松	0.483	2.04	0.5113
思茅松	0.454	1.83	0.5224
冷杉	0.366	2.12	0.4999
云杉	0.342	2.12	0.5208
油杉	0.448	2.23	0.4997
柳杉	0.294	1.91	0.5201
杉木	0.307	1.92	0.5201
柏树	0.478	2.11	0.5034
针叶混合其他针叶林	0.405	2.00	0.5101
樟树	0.460	1.89	0.4916
栎类	0.676	2.09	0.5004
硬阔类和竹林	0.598	2.34	0.4834
桦木	0.541	1.62	0.4914
檫树	0.477	2.49	0.4848
桉树	0.578	1.65	0.5223
杨树	0.378	2.16	0.4956
泡桐	0.239	3.69	0.4695
软阔类	0.443	2.50	0.4956
阔叶混交林	0.482	1.95	0.4900

注:木材密度(D)、生物量扩展因子(BEF)和碳含量(CF)引自文献[8]。

表 3 不同退耕年限土壤有机碳的变化速率

退耕年限/a	平均树龄/a	样本数	土壤有机碳变化速率/ $(\text{Mg} \cdot \text{hm}^{-2} \cdot \text{a}^{-1})$
1~5	4	39	-0.000001
6~15	9	50	0.5796
16~30	23	41	0.4913
>30	56	13	0.2380
总	15	143	0.3667

注:土壤有机碳变化速率参考 Zhang 等^[14]估算的 0—20 cm 土壤表层内的土壤有机碳固碳速率。

2 结果与分析

2.1 退耕还林工程的固碳现状

2.1.1 林木生物量固碳现状 退耕还林工程一期建设任务完成时(2010 年),全国工程林木固碳量为 320.29 Tg(表 4)。其中,中南地区林木固碳量最大,达到 80.26 Tg,占全国林木固碳量的 25.06%;华东地区最小,仅积累 22.39 Tg,约为全国林木固碳量的 7%。各地区林木固碳量在工程实施后期高于前期。

2.1.2 土壤碳库固碳现状 截至 2010 年,全国退耕还林工程土壤固碳量为 35.58 Tg,其中西北地区土壤固碳量最大,达到 10.57 Tg,占全国土壤碳储量的 29.71%;华东地区最小,仅积累 1.74 Tg,约为全国土壤碳储量的 5%。土壤固碳量与造林面积成正比,造林面积越多,土壤固碳量越大。全国各地区土壤固碳量也表现为在工程实施后期高于前期(表 4)。

2.1.3 工程林的固碳现状 退耕还林工程林总固碳量为 355.87 Tg,其中工程后期固碳量约为前期的 5 倍(表 4)。工程完成时,林木固碳量是土壤固碳量的 9 倍。工程实施前期和后期,林木固碳量均大于土壤固碳量。中南地区总固碳量最大,达到 85.16 Tg,占全国总碳储量的 23.93%;华东地区最小,仅 24.13 Tg,约为全国总碳储量的 6.78%。西北地区虽然工程覆盖面积最大,但是固碳量却小于中南和西南地区,主要是由于各地区造林树种生长速率的差异所引起。

2.2 退耕还林工程的年固碳量

2.2.1 林木年生物固碳量 自 1999—2050 年,全国及各地区林木年生物固碳量均为抛物线趋势,其峰值出现在 2010 年左右,但各地区又存在差异(图 1)。全国尺度林木年生物固碳量高峰在 2010 年,固碳量为 48.34 Tg。由于退耕还林工程的造林树种以生长快速、寿命较短的杨树、马尾松、杉木等速生树种为主,这些树种的寿命通常在 30~50 年,其生物量快速生长期一

一般在树龄为 10~15 年。因此,根据不同树种生物量异速生长方程计算得到林木年生物固碳量高峰出现在 2010 年左右。1999—2010 年全国工程林生物碳年平均固碳量为 26.69 Tg/a,且工程后期高于前期。其中,中南地区林木年平均固碳量最大,为 7.30 Tg/a;东北地区最小,年平均固碳量为 2.12 Tg/a(表 4)。

表 4 退耕还林工程实施不同时期的面积、固碳量和年平均固碳量

地区	工程实施时期	面积/hm ²	固碳量/Tg			年平均固碳量/(Tg·a ⁻¹)		
			植被	土壤	总固碳量	植被	0—20 cm 土壤	年平均总固碳量
东北	2000—2004	1.23	4.02	0	4.02	0.80	0	0.80
	2005—2010	0.59	19.33	2.37	21.70	3.22	0.40	3.62
	2000—2010	1.82	23.35	2.37	25.72	2.12	0.22	2.34
华北	2000—2004	4.19	14.09	0	14.09	2.82	0	2.82
	2005—2010	1.29	45.98	8.43	54.41	7.66	1.41	9.07
	2000—2010	5.48	60.07	8.43	68.50	5.46	0.77	6.23
华东	2002—2004	0.87	3.12	0	3.12	1.04	0	1.04
	2005—2010	0.27	19.27	1.74	21.01	3.21	0.29	3.50
	2002—2010	1.14	22.39	1.74	24.13	2.49	0.19	2.68
中南	2000—2004	2.77	7.36	0	7.36	1.47	0	1.47
	2005—2010	1.43	72.90	4.90	77.80	12.15	0.82	12.97
	2000—2010	4.20	80.26	4.90	85.16	7.30	0.45	7.74
西南	1999—2004	3.57	17.86	0.02	17.88	2.98	0	2.98
	2005—2010	1.09	51.45	7.55	59.00	8.58	1.24	9.83
	1999—2010	4.66	69.31	7.57	76.88	5.78	0.63	6.41
西北	1999—2004	4.89	17.61	0.26	17.87	2.94	0.04	2.98
	2005—2010	1.43	47.30	10.31	57.61	7.88	1.72	9.60
	1999—2010	6.32	64.91	10.57	75.48	5.41	0.88	6.29
全国	1999—2004	17.53	64.06	0.28	64.34	10.68	0.05	10.73
	2005—2010	6.10	256.23	35.30	291.53	42.71	5.88	48.59
	1999—2010	23.63	320.29	35.58	355.87	26.69	2.97	29.66

注:西南、西北地区的退耕还林工程始于 1999 年;东北、华北、中南地区的退耕还林工程始于 2000 年;华东地区的退耕还林工程始于 2002 年。1999—2004 年为退耕还林工程实施前期,2005—2010 年为退耕还林工程实施后期。植被固碳量是指林木生物物质固碳量,土壤固碳量是指土壤有机碳固定量,总固碳量包括植被和土壤两部分固碳量。

2.2.2 土壤碳库的年固碳量 1999—2050 年间,全国及各地区退耕还林工程林土壤年固碳量均表现为先增加后降低并稳定的趋势,且在 2040 年以后趋向平衡。由于土壤新增固碳量主要来源于林木地上和地下凋落物、根系分泌物以及微生物残体等,因此,退耕还林工程土壤年固碳量峰值滞后于林木生物量固碳。土壤年固碳量在 2016 年达到最高峰(图 2),固碳量为 13.52 Tg/a。退耕还林工程实施期间,全国工程林土壤

年平均固碳量为 2.97 Tg/a,且工程后期显著高于前期。西北地区土壤年平均固碳量最大,为 0.88 Tg/a;华东地区最小,土壤碳库年平均固碳量仅为 0.19 Tg/a。主要是由于退耕还林工程在华东地区开始时间晚,覆盖面积小,使得土壤碳库积累速率较小。

全国各地区土壤年均固碳量变化规律一致,在工程实施后期土壤年平均固碳量均显著高于前期(表 4)。

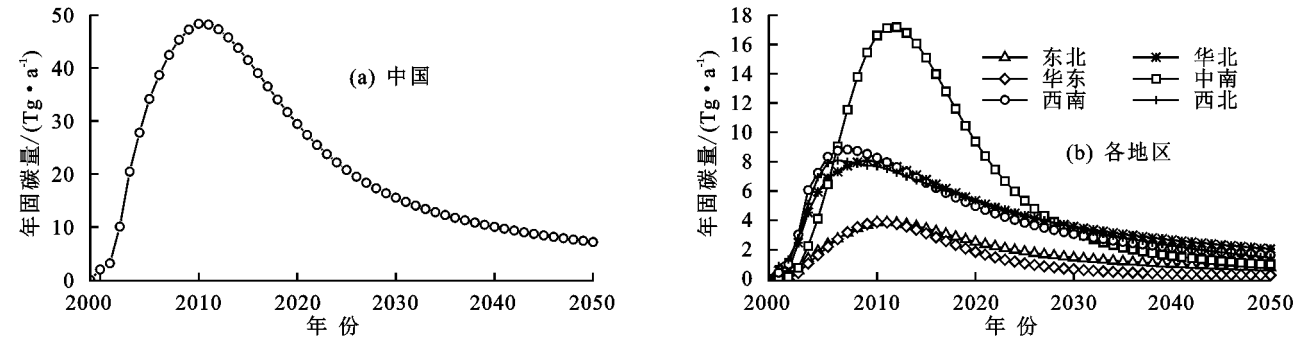


图 1 中国及其各地区退耕还林工程林生物量碳库的年固碳量

2.2.3 工程林的年固碳量 1999—2050 年间,各地区退耕还林工程年固碳量与生物固碳量变化基本一致,表现为抛物线趋势,年固碳量在 2011 达到最高峰,其工程林的年固碳量最大值为 59.97 Tg/a。由于各地区退耕还林工程开始的时间和造林树种不同,使得各地区工程林的年固碳量达到最高峰的时间不一致,但总体介于生物量年固碳和土壤年固碳峰值之间。其中,东北和中南在 2012 年达到最高峰,华东地区在 2011 年达到最高峰,华北和西北地

区在 2010 年达到最高峰,西南地区在 2009 年达到最高峰(图 3)。

在退耕还林工程实施期间,全国的工程林年平均固碳量为 29.66 Tg/a。中南地区工程林的年平均固碳量最大,为 7.74 Tg/a,主要是由于该区林木生物质碳库的固碳量较大。东北地区最小,工程林年平均固碳量仅为 2.34 Tg/a。与林木和土壤年均固碳量变化规律一致,全国各地区工程林年平均固碳量在工程实施后期均显著高于前期(表 4)。

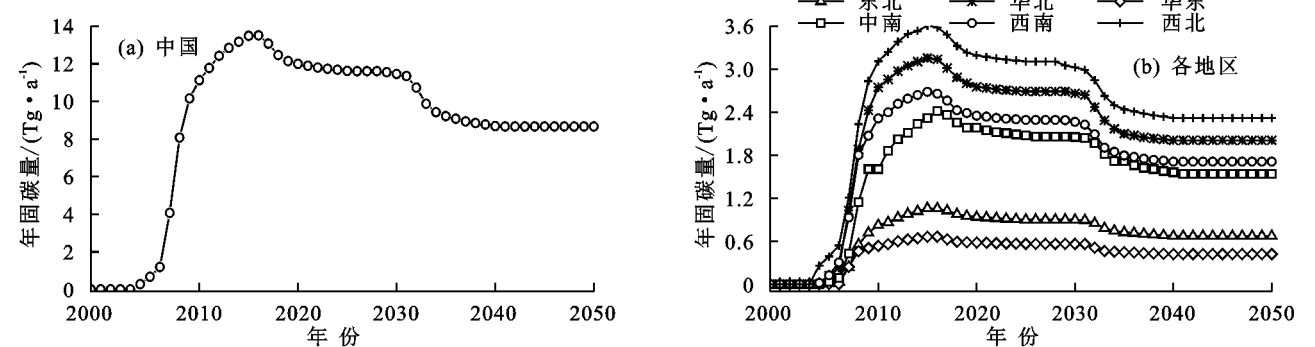


图 2 中国及其各地区退耕还林工程土壤碳库的年固碳量

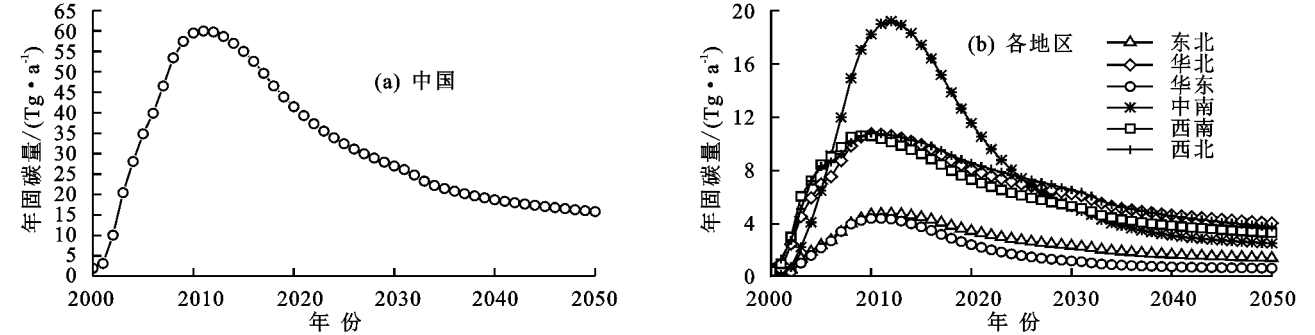


图 3 中国及其各地区退耕还林工程年固碳量

2.3 退耕还林工程的固碳潜力

2.3.1 植被碳库的固碳潜力 自 2010—2050 年,林木的固碳潜力不断增加(图 4)。在 2020 年、2030 年、2040 年和 2050 年,其固碳潜力分别为 397.34,604.00,725.53,808.90 Tg,占同期工程林固碳增汇潜力的比例分别为 75.79%,71.26%,68.19%和 65.55%,表明随着植被的恢复,林木的固碳增汇潜力占生态系统总碳汇的比例不断减小。在 6 个地区中,林木固碳潜力均不断增加。到 2050 年,东北、华北、华东、中南、西南和西北地区林木固碳潜力占全国的比例分别为 8.92%,20.06%,5.90%,28.18%,18.02%和 18.91%,与各地区的退耕还林树种有关。

2.3.2 土壤碳库的固碳潜力 全国在 2020 年、2030 年、2040 年、2050 年的土壤固碳潜力分别为 126.93,243.54,338.48,425.14 Tg,占同期工程林固碳潜力的比例分别为 24.21%,28.74%,31.81%和 34.45%。随着植被的恢复,土壤的固碳增汇潜力占生态系统

总碳汇的比例不断增加。到 2050 年,东北、华北、华东、中南、西南和西北地区土壤固碳潜力占全国的比例分别为 7.76%,23.21%,4.83%,17.76%,19.73%和 26.72%,与各地区退耕还林工程的覆盖面积有关。

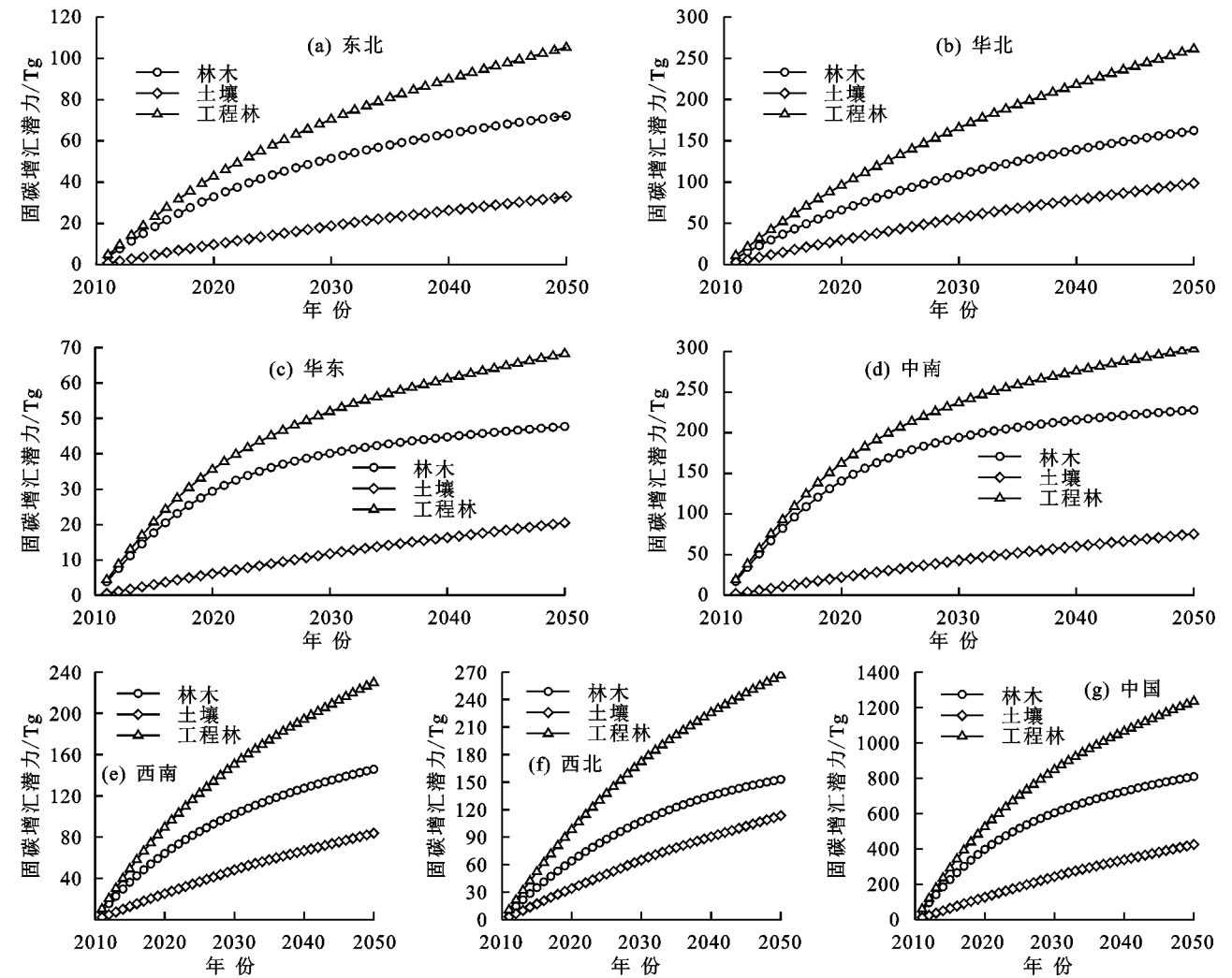
2.3.3 工程林的固碳潜力 在 2020 年、2030 年、2040 年、2050 年,中国退耕还林工程的固碳增汇潜力分别为 524.28,847.54,1 064.01,1 234.04 Tg。对应年份土壤固碳潜力占植被的比例分别为 31.95%,40.32%,46.65%,52.56%,表明土壤的固碳效益越来越明显。在 6 个地区中,工程林的固碳增汇潜力均不断增加。到 2050 年,东北、华北、华东、中南、西南和西北地区工程林固碳潜力占全国的比例分别为 8.52%,21.15%,5.53%,24.59%,18.61%和 21.60%。中南地区虽然造林面积不是最大,但是工程林的固碳潜力最大,这主要与造林树种的选择有关。6 个地区退耕还林工程林木的固碳潜力均大于土壤的固碳潜力(图 4)。

3 讨论

3.1 退耕还林工程对中国碳汇的贡献

本研究对中国退耕还林工程固碳量进行了估算,结果表明,退耕还林工程完成时(2010 年),该工程的总固碳量为 355.87 Tg,平均每年固碳量为 29.66 Tg,其总固碳量可抵消同期中国碳总排放量的 16.18%^[16]。到 2050 年,退耕还林工程的总固碳量为 1 589.91 Tg,其固碳量可抵消同期中国碳总排放量的 48.18%~66.25%(按 2050 年的 2 400~3 300 Tg 计算^[25])或 66.80%(按照 Ding 等^[26]在设定 2050 年前将大气

CO₂ 浓度控制在 470 mg/L 的目标下,估算得出中国在 2050 年的碳总排放量为 2 380 Tg)。表明我国的退耕还林工程具有很大的固碳效益,退耕还林工程对国家碳中和战略实现具有重要贡献。然而,从退耕还林工程年固碳量变化曲线(图 3)可以看出,退耕还林工程固碳能力并不是持续增加的,其固碳高峰通常出现在林木种植 10~20 年。林木种植 20~30 年以后,工程林年固碳量在较低水平趋于平稳。因此,从提高退耕还林工程林固碳潜力考虑,建议在人工林生长 20~30 年后有计划地进行采伐更新,不仅能够提高用材收益,同时也能维持较高的固碳效益。



注:林木对应植被碳库,土壤对应土壤碳库,工程林对应植被和土壤固碳潜力之和。

图 4 中国及其各地区退耕还林工程的固碳增汇潜力

3.2 植被碳库的估算精度问题

本研究中植被碳库的估算精度主要取决于树木异速生长方程及相关参数取值的准确性。本文收集整理了中国主要人工林树种的蓄积量(生物量)生长方程,分别用于估算对应退耕还林树种的生物量,从而最大化地提高退耕还林植被碳库的计算精度。然而,由于现有人工林树种异速生长方程不能覆盖退耕还林的所有人工林树种,除少数树种外,大部分树种

采用同一类型树种多个生长曲线混合替代的办法^[22],如针叶类树种用多个针叶树种混合生长曲线替代,硬阔叶类树种用多种阔叶树种混合生长曲线替代。虽然这种替代会高估一些慢速生长树种的生物量固碳,但也低估一些快速生长树种的生物量碳,二者相互抵消后可在一定程度上降低生物量碳估算的误差。除了树木异速生长方程的准确性以外,对不同树种木材密度、生物量扩展因子和含碳量的取值也会

对林木生物量碳的估算精度产生一定影响。总体来看,本研究结果能够较为准确地反映国家尺度上退耕还林工程林的植被固碳能力。然而,由于不同区域造林树种选择的差异,这种估算方法在评估区域和局部尺度林木生长碳汇时可能产生较大的不确定性。因此,为了更加精确评估退耕还林工程林木的固碳效益,未来需要针对不同区域、不同退耕还林树种构建异速生长方程,获取木材密度、生物量扩展因子、含碳量等相关参数值,从而提高模型预测精度,降低植被碳库评估的不确定性。

此外,木质残体(包括死立木、枯倒木、枯落枝)和凋落物层也是森林生态系统碳库的重要组成部分,对森林生态系统碳动态也有较大影响^[27-28]。据估算^[29],我国森林的死亡生物质碳库约为 (925 ± 54) Tg,占森林总碳库的 4.6%,其中木质残体碳库为 (429 ± 30) Tg,凋落物碳库为 (496 ± 24) Tg。虽然死亡生物质碳库在森林总碳库的占比较小,但随着退耕还林工程林的成熟、衰老,死亡生物质残体在生态系统碳库的比重也会不断增加。欧美成熟森林的死亡生物质残体碳库可占生态系统总碳库的 9.1%~11.8%^[29]。由于缺乏足够数量代表性样地的可靠数据,本研究并未将死亡生物质的碳储量纳入退耕还林工程林固碳能力与潜力评估。未来需要加强对我国不同森林类型枯落物层及木质残体碳库的调查研究,有助于进一步提高退耕还林工程植被碳库评估的精度。

3.3 土壤碳库的估算精度问题

本研究中,退耕还林以后土壤有机碳的变化采用 Zhang 等^[14]的基于土地利用变化前有机碳储量、样地年限、年降水量、年均温度等参数来估算的中国退耕还林后土壤有机碳变化速率。然而,由于研究区域、数据来源、土层深度、计算方法等的差异,不同学者对退耕还林后土壤固碳速率的估算结果并不一致,如 Deng 等^[11]基于全国 181 个退耕还林工程样地的实测数据计算得到退耕还林 0~5,6~10,11~30,31~40 和 >40 年间 0—20 cm 土壤有机碳变化速率分别为 $-0.93, 0.89, 1.30, 0.05, 0.13$ Mg/(hm²·a),其土壤固碳速率在造林前 5 年和 30 年后明显低于 Zhang 等^[14]的研究结果。尽管上述研究在土壤固碳速率绝对数值上存在一定差异,但其对造林后土壤有机碳的时间趋势预测基本一致,即退耕还林初期土壤有机碳含量发生下降,随着植被恢复而逐年增加。从整体上看,不论使用 Deng 等^[11]或 Zhang 等^[14]的研究结果,对国家尺

度上退耕还林工程土壤碳库估算结果均具有较高的可信度。此外,本研究只考虑土壤表层 0—20 cm 的有机碳,而下层土壤同样具有很大的碳库储量。退耕还林后 0—20 cm 土层固碳量约占 0—100 cm 土壤固碳量的 40%^[11]。若考虑 0—100 cm 土层,我国退耕还林工程 2010 年总固碳量将达到 682 Tg,到 2050 年,退耕还林工程的总固碳量为 4 115 Tg^[16]。然而,我国区域辽阔,地貌类型多样,不同地区土层厚度差异很大,如我国西北黄土高原地区土层平均厚度约 50~100 m,而南方喀斯特地区一些地方土层厚度不到 0.5 m。因此,未来在评估不同区域退耕还林工程土壤固碳能力时,需要考虑不同区域土层厚度,从而提高土壤固碳潜力的估算精度。

4 结论与展望

截至 2010 年,中国退耕还林工程总固碳量为 355.87 Tg,其中林木固碳量为 320.29 Tg,土壤固碳量为 35.58 Tg,工程林年均固碳量为 29.66 Tg。预计到 2050 年,退耕还林工程的固碳潜力为 1 234.04 Tg。退耕还林工程后期年均固碳量大于前期年均固碳量,工程林年均固碳量在 2011 年达到最高峰。由于各地区退耕还林工程开始的时间不同,造林树种不同,使得各地区工程林的年固碳量达到最高峰的时间不一致。造林时优先选择固碳功能较大的树种可以获得较大的固碳效益。随着植被的恢复,土壤的固碳效益越来越明显,其固碳增汇潜力占生态系统总碳汇的比例不断增加,到 2050 年,中国退耕还林工程土壤的固碳增汇潜力占林木的 52.56%。综上,我国的退耕还林工程具有较大的固碳潜力。

尽管本研究在评估全国尺度退耕还林固碳总效益的同时,也对我国东北、华北、华东、中南、西南、西北 6 个大区进行了不同区域退耕还林工程固碳速率与潜力分析,从而为国家尺度生态建设与碳汇管理提高科学参考。然而,从政府精细化管理层面来看,未来研究仍需要加强对全国各省、市、县域的退耕还林固碳现状、速率与潜力的调查研究,从而为不同省、市、县区域的碳中和管理和植被建设提供科学数据,为政府决策提供科技支撑。另外,从科学研究层面来看,相同生态地理区和生态功能区具有相似的气候、土壤和植被类型,即相似的植被、土壤固碳能力。因此,针对不同生态地理区和生态功能区退耕还林工程固碳速率与碳汇潜力的研究,更有利于理解不同生态区植被和土壤固碳过程、潜力及其驱动机制,从而科学制定和调整区域植被建设方案。

参考文献:

- [1] IPCC. AR6 Synthesis Report: Climate Change 2022[R]. Nairobi: The First Core Writing Team (CWT) Meeting, 2021.
- [2] Knee R A. What happened to global warming? Scientists say just wait a bit[J]. Science, 2009, 326: 28-29.
- [3] Bastin J F, Finegold Y, Garcia C, et al. The global tree restoration potential[J]. Science, 2019, 365(6448): 76-79.
- [4] Harris N L, Gibbs DA, Baccini A, et al. Global maps of twenty-first century forest carbon fluxes[J]. Nature Climate Change, 2021, 11: 234-240.
- [5] Harkonen S, Lehtonen A, Eerikainen K, et al. Estimating forest carbon fluxes for large regions based on process-based modelling, NFI data and Landsat satellite images[J]. Forest Ecology and Management, 2011, 262(12): 2364-2377.
- [6] Fang J Y, Chen A P, Peng C H, et al. Changes in forest biomass carbon storage in China between 1949 and 1998[J]. Science, 2001, 292: 2320-2322.
- [7] Zhao M, Zhou G S. Carbon storage of forest vegetation in China and its relationship with climatic factors[J]. Climatic Change, 2006, 74: 175-189.
- [8] 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: 101-105.
- [9] He H S, Shifley S R, Thompson F R. Overview of contemporary issues of forest research and management in China[J]. Environmental Management, 2011, 48: 1061-1065.
- [10] Deng L, Shangguan Z P. Food Security and farmer's income: Impacts of the Grain for Green Program on rural households in China[J]. Journal of Food, Agriculture and Environment, 2011, 9(3/4): 826-831.
- [11] 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[J]. Global Change Biology, 2014, 20: 3544-3556.
- [12] Lu F, Hu H F, Sun W J, et al. Effects of national ecological restoration projects on carbon sequestration in China from 2001 to 2010[J]. Proceedings of the National Academy of Sciences, 2018, 115(16): 4039-4044.
- [13] Wang K B, Hu D F, Deng J, et al. Biomass carbon storages and carbon sequestration potentials of the Grain for Green Program-Covered Forests in China[J]. Ecology and Evolution, 2018, 8(15): 7451-7461.
- [14] Zhang K, Dang H, Tan S, et al. Change in soil organic carbon following the 'grain-for-green' program in China[J]. Land Degradation and Development, 2010, 21: 13-25.
- [15] Chang R Y, Fu B J, Liu G H, et al. Soil carbon sequestration potential for "Grain for Green" project in Loess Plateau, China[J]. Environmental Management, 2011, 48: 1158-1172.
- [16] Deng L, Liu S G, Kim D G, et al. Past and future carbon sequestration benefits of China's grain for green program[J]. Global Environmental Change-Human and Policy Dimensions, 2017, 47: 13-20.
- [17] 国家林业局. 中国林业发展报告[M]. 北京: 中国林业出版社, 2005: 60-66.
- [18] 王艳芳, 刘领, 邓蕾, 等. 采伐对豫西退耕还林工程固碳的影响[J]. 生态学报, 2016, 36(5): 1400-1408.
- [19] 谭著明, 匡樟青, 夏本安, 等. 马尾松天然纯林林分生长与结构特征[J]. 湖南林业科技, 1996, 23(1): 19-25.
- [20] 章允清. 卫闽林场杉木人工林经验收获表的研制[J]. 福建林业科技, 2006, 33(3): 47-51.
- [21] 张连水, 陈南州, 罗水发, 等. 湿地松人工林生长规律研究[J]. 林业科技开发, 2002, 16(增刊): 31-34.
- [22] 陈艺齐, 蔡丽莎. 四川省退耕还林碳汇潜力预测研究[J]. 防护林科技, 2008(1): 1-3.
- [23] 赵贝贝, 翟文元, 郝克嘉, 等. Richards 生长函数在 107-杨树速生丰产林生长预测上的应用[J]. 山东农业大学学报(自然科学版), 2010, 41(1): 23-26.
- [24] 周元满, 谢正生, 刘新田. Richards 函数在桉树无性系林分生长预测上的应用研究[J]. 西南农业大学学报(自然科学版), 2005, 27(2): 240-243.
- [25] Fang J Y, Wang S P, Yue C, et al. Scenario analysis on the global carbon emission reduction goal proposed in the declaration of the 2009 G8 Summit[J]. Science in China (Series D: Earth Science), 2009, 52(11): 1694-1702.
- [26] Ding Z L, Duan X N, Ge Q S, et al. Control of atmospheric CO₂ concentration by 2050: An allocation on the emission rights of different countries[J]. Science in China (Series D: Earth Science), 2009, 52(10): 1447-1469.
- [27] 曹彦, 游巍斌, 王方怡, 等. 森林生态系统粗死木质残体碳储量研究进展[J]. 生态学报, 2021, 41(20): 7913-7927.
- [28] 段梦成, 王国梁, 史君怡, 等. 间伐对油松人工林碳储量的长期影响[J]. 水土保持学报, 2018, 32(5): 190-196.
- [29] Zhu J X, Hu H F, Tao S L, et al. Carbon stocks and changes of dead organic matter in China's forests[J]. Nature Communication, 2017, 8: e151.