

DOI: 10.5846/stxb201509011808

刘博杰, 逯非, 王效科, 刘魏魏, 饶恩明, 张路, 郑华. 中国天然林资源保护工程温室气体排放及净固碳能力研究. 生态学报, 2016, 36(14): - .
Liu B J, Lu F, Wang X K, Liu W W, Rao E M, Zhang L, Zheng H. Greenhouse gas emissions and net carbon sequestration of the Natural Forest Protection Program in China. Acta Ecologica Sinica, 2016, 36(14): - .

中国天然林资源保护工程温室气体排放及净固碳能力研究

刘博杰^{1,2}, 逯非^{1,*}, 王效科¹, 刘魏魏^{1,2}, 饶恩明¹, 张路¹, 郑华¹

1 中国科学院生态环境研究中心, 城市与区域生态国家重点实验室, 北京 100085

2 中国科学院大学, 北京 100049

摘要: 基于天然林资源保护工程(简称天保工程)一期(2000—2010年)营造林过程工程边界内碳排放和边界外碳泄漏的计算, 分析了天保工程及各区域碳排放和碳泄漏年际变化及影响因素, 对比了天保工程及各区域碳排放和碳泄漏的组成特征, 研究了天保工程及各区域净固碳量的变化特征。结果表明: 天保工程一期西北、中西部地区、南部地区、东北地区和天保工程的碳排放分别为 0.89 TgC、1.47 TgC、0.09 TgC 和 2.45 TgC; 碳泄漏分别为 3.17 TgC、3.11 TgC、6.50 TgC 和 12.78 TgC。工程措施和碳排放强度的区域性差异导致各区域碳排放组成特征不同。造林及配套森林基础设施建设是西北、中西部地区和南部地区最大的工程措施碳排放; 新造林及森林管护是东北地区最大的工程措施碳排放。相应地, 各种物资消耗中, 建材是西北、中西部地区和南部地区最大的物资碳排放; 燃油是东北地区最大的物资碳排放。天保工程在工程边界内外引起的额外温室气体排放量达到 15.23 TgC, 抵消了工程固碳效益的 9.82%; 在西北、中西部地区、南部地区和东北地区的抵消作用分别为 10.08%、8.16% 和 11.24%。天保工程一期净固碳量为 139.77 TgC, 年均净固碳量为 12.71 TgC/a。因此, 碳排放和碳泄漏对天保工程固碳的抵消较小, 工程一期在我国温室气体减排和减缓全球气候变暖上做出了巨大贡献。避免工程基础设施的盲目建设和对工程进行合理规划是减少温室气体排放的可能途径。

关键词: 天然林资源保护工程; 碳排放; 碳泄漏; 净固碳量; 温室气体

Greenhouse gas emissions and net carbon sequestration of the Natural Forest Protection Program in China

LIU Bojie^{1,2}, LU Fei^{1,*}, WANG Xiaoke¹, LIU Weiwei^{1,2}, RAO Enming¹, ZHANG Lu¹, ZHENG Hua¹

1 State Key Laboratory of Urban and Regional Ecology, Research Center for Eco-Environmental Sciences, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100085, China

2 University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China

Abstract: Annual variance of carbon emissions and carbon leakage in the Natural Forest Protection Program (NFPP) was analyzed based on the calculation of carbon emissions from afforestation within the project boundary and carbon leakage out of the boundary in the first-stage (2000 - 2010) of the NFPP. Carbon emissions and carbon leakage were compared among the NFPP and its component regions, and variance of net carbon sequestration was characterized. The results showed that carbon emissions of the NFPP in the combined northwest and mid-west regions, the south region, the northeast region, and the whole NFPP region were 0.89 Tg C, 1.47 Tg C, 0.09 Tg C, and 2.45 Tg C, respectively. Meanwhile, carbon leakage from the above regions was 3.17 Tg C, 3.11 Tg C, 6.50 Tg C, and 12.78 Tg C, respectively. Spatial differences in program

基金项目: 中国科学院战略性先导科技专项子课题(XDA05060102, XDA05050602)

收稿日期: 2015-09-01; **修订日期:** 2016-01-04

* 通讯作者 Corresponding author. E-mail: feilu@rcees.ac.cn

measures and carbon emission intensity were responsible for the differences in carbon emissions between various regions. Program measures showed that afforestation and corresponding forestry infrastructure construction were most prominent for the northwest/mid-west regions and the south region, while protection of young and mature forests was important in the northeast region. Accordingly, production and consumption of building materials were the main sources of carbon emissions for the former two regions, and consumption of fossil fuels was the main source for the latter region. Overall, in the first-stage of the NFPP, additional greenhouse gas emissions resulting from carbon emissions and carbon leakage totaled 15.23 Tg C, which counteracted 9.82% of the sequestered carbon in the program. Greenhouse gas emissions from the northwest/mid-west regions, the south region, and the northeast region could counteract 10.08%, 8.16%, and 11.24% of their carbon sequestration, respectively. Net carbon sequestration in the first-stage of the NFPP was 139.77 Tg C with an annual average of 12.71 Tg C/a. Therefore, carbon emissions and carbon leakage only played a minor role in neutralizing carbon benefits, and the first-stage of the NFPP contributed significantly to greenhouse gas emission reduction in China as well as global climate warming mitigation. Potential routes of greenhouse gas emission reduction include reasonable planning and avoidance of impulsive or reckless construction.

Key Words: Natural Forest Protection Program (NFPP); carbon emissions; carbon leakage; net carbon sequestration; greenhouse gas

工业革命以来,由于人类化石燃料燃烧和土地利用变化导致 CO_2 排放 480 PgC^[1]。近 10 年,全球平均 CO_2 浓度年增加量为 $2.0 \pm 0.1 \text{ ppm/a}$ ^[2]。森林在全球和区域碳循环中具有重要作用。目前全球森林生物量碳储量为 $363 \pm 28 \text{ PgC}$,东亚地区和中国生物量碳储量分别占全球的 2.46% 和 1.69%^[3-4]。同时,在森林的固碳方面,全球每年森林的总固碳量为 $2.4 \pm 0.4 \text{ PgC/a}$ ^[3]。东亚季风区亚热带森林净生态系统生产力 (NEP) 占全球森林 NEP 的 8%^[5]。我国目前森林的固碳能力为 78.8 TgC/a 并将持续到本世纪中叶^[6]。通过林业生态系统固定 CO_2 以减缓全球气候变化已成为国际社会的基本共识^[7]。林业碳汇是《京都议定书》规定的温室气体减排途径之一^[8-9]。在《京都议定书》规定的清洁发展机制 (CDM) 下,发达国家可通过林业碳汇项目获得碳信用额度用于抵减温室气体排放量^[10]。人口密度与森林碳密度之间具有显著负相关关系^[11]。全球每年由于人类毁林产生的碳排放高达 $2.9 \pm 0.5 \text{ PgC/a}$,是仅次于化石燃料燃烧的碳排放源^[3]。为减少发展中国家因毁林和森林退化造成的碳排放,《联合国气候变化框架公约》2005 年第 11 届缔约方大会上正式提出了“减少毁林及退化造成的碳排放” (Reducing Emissions from Deforestation and Degradation, REDD) 项目,REDD+ 是 REDD 的延伸,其中“+”指增加碳储量^[12]。明确 CDM 林业碳汇项目和 REDD+ 项目对温室气体减排的贡献要求项目的固碳能力具有可测量性、可报告性和可核性^[13-14]。

目前,国内外已有学者对林业碳汇项目的固碳能力展开研究,认为项目的开展具有可观的固碳效益^[15-18]。然而,林业碳汇项目固碳的有效性要求将项目隐藏的碳排放和碳泄漏剔除以保证固碳的额外性^[19]。林业碳汇项目边界内的造林成本来源于种植 (清理整地、定植、施肥)、抚育 (幼林除草、施肥) 和运输^[20]。以上过程所需物资如燃油、灌溉、肥料、药剂和建材在生产和运输过程会导致林业碳汇项目边界内产生“碳排放”^[21-22]。另外,林业碳汇项目可通过活动转移、市场影响、排放转移和生态泄漏直接或间接导致项目边界外温室气体排放增加,即“碳泄漏”^[23]。林业碳汇项目中的造林再造林和森林保护都可能通过活动转移和市场影响产生碳泄漏^[24]。碳泄漏可在区域乃至全球尺度上产生,部分甚至能够全部抵消项目的固碳效益^[25]。目前针对林业碳汇项目碳泄漏的研究主要集中于森林保护项目边界内木材产量调减所导致的边界外木材采伐量增加产生的温室气体排放,研究表明,碳泄漏抵消森林保护固碳效益的比例可高达 90% 左右,政策保障和加强区域间森林保护合作有助于减少碳泄漏^[26-28]。Henders 等^[29]总结了计算 REDD 项目碳泄漏的 34 种方法并将其分为 9 组,其中 6 组用于计算活动转移碳泄漏,3 组用于计算市场影响产生的碳泄漏。碳排放和碳泄漏或多或少抵消了林业碳汇项目的固碳效益。林业碳汇项目对温室气体减排的实际贡献应体现为净固

碳能力或净减排潜力,即项目实测固碳量扣除碳排放和碳泄漏等折扣因素^[30]。目前国内外已有学者对造林项目的净固碳能力展开研究并依据净固碳能力的结果对项目的减排有效性给出了评价,然而上述研究均在较小尺度上展开,对项目碳排放和碳泄漏的计算也有待完善^[16-18]。

上世纪 70 年代以来,我国相继实施了天然林资源保护工程、退耕还林工程、“三北”防护林工程、京津风沙源工程等重大生态工程。这些工程的实施,极大促进了我国森林资源的固碳功能^[31-35]。同时也为我国实现 2020 年碳排放强度比 2005 年下降 40%—45%的目标和 2030 年左右温室气体排放有望达到峰值的承诺提供了有力保障^[36]。天保工程是一项以促进我国天然林资源的恢复和发展为主旨的生态建设及重建工程^[31]。该工程自 1998 年试点启动,于 2000 年正式全面启动,一期工程时间为 2000—2010 年。天保工程的主要内容包括森林分类区划、调减和停止天然林采伐、生态公益林和商品林建设和基础保障体系建设^[37]。目前已有关于天保工程新增人工林固碳量的研究,结果表明天保工程一期人工林固碳量为 33.67 TgC,至 2020 年工程二期结束可达 96.03 TgC^[35]。除此之外,调减木材产量也是天保工程固碳的主要途径,占固碳总量的比例可达 51.62%^[31]。然而上述研究对工程的碳排放和碳泄漏尚未评估,温室气体排放对工程固碳抵消的不确定性还需要进一步明确。本研究以天保工程为研究对象,从大尺度上计算了天保工程及各区域的碳排放、碳泄漏和净固碳量,对揭示天保工程在减缓全球气候变化和温室气体减排的净贡献方面具有重要意义。

1 研究方法

1.1 研究区域

本研究所涉及的范围包括天保工程实施的 17 个省(自治区、直辖市)。基于计算参数的空间异质性和天保工程实施方案,本研究将工程划分为 3 个研究区域(表 1 和图 1)。西北、中西部地区主要包括位于黄河上中游地区的 8 个省(自治区);南部地区主要包括位于长江上游地区的 7 个省(自治区、直辖市);东北地区包括 2 个省。由于内蒙古地区造林活动主要在黄河上中游地区而调减木材产量主要在东北地区,因此本研究在计算碳排放和新造林固碳量时将内蒙古划归为西北、中西部地区,计算调减木材产量固碳量和碳泄漏时划归为东北地区。

表 1 天保工程研究区域划分

Table 1 Natural Forest Protection Program regionalization in this research

区域 Region	工程省(自治区、直辖市) Program Province (Autonomous region, Municipality)
西北、中西部地区 northwest and mid-west regions	山西、内蒙古、河南、陕西、甘肃、青海、宁夏、新疆
南部地区 south region	湖北、海南、重庆、四川、贵州、云南、西藏
东北地区 northeast region	黑龙江(含大兴安岭)、吉林

1.2 天保工程边界内碳排放和边界外碳泄漏计算

本研究计算了天保工程一期 2000—2010 年每年工程边界内造林、营林产生的碳排放以及工程实施导致边界外产生的碳泄漏。边界内碳排放指天保工程造林、营林过程物资使用和能源消耗产生的温室气体排放。边界外碳泄漏指由天保工程引起的,工程措施外的人类活动温室气体排放。“边界”的划定是基于工程的内容和措施,而非地域边界。因此碳泄漏可能发生在工程区域内也可能发生在工程区域外。本研究碳泄漏指天保工程木材产量调减导致边界外温室气体排放的增加量。

1.2.1 碳排放计算

本研究基于《中国林业统计年鉴》统计指标将天保工程分为森林基础设施建设、造林、新造林及森林管护和迹地更新四项主要工程措施。其中,森林基础设施建设包括护林宣传牌、围栏和林区道路建设;造林包括耕整地、造林地除草、种植、施肥、灌溉和飞播;新造林及森林管护包括巡视、病虫害防治和新造林抚育。将每项工程措施下各项营造林活动的碳排放求和得到各项工程措施碳排放。每项营造林活动碳排放的计算如(1)

所示。

$$E_{it} = EF_i \times M_{it} \tag{1}$$

式中, E_{it} 为第*i*种物资于第*t*年碳排放(tC); EF_i 为第*i*种物资的碳排放参数(tC·t⁻¹); M_{it} 为第*i*种物资于第*t*年的消耗量(t)。表2列出了工程消耗的物资种类、物资名称及相应的碳排放参数。 M_{it} 依据各项营造林活动每年的实施面积和单位面积需要投入的物资量确定。各项营造林活动每年的实施面积参考《中国林业统计年鉴》^[45],单位面积物资投入量参考相关造林技术规程。本研究以陕西、四川和吉林分别作为西北、中西部地区、南部地区、南部地区和东北地区的典型工程省份,计算典型工程省份每年碳排放并分别推算至3个区域,如(2)所示。

$$E_{jt} = E_{kt} \times S_{jt} / S_{kt} \tag{2}$$

式中, E_{jt} 为第*j*区域于第*t*年碳排放(tC); E_{kt} 为第*k*典型工程省份于第*t*年碳排放(tC); S_{jt} 为第*j*区域于第*t*年工程实施面积(hm²); S_{kt} 为第*k*典型工程省份于第*t*年工程实施面积(hm²)。

表 2 工程消耗的物资种类、物资名称及碳排放参数

Table 2 Carbon emission factors of respective materials consumed in the program				
物资种类 Material category	物资名称 Material	排放过程 Emission process	碳排放参数 Emission factor/(tC/t)	参考文献 References
燃油 Fuels	汽油	摩托车巡视	0.87	[38]
	柴油	运输	0.86	[30]
	航空汽油	固定翼飞机巡视、飞播	0.82	[39]
	航空煤油	直升机巡视	0.84	[39]
建材 Building materials	钢铁	护林宣传牌、围栏	0.66	[40]
	水泥	围栏、林区道路	0.19	[41]
	水	围栏、林区道路	0.02 kgC/t	[42-43]
灌溉 Irrigation	水	灌溉	0.02 kgC/t	[42-43]
肥料 Fertilizer	复合肥①	施肥	0.98	[44]
药剂 Herbicide and pesticide	2,4-D 丁酯除草剂	造林地除草	2.85	[44]
	氟乐灵除草剂	新造林抚育	6.53	[44]
	杀虫剂②	新造林抚育、森林抚育	17.28	[44]

①复合肥指 N,P,K 纯养分质量各占肥料质量的 15%; ②杀虫剂的碳排放参数指常见林业杀虫剂甲氰菊酯、敌敌畏、阿维菌素、吡虫啉和达螨灵的平均值

1.2.2 碳泄漏计算

调减木材产量是天保工程的主要内容之一。然而,随着社会经济的发展,人们对能源和木材的需求并没有减少。长期以来,薪材一直是工程区重要的能源类别。工程实施前的几年,每年全国薪材产量在 400 万立方米左右,大约折合煤炭 200 万吨^[45]。工程实施期间每年全国木材产量(原木和薪材)也呈上升趋势^[45]。基于此,本研究天保工程碳泄漏的计算包括以下两部分内容。

(1)工程区薪材产量调减导致工程边界外煤炭使用量增加而产生的温室气体排放,计算如(3)-(5)所示。工程区各区域薪材调减量如(3)所示。

$$W_{jt} = (Y_{jt} - Y_{j0}) \times P_{jt} \tag{3}$$

式中, W_{jt} 为第*j*区域于第*t*年薪材调减量(m³); Y_{jt} 为第*j*区域于第*t*年木材产量(m³); Y_{j0} 为第*j*区域于 1997

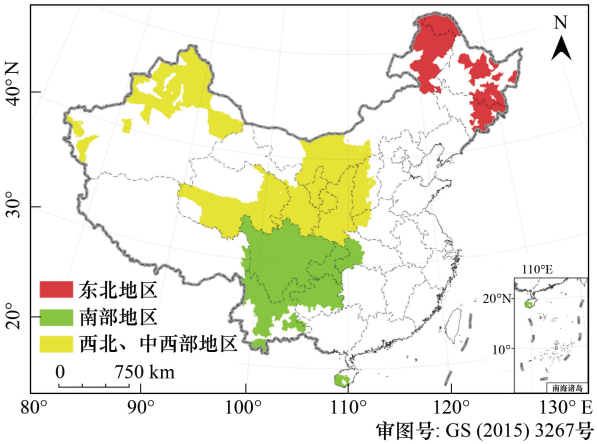


图 1 天保工程研究区域图

Fig.1 Research zoning of Natural Forest Protection Program

年木材产量(m^3); P_{jt} 为第 j 区域于第 t 年薪材产量占工程区木材总产量的比例(%)。由于缺乏工程区薪材调减量的直接数据,本研究假设工程区调减采伐量中的薪材比例和全国木材产量中的薪材比例是一样的。各区域每年木材和薪材产量的数据来源为《中国林业统计年鉴》^[45]。工程区薪材调减导致煤炭使用的增加量如(4)所示。

$$C_{jt} = W_{1jt} / 2 \quad (4)$$

式中, C_{jt} 为第 j 区域于第 t 年煤炭使用的增加量(t);每吨煤炭可替代薪材 2m^3 ^[46]。煤炭使用量的增加产生的碳泄漏如(5)所示。

$$L_{1jt} = C_{jt} \times EF_c \quad (5)$$

式中, L_{1jt} 为第 j 区域于第 t 年工程边界外煤炭使用量增加产生的碳泄漏(tC); EF_c 为煤炭的碳排放参数($0.469 \text{ tC} \cdot \text{t}^{-1}$)^[30]。

(2)工程区原木产量调减导致工程边界外用材林造林面积增加而产生的温室气体排放,计算如(6)–(8)所示。工程区各区域原木调减量如(6)所示。

$$W_{2jt} = (Y_{jt} - Y_{j0}) - W_{1jt} \quad (6)$$

式中, W_{2jt} 为第 j 区域于第 t 年原木调减量(m^3)。工程区原木产量减少导致工程边界外新造用材林面积如(7)所示。

$$A_{jt} = (W_{2jt} / 0.59) / V_j \quad (7)$$

式中, A_{jt} 为第 j 区域于第 t 年工程边界外新造用材林面积(hm^2);0.59为商品材出材率^[31]; V_j 为第七次全国森林资源清查第 j 区域森林平均单位面积蓄积量($\text{m}^3 \cdot \text{hm}^{-2}$)。工程边界外新造用材林产生的碳泄漏如(8)所示。

$$L_{2jt} = A_{jt} \times EF_{aj} \quad (8)$$

式中, L_{2jt} 为第 j 区域于第 t 年工程边界外新造用材林产生的碳泄漏(tC); EF_{aj} 为第 j 区域单位面积用材林造林碳排放量(tC/hm^2)。

1.3 净固碳量计算

基于2000—2010年各工程区域每年碳排放和碳泄漏的计算结果,结合工程新造林和调减木材产量两项固碳量,计算了天保工程一期各区域每年净固碳量,计算如(9)所示。

$$NCS_{jt} = CS_{ajt} + CS_{bjt} - E_{jt} - L_{1jt} - L_{2jt} \quad (9)$$

式中, NCS_{jt} 为第 j 区域于第 t 年工程净固碳量(tC); CS_{ajt} 为第 j 区域于第 t 年工程新造林固碳量(tC); CS_{bjt} 为第 j 区域于第 t 年调减木材产量固碳量(tC); E_{jt} 为第 j 区域于第 t 年工程边界内碳排放(tC)。本研究基于天保工程各工程省份每年累积新造林面积和各工程省份人工幼龄林固碳率计算各工程省份每年新造林固碳量,计算如(10)所示。根据各工程省份每年新造林固碳量,计算各工程区域每年新造林固碳量 CS_{ajt} 。

$$CS_{akt} = CSR_k \times S_{kt} \quad (10)$$

式中, CS_{akt} 为第 k 省于第 t 年工程新造林固碳量(tC); CSR_k 为第 k 省人工幼龄林固碳率($\text{t C hm}^{-2} \text{ a}^{-1}$)^[47]; S_{kt} 为第 k 省于第 t 年累计新造林面积(hm^2)。以天保工程实施前的1997年为基准,计算各工程区域每年调减木材产量固碳量 CS_{bjt} ,计算如(11)所示。

$$CS_{bjt} = (Y_{jt} - Y_{j0}) \times CSR_Y \quad (11)$$

式中, CSR_Y 为调减单位体积木材产量固碳量 $0.68 \text{ tC}/\text{m}^3$ ^[31]。

2 结果与分析

2.1 天保工程及各区域碳排放

2.1.1 碳排放年际变化

基于天保工程及各区域2000—2010年每年各项营造林活动物资消耗量的计算及各种物资的碳排放参

数,计算了天保工程及各区域碳排放的年际变化(图2)。天保工程一期营造林活动共产生碳排放 2.45 TgC。不同区域碳排放存在明显差异。其中,南部地区>西北、中西部地区>东北地区。整个工程期内,上述三个区域的碳排放分别为 1470.82 GgC,885.70 GgC 和 91.72 GgC。各区域年际碳排放变化与造林面积的变化具有明显的一致性。各区域碳排放的变化主要取决于造林面积的变化,由造林面积变化导致的燃油、灌溉、肥料、建材和药剂消耗的变化是碳排放发生改变的主要原因。南部地区和西北、中西部地区碳排放变化趋势较为接近。2000—2001 年,两个区域的碳排放随着造林面积的增加而上升,西北、中西部地区碳排放于 2002 年达到峰值 129.10 GgC。2002—2007 年,两个区域的碳排放随造林面积的减少而下降。2008 年开始,两个区域碳排放又随造林面积的增加而上升,南部地区碳排放于 2009 年达到峰值 188.79 GgC。东北地区只有 2000—2002 年有新造林,2002 年后碳排放基本保持稳定,主要由新造林和森林管护所产生。由于南部地区和西北、中西部地区是天保工程碳排放的主要贡献区域,因此天保工程碳排放的变化趋势与这两个区域也基本一致。

2.1.2 各工程措施碳排放组成特征

本研究将各项营造林活动划分为 4 项主要工程措施:森林基础设施建设、造林、新造林及森林管护和迹地更新^[45],明确了天保工程一期整个工程及各区域工程措施碳排放的组成特征(图3)。

森林基础设施建设是西北、中西部地区最大的碳排放,占碳排放总量的 57.88%,其次是造林,占碳排放总量的 22.06%,这两项工程措施占碳排放总量的 79.94%(图3)。因而造林及配套森林基础设施建设是西北、中西部地区主要的碳排放。造林是南部地区最大的碳排放,占碳排放总量的 52.18%,其次是森林基础设施建设,占碳排放总量的 34.94%,这两项工程措施占碳排放总量的 87.12%。因而造林及配套森林基础设施建设也是南部地区的主要碳排放。然而,东北地区新造林及森林管护是主要的碳排放,占碳排放总量的 68.72%,造林及配套森林基础设施建设占碳排放总量的 31.28%。

各区域工程措施碳排放组成的不同与天保工程实施任务的区域性差异有关。人工造林是西北、中西部地区和南部地区天保工程的主要工程措施,两个区域造林面积之和占天保工程一期造林总面积的 98.54%,因而由造林及配套森林基础设施建设产生的碳排放是这两个区域的主要碳排放。南部地区造林碳排放是西北、中西部地区的 3.93 倍,高出的碳排放中 95.83%是由南部地区经济林施肥碳排放大于西北、中西部地区经济林施肥引起的。天保工程一期南部地区经济林造林面积占

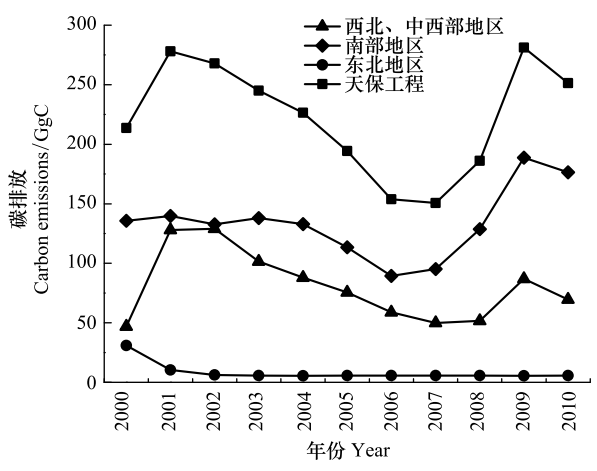


图2 天保工程及各区域碳排放变化
Fig.2 Variance of carbon emissions in Natural Forest Protection Program and respective regions

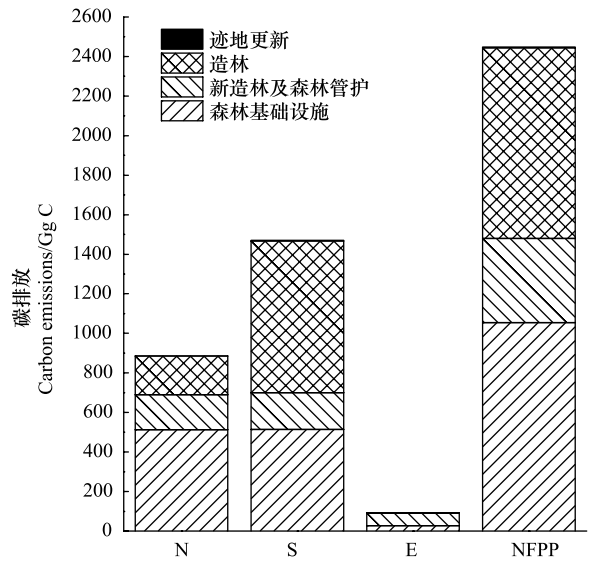


图3 天保工程及各区域工程措施碳排放
Fig.3 Carbon emissions of program measures in Natural Forest Protection Program and respective regions

N: 西北、中西部地区 northwest and mid-west regions, S: 南部地区 south region, E: 东北地区 northeast region, NFPP: 天保工程 Natural Forest Protection Program

整个工程一期经济林造林总面积的 78.46%,是西北、中西部地区经济林造林面积的 3.64 倍。由于经济林需要每年施加基肥并追肥,因而肥料消耗、运输和造林地氧化亚氮直接排放是南部地区造林碳排放明显高于西北、中西部地区的主要原因。东北地区天保工程主要以天然林资源保护和森林植被恢复为主,因而森林巡视、抚育和防火是主要的碳排放^[48]。对于天保工程,造林及配套森林基础设施建设是主要的工程措施碳排放,二者合计占碳排放总量的 82.43%,其中森林基础设施建设占 43.04%,造林占 39.39%。

2.1.3 各工程措施碳排放强度

为了解各工程措施在不同区域的单位面积平均碳排放(碳排放强度),本研究汇总了新造林及森林管护、造林两项工程措施及措施下各项目的碳排放强度(表 3)。造林的碳排放强度包含了配套森林基础设施建设的碳排放强度。相同工程措施的碳排放强度在不同区域存在差异,这主要是由于计算不同区域各工程措施碳排放时参数选取的空间异质性所致。由于东北地区天保工程没有经济林造林和飞播造林,因此这两项措施未计入该区域的碳排放。

表 3 天保工程及各区域各工程措施碳排放强度

Table 3 Carbon emission intensity of respective program measures in Natural Forest Protection Program and respective regions

工程措施 Program measures	措施下项目 Items	碳排放强度 Carbon emission intensity/(kgC/hm ²)			
		西北、中西部地区	南部地区	东北地区	天保工程
新造林及森林管护 Young and mature forests protection	森林巡视	0.35	0.27	0.26	0.29
	幼林抚育	16.06	16.07	37.81	16.39
	病虫害防治	0.05	0.02	0.01	0.03
造林 Afforestation	人工造林(生态林)	210.77	202.43	197.18	204.14
	人工造林(经济林)	3739.19	4674.02	—	4472.64
	飞播造林	202.45	194.02	—	199.29

造林措施下各项目的碳排放强度大于新造林及森林管护措施下各项目的碳排放强度(表 3),这与 2.1.2 中造林及配套森林基础设施建设是西北、中西部地区、南部地区和天保工程主要碳排放的结果相一致。在造林措施下各项目中,经济林人工造林的碳排放强度是生态林的 17.74—23.09 倍,是飞播造林的 18.47—24.09 倍。相比于生态林的粗放型管理,经济林营造过程中化肥的施用是导致经济林碳排放强度高于生态林的主要原因。由于工程区调减木材产量导致工程边界外额外新造林主要以速生丰产林为主,培育模式相比生态林更加精细化,因此本研究采用经济林的碳排放强度参数作为公式(8)的 EF_{aj} ^[49]。东北地区的 EF_{aj} 由西北、中西部地区替代。

2.1.4 各种物资消耗碳排放组成特征

为了进一步明确天保工程碳排放的组成特征,本研究将各项营造林活动消耗的物资划分为 5 类:燃油、灌溉、建材、肥料和药剂,对天保工程一期整个工程及各区域各类物资消耗的碳排放组成特征进行了研究(图 4)。

对于西北、中西部地区和南部地区,建材是最大的碳排放,其次是燃油与肥料(图 4)。肥料占南部地区碳排放总量的比例高于西北、中西部地区,这与 2.1.2 中分析的南部地区经济林造林碳排放大于西北、中西部地区相一致。东北地区主要以森林管护为主,相关管护措施包括摩托车巡视和航空巡视消耗的燃料是该区域主要的碳排放。药剂和灌溉产生的碳排放占各区域碳排放总量的比例不到 10%。对于天保工程,建材是最大的碳排放,其次是肥料和燃油,药剂和灌溉在碳排放总量中所占比例仅为 6.35%。

2.2 天保工程及各区域碳泄漏

基于天保工程区木材产量调减导致工程边界外煤炭使用量增加和新造用材林面积增加,计算了煤炭替代和新造用材林面积增加造成的碳泄漏。天保工程一期碳泄漏总量为 12.78 TgC,其中煤炭替代碳泄漏 2.88 TgC,新造用材林碳泄漏 9.90 TgC。西北、中西部地区、南部地区和东北地区碳泄漏分别为 3.17 TgC,3.11 TgC 和 6.50 TgC,其中煤炭替代碳泄漏分别为 1.34 TgC,1.03 TgC 和 0.51 TgC;新造用材林碳泄漏分别为 1.83 TgC,

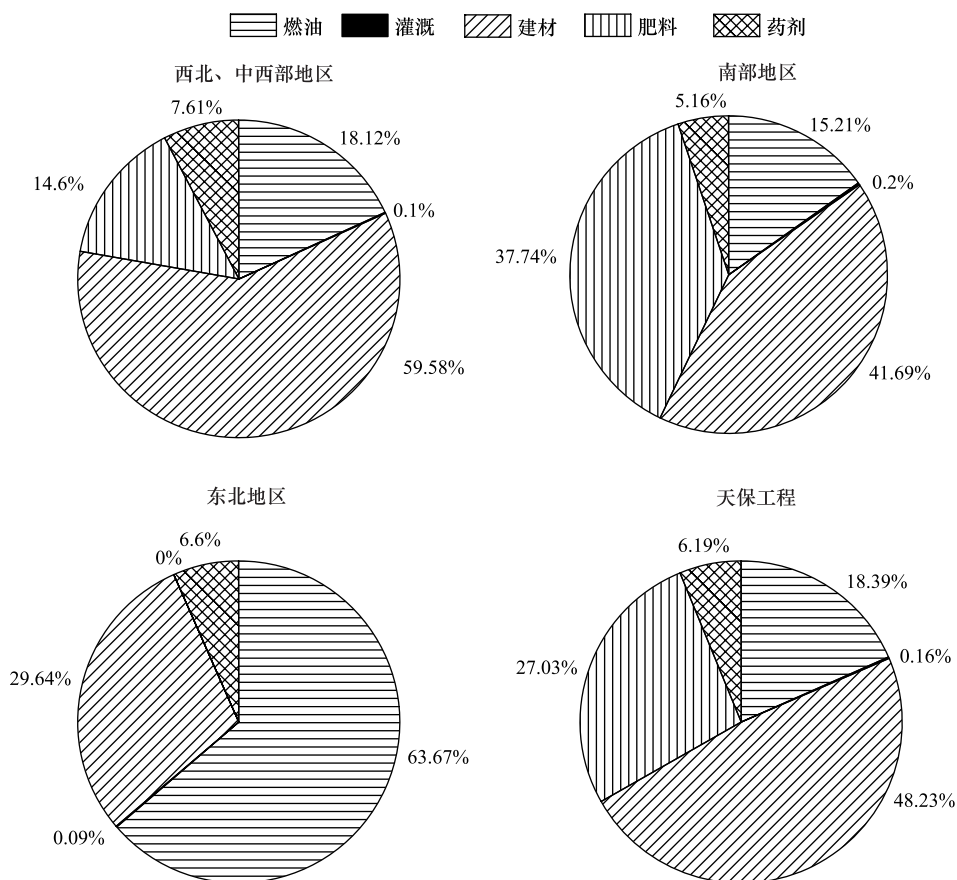


图4 天保工程及各区域各种物资消耗碳排放构成

Fig. 4 Carbon emission proportion of different categories of materials consumed in Natural Forest Protection Program and respective regions

(a) 西北、中西部地区 (b) 南部地区 (c) 东北地区 (d) 天保工程

2.08 TgC 和 5.99 TgC。可以看出,西北、中西部地区和南部地区煤炭替代碳泄漏和新造用材林碳泄漏结果较为接近,而东北地区新造用材林碳泄漏明显大于其他两个区域。东北地区原木调减量分别是西北、中西部地区和南部地区的 3.46 和 2.89 倍,相应地工程边界外新造用材林面积和由此造成的碳泄漏也大于西北、中西部地区和南部地区。各区域新造用材林碳泄漏均大于煤炭替代碳泄漏,这主要是由于各区域原木调减量均大于薪材调减量。

2.3 天保工程及各区域净固碳量

由于各区域工程实施内容的侧重点和完成情况有所不同,因此三个区域固碳量、碳排放、碳泄漏和净固碳量的年际变化和结果具有明显差异(图 5 和表 4)。随着新造林面积的累积,西北、中西部地区、南部地区和整个天保工程新造林固碳量自 2000 年至 2010 年逐年增加,占固碳总量的比例也逐年提高(图 5)。东北地区自 2002 年以后没有新造林,因此该区域新造林固碳量自 2002 年后呈稳定变化。西北、中西部地区、南部地区和天保工程每年碳排放和碳泄漏总量抵消当年固碳总量的比例随固碳总量的增加而逐年减少。然而东北地区由于固碳总量的变化比较稳定,因此每年碳排放和碳泄漏总量抵消当年固碳总量的比例也较为稳定。天保工程及三个区域净固碳量的变化与固碳总量的变化相一致,说明碳排放和碳泄漏对固碳总量具有抵消作用,但并没有影响净固碳量的变化趋势,对净固碳量变化起主导作用的还是固碳总量。

通过各个区域固碳量、碳排放、碳泄漏的对比得出(表 4):西北、中西部地区和南部地区新造林固碳量大于调减木材产量固碳量,而东北地区调减木材产量固碳是主要的固碳组成部分。碳泄漏是天保工程及三个区

域的主要温室气体排放组成,占温室气体排放总量的 67.91–98.61%。不同区域碳排放和碳泄漏对固碳效益的抵消强度不同,表现为东北地区>西北、中西部地区>南部地区。从整个天保工程来看:调减木材产量固碳量大于新造林固碳量,碳泄漏大于碳排放。天保工程在工程边界内外引起的额外温室气体排放量达 15.23 TgC,抵消了工程固碳效益的 9.82%。因此,碳排放和碳泄漏对天保工程固碳的抵消较小。天保工程一期净固碳量为 139.77 TgC,年均净固碳量为 12.71 TgC/a。

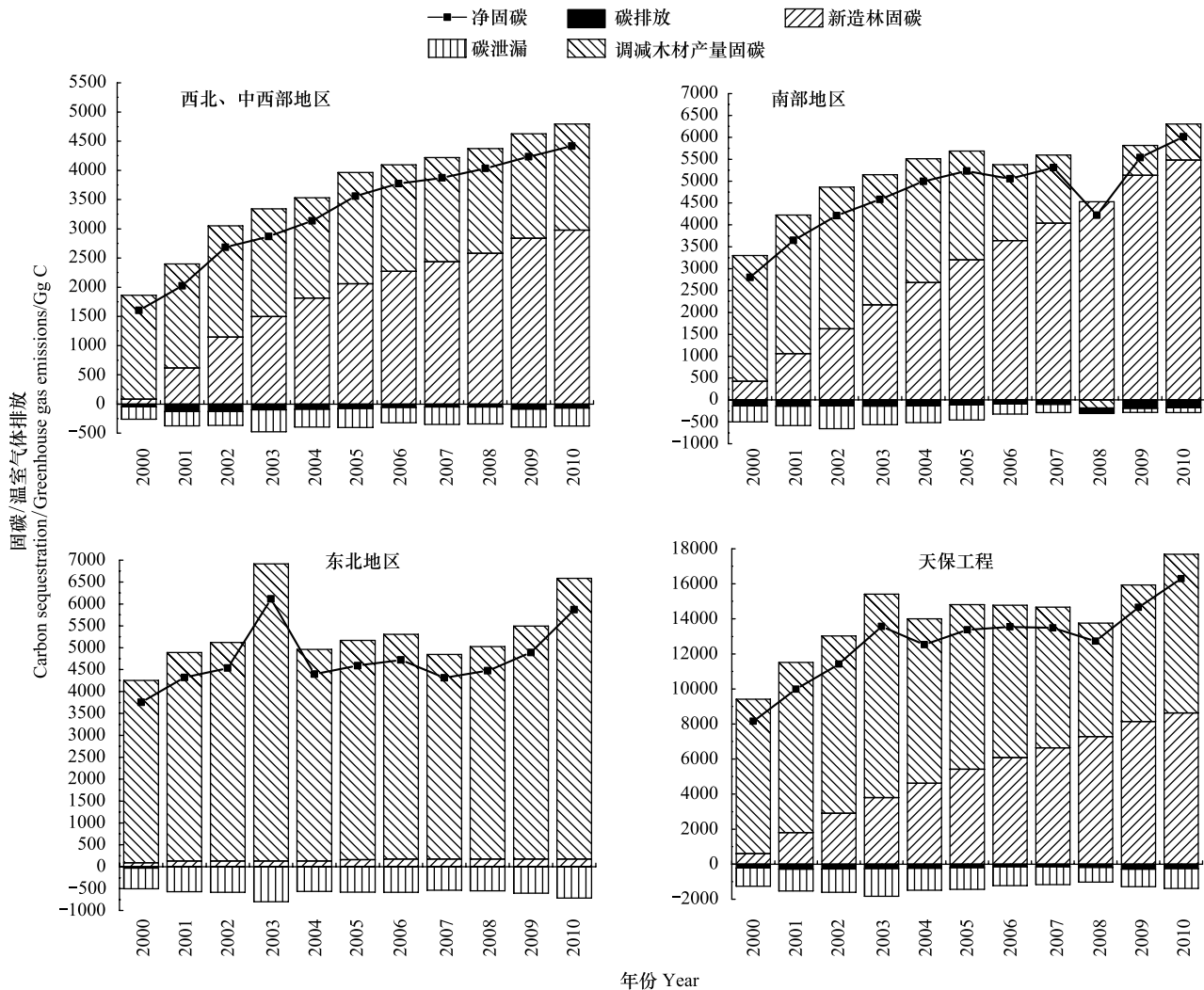


图 5 天保工程及各区域固碳量、碳排放、碳泄漏和净固碳量变化

Fig.5 Variance of carbon sequestration, carbon emissions, carbon leakage and net carbon sequestration in Natural Forest Protection Program and respective regions

(a) 西北、中西部地区 (b) 南部地区 (c) 东北地区 (d) 天保工程; ① 2008 年南部地区木材产量大于 1997 年木材产量,因此调减木材产量固碳量为负值;相应地,调减木材产量引起的工程边界外碳泄漏为 0

3 讨论

天保工程不同区域碳排放及其组成特征、碳泄漏和净固碳量存在差异。这主要是由工程实施目标和侧重点的区域性差异导致的。西北、中西部地区和南部地区以大力增加和恢复林草植被为中心,相应地造林及配套森林基础设施建设是最大的工程措施碳排放,建材是最大的物资碳排放;东北地区以保护现有天然林资源为目标,相应地新造林及森林管护是最大的工程措施碳排放,燃油是最大的物资碳排放^[48]。从整个天保工程看,建材是最大的物资碳排放,占碳排放总量的比例接近 50%。天保工程建材碳排放总量的 91%来自林区道

路建设。Gaboury 等^[50]也发现道路建设和维护是造林最大的温室气体排放措施,占造林各措施温室气体排放总量的 46%。因此,造林工程实施前应对林区道路进行合理规划,避免盲目建设造成建材的浪费和相应温室气体排放的增加。

表 4 天保工程及各区域固碳量、碳排放、碳泄漏及净固碳量

Table 4 Carbon sequestration, carbon emissions, carbon leakage and net carbon sequestration in Natural Forest Protection Program and respective regions

地区 Regions	新造林固 碳量/TgC Carbon sequestration of afforestation	占固碳总 量比例/% Fraction in total carbon sequestration	调减木材 产量固碳 量/TgC Carbon sequestration of wood production reduction	占固碳总 量比例/% Fraction in total carbon sequestration	碳排 放/TgC Carbon emissions	占温室气体 排放总量 比例/% Fraction in greenhouse gas emissions	碳泄漏/TgC Carbon leakage	占温室气体 排放总量 比例/% Fraction in greenhouse gas emissions	净固碳 量/TgC Net carbon sequestration	温室气体 排放抵消 固碳量/% Fraction of greenhouse gas emissions in carbon sequestration
西北、中西部地区 northwest and mid- west regions	20.31	50.45	19.95	49.55	0.89	21.82	3.17	78.18	36.20	10.08
南部地区 south region	33.98	60.50	22.19	39.50	1.47	32.09	3.11	67.91	51.59	8.16
东北地区 northeast region	1.65	2.81	56.91	97.19	0.09	1.39	6.50	98.61	51.98	11.24
天保工程 Natural forest protection program	55.94	36.09	99.05	63.91	2.45	16.08	12.78	83.92	139.77	9.82

天保工程各区域由于调减木材产量导致工程边界外的碳泄漏大于边界内营造林的碳排放。武曙红等^[51]和 Schwarze 等^[24]为减少碳泄漏风险提出了应对策略。从项目层面上,有必要在造林项目实施前的设计阶段将可能的泄漏因素考虑在内并采取相应的措施如合理选址、泄漏监测、开发具有社会、经济等多方面效益的项目^[24,51];从宏观层面上,可以通过对林业碳汇项目碳信用额度上限、项目类型和规模进行控制以降低碳泄漏的风险^[24]。

本研究碳排放和碳泄漏对天保工程固碳的抵消较小,说明天保工程在温室气体减排和减缓全球气候变暖上具有巨大潜力。也有类似研究表明造林碳汇项目净固碳效果明显。然而不同研究针对不同的造林碳汇项目展开,碳排放、碳泄漏计入边界的不同导致温室气体排放对固碳量的抵消存在差异。国内已有学者对生态林造林碳汇项目的温室气体排放和净固碳能力展开研究,结果表明,在计入期内生态林造林温室气体排放对固碳的抵消作用仅为 0.01%—0.24%^[16-17,52-53]。以上研究主要考虑造林过程机械设备和运输工具化石燃料燃烧造成的温室气体排放,且温室气体排放主要在造林当年产生。因此,相比于本研究温室气体排放对固碳的抵消作用较小。对于经济林造林碳汇项目,已有学者计量了膏桐林碳汇项目的净固碳量。营造林温室气体排放主要来自造林基肥和抚育管理追肥中含氮肥料的施用引起的 N₂O 排放以及造林、补植补造和抚育过程苗木和化肥的运输。结果表明,该项目于造林后前 10 年均为碳源,自第 11 年起开始有固碳效益。在 20 年的计入期内营造林温室气体排放对固碳的抵消作用为 17.26%^[18]。天保工程造林主要以生态林为主,经济林造林的碳排放强度大于生态林造林的碳排放强度是上述研究温室气体排放抵消作用高于本研究的主要原因(表 3)。国外学者对造林碳汇项目的温室气体排放和净固碳能力也有研究,这些研究主要基于对造林全过程“摇篮到门”温室气体排放的评价,从初期种子生产至最终木材运输。研究结果表明:造林全程产生的温室气体排放仅占森林固碳量的 0.4%—2.3%,占本国化石燃料燃烧温室气体排放总量的比例也很小^[50,54-55]。Sathaye 等^[56]综述了国外学者对造林项目边界外碳泄漏的研究结果,发现碳泄漏对固碳的抵消作用为 0.02%—41%。以上研究结果都表明造林碳汇项目具有显著的固碳效益。宁可等^[57]研究表明通过优化碳汇林的经营管理可以进一步提高森林的碳收益。除了造林碳汇项目,也有学者就其他固碳措施对温室气体减排的有效性进行了

研究,发现目前较受重视的农田措施都会因温室气体的排放抵消部分甚至全部土壤固碳效益^[58]。与之相比,重大林业生态工程具有固碳效果可观,工程碳排放和碳泄漏对工程固碳抵消小,净固碳显著等优势。森林基础设施建设、造林、新造林及森林管护、迹地更新等林业活动产生的碳排放仅可持续短暂的几年,本研究仅计算了天保工程一期内的净固碳量和年均净固碳量,然而随着林龄的增加,林分固碳速率还会继续提高^[59]。因此,从林分生长的整个过程看,未来天保工程的净固碳量和年均净固碳量还会进一步提高。由于中国森林总面积和平均生物量碳密度的增加,到本世纪中叶中国森林将保持较大的固碳潜力^[6]。因此,造林碳汇项目,特别是类似天保工程同时具备造林和调减木材产量两项固碳效益的林业工程,从温室气体减排角度上值得推广。基于国际能源署公布的数据,天保工程一期净固碳量相当于 2000—2010 年我国化石燃料燃烧温室气体排放总量的 0.89%,年均净固碳量相当于 2005 年(我国 2020 年减排目标基准年)我国化石燃料燃烧温室气体排放总量的 0.86%^[60]。因此,作为一个单项生态工程,天保工程的实施对我国温室气体减排目标的实现不容忽视。

本研究在天保工程碳排放、碳泄漏和净固碳量的计算上存在一定的不确定性。有研究表明,天保工程 2000—2010 年工程区内生态系统土壤保持量增加了 9.24 亿吨^[61]。相应地,增加的土壤有机碳保持量也是天保工程的固碳效益^[62]。除此之外,增加的土壤养分保持量可以减少化肥的施用量,由此可能减少温室气体排放对固碳的抵消作用^[63]。森林管护是天保工程的主要措施之一,森林防火、病虫害防治和制止破坏森林资源活动的措施进一步增加了森林固碳量^[48]。然而,造林工程可能对当地生态系统构成潜在的环境风险。Smith 等^[21]估算了热带桉树林年固碳 1 PgC/a 可导致土地蒸腾量在原有基础上增加 50%,影响了当地水文循环并对当地生物多样性构成了威胁。Gao 等^[64]也提出我国主要造林工程项目集中在干旱、半干旱地区的低生态系统水分利用效率和低植物水分利用效率的区域,导致植被固碳的水资源消耗成本较高,对生态环境造成不利影响。以上研究提到的造林对生态环境构成负面影响的“生态碳泄漏”可能会增加温室气体排放对天保工程固碳的抵消作用。基于数据的可获得性和研究方法的有待完善,本研究未计算上述天保工程额外的固碳效益和可能存在的生态碳泄漏。

4 结论

(1)天保工程一期边界内营造林碳排放总量为 2.45 TgC,其中西北、中西部地区 0.89 TgC,南部地区 1.47 TgC,东北地区 0.09 TgC;边界外碳泄漏总量为 12.78 TgC,其中西北、中西部地区 3.17 TgC,南部地区 3.11 TgC,东北地区 6.50 TgC。

(2)天保工程不同区域碳排放组成特征不同。造林及配套森林基础设施建设是西北、中西部地区和南部地区主要的工程措施碳排放,建材是主要的物资碳排放;新造林及森林管护是东北地区主要的工程措施碳排放,燃油是主要的物资碳排放。

(3)天保工程一期碳排放和碳泄漏对固碳的抵消作用为 9.82%,净固碳量为 139.77 TgC,相当于同期我国化石燃料燃烧温室气体排放总量的 0.89%。因此,天保工程一期建设在我国温室气体减排和减缓全球气候变暖上做出了巨大贡献。

参考文献(References):

- [1] Malhi Y, Meir P, Brown S. Forests, carbon and global climate. *Philosophical Transactions of the Royal Society A Mathematical Physical and Engineering Sciences*, 2002, 360(1797): 1567-1591.
- [2] IPCC. Climate Change 2013: The physical science basis // Stocker T F, Qin D, Plattner G K, Tignor M, Allen S K, Boschung J, Nauels A, Xia Y, Bex V, Midgley P M, eds. Contribution of Working Group I to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change. Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA: Cambridge University Press, 2013: 1535-1535.
- [3] Pan Y D, Birdsey R A, Fang J Y, Houghton R, Kauppi P E, Kurz W A, Phillips O L, Shvidenko A, Lewis S L, Canadell J G, Ciais P, Jackson R B, Pacala S W, McGuire A D, Piao S L, Rautiainen A, Sitch S, Hayes D. A large and persistent carbon sink in the world's forests. *Science*,

- 2011, 333(6045): 988-993.
- [4] Fang J Y, Guo Z D, Hu H F, Kato T, Muraoka H, Son Y. Forest biomass carbon sinks in East Asia, with special reference to the relative contributions of forest expansion and forest growth. *Global Change Biology*, 2014, 20(6): 2019-2030.
- [5] Yu G R, Chen Z, Piao S L, Peng C H, Ciais P, Wang Q F, Li X R, Zhu X J. High carbon dioxide uptake by subtropical forest ecosystems in the East Asian monsoon region. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*, 2014, 111(13): 4910-4915.
- [6] Hu H F, Wang S P, Guo Z D, Xu B, Fang J Y. The stage-classified matrix models project a significant increase in biomass carbon stocks in China's forests between 2005 and 2050. *Scientific Reports*, 2015, 5: Article number: 11203.
- [7] 方精云, 黄耀, 朱江玲, 孙文娟, 胡会峰. 森林生态系统碳收支及其影响机制. *中国基础科学*, 2015, (3): 20-25.
- [8] 张小全. LULUCF在《京都议定书》履约中的作用. *气候变化研究进展*, 2011, 7(5): 369-377.
- [9] Schlamadinger B, Marland G. The Kyoto Protocol: provisions and unresolved issues relevant to land-use change and forestry. *Environmental Science & Policy*, 1998, 1(4): 313-327.
- [10] Jung M. The role of forestry projects in the clean development mechanism. *Environmental Science & Policy*, 2005, 8(2): 87-104.
- [11] 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.
- [12] 袁梅, 谢晨, 黄东. 减少毁林及森林退化造成的碳排放(REDD)机制研究的国际进展. *林业经济*, 2009, (10): 23-28.
- [13] Gupta A, Lövbrand E, Turnhout E, Vijge M J. In pursuit of carbon accountability: the politics of REDD+ measuring, reporting and verification systems. *Current Opinion in Environmental Sustainability*, 2012, 4(6): 726-731.
- [14] Vine E L, Sathaye J A, Makundi W R. Forestry projects for climate change mitigation: an overview of guidelines and issues for monitoring, evaluation, reporting, verification, and certification. *Environmental Science & Policy*, 2000, 3(2-3): 99-113.
- [15] Shin M Y, Miah M D, Lee K H. Potential contribution of the forestry sector in Bangladesh to carbon sequestration. *Journal of Environmental Management*, 2007, 82(2): 260-276.
- [16] 魏亚韬. 我国造林再造林碳汇项目碳计量方法研究——以八达岭地区为例[D]. 北京: 北京林业大学, 2011.
- [17] 李梦, 施拥军, 周国模, 周大勇, 张娇, 张英海. 浙江省嘉兴市高速公路造林碳汇计量. *浙江农林大学学报*, 2013, 31(3): 329-335.
- [18] 欧光龙, 唐军荣, 王俊峰, 杨绍辉, 胥辉. 云南省临沧市膏桐能源林造林碳汇计量. *应用与环境生物学报*, 2010, 16(5): 745-749.
- [19] 陈先刚, 赵晓惠, 陆梅. 造林再造林项目碳汇能力有效性判别. *东北林业大学学报*, 2009, 37(10): 99-101.
- [20] 朱臻, 沈月琴, 徐志刚, 吴伟光, 宁可, 王志强. 森林经营主体的碳汇供给潜力差异及影响因素研究. *自然资源学报*, 2014, 29(12): 2013-2022.
- [21] Smith L J, Torn M S. Ecological limits to terrestrial biological carbon dioxide removal. *Climatic Change*, 2013, 118(1): 89-103.
- [22] 张治军, 张小全, 朱建华, 罗云建, 侯振宏, 褚金翔. 清洁发展机制(CDM)造林再造林项目碳汇成本研究——以CDM广西珠江流域治理再造林项目为例. *气候变化研究进展*, 2009, 5(6): 348-356.
- [23] 武曙红. 我国CDM造林和再造林项目方法学及案例研究[D]. 北京: 北京林业大学, 2006.
- [24] Schwarze R, Niles J O, Olander J. Understanding and managing leakage in forest-based greenhouse-gas-mitigation projects. *Philosophical Transactions of the Royal Society A Mathematical Physical and Engineering Sciences*, 2002, 360(1797): 1685-1703.
- [25] Magnani F, Dewar R C, Borghetti M. Leakage and spillover effects of forest management on carbon storage: theoretical insights from a simple model. *Tellus Series B Chemical and Physical Meteorology*, 2009, 61(2): 385-393.
- [26] Jonsson R, Mbongo W, Felton A, Boman M. Leakage implications for European timber markets from reducing deforestation in developing countries. *Forests*, 2012, 3(3): 736-744.
- [27] Hu X, Shi G Q, Hodges D G. International market leakage from China's Forestry policies. *Forests*, 2014, 5(11): 2613-2625.
- [28] Sun B, Sohngen B. Set-asides for carbon sequestration: implications for permanence and leakage. *Climatic Change*, 2009, 96(3): 409-419.
- [29] Henders S, Ostwald M. Forest carbon leakage quantification methods and their suitability for assessing leakage in REDD. *Forests*, 2012, 3(1): 33-58.
- [30] 逯非. 中国农田化学氮肥施用和秸秆还田的土壤固碳潜力及可行性研究[D]. 北京: 中国科学院生态环境研究中心, 2009.
- [31] 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.
- [32] Deng L, Liu G B, Shanguan Z P. Land-use conversion and changing soil carbon stocks in China's 'Grain-for-Green' Program: a synthesis. *Global Change Biology*, 2014, 20(11): 3544-3556.
- [33] Liu W H, Zhu J J, Jia Q Q, Zheng X, Li J S, Lou X D, Hu L L. Carbon sequestration effects of shrublands in Three-North Shelterbelt Forest region, China. *Chinese Geographical Science*, 2014, 24(4): 444-453.
- [34] Zeng X H, Zhang W J, Cao J S, Liu X P, Shen H T, Zhao X. Changes in soil organic carbon, nitrogen, phosphorus, and bulk density after afforestation of the "Beijing-Tianjin Sandstorm Source Control" program in China. *Catena*, 2014, 118: 186-194.

- [35] Zhou W M, Lewis B J, Wu S N, Yu D P, Zhou L, Wei Y W, Dai L M. Biomass carbon storage and its sequestration potential of afforestation under natural forest protection program in China. *Chinese Geographical Science*, 2014, 24(4): 406-413.
- [36] 刘广为, 赵涛, 米国芳. 中国碳排放强度预测与煤炭能源比重检验分析. *资源科学*, 2012, 34(4): 677-687.
- [37] 张静. 最新人工造林规划编制与退耕还林工程建设标准规范实务全书. 北京: 中国林业出版社, 2015.
- [38] 梅煌伟. 福建省主要温室气体排放核算及特征分析[D]. 福州: 福建师范大学, 2012.
- [39] IPCC. 2006 IPCC Guidelines for National Greenhouse Gas Inventories. // Eggleston H S, Buendia L, Miwa K, Ngara T, Tanabe K, eds. The National Greenhouse Gas Inventories Programme. Japan: IGES, 2006.
- [40] Tian Y H, Zhu Q H, Geng Y. An analysis of energy-related greenhouse gas emissions in the Chinese iron and steel industry. *Energy Policy*, 2013, 56: 352-361.
- [41] Wang Y L, Zhu Q H, Geng Y. Trajectory and driving factors for GHG emissions in the Chinese cement industry. *Journal of Cleaner Production*, 2013, 53: 252-260.
- [42] 李云开. 华北平原粮食作物灌溉消耗地下水及能源的特征[D]. 北京: 中国科学院生态环境研究中心, 2013.
- [43] Lu F, Wang X K, Han B, Ouyang Z Y, Duan X N, Zheng H. Net mitigation potential of straw return to Chinese cropland: estimation with a full greenhouse gas budget model. *Ecological Applications*, 2010, 20(3): 634-647.
- [44] 陈舜. 中国农田化肥农药生产的温室气体排放估算[D]. 北京: 中国科学院生态环境研究中心, 2014.
- [45] 国家林业局. 中国林业统计年鉴 2000-2010. 北京: 中国林业出版社, 2001-2011.
- [46] 于海卿, 伊文录. 以煤代木 势在必行. *中国林业*, 1995, (3): 33-33.
- [47] 陈泮勤, 王效科, 王礼茂. 中国陆地生态系统碳收支与增汇对策. 北京: 科学出版社, 2008.
- [48] 张志达. 天然林资源保护工程管理手册. 北京: 中国林业出版社, 2006.
- [49] 段爱国, 张建国. 速生丰产林培育理论与技术探讨. *林业建设*, 2014, (2): 27-31.
- [50] Gaboury S, Boucher J F, Villeneuve C, Lord D, Gagnon R. Estimating the net carbon balance of boreal open woodland afforestation: A case-study in Québec's closed-crown boreal forest. *Forest Ecology and Management*, 2009, 257(2): 483-494.
- [51] 武曙红, 张小全, 李俊清. CDM 林业碳汇项目的泄漏问题分析. *林业科学*, 2006, 42(2): 98-104.
- [52] 尹晓芬, 王晓鸣, 王旭, 王灏, 吴乔明. 林业碳汇项目基准线和监测方法学及应用分析——以贵州省贞丰县林业碳汇项目为例. *地球与环境*, 2012, 40(3): 460-465.
- [53] 赵福生, 师庆东, 衣怀峰, 吴友均, 张新平, 张伟燕. 克拉玛依造林减排项目温室气体(GHG)减排量计算. *干旱区研究*, 2015, 32(2): 382-387.
- [54] Timmermann V, Dibdiakova J. Greenhouse gas emissions from forestry in East Norway. *The International Journal of Life Cycle Assessment*, 2014, 19(9): 1593-1606.
- [55] Berg S, Lindholm E L. Energy use and environmental impacts of forest operations in Sweden. *Journal of Cleaner Production*, 2005, 13(1): 33-42.
- [56] Sathaye J A, Andrasko K. Special issue on estimation of baselines and leakage in carbon mitigation forestry projects. *Mitigation and Adaptation Strategies for Global Change*, 2007, 12(6): 963-970.
- [57] 宁可, 沈月琴, 朱臻, 黄敏, 王成军. 农户杉木经营的固碳能力影响因素及碳供给决策措施. *林业科学*, 2014, 50(9): 129-137.
- [58] 逯非, 王效科, 韩冰, 欧阳志云, 郑华. 农田土壤固碳措施的温室气体泄漏和净减排潜力. *生态学报*, 2009, 29(9): 4993-5006.
- [59] 于洋, 贾志清, 朱雅娟, 刘艳书, 刘海涛, 李清雪. 高寒沙地乌柳防护林碳库随林龄的变化. *生态学报*, 2015, 35(6): 1752-1760.
- [60] International Energy Agency. China, People's Republic of: Indicators for 2000-2010. <http://www.iea.org/statistics/statisticssearch/report/?country=CHINA&product=indicators&year2000> [2012/2015].
- [61] 饶恩明. 中国生态系统土壤保持功能变化及其影响因素[D]. 北京: 中国科学院生态环境研究中心, 2015.
- [62] 刘飞, 杨柯, 李括, 彭敏, 聂海峰. 我国四种典型土类有机碳剖面分布特征. *地学前缘*, 2011, 18(6): 20-26.
- [63] 李士美, 谢高地, 张彩霞, 祁悦. 森林生态系统土壤保持价值的年内动态. *生态学报*, 2010, 30(13): 3482-3490.
- [64] Gao Y, Zhu X J, Yu G R, He N P, Wang Q F, Tian J. Water use efficiency threshold for terrestrial ecosystem carbon sequestration in China under afforestation. *Agricultural and Forest Meteorology*, 2014, 195-196: 32-37.