

# 退耕还林工程不同造林类型温室气体收支与净碳汇 ——以中国中南及华东地区为例

于天任<sup>1,2</sup>, 逯非<sup>1,3,4</sup>, 杨师帅<sup>1,2</sup>, 张路<sup>1</sup>,  
黄斌斌<sup>1,2</sup>, 王效科<sup>1,4</sup>, 洗超凡<sup>1</sup>, 孟龄<sup>1</sup>, 欧阳志云<sup>1</sup>

(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; 3.北京京津冀区域生态环境变化与  
综合治理国家野外科学观测研究站, 北京 100085; 4.全球变化研究协同创新中心, 北京 100875)

**摘要:** [目的] 揭示退耕还林工程温室气体泄漏对工程固碳减排的抵消作用, 明确工程不同造林模式对固碳减排实际贡献的差异和空间格局。[方法] 针对退耕还林 4 种类型造林(即生态林、经济林、用材林和薪炭林)构建了碳核算与净减排评估方法(CANM-GGP), 通过核算典型树种造林的植被和土壤固碳、伐后产品固碳和生物质能源替代化石能源减排等固碳减排效应, 以及造林和经营管护的温室气体泄漏, 对中南及华东地区退耕还林工程 4 种类型造林的净碳汇进行评估。[结果] 2000—2019 年, 中南及华东地区退耕还林工程的生态林、经济林、用材林固碳和薪炭林减排总计 648.43 Tg(以 CO<sub>2</sub> 计), 同期工程带来温室气体泄漏 96.43 Tg, 抵消总固碳减排的 14.87%; 不同造林类型的温室气体泄漏中, 经济林最多, 为 57.69 Tg, 抵消其固碳效应的 73.95%; 温室气体泄漏分别抵消生态林、用材林和薪炭林固碳减排的 5.75%, 16.59% 和 27.05%。工程平均单位面积净碳汇为 4.52 t/(hm<sup>2</sup>·a)(以 CO<sub>2</sub> 计); 各省区在 2.85~5.74 t/(hm<sup>2</sup>·a) 之间; 生态林为 5.52~8.89 t/(hm<sup>2</sup>·a), 经济林为 0.72~1.56 t/(hm<sup>2</sup>·a), 用材林为 0.8~1.61 t/(hm<sup>2</sup>·a), 薪炭林为 3.18~5.99 t/(hm<sup>2</sup>·a)。[结论] 中南及华东地区退耕还林工程取得了巨大的净固碳减排效益, 生态林固碳增汇效果明显, 净减排效益最显著, 生物质能源替代化石能源燃烧减排的效益非常可观。作为最大的温室气体泄漏因素, 化肥相关的温室气体排放对生态工程碳汇的抵消影响不容忽视。

**关键词:** 退耕还林工程; 温室气体泄漏; 净碳汇; 生态林; 经济林; 用材林; 薪炭林

文献标识码: A

文章编号: 1000-288X(2022)05-0337-11

中图分类号: X171.4, S721

**文献参数:** 于天任, 逯非, 杨师帅, 等. 退耕还林工程不同造林类型温室气体收支与净碳汇[J]. 水土保持通报, 2022, 42(5): 337-347. DOI: 10.13961/j.cnki.stbctb.2022.05.041; Yu Tianren, Lu Fei, Yang Shishuai, et al. Greenhouse gas budget and net carbon sequestration of different afforestation types used in grain for green project [J]. Bulletin of Soil and Water Conservation, 2022, 42(5): 337-347.

## Greenhouse Gas Budget and Net Carbon Sequestration of Different Afforestation Types Used in Grain for Green Project

—A Case Study in Central South and East China

Yu Tianren<sup>1,2</sup>, Lu Fei<sup>1,3,4</sup>, Yang Shishuai<sup>1,2</sup>, Zhang Lu<sup>1</sup>,

Huang Binbin<sup>1,2</sup>, Wang Xiaoke<sup>1,4</sup>, Xian Chaofan<sup>1</sup>, Meng Ling<sup>1</sup>, Ouyang Zhiyun<sup>1</sup>

(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; 3.Beijing-Tianjin-Hebei Urban Megaregion National Observation and Research Station for

Eco-environmental Change, Beijing 100085, China; 4.Joint Center for Global Change Studies, Beijing 100875, China)

收稿日期: 2022-03-01

修回日期: 2022-07-12

资助项目: 国家自然科学基金面上项目“我国农林生态系统温室气体收支管理的净减排与可行性研究”(71874182, 72174192, 42101290); 中国科学院生态环境研究中心碳达峰碳中和生态环境技术专项(RCEES-TDZ-2021-8, RCEES-TDZ-2021-16)

第一作者: 于天任(1997—), 男(汉族), 山东省济南市人, 博士研究生, 研究方向为陆地生态系统温室气体收支与管理。Email: tryu\_st@cees.ac.cn.

通信作者: 逯非(1981—), 男(汉族), 北京市人, 博士, 研究员, 主要从事陆地生态系统温室气体收支与管理方面的研究。Email: feilu@cees.ac.cn.

**Abstract:** [Objective] The offsetting effects of greenhouse gas (GHG) leakage on carbon sequestration and GHG mitigation in the grain for green project (GGP) were analyzed in order to clarify the difference and spatial pattern of actual GHG sequestration and mitigation contribution of different afforestation types to GHG sequestration and mitigation. [Methods] A method for the GHG budget accounting of different types of afforestation (including ecological forest, economic forest, timber forest, and firewood forest) under GGP (i.e., carbon accounting and net mitigation-GGP) was established. Carbon sequestration effects of afforestation were estimated for selected typical tree species in vegetation and soil. Carbon sequestration of post-logging products and mitigation of fossil fuel substitution by biomass energy were determined. GHG leakage caused by afforestation and management was also determined. The net carbon sequestration of the four afforestation types in GGP in Central South and East China was then evaluated. [Results] The carbon sequestration of ecological forest, economic forest, and timber forest, and the mitigation of firewood forest amounted to a total of 648.43 Tg (CO<sub>2</sub>) during the period from 2000 to 2019 in Central South and East China. Additionally, the total GHG leakage of GGP reached 96.43 Tg, which could offset 14.87% of the total carbon sequestration and mitigation. The economic forest produced the largest GHG leakage, which reached 57.69 Tg, offsetting 73.95% of its carbon sequestration. The GHG leakage offset 5.75%, 16.59%, and 27.05% of the carbon sequestration or mitigation effect of ecological forest, timber forest, and firewood forest, respectively. The average net carbon sequestration per unit area of GGP in this region was 4.52 t/(ha·yr) (CO<sub>2</sub>), ranging from 2.85 t/(ha·yr) in Guangxi to 5.74 t/(ha·yr) in Anhui. The net mitigation rate of GGP was 5.52~8.89 t/(ha·yr) for ecological forest, 0.72~1.56 t/(ha·yr) for economic forest, 0.8~1.61 t/(ha·yr) for timber forest, and 3.18~5.99 t/ha/yr for firewood forest. [Conclusion] GGP in Central South and East China has achieved huge net carbon sequestration and emission mitigation benefits. Ecological forest had an obvious effect on carbon sequestration, and the net mitigation benefit was the most significant. Biomass energy could replace fossil fuel combustion and its mitigation benefit was also very considerable. The influence of fertilizer-related GHG leakage on ecological engineering carbon sequestration cannot be ignored. Fertilizer-related GHG emissions and their offsetting effect on carbon sequestration in the ecological project were nonnegligible because it was the largest GHG emission factor.

**Keywords:** grain for green project; greenhouse gas leakage; net carbon sequestration; ecological forest; economic forest; timber forest; firewood forest

全球气候变化是人类社会在 21 世纪面临的最严峻考验之一<sup>[1]</sup>,已经成为众多专家和学者探讨的热点话题。作为世界上重要的发展中国家和温室气体排放国,中国积极致力于应对全球气候变化。2020 年 9 月,中国政府表示,中国将争取在 2060 年前实现碳中和,并在同年 12 月气候峰会上进一步宣布到 2030 年,森林蓄积量将比 2005 年增加  $6.00 \times 10^9 \text{ m}^3$ 。为了早日兑现承诺,中国在各个领域大力推行固碳减排政策。其中在林业方面,增加森林面积、提高森林质量,提升生态系统碳汇增量,将为实现中国碳达峰碳中和目标、维护全球生态安全做出更大贡献。《京都议定书》也认可造林再造林为大气 CO<sub>2</sub> 减排途径,是提高森林固碳能力的低成本有效策略<sup>[2]</sup>。

中国的造林速率位居世界首位,对全球的碳固持做出了重大贡献。据第九次全国森林资源清查数据显示,中国森林植被总碳储量  $9.19 \times 10^9 \text{ t}$ (以 C 计),

较第八次全国森林资源清查结果增加了  $7.59 \times 10^8 \text{ t}$ ,中国的造林发挥了重要作用。近几十年来,中国开展了退耕还林工程、三北防护林体系建设和长江流域防护林建设等一系列林业重大生态修复项目<sup>[3]</sup>,以实现生态保护与恢复,工程的实施可能大幅提升生态系统碳汇,在碳中和实现中发挥重要作用。有研究表明,2001—2010 年期间,重大生态修复工程区每年的总碳汇为 132 Tg,对中国的温室气体减排做出了重大贡献<sup>[4]</sup>。因此,中国的国家生态修复工程的实施在数量上可以成为中国减缓气候变化战略的重要组成部分,应该继续受到高度重视。

退耕还林工程于 2000 年正式启动,作为中国重大生态修复工程之一,无论是从参与人数,还是财政预算规模和政府人力投入上看,都首屈一指<sup>[5-6]</sup>。自 2000—2018 年,退耕还林工程累计营造生态林  $1.84 \times 10^7 \text{ hm}^2$ ,经济林  $4.07 \times 10^6 \text{ hm}^2$ ,用材林  $3.51 \times 10^6 \text{ hm}^2$ ,薪炭林  $2.07 \times 10^5 \text{ hm}^2$ <sup>[7]</sup>,总投入超过

5.00×10<sup>11</sup>元。有研究表明,退耕还林工程区 0—100 cm 土壤平均固碳速率为 0.75 t/(hm<sup>2</sup>·a)<sup>[8]</sup>(以 CO<sub>2</sub> 计);也有学者在全国尺度上评估了 2000—2010 年退耕还林工程的总固碳量, Lu 等的核算结果为 270.8 Tg<sup>[4]</sup>, 刘博杰等<sup>[9]</sup>的核算结果为 222.17 Tg, 证实退耕还林工程对中国温室气体减排和减缓全球气候变暖做出了巨大的固碳贡献。上述研究往往仅基于生态系统类型变化或造林面积核算生态系统植被和土壤的碳汇和净碳汇<sup>[4, 8-9]</sup>, 目前针对退耕还林工程不同或特定造林类型开展的温室气体收支研究也较少。然而在工程实施中, 需要综合考虑自然地理特征、资源禀赋、经济效益及群众参与程度等因素, 退耕还林工程也产生了不同类型的造林模式, 即生态林、经济林、用材林和薪炭林<sup>[7, 10]</sup>。不同类型的造林涉及的化石燃料及其产品的投入及相关温室气体排放可能存在较大差异<sup>[9]</sup>, 涉及的主要固碳—减排过程也存在生态系统固碳、伐后产品固碳和生物质燃料替代化石能源减排等不同类型, 也就造成了不同造林类型可能具有不同的温室气体收支过程, 其对减缓全球变暖和实现碳中和的贡献有待分析。

本研究基于生命周期评估, 综合前人的研究方法及成果, 构建了退耕还林工程的碳核算与净减排(carbon accounting and net mitigation-grain for green, CANM-GGP), 以中国水热条件较好、退耕还林工程具有一定规模和模式较为多样化的中南及华东地区为例, 根据不同的造林类型的温室气体收支过程, 探究 2000—2019 年退耕还林工程温室气体收支情况和温室气体泄漏对工程固碳减排的抵消作用, 并对比分析了退耕还林工程的净碳汇在不同造林模式间的差异和空间格局, 以期为今后通过生态工程开展温室气体增汇减排行动, 和在退耕还林工程中遴选最优固碳途径提供科学依据。

## 1 研究方法

### 1.1 研究区域和时间尺度

退耕还林工程共划分成中南及华东、西北、西南、东北和华北 5 个地理区, 其中, 中南及华东地区大部分分布于湿润区和亚热带, 水热条件较好(表 1), 退耕还林模式多样(表 2)<sup>[10]</sup>。因此, 本研究对包括安徽、江西、河南、湖北、湖南、广西和海南 7 省(区)的中南及华东地区按 4 个造林类型, 即生态林、经济林、用材林和薪炭林进行温室气体收支核算(本研究均以 CO<sub>2</sub> 计)。

综合工程的实际开展情况、数据信息可获得性、树木生长周期和计算方法的简便性等因素, 本研究的时间尺度选择了 2000—2019 年。

表 1 中南及华东地区水热条件

省区	年平均气温/℃	年降水/mm	来源
安徽	16.2~17	935.8	[11]
江西	19	1 896.8	[12]
河南	15.6	529.1	[13—14]
湖北	16.8	893.5	[14—15]
湖南	16~19	1 498.5	[14]
广西	21.1	1 516.7	[16—17]
海南	24.7	1 594.4	[14—18]

表 2 2000—2019 年中南及华东地区退耕还林工程各造林类型面积

造林类型	累计造林面积/hm <sup>2</sup>
生态林	3 448 066
经济林	835 381
用材林	1 767 989
薪炭林	45 785

### 1.2 退耕还林造林净碳汇核算方法

为方便核算退耕还林工程不同造林模式的净碳汇, 综合文献报道的实地造林规模和示范成效以及数据可获得性等因素<sup>[10]</sup>, 本研究为 4 种造林模式各选取了两种代表性树种(表 3), 以进行对比并提高核算结果的准确性。针对不同造林模式, 采用 CANM-GPP 方法估算其碳汇和能源替代减排, 以及工程过程中各环节温室气体排放, 并得到退耕还林工程造林净碳汇, 计算方法见公式(1)<sup>[9]</sup>:

$$NCS = CSC - GHG \quad (1)$$

式中: NCS 为造林的净碳汇(Tg, 以 CO<sub>2</sub> 计); CSC 为退耕还林碳汇总量(Tg); GHG 为造林碳排放总量(Tg)。

### 1.3 总碳汇

本研究对 2000—2019 年期间退耕还林工程的总碳汇量进行了计算, 包括植被碳汇 CSCA、土壤碳汇 CSCS、木制产品碳汇 CSH 和薪材替代化石燃料燃烧减排 MFS4 个部分。生态林和经济林核算植被和土壤碳汇, 用材林核算土壤和木制产品碳汇, 薪炭林核算土壤碳汇和薪材替代化石燃料燃烧减排(表 3)。

1.3.1 植被碳汇 基于各省份每年累计新造林面积和人工幼龄林固碳率, 计算各省份每年新造林固碳量〔见公式(2)〕<sup>[9]</sup>:

$$CSCA_{it} = CSRA_{it} \times ASA_{it} \times 10^{-6} \quad (2)$$

式中: CSCA<sub>it</sub> 为 i 省于第 t 年新造林固碳量(Tg); CSRA<sub>it</sub> 为 i 省新造林固碳速率[t/(hm<sup>2</sup>·a)]<sup>[19-20]</sup>; ASA<sub>it</sub> 为 i 省于第 t 年累计新造林面积(hm<sup>2</sup>)。

表 3 不同类型退耕还林工程造林的温室气体收支过程

项目	温室气体收支过程	生态林	经济林	用材林	薪炭林
代表性树种		刺槐/枫香	核桃/板栗	日本落叶松/毛竹	麻栎/油松
碳汇或减排	植被碳汇(CO <sub>2</sub> )	•	•		
	土壤碳汇	•	•	•	•
	木制产品碳汇			•	
	薪材替代化石燃料燃烧减排				•
碳排放	整地	•	•	•	•
	除草	•	•	•	•
	苗木运输	•	•	•	•
	灌溉	•	•	•	•
	施肥(CO <sub>2</sub> 和N <sub>2</sub> O)	•	•	•	•
	病虫害防治	•	•	•	•
	幼林抚育	•	•	•	•
	采伐			•	•
	基础设施建设	•	•	•	•

注:①温室气体收支核算年限为 20 a; ②•表示存在此过程。

1.3.2 土壤碳汇 基于土壤固碳速率和工程区累计造林面积,计算土壤保持固碳量[见公式(3)]<sup>[9]</sup>:

$$CSCS_{it} = CSRF \times ASA_{it} \times \alpha \times 10^{-6} \quad (3)$$

式中:  $CSCS_{it}$  为  $i$  省于第  $t$  年新造林固碳量 (Tg);  $CSRF$  为土壤固碳速率 [ $t/(hm^2 \cdot a)$ ]<sup>[8]</sup>;  $ASA_{it}$  为  $i$  省于第  $t$  年累计新造林面积 ( $hm^2$ );  $\alpha$  为固碳系数<sup>[21]</sup>。

1.3.3 木制产品碳汇 采伐后木制产品碳汇的计算方法见公式(4)<sup>[22]</sup>:

$$CSH = CS - EDA \quad (4)$$

式中:  $CSH$  为采伐后木制产品碳汇 (Tg);  $CS$  为木制产品碳贮量 (Tg);  $EDA$  为采伐后木质产品衰减排放量 (Tg)。

1.3.4 薪材替代化石燃料燃烧减排 薪材替代化石燃料燃烧减排的计算方法见公式(5)<sup>[23]</sup>:

$$MFS = EF_{CC} \times NCV_C \times BPV / 2 \times 10^{-6} \quad (5)$$

式中:  $MFS$  为薪材替代化石燃料燃烧减排 (Tg);  $EF_{CC}$  为煤炭燃烧的温室气体排放因子 ( $t/kJ$ )<sup>[23-24]</sup>;  $NCV_C$  为煤的基位发热值 ( $kJ/t$ )<sup>[25]</sup>;  $BPV$  为薪材产量 ( $m^3$ ); 公式中 2 表示 2  $m^3$  薪材可以替代 1 t 煤<sup>[26]</sup>。

#### 1.4 总排放

退耕还林工程产生排放的造林活动包括整地 (CCS)、除草 (CCHA)、苗木运输 (CCTS)、灌溉 (CCIF)、施肥 (CCF)、病虫害防治 (CCP)、幼林抚育 (CCHT)、采伐 (EDH) 和基础设施建设 (CCB)。本研究对全部造林活动产生的碳排放进行了核算。生态林和经济林核算整地、除草、苗木运输、灌溉、施肥、病虫害防治、幼林抚育和基础设施建设的排放,用材林和薪炭林核算整地、除草、苗木运输、灌溉、施肥、病虫害防治、幼林抚育、采伐和基础设施建设的排放(表 3)。整地、除草、苗木运输、病虫害防治、幼林

抚育、采伐和基础设施建设活动设定 1 次/a,持续 20 a;不同造林类型灌溉和施肥活动发生的时间年限存在差异,具体表现为灌溉活动持续 20 a,生态林 1 次/a,经济林 3~4 次/a,用材林 3 次/a,薪炭林 1 次/a;施肥活动持续 20 a,生态林每年施底肥,经济林每年施基肥加追肥,用材林施肥 2 次/a,薪炭林每年施基肥,追肥 1~3 次/a。

1.4.1 整地 清理整地碳排放的计算方法见公式(6)<sup>[26]</sup>:

$$CCS_t = EF_D \times UDS \times SA_t \times 10^{-9} \quad (6)$$

式中:  $CCS_t$  为第  $t$  年清理整地柴油消耗碳排放 (Tg);  $EF_D$  为柴油的碳排放参数 ( $t/t$ ,以  $CO_2$  计,下同)<sup>[27]</sup>;  $UDS$  为机械清理整地单位面积耗油量 ( $kg/hm^2$ )<sup>[28]</sup>;  $SA_t$  为第  $t$  年工程区造林面积 ( $hm^2$ )<sup>[7]</sup>。

1.4.2 除草 常用的除草剂为 2,4-D 丁酯,生产除草剂的碳排放计算方法见公式(7)<sup>[26]</sup>:

$$CCHA_t = EF_{HA} \times SA_t \times AR_{HA} \times 10^{-6} \quad (7)$$

式中:  $CCHA_t$  为第  $t$  年生产除草剂 2,4-D 丁酯产生的碳排放 (Tg);  $EF_{HA}$  为 2,4-D 丁酯有效成分的碳排放参数 ( $t/t$ )<sup>[29]</sup>;  $AR_{HA}$  为施用强度 ( $t/hm^2$ )。

运输除草剂的碳排放的计算方法见公式(8)<sup>[26]</sup>:

$$CCTHA_t = EF_D \times SA_t \times \beta \times 10^{-6} \quad (8)$$

式中:  $CCTHA_t$  为第  $t$  年运输除草剂的化石燃料碳排放 (Tg);  $EF_D$  为柴油的碳排放系数 ( $t/t$ );  $SA_t$  为第  $t$  年工程区造林面积 ( $hm^2$ );  $\beta$  为单位面积运输除草剂的化石燃料消耗量 ( $t/hm^2$ )。

1.4.3 苗木运输 苗木运输的碳排放计算方法见公式(9)<sup>[26]</sup>:

$$CCTS_t = EF_D \times SA_t \times \gamma \times 10^{-6} \quad (9)$$

式中:  $CCTST_t$  为第  $t$  年苗木运输产生的碳排放(Tg);  $EF_D$  为柴油的碳排放参数(t/t);  $SA_t$  为第  $t$  年工程区造林面积( $hm^2$ );  $\gamma$  为单位面积运输苗木的化石燃料消耗量( $t/hm^2$ )<sup>[30]</sup>。

1.4.4 灌溉 造林灌溉的碳排放计算方法见公式(10)<sup>[26]</sup>:

$$CCIF_t = EF_I \times SA_t \times \lambda \times 10^{-9} \quad (10)$$

式中:  $CCIF_t$  为第  $t$  年灌溉产生的碳排放(Tg);  $EF_I$  为灌溉碳排放参数(kg/t);  $SA_t$  为第  $t$  年营造林面积( $hm^2$ );  $\lambda$  为单位面积灌溉耗水量( $t/hm^2$ )<sup>[31-32]</sup>。

1.4.5 施肥 造林需要施加基肥和追肥<sup>[33]</sup>。生产化肥的碳排放计算方法见公式(11)<sup>[26]</sup>:

$$CCF_t = FAC \times QFC_t \times \sum EF_{Fi} \times 10^{-6} \quad (11)$$

式中:  $CCF_t$  为第  $t$  年生产化肥碳排放(Tg);  $FAC$  为肥料中各纯养分占实物质量百分数;  $QFC_t$  为第  $t$  年消耗化肥重量(t);  $EF_{Fi}$  为生产第  $i$  种肥料养分的碳排放参数<sup>[29]</sup>。

运输肥料的碳排放  $CCTF_t$  的计算方法与  $CCTHA_t$  相同,此时需要运输的物质量为  $QFC_t$ 。

施含氮肥料还会导致造林地  $N_2O$  排放,计算方法见公式(12)<sup>[26]</sup>:

$$CCN_t = QFC_t \times EF_N \times TN\% \times 44/28 \times 298 \times 10^{-6} \quad (12)$$

式中:  $CCN_t$  为造林地施含氮肥料引起的  $N_2O$  排在 100 a 时间尺度上的全球增温潜势,按 100 a 时间尺度的温室效应折算为  $CO_2$ -C 当量(Tg);  $EF_N$  为  $N_2O$  直接排放系数[t/t,以  $(N_2O-N)/N$  计]<sup>[34]</sup>;  $TN\%$  为肥料中含氮素百分比;  $44/28$  为  $N_2O$  与  $N_2O-N$  的换算系数;  $298$  为  $N_2O$  的全球增温潜势(GWP)。

1.4.6 病虫害防治 常见林业杀虫剂包括甲氰菊酯、敌敌畏、阿维菌素,吡虫啉和达螨灵,本研究设每种杀虫剂在森林病虫害防治中均使用。生产杀虫剂碳排放的计算方法见公式(13)<sup>[26]</sup>:

$$CCP_t = \sum EF_{Pi} \times QP_{it} \times PA_i \times 10^{-6} \quad (13)$$

式中:  $CCP_t$  为第  $t$  年生产杀虫剂产生的碳排放(Tg);  $EF_{Pi}$  为第  $i$  种杀虫剂的碳排放参数(t/t,以 C/有效成分计)<sup>[29]</sup>;  $QP_{it}$  为第  $i$  种杀虫剂商品(原液)于第  $t$  年的消耗量(t);  $PA_i$  为第  $i$  种杀虫剂的有效成分百分数。

运输杀虫剂的碳排放  $CCTP_t$  的计算方法与  $CCTF_t$  相同,其中需要运输的杀虫剂重量为 5 种杀虫剂商品(原液)之和,即  $\sum QP_{it}$ 。

1.4.7 幼林抚育 幼林抚育使用的化学除草剂通常为氟乐灵。生产氟乐灵碳排放的计算方法见公式(14)<sup>[26]</sup>:

$$CCHT_t = EF_{HT} \times QHT_t \times 10^{-6} \quad (14)$$

式中:  $CCHT_t$  为第  $t$  年生产氟乐灵产生的碳排放

(Tg);  $EF_{HT}$  为生产氟乐灵的碳排放参数(t/t)<sup>[29]</sup>;  $QHT_t$  为第  $t$  年幼林抚育氟乐灵有效成分的消耗量(t)。

运输幼林抚育除草剂消耗柴油的碳排放  $CCTHT_t$ ,计算方法与  $CCTP_t$  相同,其中需要运输的物质量为  $(QHT_t/HTA)$ ,  $HTA$  为氟乐灵有效成分百分比<sup>[35]</sup>。

1.4.8 采伐 采伐过程排放的计算方法见公式(15)<sup>[22]</sup>:

$$EDH = (EF_{FE} + EF_{SKm} \times PS_{K_m} + EF_{LT}) \times \epsilon \times ASA_t \times 10^{-9} \quad (15)$$

式中:  $EDH$  为采伐过程排放(Tg);  $EF_{FE}$ ,  $EF_{SKm}$  和  $EF_{LT}$  分别为采伐、集材方式和运材的温室气体排放因子(kg/ $m^3$ );  $PS_{K_m}$  为第  $m$  种集材方式的比例;  $\epsilon$  为木材生产潜力 [ $m^3/(hm^2 \cdot a)$ ]<sup>[36]</sup>;  $ASA_t$  为第  $t$  年累计新造用材林面积( $hm^2$ )<sup>[7]</sup>。

1.4.9 基础设施建设 基础设施(林区道路、护林宣传牌等)建设的碳排放计算方法见公式(16)<sup>[26]</sup>:

$$CCB_t = EF_B \times SA_t \times 10^{-6} \quad (16)$$

式中:  $CCB_t$  为第  $t$  年基础建设碳排放(Tg);  $EF_B$  为碳排放参数( $t/hm^2$ )<sup>[30,37-40]</sup>;  $SA_t$  为第  $t$  年新造林面积( $hm^2$ )。

## 1.5 数据来源

本研究使用的各省退耕还林工程造林面积数据来自中国 2000—2019 年的林业年鉴、林业统计年鉴资料等统计与宏观数据<sup>[7]</sup>,不同类型造林管理中各个环节的资源、能源投入及固碳和排放参数等数据,主要通过文献调研和数据积累得到(表 4)。

表 4 人类活动消耗的资源及碳排放系数

资源	活动	碳排放系数	来源
柴油	整地、运输	0.86(t/t,以 C 计)	[27]
2,4-D 丁酯	除草	2.85(t/t,以 C 计)	[29]
水	灌溉	0.02(t/t,以 C 计)	[31,32]
		2.12(t/t,以 C/N 计)	
化肥	施肥 <sup>①</sup>	0.64(t/t,以 $C/P_2O_5$ 计)	[29]
		0.18(t/t,以 $C/K_2O$ 计)	
杀虫剂	病虫害防治	17.28(t/t,以 C 计)	[29]
氟乐灵	幼林抚育	6.53(t/t,以 C 计)	[29]
建材	基础设施建设	0.17( $t/hm^2$ ,以 C 计)	[30,37-40]

注:①复合肥(折纯量)按氮磷钾肥各占 1/3 估算。

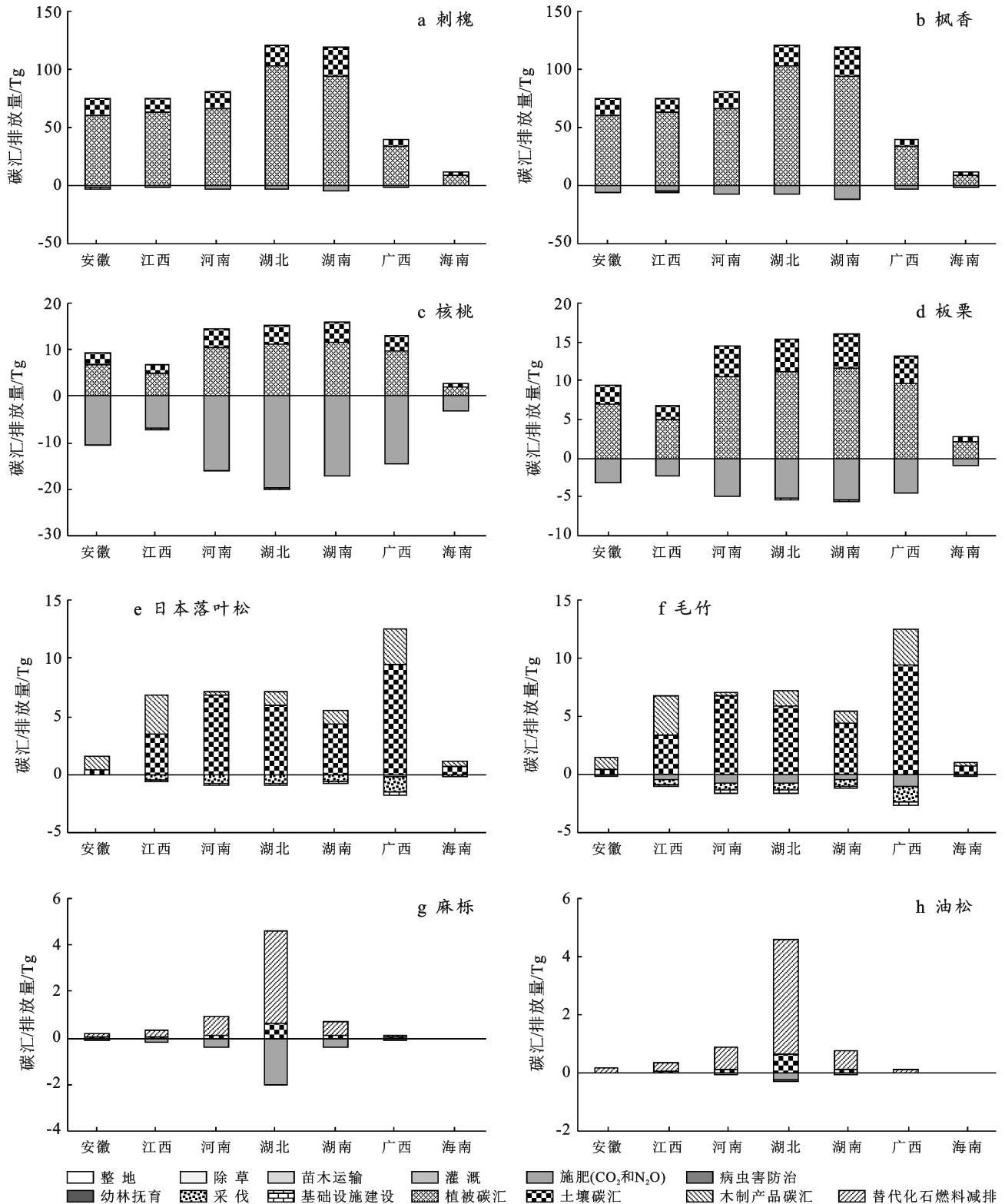
## 2 结果与分析

### 2.1 不同造林类型碳收支

在生态林造林类型中,选取刺槐和枫香作为典型树种。生态林的碳汇由植被和土壤碳汇两部分构成(图 1),植被平均固碳速率为  $6.2 t/(hm^2 \cdot a)$ ,土壤平

均固碳速率为 1.37 t/(hm<sup>2</sup> · a); 植被碳汇占 81.9%, 土壤碳汇占 18.1%; 平均单位面积固碳速率为 7.57 t/(hm<sup>2</sup> · a)。而在工程碳排放方面, 施肥引起了最多的排放, 占 89.3%, 平均单位面积排放速率为 0.44

t/(hm<sup>2</sup> · a)。两种生态林的碳收支情况相似, 平均总碳汇为 522.04 Tg, 平均总排放为 30 Tg, 碳汇是排放的 17.4 倍, 说明营造生态林能够获得较大的净碳汇(图 1a, 图 1b)。



注: 图中纵坐标轴正值表示碳汇量, 负值表示排放量(以 CO<sub>2</sub> 计)。

图 1 中国中南及华东地区 7 省(区)退耕还林工程各造林类型碳收支情况

在经济林造林类型中,选取核桃和板栗作为典型树种。经济林的碳汇由植被和土壤碳汇两部分构成,植被平均固碳速率为 $3.4 \text{ t}/(\text{hm}^2 \cdot \text{a})$ ,土壤平均固碳速率为 $1.27 \text{ t}/(\text{hm}^2 \cdot \text{a})$ ;植被碳汇占 $72.84\%$ ,土壤碳汇占 $27.16\%$ ;平均单位面积固碳速率为 $4.67 \text{ t}/(\text{hm}^2 \cdot \text{a})$ 。而在工程碳排放方面,施肥引起了最多的排放,占 $98.47\%$ ,平均单位面积排放速率为 $3.45 \text{ t}/(\text{hm}^2 \cdot \text{a})$ 。在这两种经济林中,营造核桃产生的排放远远高于板栗,平均总碳汇为 $78.01 \text{ Tg}$ ,平均总排放为 $57.69 \text{ Tg}$ ,碳汇是排放的 $1.35$ 倍,说明营造经济林产生碳汇的同时会带来较多的排放(图1c,图1d)。

在用材林造林类型中,选取日本落叶松和毛竹作为典型树种。用材林的碳汇由土壤和木制产品碳汇两部分构成,土壤平均固碳速率为 $0.88 \text{ t}/(\text{hm}^2 \cdot \text{a})$ ,木制产品平均固碳速率为 $0.29 \text{ t}/(\text{hm}^2 \cdot \text{a})$ ;土壤碳汇占 $74.93\%$ ,木制产品碳汇占 $25.07\%$ ;平均单位面积固碳速率为 $1.17 \text{ t}/(\text{hm}^2 \cdot \text{a})$ 。而在工程碳排放方面,采伐过程引起了最多的排放,占 $57.52\%$ ,平均单位面积排放速率为 $0.19 \text{ t}/(\text{hm}^2 \cdot \text{a})$ 。两种用材林都是碳汇远大于排放,平均总碳汇为 $41.54 \text{ Tg}$ ,平均总排放为 $6.89 \text{ Tg}$ ,碳汇是排放的 $6.03$ 倍,说明营造用材林能够获得较大的净碳汇(图1e,图1f)。

在薪炭林造林类型中,选取麻栎和油松作为典型树种。薪炭林的碳汇由土壤碳汇和替代化石燃料燃

烧减排两部分构成,土壤平均固碳速率为 $1.02 \text{ t}/(\text{hm}^2 \cdot \text{a})$ ,替代化石燃料燃烧平均减排速率为 $6.46 \text{ t}/(\text{hm}^2 \cdot \text{a})$ ;土壤碳汇占 $13.57\%$ ,替代化石燃料燃烧减排占 $86.43\%$ ;平均单位面积固碳速率为 $7.47 \text{ t}/(\text{hm}^2 \cdot \text{a})$ 。而在工程碳排放方面,施肥引起了最多的排放,占 $95.56\%$ ,平均单位面积排放速率为 $2.02 \text{ t}/(\text{hm}^2 \cdot \text{a})$ 。在这两种薪炭林中,营造麻栎产生的排放虽然远远高于油松,但碳汇仍然大于排放,平均总碳汇为 $6.84 \text{ Tg}$ ,平均总排放为 $1.85 \text{ Tg}$ ,碳汇是排放的 $3.7$ 倍,说明营造薪炭林能够获得碳汇效益(图1g,图1h)。

各造林类型中,单位面积固碳减排效益从大到小依次为:生态林>薪炭林>经济林>用材林,生态林最大,是用材林的 $6.47$ 倍。单位面积温室气体泄漏从大到小依次为:经济林>薪炭林>生态林>用材林,经济林最大,是用材林的 $18.16$ 倍。

## 2.2 不同造林类型温室气体泄漏对固碳减排的抵消作用及工程净碳汇

2000—2019年,中南及华东地区退耕还林工程各造林类型碳排放抵消率分别为:经济林 $73.95\%$ ;薪炭林 $27.05\%$ ;用材林 $16.59\%$ ;生态林最低,为 $5.75\%$ (图2a)。各省区排放抵消率分别为:广西 $21.27\%$ ,海南 $19.55\%$ ,河南 $16.48\%$ ,湖南 $14.76\%$ ,湖北 $14.05\%$ ,安徽 $13.31\%$ ,江西 $10.54\%$ (图2b)。

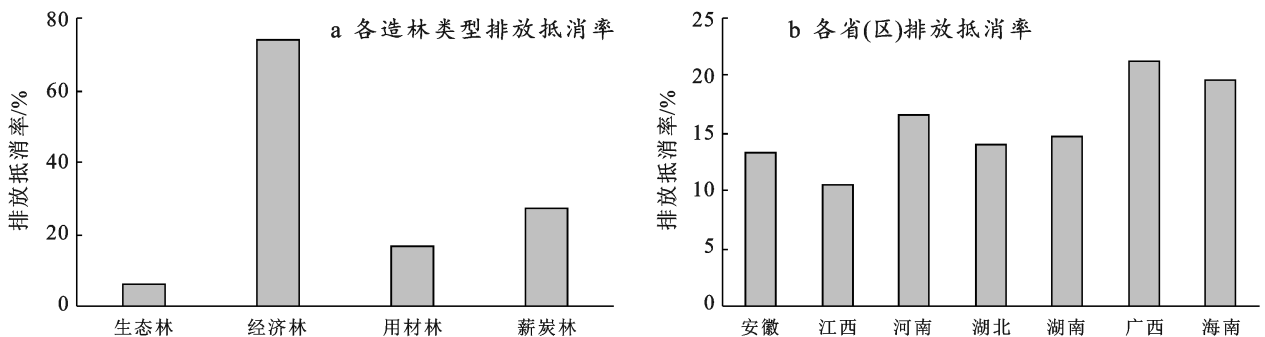
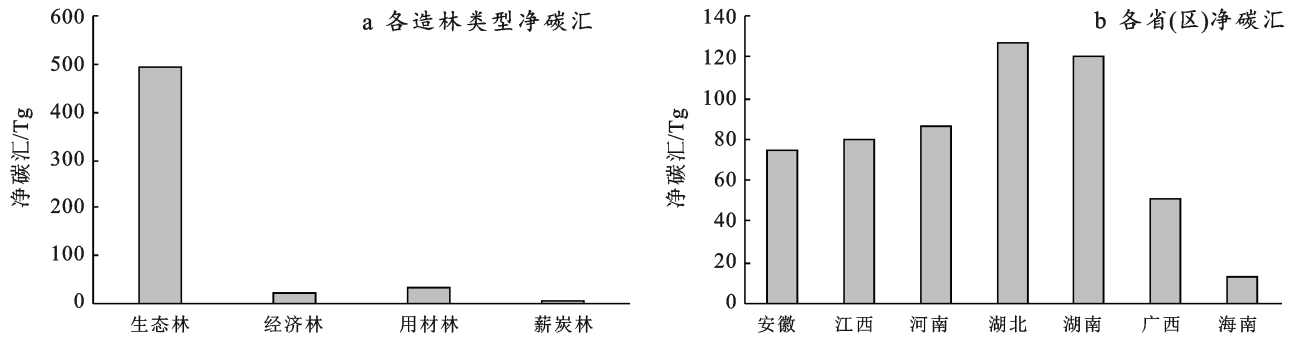


图2 各造林类型碳排放抵消率和各省排放抵消率

工程净碳汇总量(以 $\text{CO}_2$ 的量计)为 $552 \text{ Tg}$ 。各造林类型净碳汇分别为:生态林 $492.04 \text{ Tg}$ ,占 $89.14\%$ ;用材林 $34.65 \text{ Tg}$ ,占 $6.28\%$ ;经济林 $20.32 \text{ Tg}$ ,占 $3.68\%$ ;薪炭林最少,为 $4.99 \text{ Tg}$ ,占 $0.9\%$ (图3a)。各省区净碳汇分别为:湖北 $126.39 \text{ Tg}$ ,湖南 $120.33 \text{ Tg}$ ,河南 $86.21 \text{ Tg}$ ,江西 $79.73 \text{ Tg}$ ,安徽

$75.17 \text{ Tg}$ ,广西 $51.66 \text{ Tg}$ ,海南 $12.51 \text{ Tg}$ (图3b)。工程单位面积净固碳速率 $[\text{t}/(\text{hm}^2 \cdot \text{a})]$ 为 $4.53$ 。在各造林类型中,生态林最大, $7.14$ ;用材林最小, $0.98$ 。各省区单位面积净固碳速率分别为:安徽 $5.74$ ,江西 $5.55$ ,湖北 $5.27$ ,湖南 $4.42$ ,河南 $3.95$ ,海南 $3.77$ ,广西 $2.85$ (表5)。

图3 各造林类型净碳汇和各省净碳汇(以 CO<sub>2</sub> 计)表5 各省(区)各造林类型单位面积净固碳速率(以 CO<sub>2</sub> 计)

省(区)	固碳速率/(t · hm <sup>-2</sup> · a <sup>-1</sup> )			
	生态林	经济林	用材林	薪炭林
安徽	6.96	1.28	1.61	3.85
江西	8.25	1.56	1.38	3.95
河南	6.64	1.29	0.8	5.55
湖北	8.89	0.72	0.87	5.99
湖南	5.82	1.43	0.92	4.32
广西	7.84	1.3	0.97	3.18
海南	5.52	1.49	1.14	—
平均	7.14	1.22	0.98	5.45

### 3 结论

(1) 薪炭林与生态林的单位面积固碳减排效益差别很小,薪炭林可能具有较大的增汇减排潜力。其他学者的研究发现薪炭林的单位面积减排速率为 3.78~14.72 t/(hm<sup>2</sup> · a)<sup>[41-43]</sup>,本研究的估算结果为 7.47 t/(hm<sup>2</sup> · a),也在一定程度上证实了生物质能源替代化石能源燃烧减排的效益非常可观。

(2) 经济林产生的单位面积温室气体泄漏最大,培育经济作物可能需要施加相对较多的化肥,而肥料生产的碳成本以及含氮化肥施用产生的排放对碳汇的抵消作用较强。刘博杰等<sup>[26]</sup>发现天保工程化肥相关的温室气体泄漏占总排放量的 34.9%,Khanali 等<sup>[44]</sup>也发现营造核桃经济林的温室气体排放主要与化肥和化石燃料用量有关,这些研究反映出化肥相关的温室气体泄漏对生态工程碳汇的影响不容忽视。

(3) 生态林的植被和土壤碳汇对工程净减排增汇的贡献最大。国内外学者研究显示生态林的单位面积净碳汇速率为 4.03~18.07 t/(hm<sup>2</sup> · a)<sup>[45-47]</sup>,本研究的估算结果为 7.14 t/(hm<sup>2</sup> · a),说明生态林固碳增汇效果明显,净减排效益显著。

### 4 讨论

生态工程的固碳减排效益一直是学术界的研究

热点,生态学家对此开展了大量的评估研究<sup>[48-52]</sup>,不同研究间因研究对象、时间尺度、工程区界定、核算方法间的差异<sup>[53-57]</sup>,导致评估结果差距较大(表6)。从表格中对比国内外案例能够发现,某些工程如京津风沙源治理工程,空间尺度和总固碳量很大,但单位面积平均减排增汇速率相对较低;而贵州省贞丰县林业碳汇项目的空间尺度和总固碳量较小,单位面积平均减排增汇速率却最高,这与工程的实际造林模式有密切联系。以上项目对温室气体泄漏对固碳的抵消作用的探讨不多,相比之下,本研究的退耕还林工程温室气体泄漏对固碳的抵消作用较大。总而言之,本研究评估得到的工程固碳量最大,单位面积平均减排增汇速率较高,虽然温室气体泄漏对固碳的抵消率最大,还是能够取得较理想的固碳效益。此外,1970—2019年,中国碳排放量从 7.70 × 10<sup>8</sup> t 增长到 1.02 × 10<sup>10</sup> t,本研究计算得出工程年均净减排量为 2.80 × 10<sup>7</sup> t,能够抵消同期中南及华东地区工程覆盖县年均碳排放的 2.29%<sup>[58]</sup>,能够抵消同期该地区工程所在省份年均碳排放的 2%<sup>[59-62]</sup>。在中南及华东地区实施的退耕还林工程,不仅对中国的碳达峰与碳中和有重大贡献,对全球温室气体的减排也产生了不容忽视的积极作用。

2021年10月,国务院发布《中国应对气候变化的政策与行动》,强调加大温室气体排放控制力度,持续提升生态碳汇能力。国家发展改革委、自然资源部联合印发的《全国重要生态系统保护和修复重大工程总体规划(2021—2035年)》中提到,中国自然生态系统总体仍较为脆弱,生态保护压力依然较大,必须大力推进全国重要生态系统保护和修复重大工程。退耕还林工程开展的主要目的是防治坡耕地的严重水土流失<sup>[63]</sup>,在实施过程中表现出较高的瞄准效率和较低的成本有效性<sup>[6]</sup>,而本研究发现工程同样具有较大的减排增汇潜力,可能对中国向国际社会提出的“碳达峰,碳中和”目标做出重要贡献。要在兼顾水土



保持效益和成本最低原则的同时,将工程产生的减排增汇效益最大化。森林生物质能源对全球温室气体减排具有重要意义,继续进行植树造林或再造林,特别是具有较大碳汇潜力的森林类型如薪炭林,以提高

工程碳汇能力<sup>[64-67]</sup>。采伐可能产生较多的温室气体泄漏,因此需要提高该过程的能量效率<sup>[68]</sup>。重视经济林营造中精准施肥,提高生产效率,也能有效减少肥料相关的温室气体泄漏<sup>[69]</sup>。

表 6 国内外生态工程增汇减排情况(以 CO<sub>2</sub> 计)

生态工程名称	时间尺度/ a	空间尺度/ 10 <sup>4</sup> hm <sup>2</sup>	总固碳量/ 10 <sup>6</sup> t	平均减排增汇速率/ (t · hm <sup>-2</sup> · a <sup>-1</sup> )	泄漏对固碳的抵消率/%	参考文献
加拿大萨斯喀彻温省森林碳汇项目	50	20.6	1.6	0.16	—	[48]
伊朗国际碳汇项目	6	0.9	0.13	2.47	—	[49]
尼日尔社区刺槐造林项目	11	2.28	0.69	2.75	—	[50]
土耳其东北部新造林碳汇项目	22	2.5	0.02	0.04	—	[51]
安吉县竹林经营项目	30	0.14	0.25	5.84	—	[52]
河北木兰围场落叶松人工林造林项目	41	1 070	—	14.72	—	[41]
意大利栎树薪炭林造林项目	15	2.74 × 10 <sup>-5</sup>	—	8.73	—	[42]
四川甘洛县林业碳汇项目	30	0.09	0.23	8.33	—	[53]
内蒙古红花尔基退化土地碳汇造林项目	40	0.83	—	3.74	—	[54]
天然林资源保护工程	13	210	33.67	1.23	—	[55]
日本北海道落叶松造林项目	25	0.87	—	5.96	0.35	[46]
加拿大魁北克省北方森林黑云杉生态林造林项目	70	—	—	4.05	0.5	[45]
浙江省嘉兴市碳汇造林项目	20	0.01	0.05	18.09	0.19	[47]
贵州省贞丰县林业碳汇项目	20	0.15	1.22	41.96	0.9	[56]
京津风沙源治理工程(一期)	10	4 580	262.75	0.57	10.2~10.5	[57]
天然林资源保护工程	11	—	568.3	—	9.82	[26]
退耕还林工程(生态林)	20	344.81	522.04	7.57	5.75	本文
退耕还林工程(经济林)	20	83.54	78.01	4.67	73.95	本文
退耕还林工程(用材林)	20	176.8	41.54	1.17	16.59	本文
退耕还林工程(薪炭林)	20	4.58	6.84	7.47	27.05	本文
退耕还林工程(平均)	20	609.73	648.43	5.32	14.87	本文

本文的不确定性来源包括以下 3 点: ①每一个固碳和排放参数的选择都会对净碳汇的结果产生很大的影响; ②工程造林包括生态林、经济林、用材林和生物质能源经济林等多种类型,每个林种的固碳速率存在差异,并且工程碳排放仅考虑了主要的造林营林活动排放,但在实际情况中,每种造林类型的排放情况不尽相同,因此碳泄漏的核算可能被低估; ③由于受数据可获得性的限制,本研究 2019 年的工程造林情况是根据往年造林情况推算得到的,对研究结果也会造成一定程度的偏差。如何更精确地计算碳汇和排放,设定更贴近实际的情景,以对工程净碳汇进行更准确地评估,进一步核算工程的固碳成本,将是今后研究的一个重点。

policy [J]. European Journal of Operational Research, 2020,280(1):1-24.

[2] 刘魏魏,王效科,逯非,等.造林再造林、森林采伐、气候变化、CO<sub>2</sub> 浓度升高、火灾和虫害对森林固碳能力的影响[J].生态学报,2016,36(8):2113-2122.

[3] 邵全琴,樊江文,刘纪远,等.重大生态工程生态效益监测与评估研究[J].地球科学进展,2017,32(11):1174-1182.

[4] Lu Fei, Hu Huifeng, Sun Wenjuan, 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 of the United States of America, 2018,115(16):4039-4044.

[5] 陶然,徐志刚,徐晋涛.退耕还林,粮食政策与可持续发展[J].中国社会科学,2004(6):25-38.

[6] 徐晋涛,陶然,徐志刚.退耕还林:成本有效性、结构调整效应与经济可持续性:基于西部三省农户调查的实证分析[J].经济学(季刊),2004,3(4):139-162.

[ 参 考 文 献 ]

[1] Doukas H, Nikas A. Decision support models in climate

- [7] 国家林业和草原局.中国林业统计年 2000—2019[M].北京:中国林业出版社,2001—2020.
- [8] Deng Lei, Liu Guobin, Shangguan Zhouping. Land-use conversion and changing soil carbon stocks in China's 'Grain-for-Green' Program: A synthesis [J]. *Global Change Biology*, 2014,20(11):3544-3556.
- [9] 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.
- [10] 周鸿升.退耕还林工程典型技术模式[M].北京:中国林业出版社,2014.
- [11] 安徽统计年鉴 2020[M].北京:中国统计出版社,2020.
- [12] 江西省统计局国家统计局江西调查总队.江西省 2020 年国民经济和社会发展统计公报:2021 年 3 月 23 日[N].*江西日报*,2021-03-23(6).
- [13] 河南省统计局国家统计局河南调查总队.2020 年河南省国民经济和社会发展统计公报:2021 年 3 月 7 日[N].*河南日报*,2021-03-07(6).
- [14] 国家统计局,环境保护部.中国环境统计年鉴(2012)[M].北京:中国统计出版社,2013.
- [15] 湖北省统计局国家统计局湖北调查总队.2020 年湖北省国民经济和社会发展统计公报[N].*湖北日报*,2021-03-18(4).
- [16] 广西壮族自治区统计局,国家统计局广西调查总队.2016 年广西壮族自治区国民经济和社会发展统计公报:2017 年 4 月 11 日[N].*广西日报*,2017-04-27(15).
- [17] 广西壮族自治区统计局,国家统计局广西调查总队.2019 年广西壮族自治区国民经济和社会发展统计公报:(2020 年 3 月 12 日)[N].*广西日报*,2020-03-17(6).
- [18] 海南省统计局,国家统计局海南调查总队.海南统计年鉴-2013(总第 27 期)[M].北京:中国统计出版社,2013.
- [19] 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[M].北京:科学出版社,2008.
- [20] 王兵,魏江生,胡文.中国灌木林—经济林—竹林的生态系统服务功能评估[J].*生态学报*,2011,31(7):1936-1945.
- [21] Nave L E, Vance E D, Swanston C W, et al. Harvest impacts on soil carbon storage in temperate forests [J]. *Forest Ecology and Management*, 2010, 259 (5): 857-866.
- [22] Crooks S. 2013 supplement to the 2006 IPCC guidelines for national greenhouse gas inventories; Wetlands [J]. IPCCs, witzerland, 2014.
- [23] Kroeze C, Mosier A, Nevison C, et al. Revised 1996 IPCC guidelines for national greenhouse gas inventories; Chapter 4. agriculture [M]. Revised 1996 IPCC Guidelines for National Greenhouse Gas Inventories, 1997.
- [24] 马忠海,潘自强,贺惠民.中国煤电链温室气体排放系数及其与核电链的比较[J].*核科学与工程*,1999,19(3):268-274.
- [25] Lu Fei, Wang Xiaoke, Han Bing, et al. Modeling the greenhouse gas budget of straw returning in China: Feasibility of mitigation and countermeasures [J]. *Annals of the New York Academy of Sciences*, 2010, 1195(Suppl 1):E107-E130.
- [26] 刘博杰,逯非,王效科,等.中国天然林资源保护工程温室气体排放及净固碳能力[J].*生态学报*,2016,36(14):4266-4278.
- [27] Lu Fei, Wang Xiaoke, Han Bing, et al. Net mitigation potential of straw return to Chinese cropland: Estimation with a full greenhouse gas budget model [J]. *Ecological Applications: A Publication of the Ecological Society of America*, 2010,20(3):634-647.
- [28] 北京市统计局,国家统计局北京调查总队.北京统计年鉴(中英文对照)[M].北京:中国统计出版社,2011.
- [29] 陈舜.中国农田化肥农药生产的温室气体排放估算[D].北京:中国科学院大学,2014.
- [30] 榆林市林业和草原局.DB 6108/T 28-2021 沙地柏营养袋扦插育苗及造林技术规程[S].2021.
- [31] 张方秋,曾令海,李小川.广东森林碳汇造林理论与实践[M].北京:中国林业出版社,2014.
- [32] 张红文,雷跃平.河南飞播营造林新技术[M].郑州:黄河水利出版社,2010.
- [33] 何慎,雷正菊,曹学良,等.麻栎播种育苗及造林技术[J].*林业实用技术*,2013(9):71-72.
- [34] Zheng Xunhua, Han Shenghui, Huang Yao, et al. Re-quantifying the emission factors based on field measurements and estimating the direct N<sub>2</sub>O emission from Chinese croplands [J]. *Global Biogeochemical Cycles*, 2004,18(2).
- [35] 国有技术监督局.GB/T 15783-1995 主要造林树种林地化学除草技术规程[S].北京:中国标准出版社,1995.
- [36] 李红勋,马花如.我国速生丰产用材林发展潜力研究[M].北京:中国林业出版社,2013.
- [37] Tian Yihui, Zhu Qinghua, Geng Yong. An analysis of energy-related greenhouse gas emissions in the Chinese iron and steel industry [J]. *Energy Policy*, 2013,56:352-361.
- [38] Wang Yilei, Zhu Qinghua, Geng Yong. Trajectory and driving factors for GHG emissions in the Chinese cement industry [J]. *Journal of Cleaner Production*, 2013, 53:252-260.
- [39] 白秀萍,陈绍志,何友均,等.国外林区道路发展现状及启示[J].*世界林业研究*,2015,28(1):85-91.
- [40] 姚巍.陕西天然林保护工程十年建设现状及发展对策研究[D].陕西 杨凌:西北农林科技大学,2010.

- [41] Lun Fei, Liu Yu, He Lu, et al. Life cycle research on the carbon budget of the *Larix principis-rupprechtii* plantation forest ecosystem in North China [J]. *Journal of Cleaner Production*, 2018,177:178-186.
- [42] Proietti P, Sdringola P, Brunori A, et al. Assessment of carbon balance in intensive and extensive tree cultivation systems for oak, olive, poplar and walnut plantation [J]. *Journal of Cleaner Production*, 2016, 112: 2613-2624.
- [43] 欧光龙,唐军荣,王俊峰,等.云南省临沧市膏桐能源林造林碳汇计量[J].*应用与环境生物学报*,2010,16(5):745-749.
- [44] Khanali M, Akram A, Behzadi J, et al. Multi-objective optimization of energy use and environmental emissions for walnut production using imperialist competitive algorithm [J]. *Applied Energy*, 2021,284:116342.
- [45] Gaboury S, Boucher J F, Villeneuve C, et al. Estimating the net carbon balance of boreal open woodland afforestation: A case-study in Québec's closed-crown boreal forest [J]. *Forest Ecology and Management*, 2009,257(2):483-494.
- [46] Owari T, Kamata N, Tange T, et al. Effects of silviculture treatments in a hurricane-damaged forest on carbon storage and emissions in central Hokkaido, Japan [J]. *Journal of Forestry Research*, 2011,22(1):13-20.
- [47] 李梦,施拥军,周国模,等.浙江省嘉兴市高速公路造林碳汇计量[J].*浙江农林大学学报*,2014,31(3):329-335.
- [48] Lemprière T C, Johnston M, Willcocks A, et al. Saskatchewan forest carbon sequestration project [J]. *The Forestry Chronicle*, 2002,78(6):843-849.
- [49] Katircioglu S, Dalir S, Olya H G. Is a clean development mechanism project economically justified? Case study of an international carbon sequestration project in Iran [J]. *Environmental Science and Pollution Research*, 2016,23(1):504-513.
- [50] Jindal R, Swallow B, Kerr J. Forestry-based carbon sequestration projects in Africa: Potential benefits and challenges [J]. *Natural Resources Forum*, 2008, 32(2):116-130.
- [51] Sivrikaya F, Keles S, Cakir G. Spatial distribution and temporal change of carbon storage in timber biomass of two different forest management units [J]. *Environmental Monitoring and Assessment*, 2007,132(1):429-438.
- [52] 陈欣怡,郑国全.安吉县竹林经营碳汇项目计量分析[J].*林业经济问题*,2018,38(4):23-29.
- [53] 李金航,明辉,于伟咏.四川省林业碳汇项目实施的比较分析[J].*四川农业大学学报*,2015,33(3):332-337.
- [54] 唐才富,涂云军,代丽梅,等.CCER林业碳汇项目开发现状及建议[J].*四川林业科技*,2017,38(4):115-119.
- [55] Zhou Wangming, Lewis B J, Wu Shengnan, et al. Biomass carbon storage and its sequestration potential of afforestation under natural forest protection program in China [J]. *Chinese Geographical Science*, 2014,24(4):406-413.
- [56] 尹晓芬,王晓鸣,王旭,等.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[J].*地球与环境*,2012,40(3):460-465.
- [57] Liu Bojie, Zhang Lu, Lu Fei, et al. Greenhouse gas emissions and net carbon sequestration of the Beijing-Tianjin Sand Source Control Project in China [J]. *Journal of Cleaner Production*, 2019,225:163-172.
- [58] Chen Jiandong, Gao Ming, Cheng Shulei, et al. County-level CO<sub>2</sub> emissions and sequestration in China during 1997—2017 [J]. *Scientific Data*, 2020,7:391.
- [59] Guan Yuru, Shan Yuli, Huang Qi, et al. Assessment to China's recent emission pattern shifts [J]. *Earth's Future*, 2021,9(11):e2021EF002241.
- [60] Shan Yuli, Huang Qi, Guan Dabo, et al. China CO<sub>2</sub> emission accounts 2016—2017 [J]. *Scientific Data*, 2020,7(1):1-9.
- [61] Shan Yuli, Guan Dabo, Zheng Heran, et al. China CO<sub>2</sub> emission accounts 1997—2015 [J]. *Scientific Data*, 2018,5(1):1-14.
- [62] Shan Yuli, Liu Jianghua, Liu Zhu, et al. New provincial CO<sub>2</sub> emission inventories in China based on apparent energy consumption data and updated emission factors [J]. *Applied Energy*, 2016,184:742-750.
- [63] 李世东.中外退耕还林还草之比较及其启示[J].*世界林业研究*,2002,15(2):22-27.
- [64] de la Fuente T, González-García S, Athanassiadis D, et al. Fuel consumption and GHG emissions of forest biomass supply chains in Northern Sweden: A comparison analysis between integrated and conventional supply chains [J]. *Scandinavian Journal of Forest Research*, 2016,32(7):1-33.
- [65] Liu Weiwei, Wang Xiaoke, Liu Bojie, et al. Full accounting of the greenhouse gas budget in the forestry of China [J]. *Mitigation and Adaptation Strategies for Global Change*, 2018,23(5):643-666.
- [66] Sun Xiangyang, Wang Genxu, Huang Mei, et al. Forest biomass carbon stocks and variation in Tibet's carbon-dense forests from 2001 to 2050 [J]. *Scientific Reports*, 2016,6:34687.

- 的关联测度及其特征解释[J].中国土地科学,2010,24(11):4-9.
- [25] 赵荣钦,黄贤金.基于能源消费的江苏省土地利用碳排放与碳足迹[J].地理研究,2010,29(9):1639-1649.
- [26] 赵景峰,李妍.黄河流域城市群综合承载力评价及时空分异演进[J].生态经济,2022,38(2):75-83.
- [27] 郑伯铭,明庆忠,刘安乐,等.西部省区旅游经济效率与区域经济水平的重心耦合及互动响应研究[J].世界地理研究,2022,31(2):350-362.
- [28] 郑子豪,吴志峰,陈颖彪,等.基于 Google Earth Engine 的长三角城市群生态环境变化与城市化特征分析[J].生态学报,2021,41(2):717-729.
- [29] 李平星,周健,刘申伟.国土空间规划的自然要素评价与集成:进展与展望[J].生态环境学报,2021,30(12):2431-2440.
- [30] 孙阳,王佳韡,伍世代.近 35 年中国资源环境承载力评价:脉络、热点及展望[J].自然资源学报,2022,37(1):34-58.
- [31] 高喜红,许文豪,林宇晨,等.区域生态承载力评价方法及指标研究[J].西部人居环境学刊,2021,36(1):57-65.
- [32] 王垚,朱美琳,王勇,等.长三角城市群碳中和潜力评价与实现策略研究[J].规划师,2022,38(3):61-67.
- [33] 吴健生,许娜,张曦文.中国低碳城市评价与空间格局分析[J].地理科学进展,2016,35(2):204-213.
- [34] 俞艳波,杨立涛,赵兴哲,等.一种基于熵权法理论的水准网平差定权方法[J].测绘地理信息,2022,47(2):30-33.
- [35] 黄志启,郭慧慧.基于熵权 TOPSIS 模型的郑州市资源环境承载力综合评价[J].生态经济,2019,35(2):118-122.
- [36] 匡丽花,叶英聪,赵小敏,等.基于改进 TOPSIS 方法的耕地系统安全评价及障碍因子诊断[J].自然资源学报,2018,33(9):1627-1641.
- [37] 叶菁,谢巧巧,谭宁焱.基于生态承载力的国土空间开发布局方法研究[J].农业工程学报,2017,33(11):262-271.
- [38] 宋苑震,覃盟琳,袁倩文,等.碳平衡导向下北部湾城市群碳汇用地布局优化研究[J].广西大学学报(自然科学版),2020,45(5):1071-1082.

(上接第 328 页)

- [20] 刘文瑞,李晓婷,李彤,等.基于 MODIS 和 CASA 模型的伊春市森林植被 NPP 变化特征及其影响因子分析[J].生态学杂志,2022,41(1):150-158.
- [21] Wang Lunche, Zhu Hongji, Lin Aiwen, et al. Evaluation of the latest MODIS GPP products across multiple biomes using global eddy covariance flux data [J]. Remote Sensing, 2017,9(5):418.
- [22] 林少君,贺立静,黄沛生,等.浮游植物中叶绿素 a 提取方法的比较与改进[J].生态科学,2005,24(1):9-11.
- [23] 徐兆礼,沈新强.长江口水域浮游动物生物量及其年间变化[J].长江流域资源与环境,2005,14(3):282-286.
- [24] 王伟,顾继光,韩博平.华南沿海地区小型水库叶绿素 a 浓度的影响因子分析[J].应用与环境生物学报,2009,15(1):64-71.
- [25] 孙凌,金相灿,杨威,等.硅酸盐影响浮游藻类群落结构的围隔试验研究[J].环境科学,2007,28(10):2174-2179.
- [26] Desortová B. Relationship between chlorophyll- $\alpha$  concentration and phytoplankton biomass in several reservoirs in Czechoslovakia [J]. Internationale Revue Der Gesamten Hydrobiologie Und Hydrographie, 1981,66(2):153-169.
- [27] Watson K J. Phytoplankton and its dynamics in two tropical lakes: A tropical and temperate zone comparison [J]. Hydrobiologia, 1986,138(1):161-176.

(上接第 347 页)

- [67] Yue Junwei, Guan Jinhong, Deng Lei, et al. Allocation pattern and accumulation potential of carbon stock in natural spruce forests in northwest China [J]. PeerJ, 2018,6:e4859.
- [68] Nakano K, Shibahara N, Nakai T, et al. Greenhouse gas emissions from round wood production in Japan [J]. Journal of Cleaner Production, 2018,170:1654-1664.
- [69] Li Nian, Wei Caidi, Zhang Hui, et al. Drivers of the national and regional crop production-derived greenhouse gas emissions in China [J]. Journal of Cleaner Production, 2020,257:120503.