

毛竹碳汇造林初期净碳汇量监测与不确定性分析

俞淑红^{1,2}, 周国模^{1,2}, 施拥军^{1,2}, 吕玉龙³, 沈振明⁴

(1. 浙江农林大学 浙江省森林生态系统碳循环与固碳减排重点实验室, 浙江 临安 311300; 2. 浙江农林大学 亚热带森林培育国家重点实验室培育基地, 浙江 临安 311300; 3. 浙江省安吉县林业局, 浙江 安吉 313300; 4. 浙江省临安市林业技术服务总站, 浙江 临安 311300)

摘要: 竹林是热带和亚热带地区一种分布广泛的森林资源类型。由于其优良的固碳功能, 在林业应对气候变化的背景下, 以积累碳汇和实现碳汇交易为目的的毛竹 *Phyllostachys edulis* 林营造活动日益增多。跟踪调查整个毛竹造林过程, 连年监测毛竹碳储量变化和土壤有机碳变化, 结合基线碳储量和造林活动过程排放泄漏估测, 探究净碳汇量变化积累特征。结果表明: ①项目区毛竹碳汇造林初期(1~5 a)净碳汇量二氧化碳当量(CO₂-e)为 443.77 t, 累计净碳汇量二氧化碳当量为 9.30 t·hm⁻²; ②项目区在组成净碳汇量的多个分量中, 只有毛竹碳储量变化起正面影响, 而土壤有机碳变化、施肥排放和运输泄漏均对净碳汇量积累造成负面影响, 5 a 二氧化碳当量分别为-292.90, -18.99 和-8.27 t; ③毛竹造林初期(1~5 a), 毛竹碳储量(地上、地下)变化和净碳汇量变化速率并不均匀; ④毛竹造林过程中的土壤扰动, 对净碳汇量会带来显著影响, 造林初期甚至会出现净排放。图 3 表 8 参 26

关键词: 森林生态学; 毛竹; 碳汇林; 净碳汇量; 年变化; 土壤扰动

中图分类号: S718.5 **文献标志码:** A **文章编号:** 2095-0756(2016)05-0807-09

Net carbon sinks in the initial stages of moso bamboo stands

YU Shuhong^{1,2}, ZHOU Guomo^{1,2}, SHI Yongjun^{1,2}, LÜ Yulong³, SHEN Zhenming⁴

(1. Zhejiang Provincial Key Laboratory of Carbon Cycling in Forest Ecosystems and Carbon Sequestration, Zhejiang A & F University, Lin'an 311300, Zhejiang, China; 2. The Nurturing Station for the State Key Laboratory of Subtropical Silviculture, Zhejiang A & F University, Lin'an 311300, Zhejiang, China; 3. Forest Enterprise of Anji County, Anji 313300, Zhejiang, China; 4. Lin'an Forest Technical Service Station, Lin'an 311300, Zhejiang, China)

Abstract: Due to climate change problems, afforestation activities with bamboo, a widely distributed forest-type resource in tropical and subtropical regions, to accumulate carbon sinks and to foster carbon sink trade have been increasing because of bamboo's strong carbon sequestration capability. This study followed the entire carbon process in bamboo stands to monitor the annual storage change of moso bamboo (*Phyllostachys edulis*) carbon and soil organic carbon (SOC) by establishing 36 plots with 20m × 20m size, and then explored the accumulation and change characteristics of net carbon sequestration by considering baseline carbon storage and emission leakage estimates with afforestation activities. Results showed that 1) in the initial stage (1-5 years) for moso bamboo carbon sink stands, the net carbon sink was 443.77 t CO₂-equivalent (e), and the cumulative net carbon sink was 9.30 t CO₂-e per hectare. 2) Only moso Bamboo carbon sink change had a positive impact on the project's net carbon sink; whereas, five year accumulation changes in t CO₂-e for SOC (-292.90), fertilization emission (-18.99), and transportation leakage (-8.27) revealed adverse effects. 3) However, the

收稿日期: 2015-11-13; 修回日期: 2015-12-11

基金项目: “十二五”国家科技支撑计划项目(2012BAD22B0503); 国家林业局引进国际先进农业科学技术计划(“948”计划)项目(2013-4-71); 国家自然科学基金资助项目(31370637); 浙江省自然科学基金资助项目(Y5110145)

作者简介: 俞淑红, 从事森林碳汇计量与监测研究。E-mail: ysh20060@163.com。通信作者: 施拥军, 副教授, 从事森林碳汇计量与监测研究。E-mail: syjwwh@163.com

rate-of-change for bamboo carbon (aboveground and underground) was not uniform. 4) Also, soil disturbance during moso bamboo afforestation had a strong negative influence on the net carbon sink, even causing net emissions (-116.31) in the early stages of afforestation. [Ch, 3 fig. 8 tab. 26 ref.]

Key words: forest ecology; moso bamboo (*Phyllostachys edulis*); carbon sequestration forest; net carbon sink; annual variation; soil disturbance

全球气候变化对人类的生存和发展带来巨大的影响和挑战。如何控制温室气体排放,减少大气中以二氧化碳(CO₂)为代表的温室气体浓度,减缓气候变化成为全球关注的热点。森林生态系统具有良好的固碳释氧功能,汇集了全球植被碳库的86%和土壤碳库的73%,在调节全球碳平衡以及应对气候变化方面具有不可替代的重要作用^[1-3]。自2005年《京都议定书》生效以来,通过造林再造林、加强森林经营等措施来提高区域森林固碳能力和作为应对气候变化的重要手段,备受国际社会关注和认可^[4]。中国政府提出“森林双增方案”,多次强调通过森林恢复和增长,增加森林碳汇,促进碳汇交易,以更好应对全球气候变化。竹林是中国南方地区十分重要的森林资源类型,适生能力强,广泛分布于浙江、福建、江西、湖南、安徽等16个省区,加工利用方便、综合效益良好、深受林农喜爱。竹林面积和竹产业快速增长,竹林在保护生态环境和促进山区经济发展中发挥着重要的作用。同时,竹林具有优良的固碳能力,毛竹 *Phyllostachys edulis* 林乔木层固碳量达 5.097 t·hm⁻²·a⁻¹,是速生阶段杉木 *Cunninghamia lanceolata* 的1.46倍、热带山地雨林的1.33倍和苏南27年杉木林的2.16倍^[5-9]。根据毛竹林的碳水通量观测研究,毛竹林生态系统的年净固碳量甚至可以达到 6.629 t·hm⁻²·a⁻¹^[10]。因此,在林业应对气候变化的背景下,以积累碳汇和实现碳汇交易为目的的毛竹林营造活动日益增多。无论是清洁发展机制(CDM)框架、国际核证碳减排标准(VCS),还是中国自愿减排项目(CCER),都要求对碳汇造林活动进行科学监测,提供精度可靠的年净碳量或年减排量数据,以满足可测量、可报告、可核查的要求,监测结果还需要进行不确定性分析,以此作为核减和签发碳减排量的依据。虽然周国模等^[11-13],范叶青等^[14],顾蕾等^[15],周宇峰等^[16]对毛竹林生态系统的碳积累、碳分配和碳转移特征等进行了大量研究,张文俊等^[17],周伟等^[18]对新疆杨树 *Populus alba* var. *pyramidalis*,杉木等树种造林后的碳积累效果和综合效益也进行了相关研究,但是基于竹子造林项目活动,引起植被、土壤碳库变化并考虑活动过程的温室气体排放、泄漏的定期监测研究却少见报道。关于不确定性分析,在森林碳核算与碳监测领域,学者较多关注的是由单一监测变量所产生的不确定性问题^[19-20],但由于竹子造林,会涉及多个碳层和植被、土壤等多个碳库,碳汇造林后总碳储量变化的不确定性来源于多个变量的监测误差,需要通过误差逐级传递分析才能获得^[21]。作者主要研究毛竹造林活动的碳汇监测方法和初期净碳汇量的变动特征,探讨不同监测变量对总体不确定性的影响,以为竹子碳汇造林活动和竹林碳汇交易提供借鉴。

1 研究区概况

研究区试验毛竹林位于浙江省临安市藻溪镇境内,是中国绿色碳汇基金会资助、浙江农林大学营建的全球首个毛竹碳汇林基地,面积为47.72 hm²,中心地理坐标为30°10'20" N, 119°29'40" E,平均海拔为550 m,土壤为红壤,呈酸性,年平均气温为15.8 °C,年降水量1 500.0 mm左右。试验毛竹林于2008年通过母竹移栽方式新造,初植密度为450株·hm⁻²,在发育成林初期阶段,抚育措施为夏季除草1次·a⁻¹,隔2 a采用沟施方式施用竹林复合肥[m(氮 N):m(磷 P₂O₅):m(钾 K₂O)=13:3:2]300~450 kg·hm⁻²,除挖取退笋、败笋外,全部留笋长竹,不进行伐竹作业。

2 研究方法

2.1 碳库选择及温室气体排放源确定

本研究考虑毛竹生物学特点,主要选取地上生物量、地下生物量和土壤有机碳三大碳库进行计量与监测。由于造林过程中不使用整地机械、油锯等燃油机械设备,因此涉及的温室气体排放源主要是运输苗木、肥料中所使用的运输工具消耗的化石燃料燃烧引起的二氧化碳排放和在造林和森林管理活动中施用竹林复合肥引起的直接一氧化二氮(N₂O)排放。

2.2 野外调查方法

2.2.1 植被生物量调查 ①基线散生木与林下植被生物量调查。在造林实施前, 根据造林地涉及的小班资料和植被状况将基线划分为 2 个碳层(BSL-1 和 BSL-2), 按各碳层面积比例分配, 设立标准地进行调查(BSL-1 设立 14 个样地, BSL-2 设立 6 个样地)。样地利用全站仪设置, 大小为 20 m × 20 m、朝向正北, 每木调查测定样地内散生木的树种、年龄、胸径、树高, 同时在每个样地四角和中心点分别设立 5 个灌木样方和草本样方, 灌木样方面积为 4 m × 4 m, 草本植被样方面积为 1 m × 1 m, 测定记录灌木平均高度后, 将样方里所有灌木和草本植被全部收割并称鲜质量, 挖出地下部分称出鲜质量。取样带回实验室, 在 70 °C 通风干燥箱内烘干 48 h 至恒量, 计算含水率, 然后计算样方内灌木和草本的生物量干质量, 再根据含碳率系数将生物量转化为碳储量, 灌木平均含碳率为 0.49, 草本平均含碳率为 0.47。②造林 5 a 后(2013 年)毛竹生物量监测调查。根据毛竹造林模式(造林方式、单位面积施肥量)的不同, 将试验毛竹林划分为 2 个碳层(PROJ-1 和 PROJ-2), 按面积比例分配监测固定样地数量(PROJ-1 设立 6 个样地, PROJ-2 设立 10 个样地)。样地利用全站仪设置, 大小为 20 m × 20 m、朝向正北, 样地四角用水泥桩标记。每木检尺样地内各株毛竹的年龄、胸径、树高, 再根据单株生物量模型计算各株的生物量及碳储量, 累计获得样地生物量并推算项目区总体生物量。项目监测时, 不调查和不考虑林下灌木和草本生物量。

2.2.2 土壤调查与测定 在样地内中心点及 4 个角桩点分别设置 5 个采样点, 用土钻或挖掘土壤剖面分层(如 0~10 cm, 10~30 cm 和 30~50 cm)采取土壤, 按土层充分混合后, 用四分法分别取 200~300 g 土壤样品, 去除全部直径大于 2 mm 石砾、根系和其他死有机残体, 带回实验室风干、粉碎, 过 2 mm 筛, 采用重铬酸钾外加热法测定土壤有机碳。在每个采样点, 用环刀(200 cm³)分层各取原状土样 1 个, 用电子天平称土壤湿质量, 估计直径大于 2 mm 石砾、根系和其他死有机残体的体积百分比。分层取混合土样 1 个·样地⁻¹, 带回室内 105 °C 烘干至恒量, 测定土壤含水率, 计算环刀内土壤的干质量和各土层平均容重。

2.3 碳汇计量方法

由于造林项目活动涉及基线、边界内温室气体源排放和边界外泄漏等问题, 因此, 项目实际产生的净碳汇量为造林 t a 后的项目碳储量, 减去项目边界内增加的排放量, 减去造林项目引起的泄漏, 再减去基线碳储量变化量。

2.3.1 基线碳储量变化计算 基线碳储量变化是指在基线情景下(不实施造林活动)项目实地的碳储量变化, 预估它是由土壤碳储量变化与植被生物量碳储量变化 2 部分构成。在基线情景下, 认为土壤碳储量变化量为 0, 而由于项目实施地存在一定数量的散生杉木, 散生杉木的生长会引起植被生物量碳储量的变化。本研究采用杉木人工林生长收获模型^[22] $\ln M_2 = 1.504 8 - 137.100 5 (t_2 \times I_{SI})^{-1} + 0.430 2 \ln I_{SI} + (3.129 5 + 0.262 0 \ln I_{SI}) \times (1 - t_1/t_2) + 0.912 1 t_1/t_2 \times \ln G_1$ (其中: M 为因变量, t 为林分年龄, I_{SI} 为地位指数, G 为林分断面积)来估算不同时间的杉木蓄积变化, 然后使用生物量扩展因子法计算基线情景下散生杉木地上和地下生物量碳储量^[1,23], 其中杉木木材密度取 0.307 t·m⁻³, 杉木生物量扩展因子取 1.530, 杉木平均含碳率取 0.470, 生物量根茎比取 0.220。

2.3.2 造林后毛竹碳储量变化计算 根据样地每木检尺结果(竹龄、胸径)和毛竹单株地上部分生物量方程^[24-25]: $M = 747.787 0 D^{2.771} [0.014 8 A / (0.028 0 + A)^{5.555} + 3.772 0]$ (其中 M 为生物量, D 为胸径, A 为林龄), 累计得到各样地地上生物量, 再根据各碳层样地单位面积生物量和造林面积获得毛竹地上生物量。考虑毛竹各器官的平均含碳率(地上为 0.504 2, 地下为 0.493 5)和地下生物量与地上生物量之比(0.32), 把毛竹地上生物量转化为毛竹碳储量。

2.3.3 造林后土壤碳储量变化计算 在调查测定得到各土层土壤有机碳和容重后, 采用式(1)计算样地单位面积土壤有机碳储量^[21]:

$$C_{SOC_{mi,p}} = \sum_{l=1}^L C_{SOC_{mi,p,l}} \times B_{BD_{mi,p,l}} \times (1 - F_{mi,p,l}) \times D_{depth,l} \quad (1)$$

式(1)中: $C_{SOC_{mi,p}}$ 表示第 m 年 i 碳层 p 样地单位面积土壤有机碳储量(t·hm⁻²), $C_{SOC_{mi,p,l}}$ 表示 l 土层土壤有机碳[g·(100 g 土壤)⁻¹], $B_{BD_{mi,p,l}}$ 表示 l 土层土壤容重(g·cm⁻³), $F_{mi,p,l}$ 表示直径大于 2 mm 石砾、根系和其

他死有机残体的体积百分比(%), D_{depth} 则指各土层厚度(cm)。由此得到:第 m 年 i 碳层平均土壤有机碳储量为:

$$C_{MSOC,m,i} = \sum_{p=1}^P C_{SOC,m,i,p} / P \quad (2)$$

2.3.4 项目边界内的温室气体排放 本研究中项目边界内温室气体(GHG)排放的事前计量仅考虑因施用含氮肥料引起的一氧化二氮直接排放。碳层 PROJ-1 和 PROJ-2 施用竹林专用复合肥分别为 $300 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$ 和 $450 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$ 。具体计算公式如下^[21]:

$$E_{N_{fertilizer,t}} = F_{SN,t} \times F_{EF,t} \times W_{MWN2O} \times G_{GWP20} \quad (3)$$

$$F_{SN,t} = \sum M_{MSF_j,t} \times N_{NCSF_j} \times (1 - F_{fracGASM}) \quad (4)$$

式(3)和式(4)中: $F_{SN,t}$ 表示第 t 年施用的含氮肥经氨(NH_3)和一氧化二氮(N_2O)挥发后的量($\text{t} \cdot \text{a}^{-1}$), $F_{EF,t}$ 为氮肥施用一氧化二氮排放因子(PCC 缺省值为 0.01), W_{MWN2O} 表示一氧化二氮与氮的分子量比(取值 44/28), G_{GWP20} 表示一氧化二氮全球增温趋势(IPCC 缺省值为 310.00), $M_{MSF_j,t}$ 表示第 t 年施用的含氮肥 j 的量($\text{t} \cdot \text{a}^{-1}$), N_{NCSF_j} 表示含氮肥 j 的含氮率(取 0.50%), $F_{fracGASM}$ 表示施用含氮肥的氨和一氧化二氮的挥发比例(IPCC 缺省值为 0.20)。

2.3.5 项目边界外的温室气体泄漏 泄漏主要考虑使用运输工具燃烧化石燃料引起的二氧化碳排放。本研究中造林活动主要涉及运输肥料和苗木。苗木运输的汽车平均载苗量为 $300 \text{ 株} \cdot \text{车}^{-1}$, 平均运输距离 60 km, 苗量按实际使用苗量的 110% 计算; 肥料运输的汽车平均载质量为 $5 \text{ t} \cdot \text{车}^{-1}$, 平均运输距离 30 km, 运输的肥料量按设计施肥量计算。100 km 耗柴油量 12.0 L, 计算得到运输引起的泄漏。公式如下^[21]:

$$L_{LKvehicle,t} = F_{EFCO2} \times V_{NCV} \times C_{FC,t} \quad (5)$$

$$C_{FC,t} = \sum_{v=1}^V \sum_{i=1}^I n \times (T_{MTr,i,t} / L_{TLr,i}) \times D_{ADr,i} \times C_{SECKr,i} \quad (6)$$

式(5)和式(6)中: $L_{LKvehicle,t}$ 表示第 t 年项目边界外运输引起的二氧化碳排放当量($\text{t} \cdot \text{a}^{-1}$), F_{EFCO2} 表示燃油的二氧化碳排放因子(柴油为 $0.074 \text{ t} \cdot \text{GJ}^{-1}$), V_{NCV} 表示燃油的热值(柴油为 $0.035 \text{ 8 GJ} \cdot \text{L}^{-1}$), $C_{FC,t}$ 指燃油消耗量(取值 1.0), n 表示车辆回程装载因子(满载时 $n=1$, 空驶时 $n=2$), $T_{MTr,i,t}$ 表示第 t 年车辆运输物资的总量(m^3 或 t), $L_{TLr,i}$ 表示车辆装载量($\text{m}^3 \cdot \text{车}^{-1}$ 或 $\text{t} \cdot \text{车}^{-1}$), $D_{ADr,i}$ 指单程运输距离(km), 而 $C_{SECKr,i}$ 则表示单位消耗量($\text{L} \cdot \text{km}^{-1}$)。

2.4 不确定性分析方法

监测结果不确定性分析主要针对基于固定样地的抽样监测进行。由于基线碳汇量变化、温室气体排放和泄漏监测都不是基于固定样地进行的, 所以本研究中主要考虑单位面积项目生物量碳储量和项目土壤碳储量监测误差引起的单位面积项目总碳储量的不确定性。

碳储量变化的抽样监测是分层进行的, 因此先以碳层为单位, 分别计算碳层内单位面积生物量碳储量、土壤有机质碳储量的标准差, 然后采用误差传递方法得到单位面积碳层碳储量的标准差, 最终可以获得单位面积项目总体碳储量的标准差。对于某个分层监测的变量估计值, 其标准差按式(7)计算:

$$S^2 = \sum_{i=1}^n w_i^2 \times S_i^2 \quad (7)$$

式(7)中: w_i 碳层 i 在项目总面积中的面积权重, 无量纲 S^2 某个监测变量单位面积(生物量碳储量、土壤有机质碳储量)的方差($\text{t} \cdot \text{hm}^{-2}$)², S_i^2 某个监测变量 i 项目碳层单位面积的方差($\text{t} \cdot \text{hm}^{-2}$)²。 n 个估计值之和或差(项目碳储量)的总体标准差(S_{proj})和不确定性(U_{proj}), 按式(8)传递和计算:

$$S_{proj} = \frac{\sqrt{\sum_{i=1}^n (S_i \times C_i)^2}}{\left| \sum_{i=1}^n C_i \right|}, \quad U_{proj} = \frac{t_{\alpha} \times S_{p_n}}{C_{p_n}} \quad (8)$$

式(8)中: C_i 表示 i 碳层单位面积碳储量($\text{t} \cdot \text{hm}^{-2}$), S_i 表示单位面积碳储量标准差, U_{proj} 表示项目总体不确定性, C_{p_n} 表示项目碳储量, S_{p_n} 表示项目总体标准差, t_{α} 指显著性水平 α 下的 t 分布值, 取 1.96。

3 结果与分析

3.1 造林前分层与造林后分层

在造林前基线情景下，造林地根据原有土地覆盖利用情况和植被状况分为 2 个碳层。其中，BSL-1 中含少量散生杉木，而 BSL-2 中则只有灌木和草本(表 1)，2 个碳层林地均属于无立木林地。造林后，根据毛竹造林模式的不同，项目地被划分为 2 个碳层(PROJ-1 和 PROJ-2)，其中，PROJ-1 以散状匀栽为主，PROJ-2 以团状丛栽为主(表 2)。分碳层计量能达到用更少的样地数量得到可靠结果的目的。

表 1 造林前基线分层

Table 1 Baseline stratification before afforestation

碳层编号	散生木			灌木		草本		面积/ hm ²	
	优势树种	毛竹/(株·hm ⁻²)	平均胸径/cm	平均树高/m	平均盖度/%	平均高度/m	平均盖度/%		平均高度/m
BSL-1	杉木	480	5.2	3.0	25	1.2	10	0.7	33.66
BSL-2					35	1.2	10	0.7	14.06

表 2 造林后项目分层

Table 2 Project stratification after afforestation

碳层编号	造林树种	造林方式	混交方式	初植密度/(株·hm ⁻²)	竹林复合肥/(kg·hm ⁻²)	面积/hm ²
PROJ-1	毛竹	散状匀栽	纯林	450	300	15.47
PROJ-2	毛竹	团状丛栽	纯林	450	450	32.25

3.2 各组分变化监测

计算得到造林前 1~5 a 的基线碳储量变化(表 3)和造林后 1~5 a 试验地竹林碳储量变化(表 4)。其中，5 a 的基线碳储量有 292.51 t，而造林后竹林的碳储量为 316.01 t，比基线累计增加了 23.50 t。图 1 和图 2 分别表明了基线与项目 2 种情景下的每年碳储量的变化趋势，图 2 表明了 1~5 a 期间的项目碳储量变化量并没有像基线预测(图 1)的那样呈逐年增长规律。

表 3 基线情景下 1~5 a 的碳储量计量结果

Table 3 The 1-5 years measurement result of carbon storage in the baseline scenario

t/a	地上生物量/ (t·hm ⁻²)	基线碳储量/t		
		地上	地下	合计
1	0.69	16.56	3.64	20.20
2	1.16	27.93	6.15	34.08
3	1.81	43.48	9.57	53.04
4	2.64	63.53	13.98	77.51
5	3.67	88.25	19.42	107.67
合计	9.97	239.75	52.76	292.51

表 4 项目情景下 1~5 a 竹林碳储量变化结果

Table 4 The 1-5 years monitoring result of carbon storage in the project scenario

t/a	地上生物量/ (t·hm ⁻²)	项目竹林碳储量/t		
		地上	地下	合计
1	0.49	5.91	1.85	7.76
2	4.02	56.24	17.62	73.86
3	2.80	33.68	10.55	44.23
4	3.44	47.81	14.97	62.79
5	7.20	96.99	30.38	127.37
合计	17.96	240.64	75.37	316.01

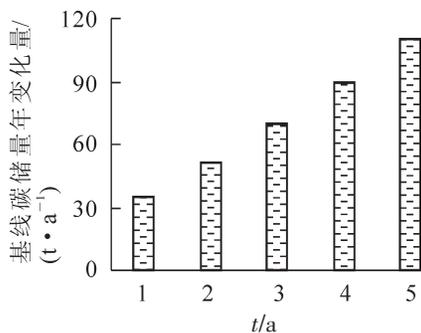


图 1 预估基线碳储量年变化

Figure 1 Annual change of baseline carbon storage

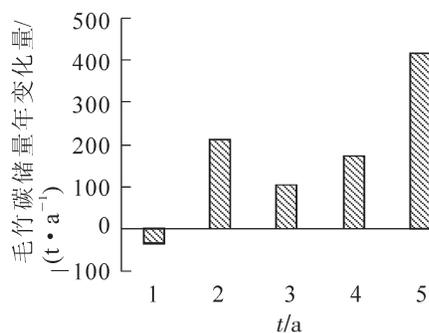


图 2 1~5 a 项目毛竹碳储量变化

Figure 2 Annual change of project bamboo forest carbon storage

由 2.3.3 节中所述方法计算得到 2008–2013 年的土壤有机碳储量变化量为 -79.88 t(表 5)。由于土壤是隔 5 a 测得, 因此其年变化量由每年平均所得。

表 5 土壤有机碳储量变化

Table 5 Change of soil carbon storage

碳层	面积/hm ²	2008 年		2013 年		土壤有机碳储量变化量/t
		样地土壤有机碳储量/(t·hm ⁻²)	土壤有机碳储量/t	样地土壤有机碳储量/(t·hm ⁻²)	土壤有机碳储量/t	
PROJ-1	15.47	51.62 ± 0.48	798.75	50.88 ± 2.35	787.26	-11.49
PROJ-2	32.25	42.82 ± 0.76	1 380.92	40.70 ± 1.90	1 312.53	-68.39
合计	47.72	47.22 ± 0.54	2 179.66	45.79 ± 1.49	2 099.79	-79.88

由 2.3.4 节与 3.3.5 节所述方法计算得到项目边界内的温室气体排放的二氧化碳当量和泄漏的二氧化碳当量分别为 19.00 t 和 8.27 t(表 6), 其中 2 a 施 1 次肥, 因此, 第 2 年与第 4 年不产生排放和泄漏, 而苗木运输只发生在第 1 年, 所以第 2~5 年苗木运输的泄漏为 0。

表 6 项目边界内的温室气体排放和泄漏量

Table 6 Greenhouse gas emissions and leakage within the project boundaries

t/a	温室气体排放的二氧化碳当量		温室气体泄漏的二氧化碳当量			
	年排放/(t·a ⁻¹)	累计/t	肥料运输/(t·a ⁻¹)	苗木运输/(t·a ⁻¹)	合计	
					年泄漏/(t·a ⁻¹)	累计泄漏/t
1	6.33	6.33	1.24	4.55	5.79	5.79
2		6.33				5.79
3	6.33	12.66	1.24		1.24	7.03
4		12.66				7.03
5	6.33	19.00	1.24		1.24	8.27

3.3 项目净碳汇量

项目造林后 1~5 a 期间, 项目净碳汇量变化结果见表 7。造林第 1 年由于造林活动对土壤扰动影响剧烈表现为“碳净排放”, 约有 116.31 t 二氧化碳排放到大气中去。从第 2 年开始, 项目逐渐转换为“碳净吸收”。5 a 后, 项目累计净碳汇量二氧化碳当量为 443.77 t, 单位面积累计净碳汇量二氧化碳当量为 9.30 t·hm⁻²。在对项目净碳汇量构成负面影响的 3 个主要变量中, 土壤有机碳变化占了 91.49%, 而温室气体排放和泄漏则分别占了 5.93% 和 2.58%。图 3 中可以看出除了温室气体排放与泄漏变化不明显外, 其他分量均呈现明显上升趋势, 且变化越来越快。

表 7 项目净碳汇量

Table 7 Project of net carbon sink

t/a	碳储量二氧化碳当量			温室气体排放二氧化碳当量		泄漏二氧化碳当量		基线碳储量二氧化碳当量		净碳汇量二氧化碳当量	
	毛竹碳储量/(t·a ⁻¹)	土壤有机碳/(t·a ⁻¹)	累计/t	年变化/(t·a ⁻¹)	累计/t	年变化/(t·a ⁻¹)	累计/t	年变化/(t·a ⁻¹)	累计/t	年变化/(t·a ⁻¹)	累计/t
1	28.45	-58.58	-30.13	-6.33	-6.33	-5.79	-5.79	34.53	74.07	-76.78	-116.31
2	270.81	-58.58	182.11	0.00	-6.33	0.00	-5.79	50.89	124.96	161.34	45.03
3	162.19	-58.58	285.73	-6.33	-12.66	-1.24	-7.03	69.56	194.48	26.49	71.56
4	230.22	-58.58	457.36	0.00	-12.66	0.00	-7.03	89.69	284.20	81.95	153.47
5	467.04	-58.58	865.82	-6.33	-18.99	-1.24	-8.27	110.59	394.79	290.30	443.77

3.4 不确定性分析结果

由 2.4 方法得到各监测变量标准差传递和项目总体不确定性结果(表 8)。对于项目碳层 PROJ-1, 单位面积竹林生物量碳储量(含地上、地下)变化的标准差为 2.08 t·hm⁻², 单位面积土壤有机质碳储量

(2013 年)测定的标准差为 $2.35 \text{ t}\cdot\text{hm}^{-2}$; 对于项目碳层 PROJ-2, 单位面积竹林生物量碳储量(含地上、地下)变化的标准差为 $3.21 \text{ t}\cdot\text{hm}^{-2}$, 单位面积土壤有机质碳储量(2013 年)测定的标准差为 $1.90 \text{ t}\cdot\text{hm}^{-2}$ 。根据各碳层和各碳库的样地监测结果, 计算得到项目碳储量变化测定和监测的总体标准差为 $2.72 \text{ t}\cdot\text{hm}^{-2}$, 在 95.00%的可靠性水平下, 项目总体监测结果不确定性为 10.29%。

表 8 各监测变量标准差传递和项目总体不确定性

Table 8 Monitoring variables standard deviation and the overall uncertainty of the project

碳层	面积/ hm^2	单位面积土壤碳储量/ ($\text{t}\cdot\text{hm}^{-2}$)	单位面积毛竹碳储量/ ($\text{t}\cdot\text{hm}^{-2}$)	单位面积项目碳储量/ ($\text{t}\cdot\text{hm}^{-2}$)	项目总体不确定性 (95.00%的可靠性水平)
PROJ-1	15.47	50.88 ± 2.35	4.03 ± 2.08	54.90 ± 3.13	
PROJ-2	32.25	40.70 ± 1.90	7.87 ± 3.21	48.57 ± 3.73	
合计	47.72	45.79 ± 1.49	5.95 ± 2.27	51.74 ± 2.72	0.102 9

4 结论与讨论

碳汇造林项目与普通造林相比, 主要区别在于需要确定造林地的基线情景, 同时对造林项目活动实施事前计量和事后的定期监测, 以获得满足额外性要求且具有可靠精度保证的净碳汇量或减排量, 才有可能实现碳汇交易。研究表明: 在项目区, 按照 $450 \text{ 株}\cdot\text{hm}^{-2}$ 的初植密度实施毛竹碳汇造林, 5 a 后, 可实现累计净碳汇量二氧化碳当量为 $443.77 \text{ t}\cdot\text{hm}^{-2}$, 期间净碳汇量二氧化碳当量为 $1.86 \text{ t}\cdot\text{hm}^{-2}\cdot\text{a}^{-1}$ 。这与孙成等^[10]在浙江安吉利用碳水通量观测得到的毛竹林生态系统的净固碳量二氧化碳当量 $24.31 \text{ t}\cdot\text{a}^{-1}$ 相比有较大差距, 主要原因在于碳水通量观测的竹林已经处于成林稳定阶段且生长旺盛, 而本研究竹林尚未成林, 同时又考虑了项目施肥和运输所导致的温室气体排放影响。在组成项目净碳汇量的多个分量中, 只有毛竹碳储量变化起正面影响, 而土壤有机碳变化、施肥排放和运输泄漏均对净碳汇量积累造成不利影响。

毛竹造林初期(1~5 a), 毛竹碳储量(地上、地下)变化和项目净碳汇量变化速率并不均匀。这说明对于毛竹造林来说, 仿照乔木造林采用定期平均变化法来计量预估毛竹碳储量的变化量并不合适, 非常需要建立毛竹发育成林阶段(一般为 1~8 a)的立竹密度、平均胸径、生物量或碳储量的异速生长方程, 才能满足毛竹林项目的碳汇计量需要。另外, 毛竹造林过程中的土壤扰动, 对项目净碳汇量会带来显著影响, 造林初期甚至会由此引起项目呈现净排放, 与刘娟等^[26]竹林经营强度越高土壤温室气体排放越大的研究结论是相一致的, 因此, 今后实施毛竹碳汇造林项目, 建议不能忽略土壤有机碳库, 在项目实施时还需要严格控制土壤扰动强度和频率。项目运输苗木、肥料等引起的二氧化碳排放和由于施用含氮肥料引起的直接一氧化二氮排放计量过程复杂, 监测工作量和成本也很高, 虽然施肥排放和运输泄漏均会对项目净碳汇量带来负面影响, 但所占比例很小, 分别只占 5.93%和 2.58%, 考虑碳汇项目成本有效性原则, 可以忽略其影响, 不进行计量监测。

本研究采用分别碳层进行计量和监测, 按照现有的样地布置和数量, 在 95.00%的可靠性水平下, 项目总体监测结果不确定性(相对误差)为 10.29%, 即监测结果精度达到 89.71%, 高于竹子造林项目方法学的要求。在后续的监测过程中, 还可以考虑适当减少样地数量, 以降低监测成本。

5 参考文献

- [1] WATSON R T, NOBLE I R, BOLIN R, et al. *Land Use, Land-Use Change and Forestry: A Special Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC)* [M]. Cambridge: Cambridge University Press, 2000.
- [2] 刘国华, 傅伯杰, 方精云. 中国森林碳动态及其对全球碳平衡的贡献[J]. 生态学报, 2000, 20(5): 733 - 740.

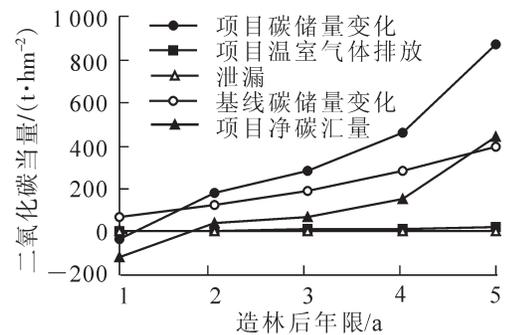


图 3 1~5 a 期间项目净碳汇量各组分量累计变化量
Figure 3 Accumulative total variation of each feature in 1-5 years

- LIU Guohua, FU Bojie, FANG Jingyun. Carbon dynamics of Chinese forests and its contribution to global carbon balance [J]. *Acta Ecol Sin*, 2000, **20**(5): 733 – 740.
- [3] 李海奎, 雷渊才, 曾伟生. 基于森林清查资料的中国森林植被碳储量[J]. 林业科学, 2011, **47**(7): 7 – 12.
LI Haikui, LEI Yuancai, ZENG Weisheng. Forest carbon storage in China estimated using forestry inventory data [J]. *Sci Silv Sin*, 2011, **47**(7): 7 – 12.
- [4] 李怒云, 宋维明. 气候变化与中国林业碳汇政策研究综述[J]. 林业工作参考, 2006(5): 130 – 137.
LI Nuyun, SONG Weiming. Summary for climate change and forestry carbon sequestration policy under CDM in China [J]. *For Work Res*, 2006(5): 130 – 137.
- [5] 郭起荣, 杨光耀, 杜天真, 等. 中国竹林的碳素特征[J]. 世界竹藤通讯, 2005, **3**(3): 25 – 28.
GUO Qirong, YANG Guangyao, DU Tianzhen, *et al.* Carbon character of Chinese bamboo forest [J]. *World Bamb Rat*, 2005, **3**(3): 25 – 28.
- [6] 方晰, 田大伦, 项文化. 速生阶段杉木人工林碳素密度、储量和分布[J]. 林业科学, 2002, **38**(3): 14 – 19.
FANG Xi, TIAN Dalun, XIANG Wenhua. Density, storage and distribution of carbon in Chinese fir plantation at fast growing stage [J]. *Sci Silv Sin*, 2002, **38**(3): 14 – 19.
- [7] 阮宏华, 姜志林, 高苏铭. 苏南丘陵主要森林类型碳循环研究: 含量与分布规律[J]. 生态学杂志, 1997, **16**(6): 18 – 22.
RUAN Honghua, JIANG Zhilin, GAO Suming. Preliminary studies of carbon cycling in three types of forests in the hilly regions of southern Jiangsu Province [J]. *Chin J Ecol*, 1997, **16**(6): 18 – 22.
- [8] 李意德, 吴仲民, 曾庆波, 等. 尖峰岭热带山地雨林生态系统碳平衡的初步研究[J]. 生态学报, 1998, **18**(4): 37 – 44.
LI Yide, WU Zhongmin, ZENG Qingbo, *et al.* Carbon pool and carbon dioxide dynamics of tropical mountain rain forest ecosystem at Jianfengling, Hainan Island [J]. *Acta Ecol Sin*, 1998, **18**(4): 37 – 44.
- [9] 陈先刚, 张一平, 张小全, 等. 过去 50 年中国竹林碳储量变化[J]. 生态学报, 2008, **28**(11): 5218 – 5227.
CHEN Xiangang, ZHANG Yiping, ZHANG Xiaoquan, *et al.* Carbon stock changes in bamboo stands in China over the last 50 years [J]. *Acta Ecol Sin*, 2008, **28**(11): 5218 – 5227.
- [10] 孙成, 江洪, 周国模, 等. 我国亚热带毛竹林 CO₂ 通量的变异特征[J]. 应用生态学报, 2013, **24**(10): 2717 – 2724.
SUN Cheng, JIANG Hong, ZHOU Guomo, *et al.* Variation characteristics of CO₂ flux in *Phyllostachys edulis* forest ecosystem in subtropical region of China [J]. *Chin J Appl Ecol*, 2013, **24**(10): 2717 – 2724.
- [11] ZHOU Guomo, MENG Cifu, JIANG Peikun, *et al.* Review of carbon fixation in bamboo forests in China [J]. *Bot Rev*, 2011, **77**(3): 262 – 270.
- [12] 周国模, 姜培坤. 毛竹林的碳密度和碳储量及其空间分布[J]. 林业科学, 2004, **40**(6): 20 – 24.
ZHOU Guomo, JIANG Peikun. Density, storage and spatial distribution of carbon in *Phyllostachys pubescens* forest [J]. *Sci Silv Sin*, 2004, **40**(6): 20 – 24.
- [13] 周国模, 吴家森, 姜培坤. 不同管理模式对毛竹林碳储量的影响[J]. 北京林业大学学报, 2006, **28**(6): 51 – 55.
ZHOU Guomo, WU Jiasen, JIANG Peikun. Effects of different management models on carbon storage in *Phyllostachys pubescens* forest [J]. *J Beijing For Univ*, 2006, **28**(6): 51 – 55.
- [14] 范叶青, 周国模, 施拥军, 等. 坡向坡位对毛竹林生物量与碳储量的影响[J]. 浙江农林大学学报, 2012, **29**(3): 321 – 327.
FAN Yeqing, ZHOU Guomo, SHI Yongjun, *et al.* Relationship of slope aspect and position on biomass storage and carbon in a *Phyllostachys edulis* stand [J]. *J Zhejiang A & F Univ*, 2012, **29**(3): 321 – 327.
- [15] 顾蕾, 沈振明, 周宇峰, 等. 浙江省毛竹竹板材碳转移分析[J]. 林业科学, 2012, **48**(1): 186 – 190.
GU Lei, SHEN Zhenming, ZHOU Yufeng, *et al.* Analysis of carbon transfer in moso bamboo plank in Zhejiang Province [J]. *Sci Silv Sin*, 2012, **48**(1): 186 – 190.
- [16] 周宇峰, 顾蕾, 刘红征, 等. 基于竹展开技术的毛竹竹板材碳转移分析[J]. 林业科学, 2013, **49**(8): 96 – 102.
ZHOU Yufeng, GU Lei, LIU Hongzheng, *et al.* Carbon transfer during manufacturing of moso bamboo plank using the bamboo unfolding and flattening technology [J]. *Sci Silv Sin*, 2013, **49**(8): 96 – 102.

- [17] 张文俊, 马珂, 师庆东, 等. 克拉玛依人工杨树碳汇林对土壤有机碳储量的影响[J]. 新疆农业科学, 2012, **49**(5): 856 – 861.
ZHANG Wenjun, MA Ke, SHI Qingdong, *et al.* The study of the influence poplar plantation carbon sink forest acting on soil organic carbon in Karamay [J]. *Xinjiang Agric Sci*, 2012, **49**(5): 856 – 861.
- [18] 周伟, 高岚. 森林碳汇收益的实证分析: 以广东省杉木林为例[J]. 科技管理研究, 2015, **35**(2): 219 – 223.
ZHOU Wei, GAO Lan. Optimal forest harvest age considering carbon sequestration in multiple carbon pools: taking fir forest in Guangdong as an example [J]. *Sci Technol Manage Res*, 2015, **35**(2): 219 – 223.
- [19] 朱汤军, 沈楚楚, 季碧勇, 等. 基于 LULUCF 温室气体清单编制的浙江省杉木林生物量换算因子[J]. 生态学报, 2013, **33**(13): 3925 – 3932.
ZHU Tangjun, SHEN Chuchu, JI Biyong, *et al.* Research on biomass expansion factor of Chinese fir forest in Zhejiang Province based on LULUCF greenhouse gas inventory [J]. *Acta Ecol Sin*, 2013, **33**(13): 3925 – 3932.
- [20] 沈楚楚. 浙江省主要树种(组)生物量转换系数研究[D]. 临安: 浙江农林大学, 2013.
SHEN Chuchu. *The Research on Biomass Expansion Factors of the Dominant Tree Species in Zhejiang Province* [D]. Lin'an: Zhejiang A & F University, 2013.
- [21] 国家林业局造林绿化管理司. 造林项目碳汇计量监测指南[M]. 北京: 中国林业出版社, 2014.
- [22] 叶代全. 杉木人工林生长收获预估模型的研究[J]. 林业勘察设计, 2006(2): 1 – 4.
YE Daiquan. The research of Chinese fir plantation growth and harvest forecast model [J]. *For Prosp Des*, 2006 (2): 1 – 4.
- [23] 罗云建, 张小全, 侯振宏, 等. 我国落叶松林生物量碳计量参数的初步研究[J]. 植物生态学报, 2007, **31**(6): 1111 – 1118.
LUO Yunjian, ZHANG Xiaoquan, HOU Zhenhong, *et al.* Biomass carbon accounting factors of *Larix* forests in China based on literature data [J]. *J Plant Ecol*, 2007, **31**(6): 1111 – 1118.
- [24] 周国模. 毛竹林生态系统中碳储量、固定及其分配与分布的研究[D]. 杭州: 浙江大学, 2006.
ZHOU Guomo. *Carbon Storage, Fixation and Distribution in Mao Bamboo (*Phyllostachys pubescens*) Stands Ecosystem* [D]. Hangzhou: Zhejiang University, 2006.
- [25] 周国模, 刘恩斌, 刘安兴, 等. Weibull 分布参数辨识改进及对浙江毛竹林胸径年龄分布的测度[J]. 生态学报, 2006, **26**(9): 2918 – 2926.
ZHOU Guomo, LIU Enbin, LIU Anxing, *et al.* The algorithm update of Weibull distribution on measuring the distribution of diameter and age of moso bamboo forests in Zhejiang Province, China [J]. *Acta Ecol Sin*, 2006, **26**(9): 2918 – 2926.
- [26] LIU Juan, JIANG Peikun, WANG Hailong, *et al.* Seasonal soil CO₂ efflux dynamics after land use change from a natural forest to moso bamboo plantations in subtropical China [J]. *For Ecol Manage*, 2011, **262**(6): 1113 – 1131.