

CDM-ARP 杉木林碳汇监测方法学研究

朱向辉^{1,2}, 汪传佳¹, 王仁东³, 翁永发³, 马飞杰^{1,2}, 过路⁴, 方怀远⁴, 朱汤军¹

(1. 浙江省林业科学研究院, 浙江 杭州 310023; 2. 浙江林学院 林业与生物技术学院, 浙江 临安 311300;
3. 浙江省衢州市林业局, 浙江 衢州 324002; 4. 浙江省开化县林业局, 浙江 开化 324300)

摘要: 为满足浙江省重点产杉区造林再造林项目杉木林的碳汇监测需要, 利用杉木 *Cunninghamia lanceolata* 立地数量化模型、定量间伐技术、生长收获模型和生物量模型等, 区分不同立地条件, 采用定量方法, 并考虑间伐因素, 建立了清洁发展机制造林再造林项目(CDM-ARP)杉木林碳汇监测方法学, 对杉木林分碳密度、碳储量和二氧化碳净吸存量进行监测。监测方法分为项目规划阶段(造林前)预测和林分生长阶段(造林后)监测。选择易测定的碳库作为监测对象, 并用常规测树因子来估测较难测定的各器官生物量和碳汇量。该方法科学准确, 省时省力, 成本低廉, 快速高效。图1表2参16

关键词: 森林经理学; 清洁发展机制; 造林再造林碳汇项目; 杉木; 碳汇; 监测方法; 浙江省

中图分类号: S758.8 **文献标志码:** A **文章编号:** 1000-5692(2008)03-0336-06

Study on the methodology for monitoring Chinese fir carbon sink of CDM-afforestation and reforestation (AR) project

ZHU Xiang-hui^{1,2}, WANG Chuan-jia¹, WANG Ren-dong³, WENG Yong-fa³,
MA Fei-jie^{1,2}, GUO Lu⁴, FANG Huai-yuan⁴, ZHU Tang-jun¹

(1. Zhejiang Institute of Forest Science, Hangzhou 310023, Zhejiang, China; 2. School of Forestry and Biotechnology, Zhejiang Forestry College, Lin'an 311300, Zhejiang, China; 3. Forest Enterprise of Quzhou City, Quzhou 324002, Zhejiang, China; 4. Forest Enterprise of Kaihua County, Kaihua 324300, Zhejiang, China)

Abstract: In order to monitor the carbon sink of *Cunninghamia lanceolata* (Chinese fir) in the key fir production area of Zhejiang Province, the research integrated previous research achievements such as site quantified model, quantitative thinning technology, yield models and biomass models to establish a methodology for monitoring Chinese fir carbon sink to predict the carbon density, carbon storage and net carbon dioxide absorption amount of Chinese fir stand. The monitoring methodology was divided into two stages, i. e., project programming stage and stand growth stage, to predict the above-mentioned three indexes. The research selected the easily determined carbon pool as monitoring object and used conventional measurement factor to predict the biomass and carbon sink amount which are difficult to measure. The monitoring methodology is not only scientific, accurate, and effective and quick, but also cheap and efficient. [Ch, 1 fig. 2 tab. 16 ref.]

Key words: forest management; clean development mechanism (CDM); afforestation and reforestation project (ARP); *Cunninghamia lanceolata* (Chinese fir); carbon sink; monitoring method; Zhejiang Province

随着温室效应和气候变暖的加剧, 森林碳汇作用越来越受到全世界的重视, 我国林业必将成为最重要的碳汇生产行业, 森林碳汇将成为 21 世纪林业生产的主要产品之一。清洁发展机制(简称 CDM,

收稿日期: 2007-04-16; 修回日期: 2007-09-12

基金项目: 浙江省科技厅欠发达地区专项(2005C32049); 浙江省与中国林业科学研究院省院合作林业重点项目(2005SY01)

作者简介: 朱向辉, 硕士研究生, 从事森林培育和森林生态学研究。E-mail: zxh2001613@163.com

即 clean development mechanism) 造林再造林碳汇项目 (简称 ARP, 即 afforestation and reforestation project) 是《京都议定书》框架下发达国家和发展中国家之间在林业领域内的唯一合作机制。通过实施 ARP, 能够在生产大量木材的同时, 获得额外的碳汇收入, 使造林效益成倍增加。但并不是所有的碳汇都可以交易的, 只有那些经过核证的碳汇量才能交易。而核证最关键的就是要建立 ARP 的碳汇基线和监测方法学。碳汇监测方法学的建立成为一个地区(省)能否开展 CDM-ARP 和碳交易的最重要先决条件之一^[1]。监测是获得透明的、可测定的、可证实的和可核查的, 由项目活动引起的人为净温室气体源排放或汇清除, 并尽可能降低不确定性, 目前南方各树种 CDM-ARP 监测方法学研究甚少。杉木 *Cunninghamia lanceolata* 是中国南方主要的速生用材树种, 生长快, 碳汇量大, 是中国南方主要的碳汇树种。作者就浙江省 CDM-ARP 杉木林监测方法开展研究。

1 ARP 杉木林监测方法学方案设计和碳库选择

碳汇监测方法要求科学准确, 省时省力, 快速高效。从 20 世纪 70 年代开始, 中国南方地区对杉木从育种、种苗、森林培育和森林经营管理等方面进行了大量深入研究^[2-10], 许多基础性数据和成果可以整合利用, 不足部分进行一些补充调查。本研究遵循上述原则, 对 ARP 杉木林监测方法学进行设计(图 1)。监测方法分项目规划(造林前)阶段的预测和林分生长(造林后)阶段监测 2 种。本研究列出浙江省几个重点产杉区(以开化县为主)和部分全省的模型, 其他地区可就近选用相应的模型。监测期间隔年限(Δt)一般选 1 a 或 5 a。

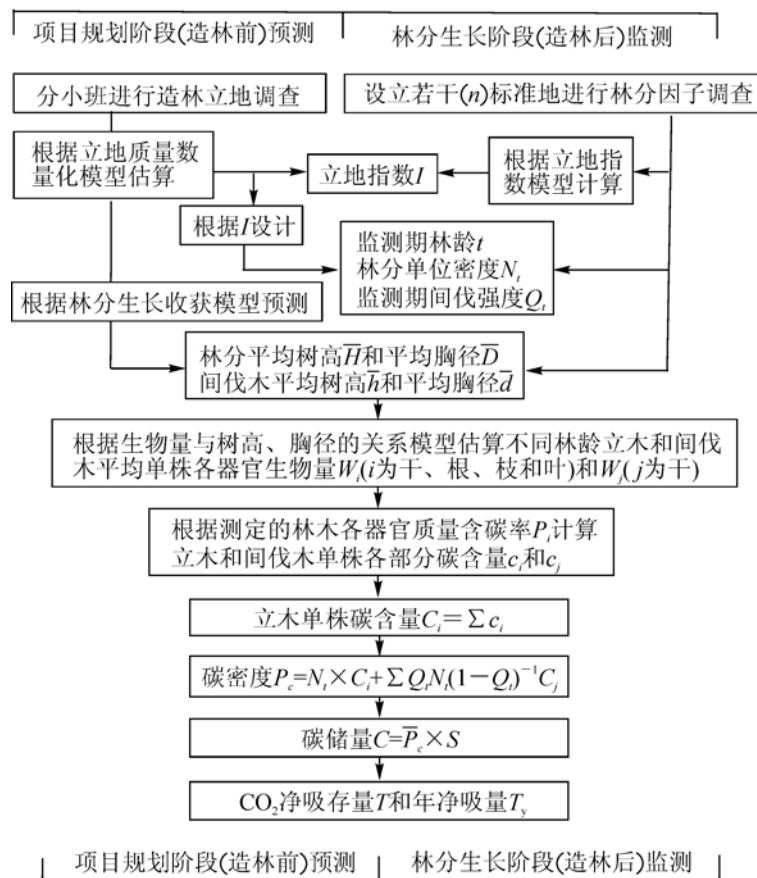


图 1 ARP 杉木林碳汇监测方法学

Figure 1 Methodology for monitoring *Cunninghamia lanceolata* carbon sequestration of ARP

杉木林分的碳汇包括杉木的器官(干、枝、叶、根、花果、皮), 枯树落叶, 林下植被, 土壤, 动物和微生物等, 由于土壤、枯枝落叶层、动物、微生物碳库有可证实的依据证明在林分生长过程

中,碳储量不会减少,而且监测成本高,因此,监测时放弃这几个碳库的碳汇量。林下植被到最后几乎很少,花果量也很少,皮中的碳不能长期固定,所以林下植被、花果和皮的碳汇予以放弃。根据杉木林分生长规律,在生长周期内要进行2~3次抚育间伐,林分生长收获模型是建立在大部分间伐过的林分标准地上的,因此,在有间伐的监测期内应加上间伐木的碳汇。间伐剩余物会以枯枝落叶的形式留在林分内,伐根也留在林分内,增加土壤的碳储量,但为了减少监测成本,间伐木只计算树干的碳汇量。放弃的这些碳库足以弥补碳泄漏引起的项目所获得的碳信用比实际高的问题。

2 ARP 杉木林监测方法

2.1 相关因子收集及造林作业设计

项目规划(造林前)阶段:对造林小班进行立地因子调查,包括海拔、地形、土壤和植被等,实测小班面积 $S(\text{hm}^2)$ 。根据立地指数及经营目的等情况进行造林作业设计,如造林密度 N ,间伐时间 t ,间伐强度 Q_i 和次数等,定量间伐设计方法可参考本文2.4。

林分生长(造林后)阶段:按随机抽样原则,确定10%以上数量小班作为监测小班,在监测小班内选择有代表性位置设置 $20\text{ m} \times 20\text{ m}$ 固定标准地,共 n 个标准地,小班面积 $S(\text{hm}^2)$ 。在每个监测期调查林龄 $t(\text{a})$,林分单位密度 $N_i(\text{株} \cdot \text{hm}^{-2})$,平均树高 $\bar{H}(\text{m})$,平均胸径 $\bar{D}(\text{cm})$,优势树高 $H_u(\text{m})$ 。监测期内如果进行了间伐,应收集间伐木平均树高 $\bar{h}(\text{m})$,平均胸径 $\bar{d}(\text{cm})$,间伐前后林分密度 N , N_i 和间伐强度 $Q_i(\%)$ 等资料。

2.2 立地指数 I 计算

2.2.1 项目规划(造林前)阶段 取各造林设计小班的海拔、黑土层厚、坡位、坡向、坡度和土壤厚度等立地因子,查杉木人工林数量化立地指数得分表,对杉木造林小班的立地指数进行预估。

开化县杉木人工林数量化立地指数得分表见表1^[3,11],立地数量化模型为:

$$I = 10.388 + \sum_{i=1}^m \sum_{j=1}^{m_j} B(j,i) \delta_k(j,i), \text{复相关系数 } R_{ym} = 0.7146。$$

浙北地区参见文献[3]。

表1 开化县杉木人工林数量化立地指数得分表

Table 1 Quantitative site index table of *Cunninghamia lanceolata* plantation in Kaihua County

项 目	类 目	得 分	范 围	%	偏相关系数 r_u	t_u
海拔 $x_1/(\text{m})$	x_{11} <300	2.243	2.765	40.6	0.389 1	5.943 5
	x_{12} 300~600	2.073				
	x_{13} 600~900	-0.522				
	x_{14} ≥ 900	0.000				
坡位/ x_2	x_{21} 下	0.795	0.795	11.7	0.149 4	2.126 1
	x_{22} 中	0.529				
	x_{23} 上	0.000				
坡向/ x_3	x_{31} 阴	-0.356	0.558	8.2	0.085 3	1.204 7
	x_{32} 半阴	-0.119				
	x_{33} 半阳	-0.558				
	x_{34} 阳	0.000				
坡度/ x_4	x_{41} $\leq 15^\circ$	0.890	1.195	17.5	0.096 5	1.358 5
	x_{42} $15^\circ \sim 25^\circ$	-0.305				
	x_{43} $25^\circ \sim 35^\circ$	0.209				
	x_{44} $> 35^\circ$	0.000				

续表 1

项 目	类 目	得 分	范 围	%	偏相关系数 r_u	t_u	
土壤厚度 $x_5/(cm)$	x_{51}	>80					
	x_{52}	40~80	0.844	12.4	0.1063	1.5043	
	x_{53}	≤40	0.000				
黑土层厚 $x_6/(cm)$	x_{61}	>30	0.605				
	x_{62}	20~30	0.610				
	x_{63}	10~20	-0.047	0.652	9.6	0.1495	2.1277
	x_{64}	≤10	0.000				
常数项 B_0				10.3380			
剩余标准差 S_y				1.6489			
复相关系数 R_{ym}				0.7146		14.3743	

2.2.2 林分生长(造林后)阶段 杉木优势高 H_u 与年龄 t 的关系, 以方程 $H_u = a [1 - e^{(-ct)}]^b$ 拟合效果最好, 当 $t = t_0$ (标准年龄 20 a) 时的 H_u 即为立地指数 I , 得: $I = H_u \left[\frac{1 - e^{(-ct_0)}}{1 - e^{(-ct)}} \right]^b$ 。开化县模型^[4,10]为:

$$I = H_u \left[\frac{1 - e^{(-0.8867)}}{1 - e^{(-0.0443t)}} \right]^{1.2621}, \text{ 相关系数 } r = 0.9993。$$

为了避免调查优势高, 可以用林分平均高 \bar{H} 估算。开化县模型^[4]为:

$$H_u = 1.018726 + 1.12096\bar{H}, \text{ 相关系数 } r = 0.9809。$$

2.3 不同林龄的胸径、树高或蓄积预估

林分生长(造林后)阶段根据林分调查因子计算。规划设计(造林前)阶段, 根据杉木生长收获模型计算。开化县的模型^[5,9]为:

$$\ln \bar{D} = 4.544590 + 0.053027I - 0.279606 \ln N - 9.881800/t, \text{ 相关系数 } r = 0.8570。$$

$$\ln \bar{H} = 2.920770 + 0.081000I - 0.120030 \ln N - 14.266970/t, \text{ 相关系数 } r = 0.9166。$$

全省的模型^[6]为:

$$\ln \bar{D} = 4.504156 - 0.036179I - 0.084218 \ln N - 12.031347/t, \text{ 相关系数 } r = 0.9459。$$

$$\ln M = 1.638213 + 0.121188I + 0.524874 \ln N - 28.389612/t, \text{ 相关系数 } r = 0.8916。$$

其中: I 为立地指数(m); N 为密度(株·hm⁻²); t 为年龄(a); M 为林分蓄积(m³·hm⁻²)。

2.4 定量抚育间伐设计

根据杉木林木胸径生长规律和林分分化特征, 确定间伐起始期和间隔期。利用优势高与平均高、年龄关系建立杉木立地指数模型。通过对胸径与冠幅关系的研究, 得到不同立地指数下的杉木基本经营密度 N_0 及饱和密度 N_k 模型。根据立地指数 I 等确定经营密度指标 u 、 G 和 J 值, 得到间伐后保留密度 N_t 计算模型, 并藉以计算间伐强度 Q_t 。

开化县杉木间伐后保留密度模型 N_k (株·hm⁻²)^[4,13] 为:

$$N_t = 56080ue^{-2(G+J\ln \bar{D})}/x。$$

$$Q_t = (N - N_t)/N \times 100%。$$

u , G , J 值查算见表 2^[4,11]。

表 2 开化县杉木间伐后保留密度模型 u , G , J 值查算表

Table 2 Look-up table for u , G , J of reserve density model of thinned *Cunninghima lanceolata* plantation in Kaihua County

立地指数 I / m	G 值	J 值	经营密度 指标 (u 值)
$I \leq 13$	-0.2404	0.4723	0.8
$13 < I \leq 15$	-0.2271	0.4700	0.7
$I > 15$	-0.2370	0.4716	0.6

2.5 杉木平均单株各器官生物量估算

生物生长规律的重要特点之一是相对生长,即群体和个体之间、个体中的各器官均存在着这一规律。在实际工作中,可用易测定的胸径、树高因子来估测较难测定的各器官生物量和碳汇量。

根据已建立的生物量与树高、胸径的关系模型估算平均单株各器官烘干生物量 W_i (kg)。开化县烘干生物量的模型^[7,9]为:

$$W_{\text{干}} = 0.0485 \bar{D}^{1.31} \bar{H}^{1.16}, \text{ 相关系数 } r = 0.9567;$$

$$W_{\text{根}} = 6.1114 \times 10^{-2} \bar{D}^{1.1352} \bar{H}^{0.9453}, \text{ 相关系数 } r = 0.8743;$$

$$W_{\text{枝}} = 1.2483 + \bar{D}^2 (0.0174 + 0.06919\bar{H} - 0.0003165\bar{H}^2), \text{ 相关系数 } r = 0.6228;$$

$$W_{\text{叶}} = 1.2514 + \bar{D}^2 (-3.5219 + 0.010309\bar{H} - 0.000507\bar{H}^2), \text{ 相关系数 } r = 0.5241。$$

庆元县烘干生物量的模型^[8]为:

$$W_{\text{干}} = 3.4166 \times 10^{-2} \bar{D}^{1.7202} \bar{H}^{1.1057}, \text{ 相关系数 } r = 0.9749;$$

$$W_{\text{根}} = 4.3570 \times 10^{-2} (\bar{D}^2 \bar{H})^{0.7172}, \text{ 相关系数 } r = 0.8893;$$

$$W_{\text{枝}} = 1.3987 \times 10^{-2} \bar{D}^{2.3555} \bar{H}^{-0.2717}, \text{ 相关系数 } r = 0.7289;$$

$$W_{\text{叶}} = 0.9780 + \bar{D}^2 (-8.4058 \times 10^{-3} + 4.0595 \times 10^{-3} \bar{H} + 1.9195 \times 10^{-4} \bar{H}^2), \text{ 相关系数 } r = 0.6282。$$

如监测期内设计要间伐(预测)或已间伐(监测),要加上间伐材的生物量 W_j (只计算间伐材树干生物量)。

2.6 单株和各器官碳含量和碳密度

碳储量测定普遍采用的方法是通过直接或间接测定森林植被的生产量与生物现存量再乘以生物量中碳元素的含量推算而得^[12-16]。用重铬酸钾-硫酸氧化法测定林木各器官含碳量,得到浙江省杉木各器官烘干质量含碳率 P_i 分别为:干 52.34%,根 47.22%,枝 48.95%,叶 51.28% 和皮 49.17%。

根据测定的林木各器官质量含碳率 P_i 和烘干生物量计算碳质量 c (kg): 单株各器官碳质量 $c_i = W_i \times P_i$; 间伐木树干碳质量 $c_j = W_j \times P_{\text{干}}$ 。

如果用材积 V 或蓄积 M 换算碳质量时,用杉木各器官绝干密度换算成单位体积含碳率计算。

立木平均单株碳质量 $C_i = \sum c_i$ 。则:

$$\text{该标准地碳密度 } P_c (\text{kg} \cdot \text{hm}^{-2}) \text{ 为: } P_c = N_i \times C_i + \sum Q_i N_i (1 - Q_i)^{-1} C_j。$$

$$\text{林分平均碳密度 } \bar{P}_c = n^{-1} \sum P_c。$$

2.7 林分碳储量和二氧化碳净吸存量

碳储量(t): $C = \bar{P}_c \times S / 1000$, 则二氧化碳净吸存量(t)为: $T = 44 / 12 C$ 。

监测期内二氧化碳年净吸存量($\text{t} \cdot \text{a}^{-1}$)为: $T_y = \frac{T_{\text{后}} - T_{\text{前}}}{\Delta t}$ 。

3 监测方法评价

本研究区分不同立地条件、全部采用定量方法,并考虑间伐材的碳汇,进行碳汇预测和监测,科学准确,精度高。

该方法充分整合杉木已有研究成果,结合碳汇监测的实际,进行补充调查研究。在实际监测时,只调查林分的几个主要常规因子监测碳汇量,成本低,省时省力。

文章列出了浙江省几个点重点产杉区(以开化县为主)和部分全省的模型。各地在具体应用时可就近选用,精度可满足要求,也可通过调查建立自己的模型,精度会更高。

其他树种的碳汇监测也可参考本方法,但选用的模型应根据各树种的具体情况建立。

参考文献:

- [1] 汪传佳. 重视 CDM 造林再造林项目建设[J]. 浙江林业, 2006 (2): 24 - 25.
- [2] 汪传佳, 周俊宏. 浙江开化县“国家造林项目”立地质评价[J]. 浙江林业科技, 1991, 11 (6): 47 - 51.
- [3] 郑勇平, 方俊良, 杨志涌, 等. 湖州市杉木林立地质量的数量化评价[J]. 浙江林学院学报, 1991, 8 (2): 234 - 244.
- [4] 汪传佳. 杉木定量抚育间伐技术研究[J]. 林业科技通讯, 1998 (1): 7 - 9.
- [5] 周国模, 林生明, 王仁东. 杉木人工林主伐年龄的研究[J]. 浙江林学院学报, 1991, 8 (3): 295 - 299.
- [6] 周国模, 郭仁鉴, 韦新良, 等. 浙江省杉木人工林生长模型及主伐年龄的确定[J]. 浙江林学院学报, 2001, 18 (3): 219 - 222.
- [7] 林生明, 徐土根, 周国模. 杉木人工林生物量的研究[J]. 浙江林学院学报, 1991, 8 (3): 288 - 294.
- [8] 周国模, 姚建祥, 乔卫阳. 浙江庆元杉木人工林生物量的研究[J]. 浙江林学院学报, 1996, 13 (3): 235 - 242.
- [9] 李晓庆, 郑勇平, 郑求星. 杉木人工林主伐年龄的研究[M]//王仁东. 杉木林基地资源评估和经营技术综合研究论文集. 上海: 上海科学技术文献出版社, 1992: 93 - 97.
- [10] 鄢振武, 汪传佳, 秦国峰, 等. 生态经济型林业经营技术[M]. 北京: 中国农业出版社, 2002: 104 - 108.
- [11] 李晓庆, 汪传佳. 荒山森林生态系统恢复技术[M]. 北京: 中国农业出版社, 2000: 15 - 20.
- [12] 刘华, 雷瑞德. 我国森林生态系统碳储量和碳平衡的研究方法及进展[J]. 西北植物学报, 2005, 25 (4): 835 - 843.
- [13] 王效科, 冯宗炜, 欧阳志云. 中国森林生态系统的植物碳储量和碳密度研究[J]. 应用生态学报, 2001, 12 (1): 13 - 16.
- [14] ALEXANDER S, SUZI K, FLINT H, *et al.* An interdisciplinary method for estimating carbon-offset supply and increasing the feasibility of a carbon market under the CDM [J]. *Ecol Econ*, 2000, 35: 203 - 221.
- [15] OMAR R, GARZA-CALIGARIS J, KANNINEN M, *et al.* Modeling carbon sequestration in afforestation, agroforestry and forest management projects: the CO₂ fix V. 2 approach [J]. *Ecol Model*, 2003, 164: 177 - 199.
- [16] ANDERS L, ACHIM G, ANN-SOFIE M. Long-term measurements of boreal forest carbon balance reveal large temperature sensitivity [J]. *Global Change Biol*, 1998, 4 (4): 443.

浙江林学院与台州市林业局签订林业科技全面合作协议

2007年4月1日,浙江省教育厅与台州市人民政府全面合作暨共建浙江高校产学研联盟台州中心签约仪式在台州市隆重举行。浙江林学院与台州市林业局签订的林业科技全面合作协议作为大会的4个签约项目之一在会上正式签约。

浙江省教育厅在台州成立产学研工作中心,旨在优化整合全省高校的科技资源,连接台州市的科技需求,充分发挥政府和教育行政部门在整合资源方面的作用,为企业和高校的合作拓宽平台,拓展范围,促进高校和企业更直接更紧密合作。10多家省属高校参加了会议,校领导周国模、方伟参加了签约仪式。这次学校与台州市林业局的正式签约,标志着双方在原有合作基础上,将进一步推动在人员派出和培训、科技项目实施、科技平台建设等方面的深入合作。

科技处