

福建省森林生态系统碳汇潜力

吕劲文¹, 乐群^{1,*}, 王铮^{1,2}, 张国君¹

(1. 华东师范大学地理系, 地理信息科学教育部重点实验室, 上海 200062; 2. 中国科学院科技政策与管理科学研究所, 北京 100190)

摘要:利用 CO2FIX V3.1 模型对福建省原有森林生态系统和无林地造林两部分的碳汇潜力动态变化进行计算,为 CDM 造林碳汇项目的开展提供参考。假设采伐、非采伐两种情景,模拟显示福建省原有森林生态系统 2004 至 2050 年可净固定大气碳量为 254.74—334.79TgC,而无林地造林可净固定大气碳量 49.23—58.42TgC。马尾松、杉木及硬阔类的面积在福建省森林中占较大比重,自 2004 至 2050 年,三者可分别固碳 92.26—103.17TgC、71.09—107.39TgC 和 114.97—132.41TgC。在福建省 9 个地级市中,南平、福州和三明的无林地造林碳汇潜力最大,龙岩、漳州、宁德次之,沿海的莆田、泉州和厦门最小。

关键词:碳汇潜力;CO2FIX 模型;森林生态系统

Carbon sequestration potential in Fujian's forest ecosystems

LÜ Jingwen¹, YUE Qun^{1,*}, WANG Zheng^{1,2}, ZHANG Guojun¹

1 Department of Geography, East China Normal University, Key Laboratory of Geography Information Science, Ministry of Education, Shanghai 200062, China

2 Institute of Policy and Management, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100190, China

Abstract: As an effort to provide a benchmark for the CDM afforestation project, dynamics of carbon sequestration potential for both indigenous forests and non-forested lands in Fujian Province was modeled using a computerized ecological model known as CO2FIX V3.1. Two human interference scenarios, harvesting and non-harvesting, were simulated. Simulation results suggested that the net carbon sequestered by indigenous forest ecosystem between 2004 and 2050 may reach 254.74—334.79TgC, while afforestation practices during the same period may fix additional 49.23—58.42TgC. With high proportions among all forest species, *Pinus massoniana*, *Cunninghamia lanceolata*, and Hardwood may solidify carbon dioxide up to 92.26—103.17TgC, 71.09—107.39TgC, and 114.97—132.41TgC, respectively. All nine prefecture-level cities in Fujian were rank ordered using the model output, with Nanping, Fuzhou, and Sanming presenting the greatest potential in carbon sequestration, Longyan, Zhangzhou, and Ningde in the middle, and such costal cities as Putian, Quanzhou, and Xiamen tailing the list.

Key Words: carbon sequestration; CO2FIX model; forest ecosystem

森林过度采伐被认为是继矿物燃料燃烧之后引起全球大气二氧化碳浓度上升的最重要因素^[1]。研究表明,不同自然地带的植被固碳能力不同,以森林生态系统固碳能力最强、最稳固^[2]。因此,造林对于降低大气二氧化碳浓度,平衡全球碳循环起着重要的作用,而准确的估算并分析森林生态系统碳汇潜力将有助于大气环境的有效评估并为决策提供科学依据。

国内外学者对森林生态系统生产力、碳贮存量及其动态变化和碳汇潜力进行了广泛研究。传统方法利用森林资源清查资料进行统计分析,Dixon 等^[3]研究表明低纬地区森林采伐致使每年大量的碳排入大气,而中高纬地区森林生态系统则具备一定的碳汇功能。方精云等^[4]对我国 1949 至 1998 年间森林植物碳贮存量的

基金项目:中国科学院知识创新工程重要方向资助项目(KZCX2-YW-325)

收稿日期:2009-07-29; 修订日期:2009-12-31

* 通讯作者 Corresponding author. E-mail: qyue@ geo. ecnu. edu. cn

动态变化进行了计算,证实了我国森林生态系统对全球大气碳平衡的贡献。王效科等^[5]和刘国华等^[6]对我国森林生态系统的植物碳量、碳密度及其变化趋势进行了分析计算。随着计算机模型的开发应用,森林生态系统碳循环的发展及限制因素(包括气象、生物、化学等方面)被综合加以考虑并结合样地清查数据进行模拟,其中 Zhang 等^[1]和 Nabuurs 等^[7]分别利用 F-CARBON 1.0 和 CO2FIX V2.0 对森林生态系统碳汇潜力和森林碳汇估算的不确定因素进行分析;季劲钩等^[8]利用 AVIM 研究了地表面物理过程与生物地球化学过程耦合的激励和实现方法。近年来,遥感技术结合地面调查为研究森林生态系统碳循环提供了新方式^[9-10]。

福建省地势自西北向东南下降,西部和中部的两列山带走向大致与海岸平行,其间为河谷、盆地,东部沿海为丘陵、台地和平原。全省年均气温 15—22℃,年均降水量 800—1900mm,降水量分布沿海和岛屿偏少,西北山地较多。第六次全国森林资源清查(1999—2003 年)显示,福建省的森林覆盖率达到 62.96%,居全国各省之首,且中幼龄林面积比重较大,因此单位国土面积上的碳汇潜力大。目前对福建省森林碳汇潜力研究较少,且国内对森林碳汇潜力的研究多未能对系统各组成部分碳汇潜力进行细分,本研究分两种情景对 2004—2050 年全省碳汇潜力进行估算,为 CDM 造林碳汇项目的开展提供参考。

1 研究方法

1.1 CO2FIX V 3.1 模型简介^[11-12]

CO2FIX 模型由荷兰瓦格宁根大学开发,是基于生态系统层级的碳平衡模型。该模型可用于模拟计算森林生态系统中活立木、土壤和木质产品链的碳贮存量和碳通量,模拟时间以 1a 为单位。CO2FIX V3.1 版本(2004 年)主要包括生物量模块、土壤模块、林产品模块、生物质能源模块、经济模块和碳核算模块。

模型中,森林生态系统的净固碳量由下式计算:

$$CT_t = Cb_t + Cs_t + Cp_t \quad (1)$$

式中, Cb_t 、 Cs_t 、 Cp_t 分别表示在时间 t 贮存于活立木、土壤有机物以及木质产品中的碳量,单位均为 MgC/ hm^2 。生物质能源模块的计算结果不直接代表碳贮存,但将计算其替代矿物能源而避免的碳排放计入系统碳固存,可用下式表示:

$$A = CT_t + Cbio_t \quad (2)$$

式中, A 代表造林总吸收的碳总量, $Cbio_t$ 表示使用生物质能源排放到大气中的碳量,即生物质能源替代矿物能源,从而减少由于矿物能源的使用排放至大气中的碳净增量。

生物量模块考虑了植被干、枝、叶、根生长量、死亡率(包括自然、竞争死亡和经营性枯死)以及采伐等几个因素对单位面积上活立木碳存量的影响,其中树干的生长量对其影响最大,枝、叶、根生物量增长通过其与树干生物量增长的相对比例系数确定。模型中提供了两种定义树干生物量生长的方法:1、根据树木或林分年齡计算(数据可由传统的收获表获取)。一般生长模式如 Chapman-Richards 模式:

$$a = A / \{1 + e^{-(\beta + kt)/v}\} \quad (3)$$

式中, a 代表 t 时刻的生物量, A 表示最大生物量(即累积生长的饱和值或称之为生物学上限), β 、 k 、 v 为参数。方程(3)仅用于描述树种一般的生长模式,而实际的模型计算中考虑到数据的可获取性,以各树种单位面积蓄积连年生长量时间序列(CAI)来表征其生物量的增长,本文即以此方法进行计算(表 3)。2、根据植物地上部分的最大生物量与林分总生物量计算。考虑到在热带森林中往往以直径取代林齡,则:

$$B_i = A \times (B_{max} - B) \times B^k \quad (4)$$

式中, B_i 表示林分生物量增量, B_{max} 、 B 分别表示最大可达生物量和实际生物量, A 、 k 为参数。

模型采用 YASSO 动态土壤模块估算土壤中碳储量以及碳通量,土壤碳的输入因子可直接由生物量模块导入。模块包括 3 个残体部分以及 5 个分解部分。目前该模型版本中还未考慮土壤各分层中的相应碳汇量,而将土壤层视为一个整体。

产品模块全程跟踪林产品中碳在采伐后的走向。在采伐的当年,完成了多个中间过程及分配步骤,直至碳被最终留存于木质产品、被填埋或转化为生物质能源。树干和采伐的树枝是产品模块的物质来源。模块只

考虑初始形成的生物质中的碳,而树胶等则不予以考虑。林产品使用寿命内假定碳平均排放。

化石能源燃烧使长期固存的碳释放到大气中,而生物质能源的利用只释放短期固定的碳,不会额外增加大气碳含量。模型中,生物质能源来源于工业生产剩余物(如废弃的产品、生产过程的损失等)和采伐剩余物。生物质能减排包括两种方式:(1)用生物质能替代化石能源;(2)改进现有的生物质能使用技术。

模型中经济模块对成本效益进行了简单的估算,碳核算模块主要用于计算碳信用。

1.2 数据及模型参数

采用造林绿化的方式增加碳吸存,可利用土地面积是一重要的因素。据第六次全国森林资源清查统计,福建省林分中幼龄林、中龄林及近熟林合计面积为 $5.1261 \times 10^6 \text{ hm}^2$ (表1),本研究中原有森林碳汇潜力即通过上述数据计算。由于楠木林在全省林分中所占比重小,仅为0.14%,本研究未予以考虑。同期全省无林地(包括宜林荒山荒地、采伐迹地、火烧迹地、宜林沙荒地)总面积 $8.251 \times 10^5 \text{ hm}^2$ ^[13],依据福建统计年鉴以及全省造林计划估算各地级市无林地面积、各树种在各地造林面积及造林年数(表2),同时假设各地年递增造林面积均为5%。表2中福州15a表示用15a完成无林地造林。

表1 福建省未成熟林面积^[13]

Table 1 Area of premature forest in Fujian Province/ 10^2 hm^2

树种 Species	林分 Stand forest			用材林优势树种 Dominant species of timber forest		
	幼龄林 Young forest	中龄林 Half-mature forest	近熟林 Near-mature forest	幼龄林 Young forest	中龄林 Half-mature forest	近熟林 Near-mature forest
马尾松 <i>Pinus massoniana</i>	5318	7745	3054	2017	5219	2670
杉木 <i>Cunninghamia lanceolata</i>	3511	10634	3247	3031	9768	3055
栎类 <i>Quercus</i>	505	746	385	192	361	193
硬阔类 Hardwood species	5147	6953	1828	2573	3657	697
桉树 <i>Eucalyptus</i> spp	144	0	0	144	0	0
木麻黄 <i>Casuarina equisetifolia</i>	313	192	120	0	0	0
软阔类 Softwood species	915	384	120	650	264	72

表2 福建省各市无林地各树种植面积

Table 2 Area of plantation for each species in prefecture-level cities of Fujian Province/ 10^2 hm^2

树种 Species	Fuzhou 15a	Xiamen 8a	Quanzhou 10a	Zhangzhou 10a	Ningde 8a	Putian 20a	Sanming 8a	Longyan 8a	Nanping 12a
	306	10	141	257	216	154	327	272	370
杉木 <i>Cunninghamia lanceolata</i>	408	12	188	345	287	206	436	362	494
栎类 <i>Quercus</i>	-	-	-	-	-	-	22	18	25
硬阔类 Hardwood species	367	11	169	310	259	185	393	326	445
桉树 <i>Eucalyptus</i> spp	21	1	10	17	15	10	22	18	25
木麻黄 <i>Casuarina equisetifolia</i>	41	2	20	34	30	20	-	-	-
软阔类 Softwood species	102	4	36	72	64	42	109	91	124
合计 Total	1245	40	564	1035	871	617	1309	1087	1483

生物量模块参数见表3及附表1。各树种的干碳含量采用IPCC推荐值0.5(MgC/Mg DM),模块所需输入的枝、叶、根相对树干的生长比例通过各部分的年净生产力数据获取。本研究为简化计算,未考虑由于种间竞争及采伐造成的活立木死亡率。根据福建省森林资源状况,选择用栲树和檫树替代硬阔类和软阔类数据,其单位面积蓄积连年生长量(CAI)均以1200株/ hm^2 计算。由于国内对枝、叶、根(整体根系)等的周转率研究资料有限,本研究主要参考以往CO2FIX模型的应用研究^[7,14-15]及相关文献^[16]进行参数估计。木材密度计算

参考相关文献^[17-18],木麻黄取自各高度方向的均值,其余树种均取自各地方的平均值。本研究中将木麻黄视为防护林栽培,只间伐而无主伐。

由于福建省内的硬阔类、软阔类和栎类主要分布于闽西的3市,而马尾松、杉木在全省均有分布,桉树、木麻黄主要分布于沿海各市,且由于各龄组的树种只有全省面积统计,因此原有森林碳汇计算土壤模块中所需气象数据^[19](月平均气温和降水量)采用如下形式输入:马尾松和杉木的气象数据采用全省平均值,硬阔类、软阔类和栎类采用三明、龙岩和南平3地平均值,木麻黄、桉树采用沿海各市平均值。林产品模块中,模型依据林产品使用效能的高低提供了两组参数,本研究选用低处理以及回收效能的参数。生物质能源模块中,对于采伐残落物以及工业废弃木质残体均考虑替代部分煤的使用,即用于薪材,并采用改良炉灶技术。

表3 模型生物量模块使用参数

Table 3 Main parameters used in biomass module of CO2FIX model

树种 Species	木材干质量密度 Wood density (dry mass) (MgDM/m ³)	枝/叶/根年周转率 Branch/Foliage/ Root turnover rate	生长期 Growing season	轮伐期 Rotation /a	CAI 及干、枝、叶、根 净生产力参考文献 Data source references of CAI and net productivity of stem, branch, foliage, root
马尾松 <i>Pinus massoniana</i>	0.431	0.05/0.33/0.1	3—11	30	[20,21]
杉木 <i>Cunninghamia lanceolata</i>	0.307	0.05/0.33/0.1	3—11	25	[22,23]
栎类 <i>Quercus</i>	0.676	0.05/1.00/0.08	3—10	45	[24,25]
硬阔类 Hardwood species	0.47	0.05/0.33/0.08	3—11	35	[26,27]
桉树 <i>Eucalyptus</i> spp	0.578	0.05/0.33/0.08	2—12	10	[28,29]
木麻黄 <i>Casuarina equisetifolia</i>	0.687	0.05/0.33/0.1	3—10	30	[30,31]
软阔类 Softwood species	0.477	0.05/1.00/0.08	3—11	20	[32,33]

本研究依据采伐方式的不同对福建省森林生态系统碳汇潜力分两种情景进行模拟,比较模拟结果可定量分析造林增汇方式对于保护全球气候的贡献。情景1(采伐情景):假定原有用材林以及无林地造林成熟后当年完成采伐并栽种同一树种,而林分中非用材林则假定成熟后其碳循环达到动态平衡,并且模拟森林生态系统中活立木、土壤、生物质能及林产品等四个组分的碳贮存量动态变化。该情景设置可估算出全省森林生态系统最大可达净固碳量;情景2(非采伐情景):假定不进行主伐,只进行部分间伐,林分成熟后同样假定其碳循环达到动态平衡,并且只模拟活立木及土壤固碳量两部分数据,该情景设置表示全省森林生态系统最低净固碳量。附表1中采伐强度列中前者表示情景1,后者表示情景2,假定在情景2中间伐的干枝及残落物均直接进入土壤,不成为林产品或薪材。

2 结果与分析

原有森林生态系统碳汇潜力如图1所示。2004至2050年,采伐情景净固碳量大于非采伐情景,并通过生物质能源的使用减少化石燃料碳162.00TgC排放至大气中。活立木的碳贮存量在两情景中均占据较大比重,由于林木定时主伐,情景1中呈现较规律的波动,两情景活立木碳贮存量分别占系统净固碳量的58.72%和79.50%。两情景中土壤碳贮存量的变化均较稳定,至2050年分别占系统净固碳量的15.25%和20.50%。采伐情景中林产品的碳贮存量随活立木的定期采伐呈现相应的增长,至2050年,可达到87.15TgC,占系统净固碳量的26.03%。

由于福建省9个地级市完成无林地造林年限及造林面积不同,森林生态系统各组成部分碳贮存量变化较平缓,在研究时限内未表现出明显的周期性规律。无林地造林碳汇潜力如图2所示,采伐情景净固碳量从2030年起变化平缓,至2050年,净固定大气碳量略低于非采伐情景,这与各树种相继成熟采伐后部分固定的碳返回大气中有关,随着新一轮的造林,情景1中森林生态系统中的净固碳量将进一步增长,而情景2则逐步达到碳循环的动态平衡。研究时限内,情景1的总固碳量仍大于非采伐情景,同时由于生物质能的使用向大气中排放31.77TgC。由于造林树种中所占比重较大的马尾松、杉木及硬阔类的轮伐年限多在30a左右,采

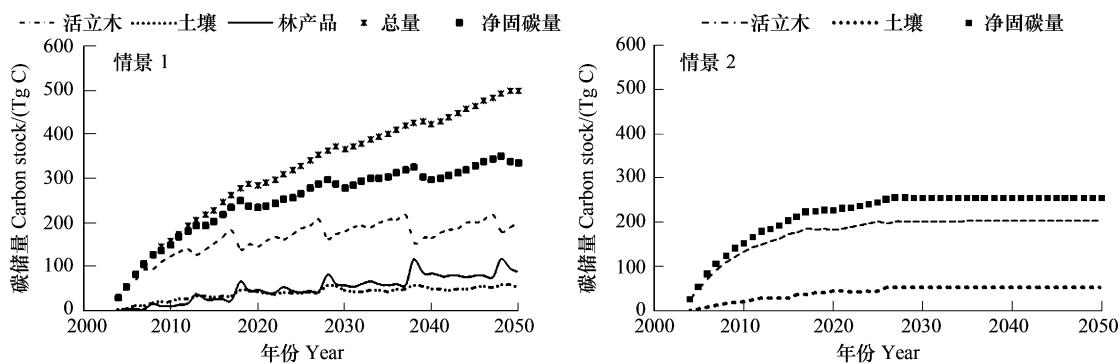


图1 福建省原有森林碳汇潜力(情景1采伐;情景2非采伐)

Fig. 1 Carbon sequestration potential for Fujian's indigenous forests

伐情景中活立木的碳贮存量从2035年起逐渐减少,至2050年占系统净固碳量的40.82%,而非采伐情景中活立木碳贮存量持续增长,至2050年占系统净固碳量的73.60%。土壤碳贮存量增长在两情景中均较平稳,至2050年分别占系统净固碳量的18.68%和26.40%。采伐情景中林产品碳贮存量从2030年起增长明显,至2050年,可达19.93TgC,占系统净固碳量的40.50%。

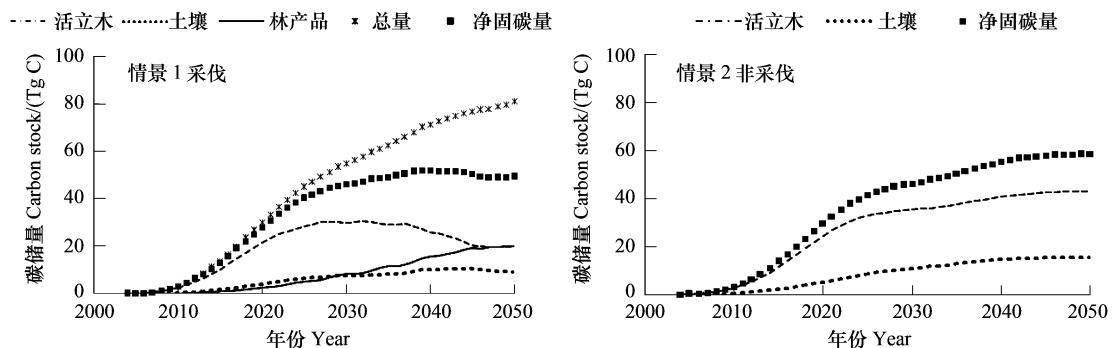


图2 福建省无林地造林碳汇潜力

Fig. 2 Carbon sequestration potential for Fujian's non-forested lands

2004至2050年,9个地级市无林地造林净固碳量计算结果如图3所示。采伐情景中,南平、福州、三明潜力均较大,至2050年3地净固碳量(含活立木、林产品及土壤3部分)分别可达8.49、7.99、7.52TgC;龙岩、漳州、宁德次之,分别可达6.23、6.17、5.28TgC;沿海的莆田、泉州和厦门最小,分别为3.92、3.37、0.26TgC。该情景中,南平、三明和龙岩3市的林产品部分的碳贮存量均大于活立木部分的碳贮存量,而沿海6市的林产品部分碳贮存量均小于活立木部分的碳贮存量。这主要是因为南平、三明和龙岩三市选种的栎类在轮伐期后进行主伐,固存的碳由活立木转移至林产品中,而沿海各市选种的木麻黄在本研究中主要考虑用于防护林,只间伐而无主伐,因而其对各市林产品部分的碳贮存量没有贡献。非采伐情景中,研究时限内南平、三明、福州净固碳量分别为10.32、9.15、9.09TgC;龙岩、漳州、宁德次之,分别为7.57、7.37、6.23TgC;莆田、泉州和厦门最小,分别为4.37、4.02、0.30TgC。

各树种固定大气碳方面,由于马尾松、杉木及硬阔类未成熟林占原有未成熟林分面积的89.27%,在无林地造林面积中占85.15%,因此具有较大潜力。至2050年三者在全省森林生态系统中可分别净固碳92.26—103.17TgC、71.09—107.39TgC和114.97—132.41TgC,在采伐情景中分别占所有植被固碳量的26.87%、27.96%和34.48%,在非采伐情景中占29.46%、22.70%和36.71%。由于假定木麻黄主要用于海岸防护林,只进行部分间伐,固碳量有限,为9.15—9.21TgC。栎类、桉树和软阔类的净固碳量分别为8.98—10.40TgC、

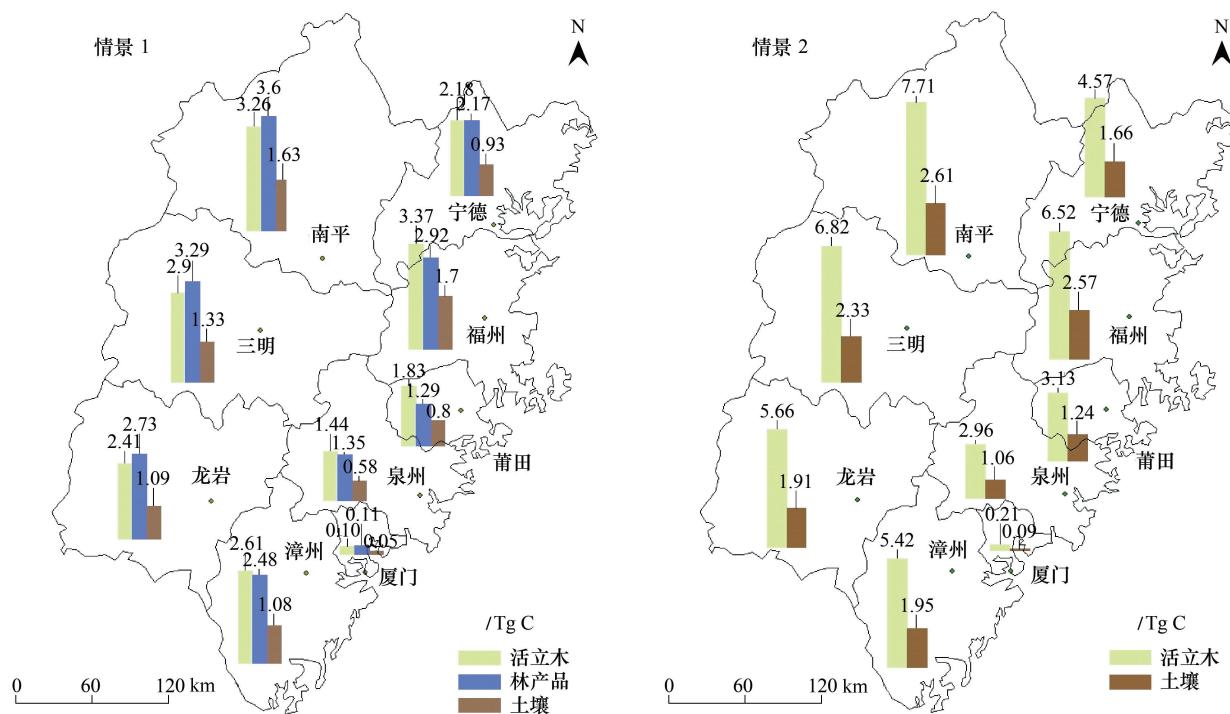


图3 两种情景下福建省各地级市无林地造林碳汇潜力比较

Fig.3 Carbon sequestration potential in each prefecture-level city's non-forested lands of Fujian Province

1.24—3.87TgC 和 15.48—17.57TgC。

3 结论与讨论

情景 1 假设各树种成熟后当年完成采伐并栽种同一树种,而实际生产过程中对成熟林木的采伐并开始新一轮的种植需要一定的年限,因而该情景的模拟结果表征森林生态系统理论碳汇潜力的上限;情景 2 中假定各树种成熟后不进行主伐,即森林生态系统进入碳循环的平衡态,而实际的社会生产发展对林产品有广阔的需求,因而该情景表征森林生态系统的理论最小碳汇潜力。基于此 2 种假设情景,估算福建省森林生态系统 2004 至 2050 年可净固定大气碳量为 313.16—384.02TgC。情景 1,原有森林生态系统及无林地造林的净固碳量均未在研究时限内达到饱和,曲线未收敛。这与该情景中假设的森林采伐模式相关,即系统碳汇潜力的动态变化取决于林木的定期采伐。情景 2,原有森林生态系统及无林地的净固碳量分别在 2030 年及 2050 年前后达到饱和,曲线收敛。这主要是由于本研究考虑无主伐的森林生态系统在成熟后将达到碳循环的动态平衡。两情景的模拟表明间断采伐有利于提高森林生态系统碳汇潜力。树种固碳方面,马尾松、杉木及硬阔类占较大比重,可分别固碳 92.26—103.17TgC、71.09—107.39TgC 和 114.97—132.41TgC。在福建省九个地级市中,南平、福州和三明的造林碳汇潜力最大,龙岩、漳州、宁德次之,沿海的莆田、泉州和厦门最小。

由于立地条件的差异影响林木生长,且国内对各树种各年龄段单位面积蓄积连年增长量(CAI)时间序列的统计数据较少,一定程度上影响了 CO2FIX 模型的模拟结果。同时,生物量模块中各树种定期间伐比例及枝、叶、根等的参数(如周转率)无法直接获取,各树种在福建省的分布、面积等数据的空间分辨力受数据可获取性制约,对本研究中森林生态系统碳汇潜力的估算造成一定的影响。本研究在情景 2 中假定各林种在成熟后达到碳循环的动态平衡,但也有研究表明^[34]成熟森林土壤仍能固定大量的碳。另外,在估算福建省森林生态系统碳量时未考虑日益扩展的四旁树木以及经济林、竹林、疏林、灌木、苗圃等的碳汇潜力,实际上其在林业用地中占据一定的比重。

References:

- [1] Zhang X Q, Xu D Y. Potential carbon sequestration in China's forests. Environmental Science and Policy, 2003, 6:421-432.

- [2] Wei D S, Xu J T, Li N Y. Afforestation and Climate Change. *Researches on Carbon Sequestration*. Beijing: China Forestry Publishing House, 2003: 3.
- [3] Dixon R K, Brown S, Houghton R A, Solomon A M, Trexler M C, Wisniewski J. Carbon pools and flux of global forest ecosystems. *Science*, 1994, 263:185-190.
- [4] Fang J Y, Chen A P, Peng C H, Zhao S Q, Ci L J. Changes in forest biomass carbon storage in China between 1949 and 1998. *Science*, 2001, 292:2320-2322.
- [5] Wang X K, Feng Z W, Ouyang Z Y. Vegetation carbon storage and density of forest ecosystem in China. *Journal of Applied Ecology*, 2001, 12 (1):13-16.
- [6] Liu G H, Fu B J, Fang J Y. Carbon dynamics of Chinese forests and its contribution to global carbon balance. *Acta Ecologica Sinica*, 2000, 20 (5):733-740.
- [7] Nabuurs G J, Schelhaas M J. Carbon profiles of typical forest types across Europe assessed with CO2FIX. *Ecological Indicators*, 2002, 1:213-223.
- [8] Ji J J, Yu L. A simulation study of coupled feedback mechanism between physical and biogeochemical processes at the surface. *Chinese Journal of Atmospheric Science*, 1999, 23(4):439-448.
- [9] Krinkina O N, Harmon M E, Cohen W B, Oetter D R, Zyrina O, Duane M V. Carbon stores, sinks, and sources in forest of northwestern Russia: Can we reconcile forest inventories with remote sensing results. *Climate Change*, 2004, 67:257-272.
- [10] Yang C J, Liu J Y, Huang H, Xu H X, Dang C L. Correlation analysis of the biomass of the tropical forest vegetation, Meteorological Data and Topographical Data. *Geographical Research*, 2005, 24(3):473-479.
- [11] Schelhaas M J, Van Esch P W, Groen T A, De Jong B H J, Kanninen M, Liski J, Masera O, Mohren G M J, Nabuurs G J, Palosuo T, Pedroni L, Vallejo A, Vilen T. CO2FIX V3.1-A modeling framework for quantifying carbon sequestration in forest ecosystems. ALTERRA Report 1068. Wageningen, The Netherlands: Alterra-Centrum Ecosystemen, 2004. 1-122.
- [12] Masera O R, Garza-Caligaris J F, Kanninen M, Karjalainen T, Liski J, Nabuurs G J, Pussinen A, De Jong B H J, Mohren G M J. Modeling carbon sequestration in afforestation, agroforestry and forest management projects: the CO2FIX V. 2 approach. *Ecological Modelling*, 2003, 164: 177-199.
- [13] State Forestry Administration. *Forest Resources Statistics of China(1999—2003)*. Beijing: China Forestry Publishing House, 2005: 1-452.
- [14] De Jong B H, Masera O, Olguin M, Martinez R. Greenhouse gas mitigation potential of combining forest management and bioenergy substitution: A case study from Central Highlands of Michoacan, Mexico. *Forest Ecology and Management*, 2007, 242:398-411.
- [15] Schelhaas M J, Nabuurs G J. CO2FIX at the landscape level—an application for the Veluwe area, the Netherlands. ALTERRA Report 301. Wageningen, The Netherlands: Alterra-Centrum Ecosystemen, 2001: 1-46.
- [16] Gill R A, Jackson R B. Global patterns of root turnover for terrestrial ecosystems. *New Phytologist*, 2000, 147:13-31.
- [17] Research Institute of Wood Industry, Chinese Academy of Forestry. *Study on Wood Physical and Mechanical Properties of the Dominant Tree Species in China*. Beijing: China Forestry Publishing House, 1982: 1-154.
- [18] Lin J G, Lin C C, Lin X F, Fang B Z. Study on the variation of wood density and mechanic properties within *Casuarina equisetifolia* trees. *Journal of Fujian College of Forestry*, 1999, 19(2):167-169.
- [19] Lu S J. *Fujian Climate*. Beijing: China Meteorological Press, 1999: 31-55.
- [20] Zhou Z X. *Chinese Pinus Massoniana*. Beijing: China Forestry Publishing House, 2001:139.
- [21] Xiang W H, Tian D L. Nutrient cycling in *Pinus Massoniana* stands of different age classes. *Acta Phytoecologica Sinica*, 2002, 26(1):89-95.
- [22] Chen C X. Studies of compilation of standard yield table of seedling stand of *Cunninghamia anceolata* in general product area in Fujian. *Journal of Fujian Forestry Science and Technology*, 2004, 31(4):1-3, 14.
- [23] Chen C Y. *Ecology of Cunninghamia Anceolata Plantation*. Beijing: Science Press, 2000:134.
- [24] State Forestry Administration. *Liaoning Forests*. Beijing: China Forestry Publishing House, 1991:92.
- [25] Liu Y C, Wu M Z, Guo Z M, Jiang Y S, Liu S R, Wang Z Y, Liu B D, Zhu X L. Biomass and net productivity of *Quercus variabilis* forest in Baotianman nature reserve. *Journal of Applied Ecology*, 1998, 9(6):569-574.
- [26] Zhan Y S, Ao X Y, Lin F, Shao J F, Huang X F. Studies on the productivity of the secondary *Castanopsis fargesii* and *Schima superb* stands in Jiangxi Province. *Forest Research*, 1998, 11(6):618-622.
- [27] Li W H. *Study on Chinese Forest Resources*. Beijing: China Forestry Publishing House, 1996:120.
- [28] Qi S Y. *Chinese Eucalyptus spp.* Beijing: China Forestry Publishing House, 1989:252.
- [29] Zhang Q, Hong W, Wu C Z, Wu J L. Comparative analyses on biomass and productivity of different *Eucalyptus* plantations. *Journal of Fujian College of Forestry*, 2006, 26(3): 218-223.
- [30] Ye G F, Zhang S S, Xu J S, Lin W X, Yao Q D, Huang F R, Xu Y C, Tan F L. Study on the maturity stage and regeneration period of main

- types of *Casuarina equisetifolia* protection forest. Protection Forest Science and Technology, 2000 (Special Issue 1) : 19-23, 78.
- [31] Ye G F, Lin Y S, Wu S D, Xu J S, Lin W X, Pan H Z. Study on the dynamic changes of *Casuarina equisetifolia* productivity. Protection Forest Science and Technology, 1996 (Special Issue) : 17-20.
- [32] Fan H L, Hong W, Hong T, Wu C Z. Preliminary study of the growth law of *Sassafras tsumu* on north Fujian mountain land. Journal of Fujian Forestry Science and Technology, 2005, 32(2) : 68-71.
- [33] Tian D L, Zhang C J, Luo Z F, Yuan W X. Biomass and distribution of nutrient elements in natural *Sassafras* mixed forests. Journal of Central-South Forestry College, 1990, 10(2) : 121-128.
- [34] Zhou G Y, Liu S G, Li Z, Zhang D Q, Tang X L, Zhou C Y, Yan J H, Mo J M. Old-Growth forests can accumulate carbon in soils. Science, 2006, 314:1417.

参考文献:

- [2] 魏殿生,徐晋涛,李怒云.造林绿化与气候变化——碳汇问题研究.北京:中国林业出版社,2003;3.
- [5] 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.应用生态学报,2001,12(1) :13-16.
- [6] 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.生态学报,2000,20(5) :733-740.
- [8] 季劲钩,余莉.地表物理过程与生物地球化学过程耦合反馈机理的模拟研究.大气科学,1999,23(4) :439-448.
- [10] 杨存建,刘纪远,黄河,许辉熙,党承林.热带森林植被生物量与遥感地学数据之间的相关性分析.地理研究,2005,24(3) :473-479.
- [13] 中华人民共和国林业部.全国森林资源统计(1999—2003).北京:中国林业出版社,2005.1-452.
- [17] 中国林科院木材工业研究所.中国主要树种的木材物理力学性质.北京:中国林业出版社,1982. 1-154.
- [18] 林金国,林春池,林秀芳,方柏州.木麻黄木材密度与力学性质株内变异的研究.福建林学院学报,1999,19(2) :167-169.
- [19] 鹿世瑾.福建气候.北京:气象出版社,1999;31-55.
- [20] 周政贤.中国马尾松.北京:中国林业出版社,2001;139.
- [21] 项文化,田大伦.不同年龄阶段马尾松人工林分循环的研究.植物生态学报,2002,26(1) :89-95.
- [22] 陈昌雄.福建杉木一般产区实生林标准收获表的编制研究.福建林业科技,2004,31(4) :1-3,14.
- [23] 陈楚莹.杉木人工林生态学.北京:科学出版社,2000;134.
- [24] 中华人民共和国林业部组织编写.辽宁森林.北京:中国林业出版社,1991;92.
- [25] 刘玉萃,吴明作,郭宗民,蒋有绪,刘世荣,王正用,刘保东,朱学凌.宝天曼自然保护区栓皮栎林生物量和净生产力研究.应用生态报,1998,9(6) :569-574.
- [26] 詹有生,敖向阳,林飞,邵锦锋,黄晓凤.江西次生栲树、木荷林生产力的研究.林业科学研究,1998,11(6) :618-622.
- [27] 李文华.中国森林资源研究.北京:中国林业出版社,1996;120.
- [28] 韩述雅.中国桉树.北京:中国林业出版,1989;252.
- [29] 张琼,洪伟,吴承祯,吴继林.不同桉树人工林生物量与生产力的比较分析.福建林学院学报,2006,26(3) :218-223.
- [30] 叶功富,张水松,徐俊森,林武星,姚庆端,黄芙蓉,徐耀昌,谭芳林.木麻黄主要类型防护林的防护成熟期和更新期研究.防护林科技,2000(专刊):19-23,78.
- [31] 叶功富,林银森,吴寿德,徐俊森,林武星,潘惠忠.木麻黄林生产力动态变化的研究.防护林科技,1996(专刊1):17-20.
- [32] 范海兰,洪伟,洪滔,吴承祯.闽北山地檫树生长规律的初步研究.福建林业科技,2005,32(2) :68-71.
- [33] 田大伦,张昌剑,罗中甫,袁文选.天然檫木混交林的生物量及营养元素分布.中南林学院学报,1990,10(2) :121-128.

附表1 各树种自然死亡率及采伐情景参数设置

Appendix table 1 Setting parameters of two human interference scenarios on mortality and harvesting of each species

树种 Species	林龄 Stand age	自然死亡率 Mortality	采伐强度		树干用作 原木/纸浆木比例 Stems logwood/ Stems rulpwood	树枝用作 原木/纸浆木比例 Branch logwood/ Branch pulpwood	残落物用于薪材比例 Slash firewood
			Fraction removed harvesting/ Non-harvesting				
马尾松	0	0.03	—	—	—	—	—
<i>Pinus massoniana</i>	8	0.02	0.4/0.2	0.2/0.7	0.0/0.5	0.2	
	14	0.01	0.4/0.1	0.3//0.6	0.0/0.6	0.2	
	20	0.01	0.3/0.1	0.5/0.4	0.0/0.6	0.3	
	30	0.01	1.0/0.0	0.6/0.3	0.2/0.6	0.3	

续表

树种 Species	林龄 Stand age	自然死亡率 Mortality	采伐强度	树干用作 原木/纸浆木比例 Stems logwood/ Stems pulpwood	树枝用作 原木/纸浆木比例 Branch logwood/ Branch pulpwood	残落物用于薪材比例 Slash firewood
			采伐/非采伐情景 Fraction removed harvesting/ Non-harvesting			
杉木	0	0.03	-	-	-	-
<i>Cunninghamia lanceolata</i>	7	0.02	0.5/0.2	0.2/0.7	0.0/0.4	0.1
	15	0.01	0.4/0.1	0.4/0.5	0.0/0.5	0.2
	25	0.01	1.0/0.0	0.6/0.3	0.2/0.6	0.3
栎类	0	0.03	-	-	-	-
<i>Quercus</i>	10	0.02	0.4/0.2	0.0/0.7	0.0/0.4	0.1
	25	0.01	0.3/0.1	0.2/0.6	0.0/0.5	0.2
	45	0.01	1.0/0.0	0.5/0.4	0.1/0.6	0.2
硬阔类	0	0.03	-	-	-	-
Hardwood species	18	0.02	0.4/0.15	0.2/0.6	0.0/0.5	0.1
	35	0.01	1.0/0.0	0.5/0.4	0.1/0.6	0.2
桉树	0	0.03	-	-	-	-
<i>Eucalyptus</i> spp	4	0.02	0.4/0.15	0.5/0.4	0.0/0.4	0.2
	10	0.01	1.0/0.0	0.7/0.2	0.2/0.6	0.3
木麻黄	0	0.03	-	-	-	-
<i>Casuarina equisetifolia</i>	8	0.02	0.3/0.3	0.0/0.5	0.0/0.3	0.0
	20	0.01	0.2/0.2	0.3/0.5	0.0/0.4	0.1
软阔类	0	0.03	-	-	-	-
Softwood species	7	0.02	0.4/0.2	0.0/0.7	0.0/0.5	0.2
	16	0.01	0.2/0.1	0.3/0.5	0.1/0.5	0.3
	20	0.01	1.0/0.0	0.6/0.3	0.2/0.6	0.3