

浙江缙云公益林生物量及固碳释氧效益

钱逸凡¹, 伊力塔^{1,2}, 钭培民³, 朱国亮³, 应宝根⁴, 余树全^{1,2}

(1. 浙江农林大学 林业与生物技术学院, 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. 浙江省缙云县林业局, 浙江 缙云 321400; 4. 浙江省林业生态工程管理中心, 浙江 杭州 310020)

摘要: 根据浙江省缙云县 117 个公益林固定小班监测数据, 在推算不同群落类型(松林、杉木 *Cunninghamia lanceolata* 林、阔叶林、针阔混交林、毛竹 *Phyllostachys edulis* 林和灌木林等 6 种群落类型)生物量的基础上, 估算了公益林植被碳储量与碳密度, 并通过碳税法、工业制氧法对缙云县公益林固碳释氧效益进行了分析。结果表明: 缙云县公益林生物量现存总量为 282.73×10^4 t, 单位生物量为 $93.21 \text{ t} \cdot \text{hm}^{-2}$, 杉木林单位生物量最高($102.61 \text{ t} \cdot \text{hm}^{-2}$), 阔叶林次之($100.93 \text{ t} \cdot \text{hm}^{-2}$), 灌木林最低($21.76 \text{ t} \cdot \text{hm}^{-2}$); 公益林平均植被碳密度为 $47.37 \text{ t} \cdot \text{hm}^{-2}$; 固碳释氧总量为 $38.59 \times 10^4 \text{ t} \cdot \text{a}^{-1}$, 总价值 4.07 亿元 $\cdot \text{a}^{-1}$ 。对缙云县公益林建设提出了一些意见和建议。图 3 表 6 参 25

关键词: 森林生态学; 公益林; 生物量; 碳密度; 固碳释氧; 缙云

中图分类号: S718.5 文献标志码: A 文章编号: 2095-0756(2012)02-0257-08

Biomass and carbon fixation with oxygen release benefits in an ecological service forest of Jinyun County, China

QIAN Yi-fan¹, Yilita^{1,2}, DOU Pei-min³, ZHU Guo-liang³, YING Bao-gen⁴, YU Shu-quan^{1,2}

(1. School of Forestry and Biotechnology, 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 Jinyun County, Jinyun 321400, Zhejiang, China; 4. Zhejiang Forestry Ecological Engineering Administration, Hangzhou 310020, Zhejiang, China)

Abstract: A detailed investigation of biomass in six types of forest communities (pine, Chinese fir, broadleaf, coniferous and broadleaf mixed, *Phyllostachys edulis*, and scrub growth forests) for 117 permanent sample plots was conducted. Carbon storage and density, carbon fixation, and oxygen release and benefit of the public service forest vegetation for the carbon tax of Jinyun County were evaluated and estimated using the Industrial Oxygen Generation Method. Results showed that the total existing biomass for the public service forests was 282.73×10^4 t with an average biomass of $93.21 \text{ t} \cdot \text{hm}^{-2}$. The Chinese fir forest had the highest community biomass ($102.61 \text{ t} \cdot \text{hm}^{-2}$) followed by the broadleaf forest ($100.93 \text{ t} \cdot \text{hm}^{-2}$), whereas the scrub growth had the lowest with $21.76 \text{ t} \cdot \text{hm}^{-2}$. The average carbon density for public service forest vegetation was $47.37 \text{ t} \cdot \text{hm}^{-2}$, and carbon fixation and oxygen release totaled $38.59 \times 10^4 \text{ t} \cdot \text{a}^{-1}$ for a total value of 407 million yuan $\cdot \text{a}^{-1}$. Opinions and suggestions for the construction of public service forests in Jinyun County. [Ch, 3 fig. 6 tab. 25 ref.]

Key words: forest ecology; public service forest; forest biomass; carbon density; carbon fixation and oxygen release; Jinyun

森林生态系统是陆地生态系统的主体, 也是最重要的陆地碳库之一, 其碳储量占整个陆地植被碳储

收稿日期: 2011-05-11; 修回日期: 2011-07-01

基金项目: 浙江省科学技术重大项目(2006C12060); 浙江农林大学科研发展基金人才启动项目(2008FR100)

作者简介: 钱逸凡, 硕士, 从事森林生态学研究。E-mail: alongly3@126.com。通信作者: 余树全, 教授, 博士, 从事森林生态学和恢复生态学研究。E-mail: yushq@zafu.edu.cn

量的 76%~98%^[1], 碳固定量每年约占整个陆地生物碳固定量的 2/3^[2-3], 其固碳释氧效益对陆地生态系统的贡献价值最大, 约占总价值的 47.5%^[4]。因此, 在调节全球碳平衡、减缓温室效应等诸多方面有着极其重要的作用。20 世纪 90 年代以前, 学者对浙江常绿阔叶林的研究主要集中在其起源、种群生物学研究及其生态系统的结构、功能及演替机制^[5-10]。近年来, 随着浙江省公益林建设的逐步推进, 针对公益林群落结构的研究也随之增多^[11-12], 但普遍存在着样本少, 缺乏系统性等问题, 而且原有研究中针对碳储量、碳密度、固碳释氧的研究较少^[13], 并且主要着眼于省级尺度上, 在县级尺度上的相关报道较少。因此, 本研究以浙江省缙云县 117 个公益林固定小班监测数据为依据, 在分析主要群落类型(松林、杉木 *Cunninghamia lanceolata* 林、阔叶林、针阔混交林、毛竹 *Phyllostachys edulis* 林和灌木林)生物量结构的基础上, 估算了其碳储量、碳密度以及固碳释氧效益, 为进一步科学推动浙江省各县市公益林建设和管理提供理论依据。

1 研究区概况

缙云县位于浙江省南部腹地、中南部丘陵山区, 丽水市东北部, 28° 25'~28° 57'N, 119° 52'~120° 25'E, 总面积为 1 503.52 km²。地貌类型分中山、低山、丘陵和谷地, 其中山地、丘陵约占全县总面积的 80%, 是典型“八山一水一分田”的山区县。属亚热带季风气候, 温暖湿润、四季分明, 年平均气温为 17.9 ℃, 年积温达 5 400.0 ℃, 最冷月(1 月)平均气温 7.6 ℃, 极端最低气温为-10.0 ℃; 最热月(7 月)平均气温 27.9 ℃; 年平均无霜期 276 d; 年平均相对湿度为 81 %; 年降水量为 1 610.5 mm。

缙云县公益林面积 30 333.33 hm², 占土地总面积的 20.17%, 占全县林业用地面积的 26.24%。主要群落类型有: 松林、杉木林、阔叶林、针阔混交林、毛竹林和灌木林, 各群落类型面积及所占比例如表 1。

缙云县公益林中, 幼、中龄林比重较大(幼龄林占 16.85%, 中龄林占 40.31%, 近熟林占 29.01 %, 成熟林占 13.12%, 过熟林占 0.72%), 占 57.16%; 幼、中龄林中, 针阔混交林和松林比例最大, 达 60.41%和 45.63%; 而近、过熟林中, 毛竹林比例最大, 达 82.88%。因此, 从表 2 中可以初步判定阔叶林、针阔混交林为增长型, 毛竹林为衰退型, 松林、杉木林、灌木林种群结构趋于稳定。

表 1 缙云县公益林类型统计

Table 1 Ecology service forest type of Jinyun County

群落类型	面积/hm ²	比例/%
松林	23 903.47	78.80
杉木林	1 942.53	6.40
阔叶林	928.20	3.06
针阔混交林	518.13	1.71
毛竹林	2 857.13	9.42
灌木林	183.87	0.61
合计	30 333.33	100.00

表 2 缙云县公益林林龄统计

Table 2 Stand age of Jinyun County ecology service forest

群落类型	幼龄林/%	中龄林/%	近熟林/%	成熟林/%	过熟林/%
松林	16.51	45.63	23.86	13.38	0.62
杉木林	27.48	38.59	10.65	20.24	3.04
阔叶林	52.25	19.54	15.47	11.97	0.77
针阔混交林	60.41	13.18	8.54	17.02	0.85
毛竹林	1.24	9.69	82.88	6.19	0.00
灌木林	35.50	23.21	35.64	5.66	0.00

说明: 毛竹林龄按竹度计算, 本研究中毛竹幼龄林代表竹度 I, 依次类推。

2 研究方法

2.1 样地设置及调查

利用缙云县二类资源清查数据中公益林小班(3 887 个)为抽样总体, 按 3%抽取 117 个固定监测小班。

在对固定监测小班全面踏查的基础上，选取典型地段内设置面积为 20 m × 20 m 的固定样地，详细记录样地基本信息，包括经纬度、海拔、坡度、坡向、坡位、郁闭度、土壤等环境因子；样地内乔木层(胸径大于 5.0 cm)采用每木调查(包括测定树高、胸径、冠幅和枝下高等)，同时在每块样地对角线上均匀设置 3 个 2 m × 2 m 的灌木固定小样方，详细记录灌木种类、株数、盖度、高度以及草本种类、株数、盖度等指标。

2.2 生物量测定

根据固定小班监测数据和浙江省重点公益林生物量模型^[14-15](表 3)，推算各个森林群落生物量(包括乔木层、灌木层以及草本层生物量)。

2.3 碳储量与碳密度

碳储量与碳密度的估算方法很多。本研究采用基于生物量的估算方法(森林生物量乘以含碳率)对公

表 3 浙江省重点公益林生物量模型

Table 3 Biomass model of key ecological forest in Zhejiang Province

层	生物量模型名称	生物量模型	模型变量	主要物种
乔木层	松类相容性生物量模型	$W_1 = W_2 + W_3 + W_4$		马尾松 <i>Pinus massoniana</i> , 湿地松 <i>P. elliotii</i> , 火炬松 <i>P. taeda</i> , 黑松 <i>P. thunbergii</i> , 黄山松 <i>P. taiwanensis</i> 等
		$W_2 = 0.060\ 0\ H^{0.793\ 4}\ D^{1.800\ 5}$		
		$W_3 = 0.137\ 708\ D^{1.487\ 266}\ L^{0.405\ 207}$		
		$W_4 = 0.041\ 7\ H^{-0.078\ 0}\ D^{2.26\ 18}$		
	杉木相容性生物量模型	$W_1 = W_2 + W_3 + W_4$		杉木 <i>Cunninghamia lanceolata</i>
		$W_2 = 0.064\ 7\ H^{0.895\ 9}\ D^{1.488\ 0}$		
		$W_3 = 0.097\ 1\ D^{1.781\ 4}\ L^{0.034\ 6}$		
		$W_4 = 0.061\ 7\ H^{-0.103\ 74}\ D^{2.115\ 252}$		
	硬阔相容性生物量模型(Ⅰ)	$W_1 = W_2 + W_3 + W_4$	W_1 为总生物量(kg), W_2 为树干生物量(kg), W_3 为树冠生物量(kg), W_4 为树根生物量(kg),	木荷 <i>Schima superba</i> , 栲树 <i>Castanopsis</i> ssp., 红楠 <i>Machilus thunbergii</i> , 刨花楠 <i>Machilus pauhoi</i> , 华东楠 <i>Machilus leptophylla</i> , 樟树 <i>Cinnamomum camphora</i> , 杜英 <i>Elaeocarpus sylvestris</i> 等
		$W_2 = 0.056\ 0\ H^{0.809\ 9}\ D^{1.814\ 0}$		
		$W_3 = 0.098\ 0\ D^{1.648\ 1}\ L^{0.461\ 0}$		
		$W_4 = 0.054\ 9\ H^{0.106\ 8}\ D^{2.095\ 3}$		
	硬阔相容性生物量模型(Ⅱ)	$W_1 = W_2 + W_3 + W_4$	H 为树高(m), D 为胸径(cm), L 为冠长(m)。	青冈 <i>Cyclobalanopsis glauca</i> , 苦槠 <i>Castanopsis sclerophylla</i> , 甜槠 <i>C. eyrei</i> , 冬青 <i>Ilex purpurea</i> , 栎 <i>Quercus</i> spp 等
		$W_2 = 0.080\ 3\ H^{0.781\ 5}\ D^{1.805\ 6}$		
		$W_3 = 0.286\ 0\ D^{1.096\ 8}\ L^{0.945\ 0}$		
		$W_4 = 0.247\ 0\ H^{0.174\ 5}\ D^{1.795\ 4}$		
	软阔相容性生物量模型	$W_1 = W_2 + W_3 + W_4$		桉木 <i>Alnus cremastogyne</i> , 柳树 <i>Salix babylonica</i> , 枫杨 <i>Pterocarya stenoptera</i> , 枫香 <i>Liquidamba formosana</i> , 檫木 <i>Sassafras tzumu</i> 等
		$W_2 = 0.044\ 4\ H^{0.719\ 7}\ D^{1.709\ 5}$		
		$W_3 = 0.085\ 6\ D^{1.226\ 57}\ L^{0.397\ 0}$		
		$W_4 = 0.045\ 9\ H^{0.106\ 7}\ D^{2.024\ 7}$		
	毛竹相容性生物量模型	$W_1 = W_2 + W_3 + W_4$		毛竹 <i>Phyllostachys edulis</i>
		$W_2 = 0.039\ 8\ H^{0.577\ 8}\ D^{1.854\ 0}$		
		$W_3 = 2.80\ E-01\ D^{0.835\ 7}\ L^{0.274\ 0}$		
		$W_4 = 3.71\ E-01\ H^{0.135\ 7}\ D^{0.981\ 7}$		
灌木层	灌木层生物量模型	$W = 0.409\ 759\ D^{1.061\ 5}\ H^{0.542\ 7}$	W 为生物量(kg), D 为地径(cm), H 为高度(m)。	茶树 <i>Camellia sinensis</i> , 盐肤木 <i>Rhus chinensis</i> , 檣木 <i>Loropetalum chinensis</i> , 铃木 <i>Eurya japonica</i> , 白栎 <i>Quercus fabri</i> , 女贞 <i>Ligustrum lucidum</i> , 青冈 <i>Cyclobalanopsis glauca</i> 等
		$W = 0.054\ 920\ H^{0.803\ 0}\ G^{1.087\ 7}$	W 为生物量(kg·m ⁻²), H 为平均高(cm), G 为盖度(%)。	莎草 <i>Cyperusro tundus</i> , 苦菜 <i>Ixeris chinensis</i> , 菝葜 <i>Smilax china</i> , 白茅 <i>Imperata cylindrica</i> , 芒 <i>Gramineae</i> , 铁角蕨 <i>Asplenium trichomanes</i> , 薹草 <i>Carex tristachya</i> 等
草本层	草本层生物量模型			

说明：引自文献[15]。

益林植被碳储量进行估算。鉴于不同森林群落因其群落组成、年龄结构的差异,其转换率略有不同。本研究中采用国际上常用的转换率,其中乔木层、灌木层转换率为 0.50^[16-18],草本层为 0.45^[19]。

2.4 固碳释氧效益及价值估算

森林植被通过光合作用持续不断地释放氧气,同化二氧化碳,并将其以稳态碳的形式固定在生态系统中。因此,可以根据植物光合作用机理和植物代谢规律推算森林植被的固碳释氧量,若按植物生物量中含有 1% 的灰分元素计,则制造 1 t 植物生物量,可放出 1.172 4 t 氧气,同化空气中 1.612 3 t 二氧化碳,固碳 0.439 9 t^[20]。

2.4.1 同化二氧化碳 ①同化空气中二氧化碳量。 $m_{CO_2}=1.612\ 3\ W_i$ 。其中: m_{CO_2} 为森林植物同化空气中二氧化碳量(t);1.612 3 为单位质量(t)森林植物同化空气二氧化碳系数; W_i 为森林植物年净生长生物量(t)。②同化空气中二氧化碳价值。采用碳税标准法对公益林固定二氧化碳的价值进行评价。目前,国际上的碳税主要用碳税率计算,使用瑞典碳税率,即 150.00 美元·t⁻¹,约合人民币 1 200.00 元·t⁻¹^[20]。

2.4.2 释放氧气 ①释放氧气量。 $m_{O_2}=1.172\ 4\ W_i$ 。其中: m_{O_2} 为森林植物放氧量(t);1.172 4 为单位质量(t)森林植物放氧量系数; W_i 为森林植物年净生长生物量(t)。②释放氧气价值。本研究采用工业生产成本法对公益林释放氧气的价值进行评价。人工生产氧气的价格为 1 100.00 元·t⁻¹。

3 结果与分析

3.1 缙云县公益林生物量

森林生物量是森林生态系统最基本的数量特征和森林固碳能力的重要标志,也是评估森林碳收支的重要参数^[21-22]。因此,估算森林生物量是估算森林碳储量和固碳释氧效益的前提。

3.1.1 不同群落类型生物量 缙云县公益林现存总生物量为 282.73×10^4 t,各群落类型中,生物量最大的是松林,达 230.86×10^4 t,占总公益林生物量的 81.65%,其他由高到低依次是杉木林 19.93×10^4 t (7.03%),毛竹林 17.15×10^4 t (6.07%),阔叶林 9.37×10^4 t (3.31%),针阔混交林 5.02×10^4 t (1.78%),灌木林 0.40×10^4 t (0.14%)。从图 1 可以看出:缙云县公益林单位生物量为 $93.21\ t \cdot hm^{-2}$ 。各群落类型单位生物量中,杉木林最高($102.61\ t \cdot hm^{-2}$),阔叶林其次($100.93\ t \cdot hm^{-2}$),其他由高到低依次为针阔混交林 $96.96\ t \cdot hm^{-2}$,松林 $96.58\ t \cdot hm^{-2}$,毛竹林 $60.03\ t \cdot hm^{-2}$,灌木林 $21.76\ t \cdot hm^{-2}$ 。

3.1.2 不同林龄生物量 由图 2 可知:松林、杉木林、阔叶林和针阔混交林的乔木层单位生物量较相近,而且从林龄结构来看,中、幼林龄的比例较高,特别是阔叶林、针阔混交林的幼林龄的比例高达 52.25% 和 60.41%。因此,可以判断出缙云县公益林各个林型单位生物量尚处于较低的水平;作为浙江省公益林中生物量增长、固碳潜力最大的群落类型^[11-13],

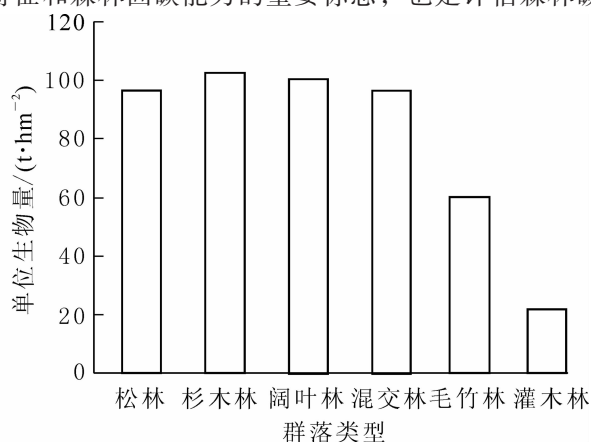


图 1 缙云县不同公益林群落单位生物量

Figure 1 Biomass per unit area of different forest types of ecology service forest in Jinyun County

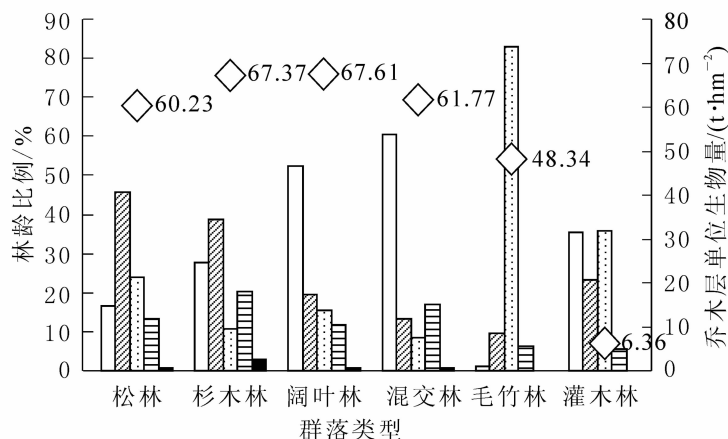


图 2 林龄结构与乔木层生物量

Figure 2 Relationship of forest age structure and the biomass of tree-layer

阔叶林、针阔混交林生物量增长潜力很大，它们的生态效益也尚未完全发挥。

3.1.3 不同垂直结构生物量 在缙云县公益林各群落中，乔木层生物量比例最高的为毛竹林，达到 80.53%，其他群落类型由高到低依次为阔叶林 66.98%，杉木林 65.66%，针阔混交林 63.71%，松林 62.36%以及灌木林 29.23%；而灌木层生物量中灌木林群落最高，为 69.35%，松林、杉木林、阔叶林和针阔混交林较为一致，毛竹林最低，仅为 18.46%；草本层生物量最高的也是灌木林群落，达 1.42%，针阔混交林最低，占 0.46%(表 4)。

表 4 缙云县不同公益林生物量垂直结构

Table 4 Biomass spatial pattern of different forest types of ecology service forest in Jinyun County

群落类型	乔木层		灌木层		草本层	
	生物量/(t·hm ⁻²)	比例/%	生物量/(t·hm ⁻²)	比例/%	生物量/(t·hm ⁻²)	比例/%
松林	60.23	62.36	35.45	36.71	0.90	0.93
杉木林	67.37	65.66	34.30	33.43	0.94	0.92
阔叶林	67.61	66.98	32.83	32.53	0.50	0.50
针阔混交林	61.77	63.71	34.75	35.84	0.45	0.46
毛竹林	48.34	80.53	11.08	18.46	0.61	1.02
灌木林	6.36	29.23	15.09	69.35	0.31	1.42
加权平均值		63.83		35.26		0.91

缙云县公益林群落结构较为完整。其中乔木层生物量为 180.45×10^4 t，占总生物量的 63.83%，灌木层生物量为 99.70×10^4 t，占总生物量的 35.26%，草本层生物量为 2.58×10^4 t，占 0.91 %。乔木层生物量是群落总生物量的主要成分，加大对乔木层的经营管理，增加乔木层生物量，是增加群落总生物量的关键。

3.2 缙云县公益林植被碳储量与碳密度

缙云县公益林植被总碳储量为 141.24×10^4 t，各群落类型中，松林碳储量最大(115.32×10^4 t)，灌木林储量最小(0.20×10^4 t)；植被总碳密度加权平均值为 $47.37 \text{ t} \cdot \text{hm}^{-2}$ (表 5)。

表 5 缙云县公益林植被碳储量与碳密度

Table 5 Carbon storage and Carbon density of different forest type of ecology service forest in Jinyun County

群落类型	碳储量/($\times 10^4 \text{ t}$)				碳密度/($\text{t} \cdot \text{hm}^{-2}$)			
	乔木层	灌木层	草本层	合计	乔木层	灌木层	草本层	合计
松林	71.98	42.37	0.97	115.32	30.11	17.73	0.40	48.24
杉木林	6.54	3.33	0.08	9.96	33.68	17.15	0.42	51.26
阔叶林	3.14	1.52	0.02	4.68	33.80	16.41	0.22	50.44
针阔混交林	1.60	0.90	0.01	2.51	30.88	17.37	0.20	48.46
毛竹林	6.91	1.58	0.08	8.57	24.17	5.54	0.28	29.98
灌木林	0.06	0.14	0.00	0.20	3.18	7.55	0.14	10.86
合计	90.23	49.85	1.16	141.24	30.10*	16.88*	0.39*	47.37*

说明：* 为加权平均值。

缙云县公益林中由于松林面积(78.80%)占绝对优势，其植被碳储量也最大，并且明显高于其他群落类型；虽然阔叶林($50.44 \text{ t} \cdot \text{hm}^{-2}$)，针阔混交林碳密度($48.46 \text{ t} \cdot \text{hm}^{-2}$)均高于松林($48.24 \text{ t} \cdot \text{hm}^{-2}$)，略低于碳密度最高的杉木林($51.26 \text{ t} \cdot \text{hm}^{-2}$)，但阔叶林、针阔混交林幼龄林面积较大(分别占到 56.25%和 60.41%)，因而它们的植被碳密度仅比灌木林($10.86 \times 10^4 \text{ t} \cdot \text{hm}^{-2}$) 高；毛竹林受单株生物量的限制，碳密度仅为 $29.98 \text{ t} \cdot \text{hm}^{-2}$ ，但毛竹生活史周期短，其固碳潜能很大。

3.3 缙云县公益林固碳释氧效益

根据公益林固定小班监测数据, 计算得出 2010 年缙云县公益林固碳释氧总量为 $38.59 \times 10^4 \text{ t} \cdot \text{a}^{-1}$, 年净固碳量为 $10.51 \times 10^4 \text{ t} \cdot \text{a}^{-1}$, 年释放氧气量为 $10.51 \times 10^4 \text{ t} \cdot \text{a}^{-1}$; 按照碳税率法和工业制氧法, 固碳释氧总价值为 4.07 亿元 $\cdot \text{a}^{-1}$, 其中固碳价值 1.26 亿元 $\cdot \text{a}^{-1}$, 释氧价值 2.81 亿元 $\cdot \text{a}^{-1}$ 。由于净增生物量的差异显著, 各群落类型固碳释氧量相差很大, 由高到低顺序为松林 > 毛竹林 > 杉木林 > 阔叶林 > 针阔混交林 > 灌木林 (表 6)。

表 6 缙云县公益林固碳释氧效益

Table 6 Value of fixing carbon and releasing oxygen of different forest types of ecology service forest in Jinyun County

群落类型	群落面积/ hm^2	净增生物量/ $(10^4 \text{ t} \cdot \text{a}^{-1})$	净固碳量/ $(\text{t} \cdot \text{a}^{-1})$	释氧量/ $(\text{t} \cdot \text{a}^{-1})$	固碳价值/ $(\text{万元} \cdot \text{a}^{-1})$	释氧价值/ $(\text{万元} \cdot \text{a}^{-1})$	固碳释 氧能力/ $(\text{t} \cdot \text{hm}^{-2} \cdot \text{a}^{-1})$	单位面积价值/ $(\text{元} \cdot \text{hm}^{-2} \cdot \text{a}^{-1})$	固碳释氧价值/ $(\text{万元} \cdot \text{a}^{-1})$
松林	23 903.47	18.40	81 822.72	218 961.43	9 818.73	21 896.14	12.58	13 267.90	3 1714.87
杉木林	1 942.53	1.33	5 920.13	15 848.31	710.42	1 584.83	11.21	11 815.74	2 295.25
阔叶林	928.20	0.56	2 683.12	6 687.53	321.97	668.75	10.10	10 673.64	990.73
针阔混交林	518.13	0.39	1 764.79	4 589.22	211.77	458.92	12.26	12 944.48	670.70
毛竹林	2 857.13	2.86	12 732.32	34 086.40	1 527.88	3 408.64	16.39	17 277.87	4 936.52
灌木林	183.87	0.05	217.05	581.07	26.05	58.11	4.34	4 576.85	84.15
合计	30 333.33	23.59	1 05140.14	280 753.95	1 2616.82	28 075.40	12.72*	13 415.02*	40 692.21

说明: * 为加权平均值。

缙云县公益林平均固碳释氧能力为 $12.72 \text{ t} \cdot \text{hm}^{-2} \cdot \text{a}^{-1}$; 其中, 毛竹林固碳释氧能力最强, 固碳量和释氧量分别为 $4.46 \text{ t} \cdot \text{hm}^{-1}$, $11.93 \text{ t} \cdot \text{hm}^{-1}$; 其次为松林, 固碳量和释氧量分别为 $3.42 \text{ t} \cdot \text{hm}^{-1}$ 和 $9.16 \text{ t} \cdot \text{hm}^{-1}$; 灌木林固碳释氧能力最弱, 平均固碳、释氧量分别为 $1.18 \text{ t} \cdot \text{hm}^{-1}$ 和 $3.16 \text{ t} \cdot \text{hm}^{-1}$ 。针阔混交林固碳释氧能力比纯阔叶林突出, 固碳、释氧量分别高出 $3.32 \text{ t} \cdot \text{hm}^{-1}$ 和 $8.85 \text{ t} \cdot \text{hm}^{-1}$ (图 3)。

4 结论与讨论

缙云县公益林总生物量为 $282.73 \times 10^4 \text{ t}$, 单位生物量平均为 $93.21 \text{ t} \cdot \text{hm}^{-2}$, 主要由松林 (占总生物量的 81.65%) 构成; 通常, 阔叶林和针阔混交林被认为是浙江省较理想的公益林群落类型^[14-16], 但由于缙云县公益林的组成结构中阔叶林、针阔混交林面积较小 (占公益林总面积的 3.06% 和 1.71%), 林龄结构尚未完善 (幼龄林比例占 52.25% 和 60.41%, 单位生物量为 $100.93 \text{ t} \cdot \text{hm}^{-2}$ 和 $96.96 \text{ t} \cdot \text{hm}^{-2}$), 因此尚未完全发挥其生态效益, 随着林龄结构的不断优化, 单位生物量还会有显著的增加。从生物量的层次结构来看, 除灌木林以外的各群落类型中, 乔木层生物量是群落生物量中比例最高的部分, 占总量的 63.00% 以上, 草本层生物量比例很低, 平均仅为总生物量的 0.91%。这主要是因为缙云县公益林郁闭度较高, 造成草本层植物光能利用率低, 生长不佳有关; 且由于毛竹林频繁经营, 灌木层、草本层植物生物量降低; 除此之外, 缙云县的灌木林主要由经济林组成, 群落结构不完整 (基本无乔木层), 郁闭度最小, 草本层生物量也最高 (1.41%)。

经本研究测算, 缙云县公益林平均植被碳密度 ($47.37 \text{ t} \cdot \text{hm}^{-2}$) 不但高于方精云等^[23]对中国浙江森林植被碳密度的估算, 并且还高于张俊等^[24]估算的浙江省公益林碳密度 ($30.28 \text{ t} \cdot \text{hm}^{-2}$), 以及丽水地区公益林平均植被碳密度 ($34.35 \text{ t} \cdot \text{hm}^{-2}$, 由丽水公益林单位生物量换算得出)^[25]。这说明缙云县公益林质量在浙江

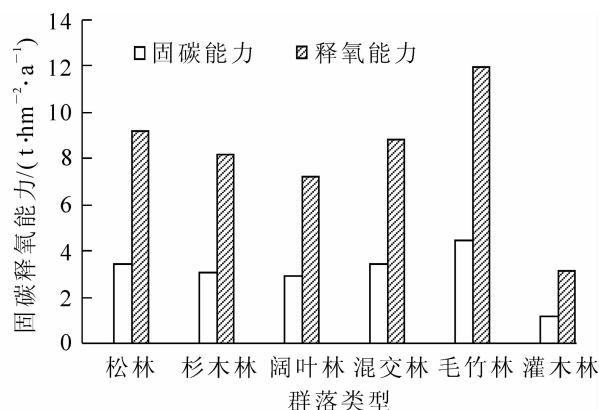


图 3 不同公益林群落固碳释氧能力

Figure 3 Comparison of solid carbon and releasing oxygen capacity of different forest types

省和丽水地区都处于前列, 考虑到目前缙云县公益林离成熟状态相差较远, 尤其是阔叶林、针阔混交林单位生物量还有很大的上升空间, 缙云县公益林在碳积累上还有很大的潜力。

缙云公益林固碳释氧效益显著, 固碳释氧总量为 $38.59 \times 10^4 \text{ t} \cdot \text{a}^{-1}$, 年净固碳量为 $10.51 \times 10^4 \text{ t} \cdot \text{a}^{-1}$, 年释放氧气量为 $10.51 \times 10^4 \text{ t} \cdot \text{a}^{-1}$, 固碳释氧总价值为 4.07 亿元 $\cdot \text{a}^{-1}$ 。同时我们看到, 虽然各群落类型年固碳释氧量由高到低顺序为松林 > 毛竹林 > 杉木林 > 阔叶林 > 针阔混交林 > 灌木林, 但固碳释氧能力由高到低则是毛竹林 > 松林 > 针阔混交林 > 杉木林 > 阔叶林 > 灌木林, 针阔混交林固碳释氧能力 ($12.26 \text{ t} \cdot \text{hm}^{-2} \cdot \text{a}^{-1}$) 已经接近松林 ($12.58 \text{ t} \cdot \text{hm}^{-2} \cdot \text{a}^{-1}$), 随着林龄的不断优化, 针阔混交林的固碳释氧能力将超过松林, 而阔叶林固碳释氧能力很低, 虽然这与林龄较小有关, 但需要采取一系列的经营措施, 使其发挥更大的生态效益。

通过多年来的努力, 缙云县公益林的分类经营取得了一定成就, 但群落类型还较为单一, 松林总面积和总生物量 (78.80% 和 81.65%) 仍占有绝对优势, 生物量增长潜力较大的阔叶林、针阔混交林生态效益未能充分发挥。为此, 在今后的公益林经营中要加强林地的经营管理, 改善龄组结构, 加大分类改造的力度, 加快针叶林的阔叶化改造, 改善森林结构, 防治水土流失, 不断提高公益林的质量, 促使公益林生态系统服务功能的充分发挥。

参考文献:

- [1] PIAO Shilong, FANG Jingyun, CIALIS P, *et al.* The carbon balance of terrestrial ecosystems in China [J]. *Nature*, 2009, **458** (7944): 1009 – 1014.
- [2] WBGU (German Advisory Council on Global Change). The accounting of biological sinks and Sources under the Kyoto Protocol: A step forwards or backwards for global environmental protection? [G/OL]. 2011-03-16 [2009-11-21]//http://www.aw-bremervahren.de/WBGU/wbgu_sn1998_engl.html.
- [3] KRAMER P J. Carbon dioxide concentration, photosynthesis and dry matter production [J]. *Bioscience*, 1981, **31** (1): 29 – 33.
- [4] 余新晓, 鲁绍伟, 靳芳, 等. 中国森林生态系统服务功能价值评估[J]. 生态学报, 2005, **25** (8): 2096 – 2102.
YU Xinxiao, LU Shaowei, JIN Fang, *et al.* The assessment of the forest ecosystem services evaluation in China [J]. *Acta Ecol Sin*, 2005, **25** (8): 2096 – 2102.
- [5] 陈启瑞, 沈琪. 浙江次生青冈林乔木层的生物量模型及其分析[J]. 植物生态学与植物学学报, 1993, **17** (1): 38 – 47.
CHEN Qichang, SHEN Qi. Studies on the biomass model of the tree stratum of secondary *Cyclobalanopsis galuca* forest in Zhejiang [J]. *Acta Phytoecol Geob Sin*, 1993, **17** (1): 38 – 47.
- [6] 金则新. 浙江天台山落叶阔叶林优势种群结构与动态分析[J]. 浙江林学院学报, 2001, **18** (3): 245 – 251.
JIN Zexin. Dominant population structure and trend of deciduous broad-leaved forest in the Tiantai Mountains in Zhejiang [J]. *J Zhejiang For Coll*, 1991, **18** (3): 245 – 251.
- [7] 常杰, 葛滢, 陈增鸿, 等. 青冈常绿阔叶林主要植物种叶片的光合特性及其群落学意义[J]. 植物生态学报, 1999, **23** (5): 393 – 400.
CHANG Jie, GE Ying, CHEN Zenghong, *et al.* Characteristics of the leaf net photosynthesis of the evergreen broad-leaved forest dominated by *Quercus glauca* and their significance in ecology [J]. *Acta Phytoecol Sin*, 1999, **23** (5): 393 – 400.
- [8] 常杰, 潘晓东, 葛滢, 等. 青冈常绿阔叶林内的小气候特征[J]. 生态学报, 1999b, **19** (1): 68 – 75.
CHANG Jie, PAN Xiaodong, GE Ying, *et al.* Features of the micro-climate in the evergreen broad-leaved forest dominated by *Quercus glauca* [J]. *Acta Ecol Sin*, 1999, **19** (1): 68 – 75.
- [9] 葛滢, 常杰. 青冈净光合作用与环境因子的关系[J]. 生态学报, 1999, **19** (5): 683 – 688.
GE Ying, CHANG Jie. Relationship between the net photosynthesis of *Quercus glauca* and the environmental factors [J]. *Acta Ecol Sin*, 1999, **19** (5): 683 – 688.
- [10] 丁圣彦, 宋永昌. 浙江天童国家森林公园常绿阔叶林演替前期的群落生态学特征[J]. 植物生态学报, 1999, **23** (2): 97 – 107.
DING Shengyan, SONG Yongchang. Study on the synecological characteristics of the early successional stage of an

- evergreen broadleaved forest on Tiantong National Forest Park, Zhejiang Province [J]. *Acta Phytacol Sin*, 1999, **23** (2): 97 – 107.
- [11] 江波. 浙江省生态公益林群落结构特征及其调控研究[D]. 北京: 北京林业大学, 2005.
JIANG Bo. *Studies on Character of Community Structure of the Ecological Forest and Its Quality Control in Zhejiang Province* [D]. Beijing: Beijing Forestry University, 2005.
- [12] 袁位高. 浙江省生态公益林主要群落结构的比较研究[D]. 北京: 中国林业科学研究院, 2009.
YUAN Weigao. *Comparative Studies on Structure of Main Forest Type of Ecological Service Forest in Zhejiang Province* [D]. Beijing: Chinese Academy of Forestry, 2009.
- [13] 余树全. 浙江省常绿阔叶林的生态学研究[D]. 北京: 北京林业大学, 2003.
YU Shuquan. *The Ecological Studies on Evergreen Broad-leaved Forest in Zhejiang Province* [D]. Beijing: Beijing Forestry University, 2003.
- [14] 应宝根, 袁位高, 葛永金, 等. 浙江省重点公益林松类生物量模型研究[J]. 浙江林业科技, 2008, **28** (2): 1 – 5.
YING Baogen, YUAN Weigao, GE Yongjin, *et al.* Establishment of the biomass model for pine in key ecological forest in Zhejiang [J]. *J Zhejiang For Sci Technol*, 2008, **28** (2): 1 – 5.
- [15] 袁位高, 江波, 葛永金, 等. 浙江省重点公益林生物量模型研究[J]. 浙江林业科技, 2009, **29** (2): 1 – 5.
YUAN Weigao, JIANG Bo, GE Yongjin, *et al.* Study on biomass model of key ecological forest in Zhejiang Province [J]. *J Zhejiang For Sci Technol*, 2009, **29** (2): 1 – 5.
- [16] 李海涛, 王姗姗, 高鲁鹏, 等. 赣中亚热带森林植被碳储量[J]. 生态学报, 2007, **27** (2): 693 – 704.
LI Haitao, WANG Shanna, GAO Lupeng, *et al.* The carbon storage of the subtropical forest vegetation in central Jiangxi Province [J]. *Acta Ecol Sin*, 2007, **27** (2): 693 – 704.
- [17] BURROWS W H, HENRY B K, BACK P V, *et al.* Growth and carbon stock change in eucalypt woodlands in northeast Australia: ecological and greenhouse sink implications [J]. *Glob Change Biol*, 2002, **8** (8): 769 – 784.
- [18] HOUGHTON R A. Aboveground forest biomass and the global carbon balance [J]. *Glob Change Biol*, 2005, **11** (6): 945 – 958.
- [19] AJTAY G L, KETNER P, DUVIGNEAUD P. Terrestrial primary production and phytomass [G]//BOLIN B, DEQENS E T, KEMPE S, *et al.* *The Global Carbon Cycle*. New York: John Wiley & Sons, 1979: 142.
- [20] 国家林业局. LY/T 1721-2008 森林生态系统服务功能评估规范[S]. 北京: 中国标准出版社, 2008.
- [21] BROWN S, SATHAYE J, CANELL M, *et al.* Mitigation of carbon emission to atmosphere by forest management [J]. *Environ Sci*, 1996, **75** (1): 80 – 91.
- [22] 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.
LIN Shengming, XU Tugen, ZHOU Guomo. Biomass of Chinese fir plantations [J]. *J Zhejiang For Coll*, 1991, **8** (3): 288 – 294.
- [23] 方精云, 陈安平. 中国森林植被碳库的动态变化及其意义[J]. 植物学报, 2001, **43** (9): 967 – 973.
FANG Jinyun, CHEN Anping. Dynamic forest biomass carbon pools in China and their significance [J]. *Acta Bot Sin*, 2001, **43** (9): 967 – 973.
- [24] 张骏, 袁位高, 葛滢, 等. 浙江省生态公益林碳储量和固碳现状及潜力[J]. 生态学报, 2010, **30** (14): 3839 – 3848.
ZHANG Jun, YUAN Weigao, GE Ying, *et al.* Carbon storage and its sequestration potential by ecological service forest in Zhejiang [J]. *Acta Ecol Sin*, 2010, **30** (14): 3839 – 3848.
- [25] 浙江省林业厅. 浙江省重点公益林建设与效益年报[R]. 杭州: 浙江省林业厅, 2007.