

海岸退化沙地木麻黄人工林能量的研究^{*}张清海¹ 叶功富² 林益明³

(1. 中国林业科学研究院热带林业研究所 广州 510520; 2. 福建林业科学研究院 福州 350012;

3. 厦门大学生命科学学院 厦门 361005)

摘要: 应用 GR-3500 型氧弹式热值仪测定福建沿海中部惠安县崇武林场 1989 年造的海岸沙地木麻黄人工林热值和能量现存量。结果表明: 现存生物量为 $152.60 \text{ t} \cdot \text{hm}^{-2}$, 净生产力为 $10.17 \text{ t} \cdot \text{hm}^{-2} \cdot \text{a}^{-1}$, 凋落物的年归还量为 $14.17 \text{ t} \cdot \text{hm}^{-2} \cdot \text{a}^{-1}$ 。木麻黄各组分干质量热值为 $19.26 \sim 20.53 \text{ kJ} \cdot \text{g}^{-1}$, 平均为 $19.70 \text{ kJ} \cdot \text{g}^{-1}$, 灰分含量为 $1.20\% \sim 11.92\%$, 平均 5.23% 。整个林分能量现存量为 $2986.92 \text{ GJ} \cdot \text{hm}^{-2}$, 各组分的分布为干(43.30%) > 根(24.10%) > 枝(13.60%) > 皮(10%) > 小枝(6.60%) > 枯枝(1.60%) > 果(0.80%)。能量的归还量为 $294.56 \text{ GJ} \cdot \text{hm}^{-2}$, 净固定量为 $196.80 \text{ GJ} \cdot \text{hm}^{-2}$, 整个林分对林地有效太阳辐射能转化率为 0.90% 。木麻黄在东南沿海地区有较高的太阳能利用率和生长适应性, 是很好的造林树种。

关键词: 能量; 木麻黄; 人工林; 退化沙地

中图分类号: S718.55 文献标识码: A 文章编号: 1001-7488(2006)08-0001-07

Studies on Energy of *Casuarina equisetifolia* Plantation on Degraded Coastal SandZhang Qinghai¹ Ye Gongfu² Lin Yiming³

(1. Research Institute of Tropical Forestry, CAF Guangzhou 510520; 2. Fujian Academy of Forestry Fuzhou 350012;

3. School of Life Sciences, Xiamen University Xiamen 361005)

Abstract: By burning samples in a GR-3500 Oxygen Bomb Calorimeter, the caloric values and the total amounts of energy of *Casuarina equisetifolia* plantation planted in 1989 were determined at Chongwu forestry centre of Hui'an county, central coastline of Fujian Province. The standing crop of biomass, net productivity and litter production of the *C. equisetifolia* plantation were $152.60 \text{ t} \cdot \text{hm}^{-2}$, 10.17 and $14.17 \text{ t} \cdot \text{hm}^{-2} \cdot \text{a}^{-1}$, respectively. The gross caloric values of various components varied from $19.26 \text{ kJ} \cdot \text{g}^{-1}$ to $20.53 \text{ kJ} \cdot \text{g}^{-1}$, with the weighted average of $19.70 \text{ kJ} \cdot \text{g}^{-1}$. Ash content ranged from 1.20% to 11.92% , and averaged 5.23% . Total amounts of energy of plantation was $2986.92 \text{ GJ} \cdot \text{hm}^{-2}$, the rank order of various components was stem (43.30%) > root (24.10%) > branch (13.60%) > bark (10%) > foliage (6.60%) > dead branch (1.60%) > fruit (0.80%). Energy return through litter and net energy fixation were 294.56 and $196.80 \text{ GJ} \cdot \text{hm}^{-2}$, respectively. The energy conversion efficiency of the photosynthetic active radiation was 0.90% on the whole stand. These results demonstrated that *C. equisetifolia* is a good tree species for silviculture in east-south coastlines of China because of its high energy conversion efficiency and ecological adaptation.

Key words: energy; *Casuarina equisetifolia*; plantation; degraded sand

木麻黄(*Casuarina equisetifolia*)自 20 世纪 50 年代引种中国已经有 50 多年的历史, 是我国东南沿海地区主要造林树种, 特别是在沿海沙地上, 已成为当家树种。沿海防护林是沿海岸主要的生态屏障, 以木麻黄为主的人工生态系统, 在防风护沙、改善沿海生态环境和促进经济建设等方面起到难以替代的作用。滨海沙地属极度退化立地, 适生树种少, 构建可持续经营的人工生态系统难度大。Gupta (1972)、Jordan (1971) 研究认为, 应用能量的概念研究植物群落比单纯用干物质测定更能反映出群落对自然资源(特别是太阳能)的利用情况。本文从能量生态学角度, 研究木麻黄人工林的能量特征, 深入了解沿海基干防护林带生态系统的结构与功能, 为沿海地区退化立地的生态恢复、现有防护林的更新改造及实现可持续经营提供科学依据。

1 试验地概况

试验地设在福建省沿海中部惠安县崇武赤湖防护林场($118^{\circ}55'E$, $23^{\circ}45'N$)。属南亚热带海洋性季风气候, 年均气温 19.8°C , 最高气温 37°C , 最低气温 2.2°C , 全年无霜期 320 d, 年均降水 1029 mm , 年均蒸发量

收稿日期: 2005-01-26。

基金项目: 国家“十五”科技攻关项目(2002BA516A16-15)“海岸带防护林优化配置模式和可持续经营技术研究”。

*叶功富为通讯作者。感谢郑海水研究员审阅全文并提出宝贵意见。

2 000 mm, 蒸发量大于降雨量, 干湿季明显, 夏季(7—9月)多台风和暴雨, 秋冬东北风强劲, 8级以上大风 105 d, 年均风速 $7.0 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$, 干湿季明显, 干旱频繁发生。土壤为均一性风积沙土, 沙土层厚度 80~100 cm。

赤湖林场, 1989年造, 密度 $2 \text{ m} \times 2 \text{ m}$ ($2\,500 \text{ 株} \cdot \text{hm}^{-2}$), 现密度为 $1\,648 \text{ 株} \cdot \text{hm}^{-2}$, 平均胸径 10.77 cm, 平均树高 12.97 m, 郁闭度大于 0.90。林地内凋落物厚度 3~5 cm, 分解良好。林下灌木、草本稀少。“九五”期间建立了固定生态定位观察点, 试验地不受人为干扰和破坏。

2 试验方法

2.1 生物量的测定

在试验地中设立 $25 \text{ m} \times 25 \text{ m}$ 样地 3 块。对样地内的林木进行每木检测, 根据每木测定的胸径和树高值选取平均木, 按 2 m 区分段进行树干解析, 枝叶部分采用分层收获法, 地下部分采用分层壕沟法, 现场称取样木各组分的鲜质量, 并取样回实验室在 $80 \text{ }^\circ\text{C}$ 下烘干, 另取小样在 $105 \text{ }^\circ\text{C}$ 下烘干, 求含水率。根据各组分的含水率, 求各组分的干物质量, 根据标准木树干解析推算各林分的生物量。初级净生产力根据前人的经验公式 $\ln W = a + b \ln(D^2 H)$ 计算: 群落能量的净生产力根据年初对群落中胸径和树高测定值, 系数 a 和 b 引用前人的研究成果(叶功富等, 1996a), 见表 1。

2.2 凋落物的收集

凋落物的收集采用收集框法, 每个样地林下随机设置 9 个收集筐, 为长 1 m, 宽 1 m, 深 15 cm, 孔径 0.5 mm 的玻璃纤维网, 筐底离地面 20 cm, 每 15 d 收集 1 次, 及时烘干, 每月收集 2 次并进行汇总, 分出叶(小枝)、枝、果和花, 分别测定鲜质量, 在 $80 \text{ }^\circ\text{C}$ 下烘干, 各组分另取少量在 $105 \text{ }^\circ\text{C}$ 下烘干至恒重, 量少的组分则在 $80 \text{ }^\circ\text{C}$ 下烘干至恒重, 求算每月凋落物的总量, 对每月的资料汇总得全年总量(林益明等, 2001; 叶功富等, 1996b)。

2.3 热值的测定

所有采集样品在 $80 \text{ }^\circ\text{C}$ 烘干, 磨粉处理后过 6 号筛贮存备用, 然后用热量计测定热值, 仪器采用长沙仪器厂生产的 GR-3500 型微电脑氧弹式热量计。样品热值以干质量热值(每克干物质在完全燃烧条件下所释放的总热量, 简称 GCV)和去灰分热值(AFCV)表示。空调控制测定环境 $20 \text{ }^\circ\text{C}$, 每样品重复多次, 误差控制在 $\pm 0.20 \text{ kJ} \cdot \text{g}^{-1}$, 每次测试时对仪器用苯甲酸标定(祖元刚, 1990; 林益明等, 2001)。

灰分含量测定采用干灰化法, 样品在马福炉中 $550 \text{ }^\circ\text{C}$ 下灰化 5 h, 然后测定灰分含量。去灰分热值 = 干质量热值 / (1 - 灰分含量)。去灰分热值可以除去不同环境下灰分含量不同的差异对热值的影响, 更能够反映植物体各组分热值情况(林益明等, 2001), 特别是叶, 更能体现其对太阳能的利用率。

能量现存量根据各组分的平均热值与各组分的生物量现存量相乘累加而得。

3 结果与分析

3.1 生物量

生物量是指群落中一定时间内单位面积上的物质数量, 通常是指活的植物体及其上枯死的植物体(林鹏等, 1999)。

从表 2 可知: 林分中各组分现存总生物量为 $152.60 \text{ t} \cdot \text{hm}^{-2}$, 其中干的生物量最大为 $67.02 \text{ t} \cdot \text{hm}^{-2}$, 占整个林分总量的 43.94%, 果实的生物量最小为 $1.16 \text{ t} \cdot \text{hm}^{-2}$, 占整个林分总量的 0.76%, 各组分的具体情况为: 干(43.94%) > 根(24.14%) > 枝(13.74%) > 皮(9.40%) > 叶(6.42%) > 枯枝(1.62%) > 果(0.76%)。整个林分生物量与南亚热带其他林分相比, 比鹤山 17 年生马占相思 (*Acacia mangium*) 林 $124.23 \text{ t} \cdot \text{hm}^{-2}$ (彭少麟等, 1998)、惠安赤湖林场 15 年生木麻黄 $123.76 \text{ t} \cdot \text{hm}^{-2}$ (叶功富等, 1996a)、印度喜马拉雅山中部贫瘠砾石地上 15 年生的印度黄檀 (*Dalbergia sissoo*) 与桃金娘 (*Rhodomyrtus tomentosa*) 混交林 $118.10 \text{ t} \cdot \text{hm}^{-2}$ (Lodhiyal et al., 2003)、香港的桃金娘灌丛 $36.47 \text{ t} \cdot \text{hm}^{-2}$ (管东生, 1998) 均高。但比鼎湖山的锥栗 (*Castanopsis chinensis*)、黄果厚壳桂 (*Cryptocarya concinna*) 和荷木 (*Schima superba*) 组成的天然林 $292.98 \text{ t} \cdot \text{hm}^{-2}$ (温达志等, 1997)、惠安

表 1 各组分生物量计算系数 a 和 b

Tab. 1 Coefficients of a and b to count biomass of various components

组分	Component	a	b
茎	Bole	-1.078 5	0.647 8
树皮	Bark	-0.754 8	0.832 5
枝	Branch	-1.254 3	0.940 7
叶	Foliage	-0.932 7	0.763 8
果	Cone	-0.845 6	0.694 2
根系	Root	-2.340 8	0.916 9
群落	Plantation	-1.827 2	0.796 4

20 年生木麻黄人工林 $194.31 \text{ t} \cdot \text{hm}^{-2}$ (吴寿德等, 1996)、中亚热带 20 年生檫木 (*Sassafras tzumu*) 林 $586.93 \text{ t} \cdot \text{hm}^{-2}$ (柳江等, 2002) 均低。地上部分与地下部分生物量比为 3.14:1, 根占总生物量的 24.14%, 具有较高的含量, 比鼎湖山格木 (*Erythrophleum fordii*) 天然林 14.41% (蚁伟民等, 2000) 和宝天曼自然保护区 45 年生栓皮栎 (*Quercus variabilis*) 林 22.29% (刘玉萃等, 1998) 高。McConaughay 等 (1999) 和 Odum (2002) 研究认为植物总是尽量把生物量分布于受限最大的器官上, 当土壤缺少养分时根系的生物量比重增大。滨海沙地养分含量低, 是木麻黄生长的一个主要限制因素, 木麻黄必须具有高度发达的根系, 来维持其快速生长对养分的需求。木麻黄根系分布较浅, 主根不明显但侧根发达, 有较高生物量, 有着很好的固沙作用。总之木麻黄在极度退化的沙地上具有较高的现存生物量, 体现出对滨海沙地有很好的适应能力。

表 2 木麻黄人工林现存生物量

Tab. 2 Crop biomass of *C. equisetifolia* plantation

项目 Item	叶 Foliage	枝 Branch	干 Bole	皮 Bark	果 Cone	根 Root	枯枝 Dead branch	总和 Total
生物量 Biomass/($\text{t} \cdot \text{hm}^{-2}$)	9.80	20.96	67.02	14.35	1.16	36.83	2.47	152.60
百分率 Percentage/%	6.42	13.74	43.94	9.40	0.76	24.14	1.62	100

3.2 净初级生产力

净初级生产力 (net primary productivity) 是指林分中除去其生理活动代谢和动物啃食之外, 单位面积单位时间内林分所固定的生物量的总量。木麻黄林各组分净初级生产力见表 3。

表 3 木麻黄人工林净初级生产力

Tab. 3 Net primary productivity of *C. equisetifolia* plantation

项目 Item	叶 Foliage	枝 Branch	干 Bole	皮 Bark	果 Cone	根 Root	总和 Total
净生产力 Net production/($\text{t} \cdot \text{hm}^{-2} \cdot \text{a}^{-1}$)	0.98	1.05	5.72	0.83	0.12	1.45	10.17
百分率 Percentage/%	9.82	10.30	56.24	8.12	1.21	14.31	100

木麻黄人工林年净生产力为 $10.17 \text{ t} \cdot \text{hm}^{-2} \cdot \text{a}^{-1}$, 比惠安 10 年生木麻黄 $7.97 \text{ t} \cdot \text{hm}^{-2} \cdot \text{a}^{-1}$ (叶功富等, 1996b)、南亚热带香港的桃金娘灌丛 $10.10 \text{ t} \cdot \text{hm}^{-2} \cdot \text{a}^{-1}$ (管东生, 1998)、夏威夷的红椿 (*Toona cilata*) 林 $8.40 \text{ t} \cdot \text{hm}^{-2} \cdot \text{a}^{-1}$ (Ares et al., 2000) 均高, 与武夷山黄山松 (*Pinus taiwanensis*) 林 $10.18 \text{ t} \cdot \text{hm}^{-2} \cdot \text{a}^{-1}$ 相近 (林鹏等, 1999), 比印度喜马拉雅山中部贫瘠砾石地上印度黄檀林 $14.18 \text{ t} \cdot \text{hm}^{-2} \cdot \text{a}^{-1}$ (Lodhiyal et al., 2003) 低, 可见木麻黄是具有较高生产力水平的沙地速生树种, 其在贫瘠沙地的适应性很好。树干年净生产力最大 $5.72 \text{ t} \cdot \text{hm}^{-2} \cdot \text{a}^{-1}$, 占总量的 56.24%, 果年净生产力最小 $0.12 \text{ t} \cdot \text{hm}^{-2} \cdot \text{a}^{-1}$, 占总量的 1.21%, 各组分的具体情况如下: 干 (56.24%) > 根 (14.31%) > 枝 (10.30%) > 叶 (9.82%) > 皮 (8.12%) > 果 (1.21%)。

3.3 凋落物归还量

凋落物是生命系统向环境归还物质和能量的主要形式, 同时也是生命系统与环境之间进行物质、能量、信息交换的主要形式。

滨海木麻黄人工林具有较高的凋落物归还量 $14.17 \text{ t} \cdot \text{hm}^{-2} \cdot \text{a}^{-1}$, 比惠安 15 年生木麻黄 $2.17 \text{ t} \cdot \text{hm}^{-2} \cdot \text{a}^{-1}$ (叶功富等, 1996b)、印度喜马拉雅山中部贫瘠砾石地上 15 年生的印度黄檀林 $4.37 \text{ t} \cdot \text{hm}^{-2} \cdot \text{a}^{-1}$ (Lodhiyal et al., 2003)、南亚热带鹤山的马占相思林 $4.90 \text{ t} \cdot \text{hm}^{-2} \cdot \text{a}^{-1}$ (彭少麟, 2003) 均高。从表 4 可知, 5—9 月归还的凋落物占总量的 58.65%, 与 Srivastava (1995) 研究结果 (5 月份凋落物归还量最大) 相似。这个期间是台风多发的季节, 雨量较高, 木麻黄生长和代谢旺盛; 同时台风也造成了大量的凋落物。年初凋落物量最小, 这与气温回升不高, 又属旱季, 木麻黄生长较慢及代谢慢有关。凋落物主成分是叶, 年归还量为 $10.23 \text{ t} \cdot \text{hm}^{-2} \cdot \text{a}^{-1}$, 占总归还量的 72.19%, 比 Srivastava (1995) 研究结果 87%~95% 低; 其次是枝条, 年归还量 $3.32 \text{ t} \cdot \text{hm}^{-2} \cdot \text{a}^{-1}$, 占总凋落物量的 23.43%; 再次是果 $0.38 \text{ t} \cdot \text{hm}^{-2} \cdot \text{a}^{-1}$, 占总量的 2.68%; 其余部分 $0.24 \text{ t} \cdot \text{hm}^{-2} \cdot \text{a}^{-1}$, 占总量的 1.69%。

3.4 木麻黄人工林及其凋落物各组分热值

热值是单位质量的物质在常温常压强下, 完全燃烧所释放出来的热量。植物各组分的热值是各组分干物质单位质量在常温常压下完全燃烧所释放的热量, 通常称干质量热值, 以下文中出现热值即指干质量热值。热值是计算群落能量的基础, 在生物量和热值的基础上可以求算群落的现存能量。植物体热值是衡量植物光能利用和生产力的指标之一 (林鹏等, 1999)。

表 4 木麻黄人工林凋落物归还量月动态变化

Tab. 4 Monthly litter biomass dynamic of *C. equisetifolia* plantation

年一月 Year-month	叶 Foliage/ (t·hm ⁻²)	枝 Branch/ (t·hm ⁻²)	果 Cone/ (t·hm ⁻²)	花 Flower/ (t·hm ⁻²)	总量 Total/ (t·hm ⁻²)	百分率 Percentage/%
2002-11	0.72	0.40	0.03	0	1.15	8.12
2002-12	0.46	0.04	0.04	0	0.54	3.81
2003-01	0.16	0.30	0.01	0	0.46	3.25
2003-02	0.15	0.10	0.01	0	0.26	1.83
2003-03	0.40	0.50	0.01	0	0.91	6.42
2003-04	0.68	0.70	0.01	0	1.39	9.81
2003-05	1.35	0.30	0.02	0.22	1.89	13.34
2003-06	1.32	0.14	0.01	0	1.47	10.37
2003-07	1.58	0.30	0.05	0.02	1.95	13.76
2003-08	1.21	0.11	0.09	0	1.41	9.95
2003-09	1.13	0.39	0.08	0	1.60	11.29
2003-10	1.08	0.04	0.02	0	1.14	8.05
总量 Total	10.23	3.32	0.38	0.24	14.17	100

木麻黄人工林各组分的热值、灰分含量、去灰分热值见表 5, 叶热值的空间分布情况为: 上层叶最高 20.53 kJ·g⁻¹, 其次为中层叶, 20.07 kJ·g⁻¹, 下层叶最小, 19.44 kJ·g⁻¹, 总体加权平均值为 20.01 kJ·g⁻¹。叶的热值从上往下减小主要是林分中太阳辐射从上往下逐渐减少造成的。枝条与叶呈相反的趋势: 上层枝最小, 19.26 kJ·g⁻¹, 其次中层枝, 下层枝最大, 总体平均热值(林分总能量与林分总生物量的比值)为 19.70 kJ·g⁻¹, 比施肥林地银柳(*Salix discolor*)林的 19.22 kJ·g⁻¹、*Salix petiolaris* 林的 19.59 kJ·g⁻¹、蒿柳(*Salix viminalis*)林的 19.21 kJ·g⁻¹(Labrecque *et al.*, 1997)均高。各组分热值顺序为: 果(20.23 kJ·g⁻¹) > 叶(20.01 kJ·g⁻¹) > 枯枝(19.83 kJ·g⁻¹) > 根(19.56 kJ·g⁻¹) > 皮(19.51 kJ·g⁻¹) > 枝(19.41 kJ·g⁻¹) > 干(19.29 kJ·g⁻¹)。

灰分含量是植物体对元素聚集度的体现, 特别是金属元素。皮的灰分含量最高, 11.92%, 干的灰分含量最小, 1.20%, 总体平均为 5.23%,
: (11.92%) > (6.84%) > (5.50%) > (4.58%) > (4.42%) > (3.54%) > (1.20%)。

, 21.98 kJ·g⁻¹, , 19.53 kJ·g⁻¹。
: (22.15 kJ·g⁻¹) > (21.48 kJ·g⁻¹) > (21.40 kJ·g⁻¹) > (20.56 kJ·g⁻¹) > (20.47 kJ·g⁻¹) > (20.34 kJ·g⁻¹) > (19.53 kJ·g⁻¹)。

5

Tab. 5 Gross caloric value, ash content and ash free caloric value of various components of *C. equisetifolia* plantation

组分 Component	干质量热值 Gross caloric value/(kJ·g ⁻¹)	Ash content/%	Ash free caloric value/(kJ·g ⁻¹)
Upper foliage	20.53±0.13	6.61±0.06	21.98±0.12
中叶 Middle foliage	20.07±0.06	6.98±0.04	21.57±0.07
下叶 Under foliage	19.44±0.06	6.93±0.02	20.88±0.06
加权平均值 Weighted average	20.01±0.04	6.84±0.03	21.48±0.08
上枝 Upper Branch	19.26±0.06	4.34±0.13	20.13±0.04
中枝 Middle branch	19.44±0.06	4.48±0.08	20.35±0.04
下枝 Under branch	19.55±0.05	4.92±0.04	20.56±0.04
加权平均值 Weighted average	19.41±0.06	4.58±0.07	20.34±0.03
干 Bole	19.29±0.13	1.20±0.10	19.53±0.12
皮 Bark	19.51±0.07	11.92±0.04	22.15±0.09
果 Cone	20.23±0.08	5.50±0.04	21.40±0.09
根 Root	19.56±0.12	4.42±0.04	20.47±0.14
枯枝 Dead branch	19.83±0.02	3.54±0.11	20.56±0.03
总量 Total	19.70±0.41	5.53±2.64	20.87±0.80

SPSS 10.0 对热值与灰分含量分析, : , r 为 -0.71, $P < 0.05$; , r 为 0.74, $P < 0.05$ 。

12.92 GJ·hm⁻²·a⁻¹, 4.39%, 5.02 GJ·hm⁻²·a⁻¹, 1.07%。
 294.56 GJ·hm⁻²·a⁻¹, 215.80 GJ·hm⁻²·a⁻¹,
 72.99%, :7月份最大, 33.01 GJ·hm⁻²·a⁻¹, 15.30%, 2月份最小
 3.08 GJ·hm⁻²·a⁻¹, 1.43%, :7月份(15.30%)>5月份(13.46%)>6月份
 (13.14%)>8月份(11.65%)>9月份(10.85%)>10月份(10.45%)>11月份(6.96%)>4月份(6.74%)>
 12月份(4.47%)>3月份(3.96%)>1月份(1.61%)>2月份(1.43%)。 6—8
 月,7月份最高,6—8月雨水充足, , , 。
 ; 1年内变化不大, , ,

8

Tab. 8 Returned energy of *C. equisetifolia* plantation

年— Year-month	叶 Foliage /(GJ·hm ⁻² ·a ⁻¹)	Branch /(GJ·hm ⁻² ·a ⁻¹)	Cone /(GJ·hm ⁻² ·a ⁻¹)	Flower /(GJ·hm ⁻² ·a ⁻¹)	Total /(GJ·hm ⁻² ·a ⁻¹)	Percentage /%
2002-11	15.01	8.06	0.59	—	23.65	8.03
2002-12	9.64	0.81	0.83	—	11.27	3.83
2003-01	3.47	5.89	0.18	—	9.54	3.24
2003-02	3.08	1.96	0.19	—	5.23	1.78
2003-03	8.55	9.83	0.20	—	18.58	6.31
2003-04	14.55	14.06	0.20	—	28.81	9.78
2003-05	29.05	5.94	0.41	4.60	40.00	13.58
2003-06	28.35	2.78	0.20	—	31.34	10.64
2003-07	33.00	6.06	1.00	0.42	40.50	13.75
2003-08	25.13	2.19	1.85	—	29.17	9.90
2003-09	23.41	7.70	1.62	—	32.74	11.11
2003-10	22.54	0.79	0.39	—	23.72	8.05
均值 Average	17.98	5.51	0.64	2.51	24.55	8.33
总量 Total	215.78	66.07	7.66	5.02	294.55	100

3. 8

(energy conversing efficiency, ECE) (NEP)
 (solar radiation energy, SRE) , ECE%=NEP/SRE×100。
 , (photosynthetic active radiation, PAR)
 , ECE=NEP/PAR×100%。
 0.47, PAR=SRE×0.47, (, 1999)。 20年的平均太阳辐射强
 度为 4.62 GJ·hm⁻²·a⁻¹(), 196.80 GJ·hm⁻²·a⁻¹,
 , 0.90%。 206.54 GJ·hm⁻²
 a⁻¹(, 1999) , (*Larix gmelinii*) 0.38%(, 1999) 。

4

1) 152.60 t·hm⁻², 43.94%, 24.14%,
 13.74%, 9.40%, 6.42%, 1.62%, 0.76%。
 68.08%。
 2) 10.17 t·hm⁻²·a⁻¹, 56.24%, 14.94%,
 70.18%, ,
 14.17 t·hm⁻²·a⁻¹, 9.27%,
 3) 19.26~20.53 kJ·g⁻¹之间, 19.70 kJ·g⁻¹,
 , , ,

4) $2\ 986.92\ \text{GJ} \cdot \text{hm}^{-2}$, $196.80\ \text{GJ} \cdot \text{hm}^{-2}$,
 $294.56\ \text{GJ} \cdot \text{hm}^{-2}$, 0.90% .

. 1998. , 22(4): 356—363
林 , . 1999. , 19(4): 504—507
林 , . 1995. : , 34(6): 987—991
林益明, . 2001. : , 42—48; 58—63; 124—127
柳 , . 2002. , 10(2): 105—110
刘玉萃, . 1998. , 9(6): 569—574
彭少麟. 2003. :
, . 1998. : , 45—60, 74—79
孙雪峰, . 1997. , : , 163—172
温达志, . 1997. + + , 17(5): 497—504
吴寿德, . 1996. , (): 21—24
肖文发, . 1999. :
, . 1996a. , (): 17—20
叶功富, . 1996b. , (): 30—34
叶功富, . 2003. , 39(): 1—7
蚁伟民, . 2000. , 20(2): 397—403
祖元刚. 1990. :

Ares A, James H F. 2000. Productivity, nutrient and water-use efficiency of *Eucalyptus asigna* and *Toona ciliata* in Hawaii. *Forest Ecology and Management*, 139: 227—236
Gupta S K. 1972. Energy structure of standing crop in certain grasslands at Gyanpur. *Trop Ecol*, 13: 147—155
Jordan C F. 1971. Productivity of a tropical forest and its relation to a world pattern of energy storage. *J Ecol*, 59: 127—142
McConaughay K D M, Coleman J S. 1999. Biomass allocation in plants. *Ecology*, 80(8): 2581—2593
Labrecque M, Teddoreescu T I, Dajgle S. 1997. Biomass productivity and wood energy of *Salix* species after 2 years growth in sric fertilized with wastewater sludge. *Biomass and Bioenergy*, 12(6): 409—417
Lodhiyal N, Lodhiyal L S. 2003. Biomass and net primary productivity of Bhabar shisham forests in central Himalaya, India. *Forest Ecology and Management*, 176: 217—235
Odum H T. 2002. Explanations of ecological relationships with energy systems concepts. *Ecological Modelling*, 158: 201—211
Strivastava A K. 1995. Biomass and energy production in *Casuarina equisetifolia* plantation stands in the degraded dry tropic of the Vindhyan Plateau, India. *Biomass and Bioenergy*, 9(6): 465—471

()