

江西千烟洲湿地松人工林碳蓄积及其与水分的关系

刘琪璟¹, 曾慧卿^{2,3}, 马泽清^{1,3}

(1. 中国科学院地理科学与资源研究所, 北京 100101; 2. 中国科学院生态环境研究中心城市与区域生态国家重点实验室, 北京 100085; 3. 中国科学院研究生院, 北京 100049)

摘要: 为揭示人工造林对碳循环的贡献以及碳蓄积同水分利用的关系, 通过树干解析方法建立南方湿地松 (*Pinus elliottii*) 生长模型, 并利用树干液流计测定水分消耗过程, 分析了从个体到群落尺度的生物量积累特征以及水分消耗规律, 包括材积方程、生物量方程、树木生长方程, 同时计算单位面积年耗水量及其与生物量积累的相关关系。试验区内地松的直径连年生长量从造林初期开始就一直呈下降趋势; 20 年生的湿地松人工林密度为 1 599 株/hm² (初植密度 5000 株/hm²), 蓄积量为 157 m³/hm², 最大蓄积量为 209 m³/hm²。目前湿地松林地上生物量为 72.061 t/hm², 生物量积累速率为 8 493 kg/(hm²·a) (折合碳约为 4 370 kg/(hm²·a)), 与通量观测得到的净交换量 (NEE) 结果基本一致。树干液流测定结果显示, 湿地松树液流速度平均为 21 495 cm³/(cm²·a), 林地通过树木蒸腾耗散的水分量为 4 769.643 t/(hm²·a), 相当于 477 mm 的降水量, 为全年降水的 48%; 最大耗水量相当于 634 mm 降水; 水分消耗量与地上干物质形成的比例为 562:1, 将生物生长量折算成蓄积量计算则水分消耗系数为 1091:1。NPP 与林分耗水速度之间呈显著的正相关关系, 包括日变化和月变化。

关键词: 生物量; 树干液流; 生长模型; 碳蓄积

文章编号: 1000-0933 (2008) 11-5322-09 中图分类号: S718.5, S758.2 文献标识码: A

Carbon sequestration of *Pinus elliottii* plantation in relation with water consumption in subtropical China

LIU Qi-Jing¹, ZENG Hui-Qing^{2,3}, MA Ze-Qing^{1,3}

1 Institute of Geographic Sciences and Natural Resources Research, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100101, China

2 State Key Laboratory of Urban and Region Ecology, Research Center for Eco-Environmental Science, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100085, China

3 Graduate University of Chinese Academy of Sciences Beijing 100049, China

Acta Ecologica Sinica, 2008, 28 (11): 5322 ~ 5330.

Abstract: Based on stem analysis and sap flow measurement, this study was conducted in subtropical China to clarify the primary productivity and the contribution of afforestation to carbon cycling, as well as the coupling relationship between carbon sequestration and water use. The growth model for *Pinus elliottii* was established, including volume table, biomass equation, diameter increment *etc.* Sap flow was measured for interpreting the relationship of primary productivity with water use. The diameter increment declined even from the beginning of afforestation, which implies the inadaptability of the exotic species in China. The stand density was reduced from the initial 5 000 stems/hm² to the present 1 599 stems/hm² in 20

基金项目: 国家重点基础研究发展规划资助项目 (2002CB4125); 国家科技部国际合作资助项目 (2006DFB91920); 中国科学院野外台站基金资助项目

收稿日期: 2008-01-25; 修订日期: 2008-09-16

作者简介: 刘琪璟 (1960 ~) 男, 辽宁人, 教授, 主要从事森林生态学与植被遥感研究。E-mail: liuqijing@gmail.com

致谢: 参加野外调查徐雯佳、刘迎春、李轩然、林耀明、涂洁等, 在此一并致谢。

Foundation item: The project was financially supported by the National Key Basic Research Special Foundation of China (No. 2002CB4125), International Joint Research Project (No. 2006DFB91920) by Ministry of Science and Technology of China, Ecological Network Fund of Chinese Academy of Sciences

Received date: 2008-01-25; **Accepted date:** 2008-09-16

Biography: LIU Qi-Jing, Professor, mainly engaged in forest ecology and vegetation remote sensing. E-mail: liuqijing@gmail.com

years by self thinning. The stand stock was $157 \text{ m}^3/\text{hm}^2$ with its maximum of $209 \text{ m}^3/\text{hm}^2$, and the volume increment was $22 \text{ m}^3/(\text{hm}^2 \text{ a})$. The above-ground biomass was $72.061 \text{ t}/\text{hm}^2$, and its growth rate was $8\,493 \text{ kg}/(\text{hm}^2 \text{ a})$ or $4\,370 \text{ kgC}/(\text{hm}^2 \text{ a})$, which is approximately consistent with the result (NEE) by means of eddy covariance. The sap flow velocity was $21\,495 \text{ cm}^3/(\text{cm}^2 \text{ a})$, and the total transpiration through canopy layer was $4\,769.643 \text{ t}/(\text{hm}^2 \text{ a})$ or 477 mm in terms of precipitation, which accounted for 48% of the annual rainfall. The maximum sap flow per year was about 634 mm. The ratio between water consumption and dry matter accumulation was 562 l. There was a significantly positive correlation between NPP and sap flow velocity, in both daily value and monthly average.

Key Words: biomass; sap flow; growth model; carbon sequestration

由于人类活动的影响,全球生态系统的功能总体上处于衰减状态^[1,2],通过生态恢复提高生态系统的碳蓄积功能受到关注。随着人们对生态系统认识的深入,特别是京都协议生效以来,生物量的意义在阐明生态系统碳蓄积上受到高度重视。在实践中,往往以木材生产量作为生产力指标^[3]。碳蓄积的研究,主要集中在几个方面:生态系统的碳收支现状、影响碳收支的驱动力以及提高碳蓄积的途径。其中碳收支的驱动力研究对于评价人为活动的影响受到高度重视^[4-6]。碳蓄积的研究方法包括传统的收获法和样地清查法、遥感法^[7]、通量法^[8]等。利用航空或卫星遥感技术测算碳蓄积研究近年来得到了迅速发展^[9],但是其精度问题一直是相关研究领域的难题。通量法是目前研究碳蓄积量最先进的方法,但其测度相关系统是非常复杂的观测系统,仅适用于特定地点的生态系统观测且对下垫面要求较严,测定结果因植被类型以及小地形差异误差很大。更为重要的是,庞大又昂贵的系统无法移动测量。更多的学者意识到,无论哪种手段,都离不开传统的群落计测方法验证。所以,通过大量样地调查以及群落生长特征测定,结合现代计测技术,是准确评价生态系统碳蓄积功能的有力手段,这一点被广泛接受^[10]。

我国在世界范围内属生态系统退化严重的国家,尽管经过几十年的努力恢复,森林覆盖率仍然很低,森林质量也有待提高。南方红壤丘陵区曾经有大面积退化生态系统,经过20a人工恢复,目前林分高度郁闭,水土流失得到控制,生物多样性明显增加^[11]。但是森林在碳蓄积以及调节水分分配方面究竟发挥着什么样的作用,需要更加准确地评价。此外,南方大面积营造的湿地松(*Pinus elliottii*)林,虽然是引进的树种,但是国外有关该种的生态学特性的报道很少,而在中国的研究却很多,且主要集中在其林学特性上。关于该种群的碳循环中的作用的研究,仅在近几年有一些报道^[16]。

本文总结了近几年调查与观测的结果,分析生态恢复后南方红壤区人工林生态系统的碳蓄积特征及其同水分利用的关系,评价生态恢复对碳循环的贡献,为科学经营管理南方人工林,提高生态系统质量提供依据。

1 试验地概况

试验地位于中国科学院江西省千烟洲生态试验站($115^{\circ}04'13''\text{E}$, $26^{\circ}44'48''\text{N}$),造林前曾是经过人为破坏的荒山秃岭,经过20a的恢复,景观发生了巨大变化,森林高度郁闭,生物种类明显增加^[11],林下已经形成了明显的灌木层和草本层,种类以森林植物占优势。森林蓄水保土功能显著增强。试验区海拔多在100 m以下,气象站海拔86 m,年平均气温(1985~2004年)为 17.9°C ,年降雨量为1 491 mm。3~6月份降雨较集中,炎热的夏季降水偏少(图1)。主要土壤类型为红壤,土壤母质为紫色砂页岩。本研究对各种人工林类型进行了样地调查,在此仅对其中面积最大的湿地松林进行分析。

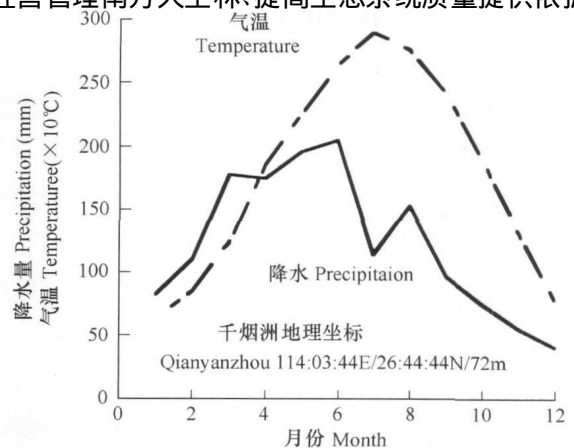


图1 试验区气温与降水季节变化(1985~2004年)

Fig. 1 Seasonal pattern of temperature and precipitation

2 研究方法

2.1 碳蓄积量测定

2.1.1 树干解析法

从2003年开始,共采伐70多株湿地松进行树干解析,同时测量所有一级枝条的基部直径(基径)。树干解析使用1 m区分段,取2个方向的平均直径逐年测定年轮宽度。通过拟合枝条直径与叶生物量、枝条生物量回归模型计算解析木所有枝条的生物量,最后建立器官生物量同胸径的回归模型^[12]。为了和林木耗水测定同步,重点分析2004年生长量和直径的关系,推算林分单位面积的生长量。同时用排水法测定树干密度,结合1998年测定的树木各器官碳密度换算碳储量。

胸径(D , cm)同器官生物量的关系拟合结果如下(kg):

$$\text{树叶生物量 } W_l = 0.0120741D^{2.1515} \quad R^2 = 0.72, \quad P < 0.001, \quad n = 22 \quad (1)$$

$$\text{树枝生物量 } W_b = 0.0401892D^{2.0074} \quad R^2 = 0.71, \quad P < 0.001, \quad n = 22 \quad (2)$$

树干生物量的计算,使用材积-胸径回归方程计算材积后,再根据木材密度换算生物量。利用胸径与地上总生物量(W)的估计值关系进行拟合,方程为:

$$W = 0.030959D^{2.5894} \quad R^2 = 0.98, \quad P < 0.001, \quad n = 70 \quad (3)$$

(1)直径相关方程

本研究由带皮直径估计去皮直径,进而计算去皮材积。通过拟合建立的带皮直径(D_b)和去皮直径(D_w)的回归方程为:

$$D_w = 0.35 + 0.822D_b \quad R^2 = 0.98, \quad P < 0.01, \quad n = 116 \quad (4)$$

(2)胸径预测方程

通过树干解析,利用自相关分析建立胸径同相邻年度胸径的关系。将 t 时刻的直径对应 $t+1$ 时刻的直径进行相关分析得到胸径预测方程,由此预测未来一年或过去一年的直径分布。假设树木不同高度的树皮厚度同胸径相等处的皮厚一致,则梢头皮厚被认为同胸高处髓心部皮厚相等,由此建立直线相关方程估计各年度胸高处皮厚。以往年度的皮厚通过回归估计获得。分析结果显示,胸径同相邻年度的胸径成紧密的直线相关(图2)。由某一年度的带皮直径($D_{b,t}$)估计下一年度带皮直径($D_{b,t+1}$)及去皮直径($D_{w,t+1}$)的方程如下:

$$\text{带皮直径预测方程 } D_{b,t+1} = 0.31385 + 1.032D_{b,t} \quad R^2 = 0.98, \quad P < 0.001, \quad n = 116 \quad (5)$$

$$\text{去皮直径预测方程 } D_{w,t+1} = 0.29891 + 0.8534D_{b,t} \quad R^2 = 0.98, \quad P < 0.001, \quad n = 116 \quad (6)$$

2.1.2 样地调查法

2004~2005年期间在试验区共调查样地70多块,样地面积20 m×20 m,对样地内所有树木进行每木检尺,并根据树干解析拟合的生物量方程,计算样地生产力。本文以1994年的12块临时样地资料进行对比研究,利用2005年调查的15块湿地松纯林样地分析林分蓄积量及生长动态,使用的是存活树木的蓄积增长量。

蓄积生长采用预测法计算,即利用胸径自相关方程估计相邻年度的直径。本文利用2005年的样地每木检尺数据,估计2004年的直径,再用材积方程计算各年度的蓄积量。

2.1.3 模型模拟法

利用BIOME-BGC模型估计群落尺度的初级生产力。BIOME-BGC模型的参数比较多,计算过程也比较复杂。模型结构在网上有详细介绍(<http://gaim.unh.edu/Structure/Intercomparison/EMDI/models/bgc.html>)。

2.2 树干液流测定

目前国际上比较流行的是使用液流计测定^[13],其原理是利用热电偶,通过测定液流经过一定距离后温度的变化(温差)计算水分运输速度。本研究使用日本生产的液流计系统进行连续观测,液流观测频率为30min/次。液流计探头长度为8cm。液流计系统还包括气象要素及土壤温度等观测装置,其中冠层温度为置于林冠层上方的红外温度计,测定的是林冠叶层的温度。样木选择,选择生长正常,代表不同径级的湿地松6株。矮小的个体有可能在实验观测期间因竞争而枯死,影响观测的连续性,故选择直径稍大的树木进行测定。

叶流量计测定的是边材水分运输速度。由于湿地松尚未开始心腐,所有木质部均属边材。液流量计数据的计算公式在很多文章都有介绍^[14,21],简单地说,就是利用单位时间单位面积边材运输的水分体积($\text{cm}^3 / (\text{h} \cdot \text{cm}^2)$)计算单株耗水速度。根据样地调查获得的胸径数据计算林木胸高断面面积($\text{cm}^2 / \text{hm}^2$),便可估算单位面积林地上林木耗水总量,即:单位面积树干一定时间内耗水量($\text{cm}^3 / \text{cm}^2$)与样地林木去皮胸高断面面积总和的乘积。

液流速度计算需要的关键参数最大温差的时间范围一般确定为 7 ~10d^[14],本研究使用 10d 的最大温差值。由于其中 3 株因仪器故障问题,数据有待进一步整理校正,因此本文利用另外 3 株观测质量最好的 2004 年数据进行分析。

耗水系数为积累单位重量干物质或有机碳所消耗的水分,其计算方法如下:

$$\begin{aligned} \text{干物质耗水系数} &= \text{耗水量} / \text{生物量增加量} \\ \text{有机碳耗水系数} &= \text{耗水量} / (\text{生物量} \times \text{碳密度}) \end{aligned}$$

3 结果

3.1 碳蓄积变化

3.1.1 林分蓄积生长

1994 年调查的湿地松平均胸径为 12.7 cm,据此计算出林木直径 10a 增长量平均为 3.2 cm。2005 年调查湿地松 1 648 株,经过统计分析,直径-株数分布呈典型的正态分布,这符合人工同龄林直径结构的一般规律。林木平均直径 15.9 cm,最大直径 30 cm,每年直径生长量平均为 0.8 cm。试验区人工林的初植密度为 5000 株/ hm^2 。根据 2005 年 15 块湿地松纯林样地调查统计,湿地松林平均密度为 1 599 株/ hm^2 ,平均直径 16.7 cm,胸高断面面积为 33 m^2 / hm^2 ,平均蓄积量为 157 m^3 / hm^2 ,最大为 209 m^3 / hm^2 ,平均蓄积生长量为 21 $\text{m}^3 / (\text{hm}^2 \cdot \text{a})$ 。由于没有考虑枯损因素,用于计算的是样地存活林木的蓄积量及其变化,所以计算结果中蓄积量略微偏低,生长量可能比实际偏高。

3.1.2 生物量变化

利用上述方法计算得出湿地松林地上生物量平均为 72.061 t / hm^2 (2005 年),其中树干占 65%。试验站湿地松各器官树干、树枝、树叶碳密度分别为 51.17%,51.37%,53.35%^[15]。将每公顷生物量分器官计算后,考虑权重计算地上总生物量的碳密度为 51.46%。因此湿地松林地上部分生物量折算成碳储量为 37.1 t / hm^2 。碳储量增量为 4.37 $\text{t} / (\text{hm}^2 \cdot \text{a})$,或者为 437 $\text{g C} / (\text{m}^2 \cdot \text{a})$ 。

1994 年调查的结果显示,地上总生物量为 47.8 t / hm^2 ,10a 时间增加了 24.2 t / hm^2 。根据树干解析计算出 2005 年林分生物量生长量为 8.4929 $\text{t} / (\text{hm}^2 \cdot \text{a})$ (表 1),说明湿地松林是一个碳汇。和 10a 增长的平均值(4.78 $\text{t} / (\text{hm}^2 \cdot \text{a})$)相比可知,生物量不是直线增加。此外,地上单株生物量同树木材积(m^3)具有紧密的直线关系,生物量(kg)大约为材积的 410 倍。而利用蓄积量计算的生物量扩展因子为 458,同单株计算的系数接近。这个参数对于从森林清查数据中提取生物量信息很有意义。

3.2 碳蓄积与水分利用的关系

3.2.1 树干液流分析

本研究的 3 株树的液流速度总体上差别不大,3 株树的树干液流量平均为 21 495 $\text{g} / (\text{cm}^2 \cdot \text{a})$ 。采用 1-1、1-2、1-3 样木测定结果分析树木耗水速度季节变化,结果表明,耗水速度随着气温升高而加大。最大值出现在

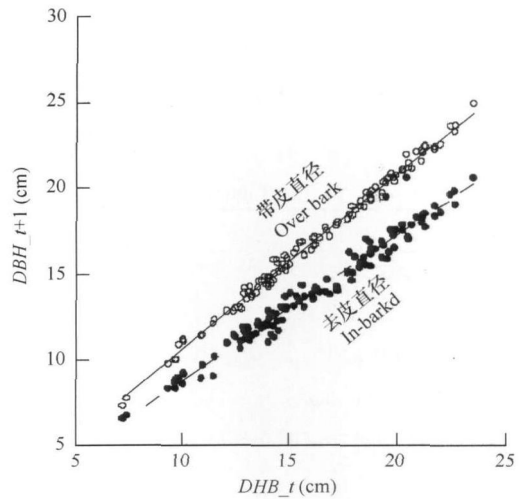


图 2 直径预测相关直线
Fig. 2 DBH prediction line

6~7月份, 超过 $6 \text{ cm}^3 / (\text{cm}^2 \cdot \text{h})$; 冬季植物生长减弱, 耗水也明显减少 (图3)。同时, 即使在冬季, 树木的耗水仍在进行, 说明生命活动没有停止。从林冠层温度变化看 (图4), 在7~8月份, 最高可达 30°C 以上。此外, 林冠层温度全年几乎都在 0°C 以上, 同树干液流没有停止的观测结果一致。

表1 湿地松林生产力主要参数

Table 1 The general parameters of productivity of slash pine plantation

项目 Item	最大值 Max2005	平均值 Mean2005	最大值 Max2004	平均值 Mean2004
密度 Density (stem/hm ²)	2000	1599	-	-
DBH (cm)	19.0	16.7	18.1	15.7
DBH 去皮 In-bark DBH (cm)	16.0	14.1	15.5	13.6
胸高断面积 Basal area (m ² /hm ²)	44.0	33.1	42.5	31.9
去皮断面积 In-bark basal area (m ² /hm ²)	31.4	23.7	29.5	22.2
蓄积量 Stock (m ³ /hm ²)	209	157	199	137
蓄积量去皮 Stock in-bark (m ³ /hm ²)	176	132	155	116
树干重 Biomass of trunk (kg/hm ²)	62497	46890	54102	40843
树枝重 Biomass of branch (kg/hm ²)	23021	17302	20841	15654
树叶重 Biomass of foliage (kg/hm ²)	10482	7869	9424	7071
地上总重 Above ground (kg/hm ²)	96000	72061	84267	63568

基于 15 个样地调查的结果, 其中 2004 年的直径数据为估计值 Data are based on 15 plots, and values in 2004 are estimated

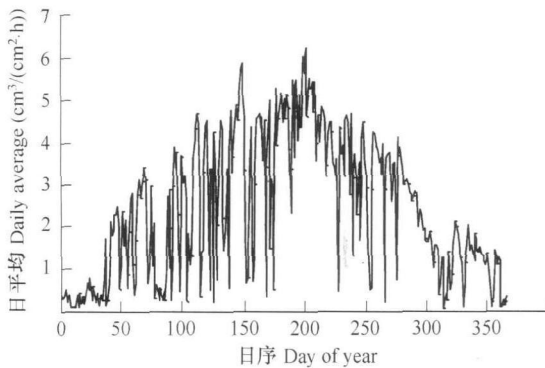


图3 湿地松树干液流速度季节变化(2004年)(1-1,1-2,1-3号树木)

Fig. 3 Seasonal change of sap flow velocity in 2004 (sample trees No. 1-1, 1-2, and 1-3)

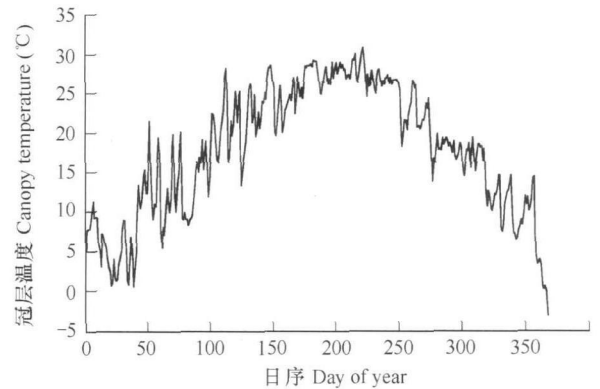


图4 树冠温度季节变化

Fig. 4 Temperature of canopy layer in relation with season

林木耗水速度按边材面积计算, 平均为 $214.95 \text{ t} / (\text{m}^2 \cdot \text{a})$, 按叶干重计算为 607 g/g , 按叶面积计算为 $102.3 \text{ kg} / (\text{m}^2 \cdot \text{a})$ (表2)。林木耗水系数比较稳定, 平均为 $561.5 \text{ kg 水} / (\text{kg 干物质})$ (表3)。即地上部分制造 1 吨干物质, 需要 561.5 倍的水分供应。将生物量折算成碳, 则耗水系数为 1091.3:1。如果考虑地下根系, 耗水系数会降低一些。

根据边材面积计算, 通过乔木层水分消耗量平均为 $4769.5 \text{ t} / (\text{hm}^2 \cdot \text{a})$, 大约相当于 477 mm 的降水量, 占当年降水量 (1324 mm) 的 48%。林地最大耗水量达 $6342 \text{ t} / (\text{hm}^2 \cdot \text{a})$ (634 mm 降水) (表3)。通过林木消耗的水分可以理解为维持正常生长所需的最低水量。

通过尺度转换计算, 林地平均耗水量为 $4769.5 \text{ t} / (\text{hm}^2 \cdot \text{a})$, 生物量增加平均 $8.4929 \text{ t} / (\text{hm}^2 \cdot \text{a})$, 最大为 $11.732 \text{ t} / (\text{hm}^2 \cdot \text{a})$ 。如果考虑其他植物的蒸腾及地面蒸发, 群落尺度的耗水量会更大。

表2 单株耗水 2004 年测定结果

Table 2 Water transpiration of individual trees in 2004

样木编号 Tree number	1-1	1-2	1-3	平均 Average
液流速度 Sap flow velocity (g/(cm ² ·a))	18693	23402	22392	21495
带皮胸径 DBH overbak (cm)	15	21.2	24.7	20.3
去皮胸径 DBH inlark (cm)	12.7	17.8	20.7	17.1
叶生物量 Foliage biomass (g/stem)	4273	8884	12289	8482
叶面积 Leaf area (m ² /stem)	25.81	53.66	74.23	51.23
边材面积 Sap wood area (cm ² /stem)	126.6	248.7	336.4	237.6
液流量 Sap flow bulk (kg/(stem·a))	2367	5820	7532	5240
叶蒸腾速度 Transpiration rate (g/(g·a))	554	655	613	607
叶蒸腾速度 Transpiration rate (Kg/(m ² ·a))	91.7	108.5	101.5	102.3

蒸腾速度单位为年蒸腾水量同叶重或叶面积之比 transpiration rate is the ratio of yearly water consumption to foliage biomass or leaf area

3.2.2 碳蓄积与水分消耗

生态系统初级生产力与碳蓄积可以说是同义语, 本研究依据地球生物化学模型 BIOME-BGC 模型模拟的湿地松林分 2004 年净第一性生产力 (*NPP*) 的日变化与水分消耗的日变化进行相关性分析。剔除负值, 对耗水速度每 5 日平均, *NPP* 每 5 日求和, 结果表明, *NPP* 总量与平均耗水速度之间相关性较为显著 (图 5) ($R^2 = 0.6945, p < 0.001$), 并显正相关关系, 这说明耗水速度的增加有利于 *NPP* 的积累。平均耗水速度与 *NPP* 总量季节变化情况 (图 6) 亦说明了这点, 两者季节变化的曲线十分相似, 冬春季节较低, 夏秋季节较高, 并在 7 月达到了最高值。每月 *NPP* 总量与月平均耗水速度显著正相关: $y = -0.5813 + 24.3015x$ ($R^2 = 0.6929, p < 0.001$)。

4 结论与讨论

本文利用测树学手段并结合样地调查, 分析了 20 年生湿地松人工林的碳蓄积特征, 并利用树干液流计测定了水分运输速度, 对耗水和碳蓄积的关系进行了分析。

4.1 生态恢复后的碳蓄积及水分利用特征

湿地松人工林造林 20a 的生产力为 72.061 t/hm², 生物量生长量为 8.4929 t/(hm²·a) (相当于 4.371 t 碳)。通过液流计测定的水分消耗量为 4769 t/(hm²·a), 水分消耗和干物质积累的比率为 561 f。维持湿地松林正常生长所必需的最低水量为现存量的 75 倍。1994 年~2004 年 10a 时间的平均生物量增长为 4.78 t/(hm²·a), 而目前的年增长率接近前 10a 平均的 2 倍。

利用涡度相关技术测定的 2004 年全年生态系统 CO₂ 净交换量 (*NEE*) 为每年 423.8 gC/m²[16] (相当于 823.6g/m² 生物量), 同本研究结果的每年 437.1 g C/m² 比较相似。本研究是对存活树木生长量的测算, 没有考虑枯死情况, 根系及其他组分如草本、灌木等也没有涉及。总的来看, 两种方法测定的结果具有比较高的一致性。说明利用传统的群落计测学手段可以获得较为可靠的结果且能够分别种类分析植物对生态系统碳循环的贡献, 这对于研究更大范围、更多类型森林的碳蓄积特征十分灵活。对于开展这样的研究, 样地林木枯死情况应该列入调查。

如果把林木枯损、分解消耗计算在内计算净交换量, 则传统方法估计的 *NEE* 可能比涡度相关法观测的数

表3 湿地松林群落尺度生产力及耗水系数 (2004 年)

Table 3 Productivity and water use efficiency of slash pine forest in stand level

项目 Items	参数 Parameters
地上生物量 Aboveground biomass (t/hm ²)	63.568
生物量增加 Biomass increase (t/(hm ² ·a))	8.4929
叶面积 Leaf area (m ² /hm ²)	47578
叶生物量 Leaf biomass (t/hm ²)	7.071
碳储量 Carbon storage (t/hm ²)	32.713
碳增量 Carbon increase (t/(hm ² ·a))	4.371
林分耗水量 Water consumption of stand (t/(hm ² ·a))	4769.5
蒸腾速率 Transpiration speed (kg/(kg·a))	674.5
蒸腾速率 Transpiration speed (kg/(m ² ·a))	100.2
生物量增长耗水系数 Water consumption factor (g/g)	561.6
碳增长耗水系数 Carbon accumulation factor (t/t)	1091.3
生物量维持系数 Biomass maintaining factor (t/t)	75.0

值低,但需要进一步的测算。这是因为,在复杂下垫面条件下,进入林冠层以下的 CO_2 气体会横向溢出,从而显示偏高的负通量。

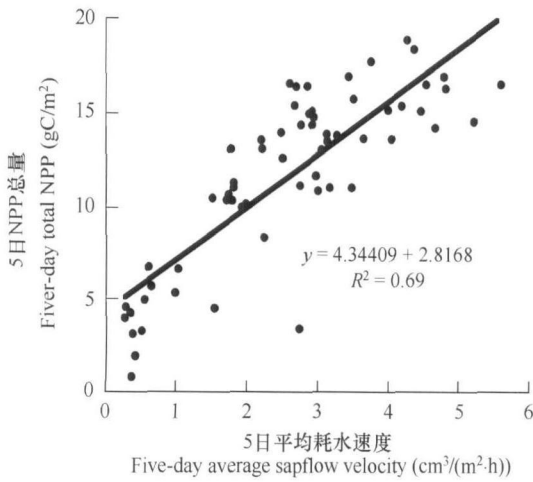


图5 湿地松林5日NPP总量与5日平均耗水速度相关分析

Fig. 5 Relation analyze between total NPP of *Pinus elliottii* forest and five - day average sap flow velocity

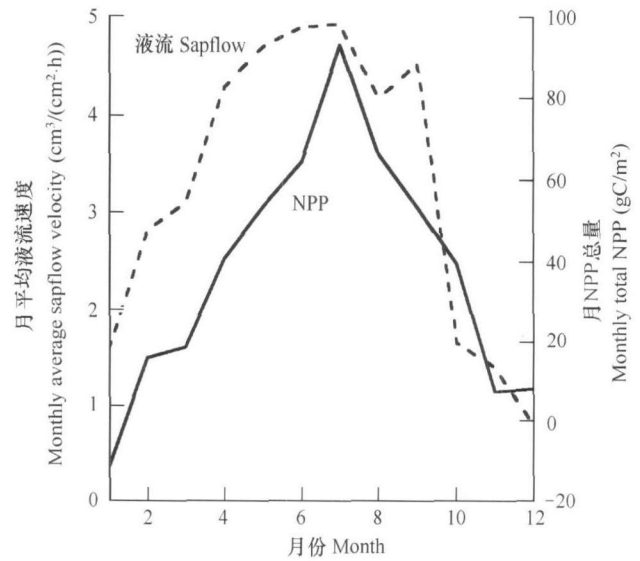


图6 湿地松林月NPP总量与月平均耗水速度相关性

Fig. 6 Correlation between total NPP and monthly average sap flow velocity

4.2 初级生产力与水分利用的关系

根据干烟洲站提供的测定结果,利用涡度相关技术测定的生态系统水汽净交换量为 736.1 mm 。由于包括植物表面及土壤的蒸发,明显高于液流测定的蒸腾量。虽然树木以外的耗水量通过简单的方法难以获得,但是,就本研究可以说明,植物蒸腾占林地水分消耗的主要部分。涡度相关测定的水汽通量与净交换量(NEE)相比为 $1737 \text{ t}^{[16]}$,将NEE换算成生物量($823.6 \text{ g}/(\text{m}^2 \cdot \text{a})$)后,其比值为 894 t 。通量法测定的水汽通量包括了蒸发,所以计算的耗水系数明显高。

假设叶片以外的耗水量可以忽略,即树木的水分散失完全由叶片完成。耗水速率换算为蒸腾速率,根据叶生物量计算为 $607 \text{ g}/(\text{g} \cdot \text{a})$,即全年蒸腾量是叶片生物量的 607 倍。利用这个参数结合样地生物量调查或叶面积指数调查,可以估计群落的耗水量。需要指出的是,根据样地每木检尺数据估计的叶生物量计算的蒸腾速率为 $674 \text{ g}/(\text{g} \cdot \text{a})$ 。这是在多次回归估计过程中误差积累的结果。所以实际应用中使用单株测定结果($607 \text{ g}/(\text{g} \cdot \text{a})$)。如果按叶面积计算,则蒸腾速率为 $102 \text{ kg}/(\text{m}^2 \cdot \text{a})$ 。群落耗水量和地上生物量之比为 75 ,即维持生物的正常活动需要 75 倍的水,可以理解为群落的需水系数,或者维持 $1 \text{ t}/\text{hm}^2$ 的地上生物量,需水量相当于 75 mm 的降水量。如此计算,试验区年降水量为 1500 mm 左右,生态系统地上生物量最大可承载 200 t 的生物量。这说明,如果单纯考虑水分供应的因素,目前的林分生产力还有很大的提高余地。

群落的耗水量是根据个体树干液流测定结果简化的。有研究指出,对于种类组成复杂、年龄不一的异龄混交林,由单株测定结果估算整个群落的耗水过程会有很大误差^[17],这是比较难以解决的问题。本研究的湿地松林是同龄纯林,群落结构简单,利用液流计测定的结果进行群落尺度的转换相对混交林比较可靠。群落消耗水分受气温及土壤水分条件的影响,通过建立水分消耗和气温以及土壤水分的关系,可以为估算森林耗水过程提供简单的方法,这是今后需要开展的工作。

用 BIOME-BGC 模型模拟^[18,19]显示,平均耗水速度与 NPP 总量季节变化曲线十分相似,并呈现明显的季节变化特点。说明可以根据林木耗水过程估算林分初级生产力。

4.3 测树学方法的可靠性

和目前最先进的通量观测手段涡度相关系统相比,利用传统的森林计测方法也可以获得关于碳蓄积的可

靠信息。对于揭示生态系统碳蓄积的年际动态, 群落生产力调查方法具有非常灵活和廉价的优点, 而根据林分生长调查进行的碳储量测算, 是目前最为可靠的途径, 并且可用来检验任何其它任何方法的精度。

4.4 今后工作展望。本研究还有几方面需要改进:

(1) 生物量测定精度问题 同大多数研究相同, 本研究没有将树皮的生物量单独计算。树皮的密度和木材相差很大, 同时树皮的体积很大。胸径 20 cm 左右的树皮体积占总体积的 28.8%。经过统计, 林分总蓄积量中, 树皮蓄积 15.9%。湿地松树皮纵裂明显, 很大的裂隙都计算在材积中, 显然会带来一定误差。树皮的密度应该分物理密度和测树学密度或树皮容重。前者为均质的树皮的物理性质, 后者是自然状态下的密度, 包括了裂隙空间, 类似于土壤容重的概念。在估计树皮生物量时建议使用树皮容重。所以本研究的地上生物量可能比实际偏高。

(2) 树干解析误差 树干解析中误差比较大的部分往往是树皮, 特别是容易脱落的树皮。树皮的厚度往往是将圆盘取回室内进行测定。这期间会有严重脱落, 特别是有些树皮深裂、剥裂的树种, 通过树干解析获得的树皮厚度小于实际厚度, 即因锯盘及搬运而使树皮不同程度脱落, 所以树木的皮厚应该在伐倒后锯盘前在对应的位置进行测量。本研究的树皮是在室内测定的, 树皮严重脱落时, 则根据野外测定的直径进行估计。尽管在测定是适当考虑了树皮脱落因素, 但是仍会比实际小一些, 因此在测定圆盘直径时以去皮直径为基准, 选择 2 个平均直径方向进行年轮测定。

(3) 树干液流的测定 树干液流测定的主要是通过树木蒸腾消耗的水分, 可能包括一些树皮的水分散失。据报道, 树干液流速度个体间差别较大^[20], 需要通过增加样本提高精度, 但实际上往往受条件限制而难以实行。比较可行的方法是利用传统测定蒸腾作用的方法测定更多个体的蒸腾速率与液流之间的相关关系, 据此估计其他树木的液流季节变化及耗水特征。此外, 树干液流的测定只采用了 2004 年一年的数据, 有待于获取更长期稳定的监测数据进一步研究。

References.

- [1] Pedersen D. Disease ecology at a crossroads: Man-made environments, human rights and perpetual development utopias. *Social Science & Medicine*, 1996, 43 (5): 745-758.
- [2] Führer E. Forest functions, ecosystem stability and management. *Forest Ecology and Management*, 2000, 132 (1): 29-38.
- [3] Li W H, Deng K M, Li F. The biomass of the main forest ecosystems in Changbai Mountain. *Forest Ecosystem Research*, 1981, 2: 34-50.
- [4] Conard S G, Ivanova G A. Wildfire in Russian boreal forests-potential impacts of fire regime characteristics on emissions and global carbon balance estimates. *Environmental Pollution*, 1997, 98 (3): 305-313.
- [5] Scrimgeour F, Oxley L, Fatai K. Reducing carbon emissions? The relative effectiveness of different types of environmental tax: the case of New Zealand. *Environmental Modelling & Software*, 2005, 20 (11): 1439-1448.
- [6] Litynski J T, Klam S M, McIlvried H G, *et al.* The United States Department of Energy's Regional Carbon Sequestration Partnerships program: A collaborative approach to carbon management. *Environment International*, 2006, 32 (1): 128-144.
- [7] Dong J, Kaufmann R K, Myneni R B, *et al.* Remote sensing estimates of boreal and temperate forest woody biomass: carbon pools, sources, and sinks. *Remote Sensing of Environment*, 2003, 84 (3): 393-410.
- [8] Yasuda Y, Ohtani Y, Watanabe T, *et al.* Measurement of CO₂ flux above a tropical rain forest at Pasoh in Peninsular Malaysia. *Agricultural and Forest Meteorology*, 2003, 114 (3-4): 235-244.
- [9] Tuyl S V, Law B E, Turner D P, *et al.* Variability in net primary production and carbon storage in biomass across Oregon forests — an assessment integrating data from forest inventories, intensive sites, and remote sensing. *Forest Ecology and Management*, 2005, 209 (3): 273-291.
- [10] Jia S, Akiyama T. A precise, unified method for estimating carbon storage in cool-temperate deciduous forest ecosystems. *Agricultural and Forest Meteorology*, 2005, 134 (1-4): 70-80.
- [11] Liu Q J, Hu L L, Li X R. Plant diversity in Qianyanzhou after 20 years of small watershed treatment. *Acta Phytocological Sinica*, 2005, 29 (5): 766-774.
- [12] Li X R, Liu Q J, Chen Y R, *et al.* Aboveground biomass of three conifers in Qianyanzhou plantation. *Applied Ecology*, 2006, 17: 1382-1388.
- [13] Granier A, Biron B, Lemoine D. Water balance, transpiration and canopy conductance in two beech stands. *Agricultural and Forest Meteorology*, 2000, 100: 291-308.

- [14] Lu P, Urban L, Zhao P. Granier's Thermal Dissipation Probe (TDP) Method for Measuring Sap Flow in Trees: Theory and Practice. *Acta Botanica Sinica*, 2004, 46(6): 631-646.
- [15] Yuan X H. Effects on organic carbon storage in different land use systems in red earth hilly area. The Master Dissertation of the Institute of Remote Sensing Applications. CAS, 1999.
- [16] Liu Y F, Yu G R, Weng X F, *et al.* Seasonal dynamics of CO₂ fluxes from sub-tropical plantation coniferous ecosystem. *Science in China Science D*, 2006, 36(A01):91-102.
- [17] Wilson K B, Hanson P J, Mulholland P J, *et al.* A comparison of methods for determining forest evapotranspiration and its components: sap-flow, soil water budget, eddy covariance and catchment water balance. *Agricultural and Forest Meteorology*, 2001, 106: 153-168.
- [18] Running S W, Coughlan J C. A general model of forest ecosystem processes for regional applications. I. Hydrologic balance, canopy gas exchange and primary production processes. *Ecology Model*, 1988, 42: 125-154.
- [19] Running S W, Hunt R E. Generalization of a forest ecosystem process model for other biomes, BIOME_BGC, and an application for global-scale models. Ehleringer J R and Field C B. *Scaling Physiologic Processes: Leaf to Globe*. San Diego: Academic Press, 1993. 141-158.
- [20] Zhao P, Rao X Q, Ma L, *et al.* Sap flow-scaled stand transpiration and canopy stomatal conductance in an *Acacia mangium* forest. *Acta Phytocological Sinica*, 2006, 30(4): 655-665.
- [21] Tu J, Liu Q J. Sap flow scaling-up of artificial *Pinus elliottii* forests in subtropical red earth area and its response to environmental factors. *Journal of Soil and Water Conservation*, 2007, 21: 197-200.

参考文献:

- [3] 李文华, 邓坤枚, 李飞. 长白山主要生态系统生物量生产量的研究. *森林生态系统研究*, 1981, 2: 34 ~50.
- [11] 刘琪璟, 胡理乐, 李轩然. 小流域治理20年后的千烟洲植物多样性. *植物生态学报*, 2005, 29(5): 766 ~774.
- [12] 李轩然, 刘琪璟, 陈永瑞, 等. 千烟洲人工林主要树种地上生物量的估算. *应用生态学报*, 2006, 17: 1382 ~1388.
- [15] 袁小华. 红壤丘陵区土地利用变化对陆地生态系统有机碳储量的影响. 中国科学院地理科学与研究所硕士论文, 1999
- [16] 刘允芬, 于贵瑞, 温学发, 等. 千烟洲中亚热带人工林生态系统 CO₂ 通量的季节变异特征. *中国科学(D 辑)*, 2006, 36(增刊1): 91 ~102.
- [20] 赵平, 饶兴权, 马玲, 等. 基于树干液流测定值进行尺度扩展的马占相思林段蒸腾和冠层气孔导度. *植物生态学报*, 2006, 30(4): 655 ~665.
- [21] 涂洁, 刘琪璟. 亚热带红壤区湿地松边材液流的尺度扩展及其对环境因子的响应. *水土保持学报*, 2007, 21: 197 ~200.