

# 马占相思人工林生态系统的碳格局及其动态模拟

李平衡<sup>1,2</sup>, 王 权<sup>3</sup>, 任 海<sup>1\*</sup>

(1. 中国科学院华南植物园, 广州 510650; 2. 中国科学院研究生院, 北京 100049;

3. Institute of Silviculture, Shizuoka University, Shizuoka 422-8529, Japan)

**摘要:**采用 BIOME-BGC 模型对广东鹤山的马占相思(*Acacia mangium*)人工林生态系统 1985~2100 年间的碳格局及其动态变化进行了模拟。结果表明,马占相思生物量在前 12 a 增长较快,之后增长缓慢,最终达到 300 t hm<sup>-2</sup>; 预计 2100 年马占相思生物量在干、根、叶中的分配分别为 73.91%、21.74% 和 4.35%。马占相思人工林的碳贮量在前 12 a 增长较快,之后增长缓慢并最终维持在 325 t C hm<sup>-2</sup> 左右,在造林初始阶段主要分布于土壤中,之后在植被、土壤和凋落物 3 大碳库中的分配分别为 43.08%、52.30% 和 4.62%; 马占相思净初级生产力(NPP)在 4~12 a 较大,最大可达 11 t C hm<sup>-2</sup>,之后下降至 3~6 t C hm<sup>-2</sup>; 马占相思叶面积指数(LAI)前 3 a 增长迅速,5 a 达到 7.84,之后下降,约为 2.7~5.0; LAI 与 NPP 的回归分析结果显示 LAI 可能是限制马占相思林 NPP 增长的主要因子。模拟结果还显示马占相思林前期生长迅速,但随后生长缓慢,叶生物量还出现负增长现象。因此,我国南亚热带地区在以马占相思作为先锋树种进行地带性森林植被恢复时,可在 12 a 后进行林分改造。

**关键词:** BIOME-BGC 模型; 碳贮存; 生物量分配; NPP; 植被恢复

中图分类号: Q948.1

文献标识码: A

文章编号: 1005-3395(2009)05-0494-08

## The Simulation on Carbon Stocks and Dynamics in *Acacia mangium* Plantation Ecosystem

LI Ping-heng<sup>1,2</sup>, WANG Quan<sup>3</sup>, REN Hai<sup>1\*</sup>

(1. South China Botanical Garden, Chinese Academy of Sciences, Guangzhou 510650, China; 2. Graduate University of Chinese

Academy of Science, Beijing 100049, China; 3. Institute of Silviculture, Shizuoka University, Shizuoka 422-8529, Japan)

**Abstract:** The carbon stocks and dynamics in *Acacia mangium* plantation ecosystem in Heshan, Guangdong Province were simulated from 1985 to 2100 by BIOME-BGC Model. The results showed that the biomass of *Acacia mangium* plantation increased rapidly in the first 12 years, and then increased slowly up to 300 t hm<sup>-2</sup>. The proportions of biomass allocated to leaves, stems and roots were 4.35%, 73.91% and 21.74%, respectively. The carbon storage at the ecosystem level had the similar tendency, it reached 325 t C hm<sup>-2</sup> at last, and the proportions of carbon storage in vegetation, soil and litter fall were 43.08%, 52.30% and 4.62%, respectively. It was found that the net primary productivity (NPP) of *Acacia mangium* plantation was high at the age of 4 to 12 years up to 11 t C hm<sup>-2</sup>, and then stabilized at 3~6 t C hm<sup>-2</sup> later. The leaf area index (LAI) increased rapidly at the first three years and reached 7.84 at 5-year-old, but then decreased to 2.7~5.0. It indicated that LAI might be the main control factor of NPP by regression analysis. Our simulation results demonstrated that the *Acacia mangium* plantation grew fast at the first 12 years. when *Acacia mangium* was used as pioneer tree species for forest vegetation restoration in lower subtropical region, it suggested on taking stand improvement after the age of 12 years.

**Key words:** BIOME-BGC model; C stock; Biomass allocation; NPP; Vegetation restoration

收稿日期: 2008-11-06

接受日期: 2009-02-15

基金项目: 国家重点基础研究发展计划项目(2009CB421101); 广东省自然科学基金项目(07118249); 广东省和广州市攻关项目(2007J1-C0471; 2008A060207017)资助

\* 通讯作者 Corresponding author

碳循环是近期生态系统生态学研究的重要内容。森林生态系统的碳吸存能力是系统功能的主要体现,是系统发挥其它生态功能的物质基础<sup>[1]</sup>。森林生态系统在全球碳循环中起着举足轻重的作用,准确估算森林生态系统碳贮量及其动态是当前陆地碳循环研究的核心内容,也是生态系统管理和退化生态系统的恢复实践的重要理论基础<sup>[2]</sup>。

由于不合理的开发利用,南亚热带原有的天然林大部分退化为草坡。为了快速恢复退化生境和增加植被覆盖,近20多年当地已在退化荒坡上建立了由先锋树种组成的人工林,以启动生态系统演替进程,从而恢复地带性森林。马占相思林就是其中之一,在广东、海南、广西等大量种植并开展了大量研究<sup>[3-5]</sup>。广东鹤山森林生态系统国家野外观测站定位(下简称鹤山站)的研究表明,马占相思林早期阶段能较快地形成复层的群落结构,冠层郁闭度和生物多样性增加也比较快<sup>[6]</sup>。但随着林龄的增大,约15 a的马占相思林出现了退化的迹象,冠层开始萎缩,枯立木增加<sup>[7]</sup>。因此,马占相思林能否长期维持其生态系统功能,是否真正有利于向地带性森林的演替,是我们亟需了解的问题。目前,对马占相思林生态系统开展了森林气象、水文、生理生态、生产力、土壤学等方面的研究<sup>[8]</sup>,但未能对各种生态系统过程进行整合,缺乏全面认识,无法预测其将来。生态系统模拟模型为克服这些困难提供了有效的途径。

20世纪80年代以来,随着森林生态系统结构、功能和生态过程的认识不断深入以及遥感、地理信息系统(GIS)和计算机技术的发展,森林生态系统模拟模型迅速发展<sup>[9]</sup>。目前,国外已建立了大量的可用于森林碳循环研究的模型,如BIOME-BGC、BIOMASS、HYBRID、CENTURY、MBL-GEM、PnET-CN、TOPOG等<sup>[10]</sup>。其中BIOME-BGC模型应用较广泛,它可模拟多种陆地生态系统碳循环过程、分配格局和动态,以及这些过程对环境变化的响应<sup>[11]</sup>,它兼具生理模型和生态系统模型的特征,对碳循环、营养物质的分配、光合、呼吸、分解等过程的描述都比较细致,是一个较全面的模型;此外,此模型在世界范围内经过了比较好的检验<sup>[12-14]</sup>。

本研究在总结鹤山站以往研究资料的基础上,运用检验和校正后的BIOME-BGC(version 4.12)模型模拟鹤山马占相思人工林生态系统的碳贮量和分配格局动态,以探讨马占相思人工林生态系统的

碳贮量及其结构特征的变化,在发育过程中生态系统内部各碳库的变化规律和碳吸存潜力,预测马占相思人工林在我国南亚热带森林植被恢复过程中的可能表现及机制。

## 1 试验地概况

中国科学院鹤山丘陵综合开放试验站位于广东省鹤山市中部(112°54'E, 22°41'N),面积约133 hm<sup>2</sup>。实验区按集水区的形式,划分为草坡(对照)、针叶林、乡土林、桉树林、豆科混交林、马占相思林、林果草鱼和林果苗复合生态系统等8个试验区。试验区为低丘地势,气候温暖多雨,年平均气温21.7℃,最热月(7月)均温29.2℃,最冷月(1月)均温12.6℃,年辐射量为4 350.5 MJ m<sup>2</sup>a<sup>-1</sup>,年降雨量1 801 mm,集中于5~9月的雨季,有明显的干、湿季之分。年均日照1 797.8 h,地带性土壤为赤红壤,土壤有机质含量为0.56%~1.64%。地带性植被为南亚热带季风常绿阔叶林<sup>[15]</sup>。

马占相思(*Acacia mangium*)原产澳大利亚昆士兰沿海、巴布亚新几内亚西南部和印度尼西亚东部,速生耐瘠,固氮能力强,是很好的先锋树种<sup>[4]</sup>。1979年被引种入我国,成为我国热带亚热带地区的主要造林树种之一。本研究的马占相思林为1984年栽种,平均海拔70 m,面积约0.75 hm<sup>2</sup>,栽种规格3 m×3 m,目前已有25 a。

## 2 研究方法

### 2.1 BIOME-BGC 模型

BIOME-BGC模型是一个陆地生态系统过程模型,能从多个尺度来模拟生态系统每天的生物地理化学过程和水文过程<sup>[13-14,16-17]</sup>。BIOME-BGC模型需要的输入参数主要有3种:研究地点初始条件、生理生态参数和气象因子,各参数的详细描述参阅BIOME-BGC模型用户指南。研究地点初始条件从文献资料中直接获取,生理生态参数采用模型中提供的常绿阔叶林生理生态参数值<sup>[17]</sup>。这种参数化反映了模型中的一个重要的假设:常绿阔叶林都有相同的生理机能并且在模拟时段内保持不变。这种参数化方法存在一定的误差,因此本文将对这些参数进行灵敏度分析,找出对模拟结果产生较大影响的参数并根据文献资料对其重新赋值或估计。最终的研究地点初始条件和重新赋值的生理生态参数见表1。

表 1 BIMOE-BGC 模型的生理生态参数和初始条件

Table 1 Ecophysiological parameterization and site-specific of the BIOME-BGC Model

序号 No.	参数 Parameters	取值 Value	文献 Literature
1	年叶和毛根周转率的比 Annual leaf and fine root turnover fraction	0.5	[7]
2	年活木材周转率 Annual live wood turnover fraction	0.07	估计 Estimate
3	年整株植物的死亡率 Annual whole-plant mortality fraction	0.005	[17]
4	年火烧死亡率 Annual fire mortality fraction	0.002	[17]
5	新毛根含 C 量/新叶含 C 量 New fine root C : new leaf C	0.95	[7]
6	新茎含 C 量/新叶含 C 量 New stem C : new leaf C	0.98	[7]
7	新边材含 C 量/新总木材含 C 量 New live wood C : new total wood C	0.22	[17]
8	新粗根含 C 量/新茎含 C 量 New croot C : new stem C	0.3	[17]
9	活叶 C/N C/N of leaves	20.45	[7]
10	鲜凋落叶 C/N C/N of leaf litter, after retranslocation	26.45	[7]
11	毛根 C/N C/N of fine roots	20.57	[7]
12	活材 C/N C/N of live wood	50.0	[7]
13	落叶纤维素含量 Leaf litter cellulose proportion	0.44	[7]
14	落叶木质素含量 Leaf litter lignin proportion	0.24	[17]
15	毛根纤维素含量 Fine root cellulose proportion	0.45	[17]
16	毛根木质素含量 Fine root lignin proportion	0.25	[17]
17	日冠层截水系数 Canopy water interception coefficient ( $\text{mm LAI}^{-1}$ )	0.041	[17]
18	冠层消光系数 Canopy light extinction coefficient	0.54	[17]
19	冠层平均比叶面积 Canopy average specific leaf area ( $\text{m}^2 \text{kg}^{-1} \text{C}$ )	10.89	[7]
20	遮荫 SLA: 向光 SLA Ratio of shaded SLA : sunlit SLA	2	[17]
21	Rubisco 酶活叶 N 量 Fraction of leaf N in Rubisco	0.06	[17]
22	最大气孔导度 Maximum stomatal conductance ( $\text{m s}^{-1}$ )	0.005	[17]
23	大气 $\text{CO}_2$ 浓度 Atmospheric $\text{CO}_2$ concentration ( $\mu\text{mol mol}^{-1}$ )	351.5	[20]
24	年 N 沉降量 Annual N deposition ( $\text{kg N m}^{-2} \text{a}^{-1}$ )	0.00476	[23]
25	年固氮量 Annual N fixation ( $\text{kg N m}^{-2} \text{a}^{-1}$ )	0.0157	[21]
26	土壤粘粒含量 Clay content in soil (%)	23.7	[21]
27	土壤砂粒含量 Soil sand percentage (%)	65.2	[21]
28	土壤粉砂含量 Soil silt content (%)	11.1	[21]
29	有效土层深 Effective soil depth (m)	1	[21]
30	反射率 Albedo (%)	0.10	[22]
31	纬度 Latitude ( $^{\circ}$ )	22.41	-
32	海拔 Altitude (m)	80	-
33	起始年最大叶碳量 Maximum leaf C at the first year ( $\text{kg C m}^{-2}$ )	0.05	[7]
34	起始年最大茎碳量 Maximum stem C at the first year ( $\text{kg C m}^{-2}$ )	0.55	[7]
35	初始土壤矿质氮 Initial soil N in mineral pool ( $\text{kg N m}^{-2}$ )	1	[7]
36	初始土壤水饱和率 Initial water saturation of soil (%)	20	[7]
37	初始土壤碳, 微生物快速循环 Fast recycle pool of soil carbon and microbial ( $\text{kg C m}^{-2}$ )	0.030	[7]
38	初始土壤碳, 微生物中速循环 Medium recycle pool of soil carbon and microbial ( $\text{kg C m}^{-2}$ )	0.092	[7]
39	初始土壤碳, 微生物慢速循环 Slow recycle pool of soil carbon and microbial ( $\text{kg C m}^{-2}$ )	9	[7]
40	初始土壤碳, 微生物最慢循环 Slowest recycle pool of soil carbon and microbial ( $\text{kg C m}^{-2}$ )	5	[7]

BIOME-BGC 模型需要的气象因子包括每日的最高温度、最低温度、日均温、降水量、水汽压亏缺 (VPD)、总辐射量和日长等 7 项。其中前 5 个气象因子从鹤山站的气象观测场获取,而后两个气象因子在 2004 年 11 月之前鹤山站没有记录,这里采用 MT-CLM 模型来估算。MT-CLM 模型<sup>[18-19]</sup>根据研究站点的经纬度、海拔高度、坡度、坡向等地理信息并结合每日最高、最低温度和降水量来估算每日总辐射量和日长,并对它们的估算误差作了检验,其中日总辐射量的误差范围在 15% 左右<sup>[19]</sup>,而日长的误差不超过 15 min<sup>[16]</sup>。

## 2.2 模型的验证

模型的验证是生态模型模拟的一个非常关键的部分,由于长期野外数据的缺乏,基于时间序列的验证方法很难进行,有必要采取其它方法进行验证<sup>[24]</sup>。本文运用 Lenhart 等<sup>[25]</sup>的灵敏度指数方法分析模型参数的灵敏性;模拟值与可获得的野外数据进行比较,并进行独立样本 *t* 检验。

## 2.3 模拟方案

模拟假定:不考虑大气 CO<sub>2</sub> 浓度及 N 沉降速率的年际变化。本次模拟的时长为 1985~2100 年。气象数据用鹤山站气象场记录的 1985~2007 年共 23 a 的气象资料,2008~2100 年的模拟将循环利用已有的 23 a 气象数据。模拟的步骤包括整合数据、参数赋值、模型运转、灵敏度分析和模型检验等。

# 3 结果和分析

## 3.1 灵敏度分析

本研究对 BIOME-BGC 模型中的 34 个参数和 6 个响应变量作了灵敏度分析(图 1)。总体上,碳含量、叶和毛根周转率、叶和毛根碳氮比、冠层消光系数等参数都有较高的灵敏度;木材周转率、比叶面积、叶 Rubisco 酶氮含量、气孔导度等参数都有中等的灵敏度;其他的参数有低的灵敏度。另外,凋落物碳量对年整株植物死亡率参数有较高灵敏度,叶面积指数对冠层平均比叶面积参数有非常高灵敏度。这与其它研究的结果相似<sup>[17,26]</sup>。

灵敏度分析能为模型的参数化提供参考依据:具有高灵敏度的参数如叶和毛根周转率、叶和毛根碳氮比等参数需要详细确定,而其它具有较低灵敏度的参数如转移生长期占生长季的比、当日生长

率、冠层截水系数、叶肉导度等参数则允许在较大范围内粗略估计,可以使用 White 等<sup>[27]</sup>为这些参数提供的参考值而不会产生太大的误差。

## 3.2 模拟结果与实测值的比较

本研究根据曾小平<sup>[27]</sup>测定的马占相思各部分含 C 量(叶为 49.5%;茎为 47.3%;根为 46.8%)把 BIOME-BGC 模型模拟产生的单位面积植被各部分 C 含量换算成生物量模拟值。对马占相思林 1985~2007 年间其中 6 a 的生物量实测值与模拟值比较,模拟值与实测值均非常接近(图 2)。对实测值与模拟值进行独立样本双尾 *t* 检验,显著性概率  $P = 0.8926 > 0.05$ ,说明观测值与模拟值之间没有显著差异。可见 BIOME-BGC 模型对马占相思林生态系统生物量的模拟可信度高。

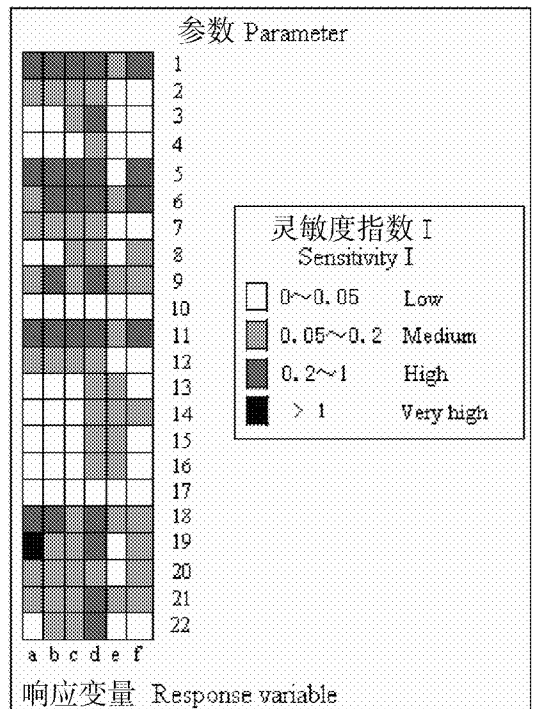


图 1 BIOME-BGC 模型主要参数的灵敏度分析

Fig. 1 The sensitivity analysis of parameters of BIOME-BGC model  
参数序号见表 1 Parameter No. see Table 1; a: 叶面积指数 LAI; b: NPP; dc: 总生物量 Total biomass; : 凋落物碳量 Litter carbon; e: 土壤碳量 Soil carbon; f: 系统总碳量 Total ecosystem carbon.

## 3.3 生物量及其分配的模拟

森林生物量按叶、树干和根 3 个部分,其中树干包括茎和枝。从模拟结果来看(图 3A),树干生物量在三者中增长最快,根次之,叶生物量的增长最慢。叶生物量在前 5 a 增长较快,从第 2 年的 10.83 t hm<sup>2</sup>增长到第 6 年的 17.93 t hm<sup>2</sup>,此后出

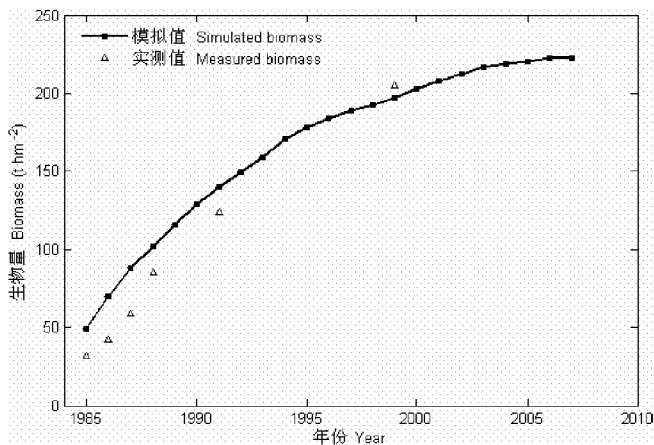


图 2 马占相思林生物量观测值与模拟值的比较

Fig. 2 Comparison of observed and simulated biomass of *Acacia mangium* forest ecosystem

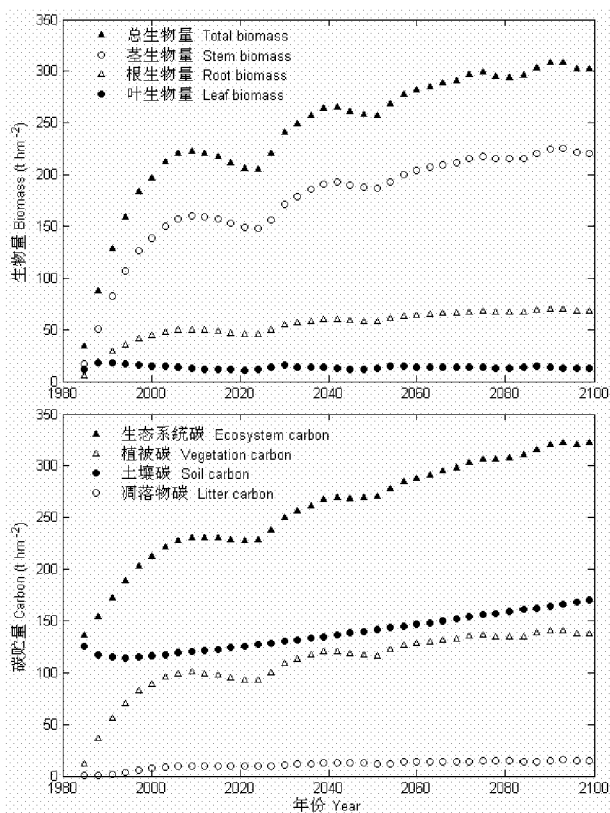


图 3 马占相思林生物量、碳贮量的长期动态

Fig. 3 Long-term dynamics of biomass allocation (A) and ecosystem carbon pattern (B) of *Acacia mangium* forest ecosystem

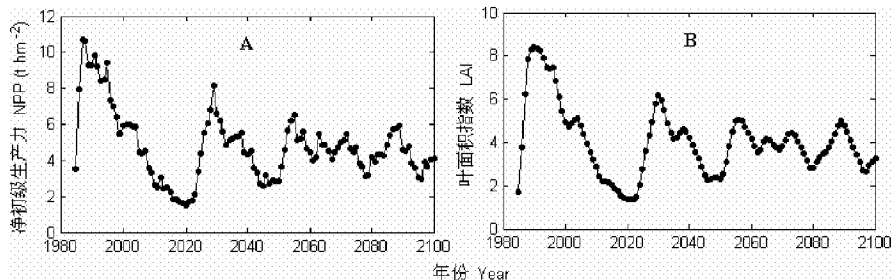


图 4 马占相思林净初级生产力和叶面积指数的长期动态

Fig. 4 Long-term dynamics of NPP (A) and LAI (B) of *Acacia mangium* forest ecosystem

现负增长,最终稳定在  $13 \text{ t hm}^{-2}$  左右。树干生物量在前 11 a 增长非常迅速,从第 2 年的  $16.63 \text{ t hm}^{-2}$  增长到第 12 年的  $115.08 \text{ t hm}^{-2}$ ; 第 14 年增长速度下降,到 26 a 达到  $160.27 \text{ t hm}^{-2}$ ; 之后的 27~40 a 出现负增长,减少了  $13.24 \text{ t hm}^{-2}$ ; 40 a 后树干生物量又开始缓慢增长,最终稳定在  $220 \text{ t hm}^{-2}$  左右。根生物量的增长趋势和树干类似,只是增长量和波动幅度比树干要小得多,最终树根生物量稳定在  $70 \text{ t hm}^{-2}$  左右。模拟后期的稳定阶段,树干、根与叶的生物量比为 17:5:1,地上部分与地下部分生物量比为 3.6:1。马占相思林总生物量主要受树干生物量的影响,增长曲线与树干几乎一样,最后稳定在  $300 \text{ t hm}^{-2}$  左右。从各器官的生物量分配比来看,马占相思林绝大部分生物量都分配到了周转率相对较慢的树干和根中,而周转率较快的叶分配的较少。

### 3.4 生态系统碳格局的模拟

生态系统的碳贮库主要有 3 个部分:植被碳贮库(生物量)、凋落物碳贮库和土壤碳贮库。模拟结果表明,马占相思林的植被碳贮存量在前 12 a 的增长迅速,从  $11.45 \text{ t hm}^{-2}$  增长到  $80.17 \text{ t hm}^{-2}$ ,之后增长缓慢,最终稳定在  $140 \text{ t hm}^{-2}$  左右(图 3B)。凋落物碳贮存量在前 6 a 增长缓慢,从  $0.075 \text{ t hm}^{-2}$  上升到  $0.67 \text{ t hm}^{-2}$ ; 之后的 16 a 有较大增长,到 23 a 已达  $9.89 \text{ t hm}^{-2}$ ; 以后增长缓慢,最终稳定在  $15 \text{ t hm}^{-2}$  左右。土壤碳贮存量在最初 10 a 间有小量下降;之后缓慢增长至  $170 \text{ t hm}^{-2}$  左右。整个马占相思林生态系统碳贮存量在前 12 a 增长较快,以后缓慢增长至  $325 \text{ t hm}^{-2}$  左右。在后期稳定阶段,植被、土壤、凋落物 3 大碳库的碳贮存量分别占生态系统总碳贮量的 43.08%、52.30% 和 4.62%。

### 3.5 净初级生产力(NPP)的模拟

植被净初级生产力(NPP)是指绿色植物在单位面积单位时间内所累积的有机物量,表现为光合作用固定的有机碳中扣除本身呼吸消耗的部分,这一部分用于植物的生长和生殖,也称净第一性生产力。模拟结果显示,马占相思林的 NPP 在前 4 a 迅速增加,从第 2 年的  $3.53 \text{ t hm}^{-2}$  增长到第 4 年的  $10.66 \text{ t hm}^{-2}$ ; 4~12 a 是马占相思林生长最快的阶段,NPP 均大于  $8.4 \text{ t hm}^{-2}$ ; 以后 NPP 开始下降,在 37 a 达最小值( $1.52 \text{ t hm}^{-2}$ ); 之后 NPP 又逐渐增加( $3\sim 6 \text{ t hm}^{-2}$ )(图 4A)。

NPP 的年度波动,主要是受气象因子的年间差异所致。将马占相思林的 NPP 与主要的气象因子(年均温、年总降雨量、年均 VPD、年总辐射量)进行相关性分析。结果显示,NPP 与年均温、年均 VPD 和年总辐射量有正相关关系( $R^2$  分别为 0.17, 0.18, 0.22),与年总降雨量有负相关关系( $R^2 = -0.13$ ,  $P = 0.06$ ),其中与年总辐射量的相关性最大( $R^2 = 0.22$ ),从  $P$  值来看,NPP 与年均温、年均 VPD 和年总辐射量的相关关系是显著的( $P < 0.05$ ),但与年总降雨量的相关关系不显著( $P = 0.06 > 0.05$ )。

### 3.6 叶面积指数(LAI)的模拟

叶面积指数(LAI)是单位土地面积上植物的总叶面积,它是群落研究的一个重要指标,与许多生态过程有关,如蒸散量、土壤水分平衡、树冠层光量的获取、植被净初级生产力等。模拟结果显示,马占相思林的 LAI 在前 5 a 增长非常迅速,从 1.70 增长到 7.84; 5~13 a 约为 7.40~8.38; 13 a 后开始下降,38 a 最低,为 1.35; 以后又逐渐增大,约为 2.70~5.00(图 4B)。

NPP 与 LAI 的动态过程非常相似,作一元线性回归分析(图 5),回归方程为  $NPP = 0.31 + 1.11 LAI$  ( $R^2 = 0.85$ ,  $P < 0.001$ )。

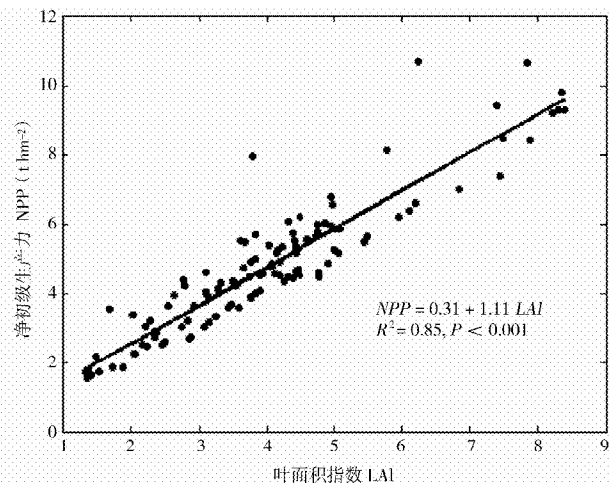


图5 马占相思林 LAI 与 NPP 的回归曲线

Fig. 5 The regression curve between net primary productivity (NPP) and Leaf area index (LAI)

## 4 结论和讨论

本研究应用 BIOME-BGC 模型对马占相思人工林生态系统的碳格局及其动态进行模拟分析,是基于一系列的前提条件或预定方案的,如大气  $\text{CO}_2$  浓度及 N 沉降速率维持在初始化模型的水平。没

有涉及真实系统中可能发生的干扰(如病虫害、台风等)及未来可能的气候变化等。与上述假设条件相关的内容都是目前生态学研究的重点领域,如生态系统对  $\text{CO}_2$  浓度增加和气候变化的响应是全球变化研究的核心内容<sup>[28-29]</sup>,本研究可以为进一步的模拟研究提供参考和基准。

虽然本次模拟使用了简化和理想化的假设条件,但模拟结果基本准确地反映了该人工林生态系统碳格局的动态行为,生物量的模拟值与实测值之间没有统计学的显著差异,其它模拟结果也与前人的观测结果基本吻合,如模拟的地上与地下部分生物量的分配比为 3.6:1,这与任海<sup>[30]</sup>报道的 3.76:1 相近;模拟的叶生物量出现负增长和凋落物量增长较大的现象都与实际林分调查的结果相吻合。因此,本次模拟的可信度较高。

马占相思林的总生物量在前 12 a 增长快,说明马占相思能速生快长,是良好的造林先锋树种。但 12 a 后出现生长缓慢现象,最终维持在  $300 \text{ t hm}^{-2}$  左右,这比同一地带的鼎湖山天然林要小  $100 \text{ t hm}^{-2}$  左右<sup>[22]</sup>。在模拟的后期稳定阶段,马占相思林叶、树干、根的生物量之比为 1:17:5,这与同一地带的鼎湖山天然林(叶、树干、根的生物量之比为 1:7:2)<sup>[31]</sup>相比,叶的生物量分配偏少,而树干和根的偏大。

马占相思林的凋落物在 6~23 a 的增长较快,之后增长缓慢并趋于稳定。这与邹碧等<sup>[32]</sup>报道的基本一致。土壤碳贮存量在最初 10 a 间小幅下降;之后缓慢增长,最终稳定在  $170 \text{ t hm}^{-2}$  左右。这与李志安等<sup>[21]</sup>报道的人工林地土体有机质较原来土壤有较大提高的结果相吻合。马占相思林生态系统总碳贮量在模拟的后期稳定阶段可达  $325 \text{ t hm}^{-2}$  左右,比造林初期增长了  $180 \text{ t hm}^{-2}$  左右。

马占相思林的 NPP 在 4~12 a 较大,生物量增长也快。在模拟的后期稳定阶段,生物量几乎不增长,但 NPP 仍然有  $3\sim 6 \text{ t hm}^{-2}$ ,这主要是由于马占相思林的年凋落物量较大所致。马占相思林的 NPP 与气象因子年均温、年总降水、年均 VPD 和年总辐射量存在一定的相关性,其中与气温、VPD 和辐射量呈正相关,与降水量呈负相关,可能与马占相思的耐旱等特性相关。另外,从 NPP 与气象因子的相关性可以看出,后期稳定阶段的 NPP 仍然存在较大的波动可能是由气象因子的年间差异造成的。

4 a 的马占相思林的 LAI 达到 6.25,说明此时马占相思林已经基本郁闭成林。此后 10 a 左右马占相思林的 LAI 都较大,而 13 a 后 LAI 开始迅速下降,最后维持在 2.7~5.0。从 LAI 与 NPP 的回归曲线图可以看出,用 LAI 可以很好地拟合 NPP,这说明了马占相思林的 NPP 极其依赖于 LAI,而 LAI 偏小是限制马占相思林 NPP 增长的一个主要因子。

马占相思在中国南方地区有大面积分布,是我国南亚热带的主要人工林生态系统类型之一<sup>[33]</sup>。近几年的观测表明,马占相思林已经开始退化,出现冠层萎缩<sup>[7]</sup>。从模拟结果来看,马占相思林在前 12 a 生长迅速,之后生长缓慢,出现负增长和衰退的现象。模拟结果显示了马占相思林的叶生物量和叶面积指数不高,这是制约其生长的关键因子。因此,虽然马占相思林在前期(12 a 左右)速生耐瘠,可以快速成林,提高森林郁闭度,但从长远来看,这类森林冠层结构简单,叶面积指数不高,不利于地带性森林的优势种的定居和发展,入侵和适应能力更强的阳性灌木容易占居退化了的先锋森林群落的下层<sup>[8]</sup>,滞缓地带性森林植被的恢复进程。从而,栽植马占相思人工林加速演替进程的目的在于这个阶段并未达到,可以对其进行林分改造,使之向地带性森林植被方向继续演替。

**致谢** Peter Thornton 博士提供了 BIOME-BGC 模型源程序;中国科学院鹤山丘陵综合开放试验站提供了大量数据;申卫军在模型学习和使用过程中给予帮助;王俊同学对文稿提出修改意见,特此致谢。

## 参考文献

- [1] Chapin III F S, Matson P A, Mooney H A. Principles of Terrestrial Ecosystem Ecology [M]. New York: Springer, 2002: 393-421.
- [2] Williams M, Schwarz P A, Law B E, et al. An improved analysis of forest carbon dynamics using data assimilation [J]. Glob Change Biol, 2005, 11: 89-105.
- [3] Qin W M(秦武明), He B(何斌), Yu H G(余浩光), et al. Biomass productivity of *Acacia mangium* plantations of different age classes [J]. J NE For Univ(东北林业大学学报), 2007, 35(1): 22-24. (in Chinese)
- [4] Ren H(任海), Peng S L(彭少麟), Yu Z Y(余作岳). Biological and ecological characteristics of *Acacia mangium* plantations [J]. Chin J Ecol(生态学杂志), 1996, 15(4): 1-5. (in Chinese)
- [5] Ren H, Yu Z Y. Biomass changes of an *Acacia mangium* plantation in southern China [J]. J Trop For Sci, 2008, 20(2): 105-110.
- [6] Fang W(方炜), Ding M M(丁明懋), Lu D M(吕冬梅), et al. Hydrological dynamics and nutrient migration with precipitation of artificial *Acacia mangium* forest in low subtropical downland [J].

- Acta Ecol Sin (生态学报), 1995, 15 (Suppl. A): 115–123. (in Chinese)
- [7] Shen W J (申卫军), Peng S L (彭少麟), Wu J G (邬建国), et al. Simulation studies on carbon and nitrogen accumulation and its allocation pattern in forest ecosystems of Heshan in lower subtropical China [J]. Acta Phytoecol Sin (植物生态学报), 2003, 27 (5): 690–699. (in Chinese)
- [8] Peng S L (彭少麟). Research and Practice of Restoration Ecology in Tropics and Subtropics [M]. Beijing: Science Press, 2003: 61–372. (in Chinese)
- [9] Batur B, Zhang X D (张旭东), Peng Z H (彭镇华), et al. Simulation models of carbon cycling in forest ecosystems [J]. World For Res (世界林业研究), 2008, 21(1): 9–13. (in Chinese)
- [10] Ryan M G, McMumie R E, Agren G, et al. Comparing models of ecosystem function for temperate conifer forests. I. Model description and validation [C]// Bremeyer A I, Hall D O, Melillo J M, et al. Global Change: Effects on Coniferous Forests and Grasslands. New York: John Wiley and Sons, 1996: 313–362.
- [11] Waring R H, Running S W. Forest Ecosystems: Analysis at Multiple Scales [M]. 2<sup>nd</sup> Ed. New York: Academic Press, 1998: 59–96.
- [12] Korol R L, Running S W, Milner K S, et al. Testing a mechanistic carbon balance model against observed tree growth [J]. Can J For Res, 1991, 21: 1098–1105.
- [13] Thornton P E, Law B E, Gholz H L, et al. Modeling and measuring the effects of disturbance history and climate on carbon and water budgets in evergreen needleleaf forests [J]. Agri For Meteorol, 2002, 113: 185–222.
- [14] Schmid S, Zierl B, Bugmann H. Analyzing the carbon dynamics of central European forests: Comparison of BIOME-BGC simulations with measurements [J]. Region Environ Change, 2006, 6: 167–180.
- [15] Shen W J (申卫军), Peng S L (彭少麟), Zhou G Y (周国逸), et al. Hydrological properties and water balance of grassland ecosystem in Heshan hill region [J]. Acta Phytoecol Sin (植物生态学报), 2000, 24(2): 162–168. (in Chinese)
- [16] Running S W, Coughlan J C. A general model of forest ecosystem processes for regional applications. 1. Hydrologic balance, canopy gas exchange and primary production processes [J]. Ecol Mod, 1988, 42: 125–154.
- [17] White M A, Thornton P E, Running S W, et al. Parameterization and sensitivity analysis of the BIOME-BGC terrestrial ecosystem model: Net primary production controls [J]. Earth Interact, 2000, 4 (3): 1–85.
- [18] Glassy J M, Running S W. Validating diurnal climatology of the MT-CLIM model across a climatic gradient in Oregon [J]. Ecol Appl, 1994, 4(2): 248–257.
- [19] Thornton P E, Running S W. An improved algorithm for estimating incident daily solar radiation from measurements of temperature, humidity, and precipitation [J]. Agri For Meteorol, 1999, 93: 211–228.
- [20] Sun G C (孙谷畴), Zeng X P (曾小平), Wei C Z (魏传制), et al. Vegetation recovery in subtropical monsoon evergreen broad-leaved forest II: Gas exchange of woody legumes [J]. Chin J Appl Ecol (应用生态学报), 1995, 6(2): 119–122. (in Chinese)
- [21] Li Z A (李志安), Fang W (方炜), Lü D M (吕冬梅). Physical and chemical properties of soils in Heshan hilly land [J]. Acta Ecol Sin (生态学报), 1995, 15 (Suppl. A): 93–101. (in Chinese)
- [22] Yu Z Y (余作岳), Peng S L (彭少麟). The artificial and natural restoration of tropical and subtropical forests [J]. Acta Ecol Sin (生态学报), 1995, 15 (Suppl. A): 1–16. (in Chinese)
- [23] Ding M M (丁明懋), Peng S L (彭少麟), Yu Z Y (余作岳), et al. Nutrient cycling in a complex ecosystem of forest, orchard, grass land and fish pond in Heshan, Guangdong [J]. Acta Ecol Sin (生态学报), 1995, 15 (Suppl. A): 82–92. (in Chinese)
- [24] Robert M S, David J M. A forest growth and biomass module for landscape simulation model, LANDIS: Design, validation, and application [J]. Ecol Model, 2004, 180: 211–229.
- [25] Lenhart T, Eckhardt K, Fohrer N, et al. Comparison of two different approaches of sensitivity analysis [J]. Phys Chem Earth, 2002, 27: 645–654.
- [26] Bossel H. Treedyn 3 forest simulation model [J]. Ecol Mod, 1996, 90: 187–227.
- [27] Zeng X P (曾小平). Net primary productivity, structure and function of three plantation communities in Heshan hilly-land [D]. Guangzhou: South China Botanical Garden, Chinese Academy of Sciences, 2007: 55–57. (in Chinese)
- [28] Cao M, Woodward F I. Dynamic responses of terrestrial ecosystem carbon on global climate change [J]. Nature, 1998, 393: 249–251.
- [29] Alley R B, Marotzke J, Nordhaus W D, et al. Abrupt climate change [J]. Science, 2003, 299: 2005–2010.
- [30] Ren H (任海), Peng S L (彭少麟), Xiang Y C (向言词). Biomass and net primary productivity in an *Acacia mangium* plantation in Heshan, Guangdong, China [J]. Acta Phytoecol Sin (植物生态学报), 2000, 24(1): 18–21. (in Chinese)
- [31] Tang X L (唐旭利), Zhou G Y (周国逸), Wen D Z (温达志), et al. Distribution of carbon storage in a lower subtropical monsoon evergreen broad-leaved forest in Dinghushan Nature Reserve [J]. Acta Ecol Sin (生态学报), 2003, 23: 90–99. (in Chinese)
- [32] Zou B (邹碧), Li Z A (李志安), Ding Y Z (丁永祯), et al. Litterfall of common plantations in south subtropical China [J]. Acta Ecol Sin (生态学报), 2006, 26(3): 715–721. (in Chinese)
- [33] Chinese Forests Editing Committee (中国森林编辑委员会). Chinese Forests Vol. 2 [M]. Beijing: China Forestry Publishing Press, 1999: 1005–1007. (in Chinese)