DOI: 10.5846/stxb201606081104

孙燕瓷,马友鑫,曹坤芳,沈金祥,张一平,梅岑岑,刘文俊.基于 Biome-BGC 模型的西双版纳橡胶林碳收支模拟.生态学报,2017,37(17): 5732-5741.

Sun Y C, Ma Y X, Cao K F, Shen J X, Zhang Y P, Mei C C, Liu W J.Simulation of carbon budget in rubber plantations in Xishuangbanna based on the Biome-BGC model. Acta Ecologica Sinica, 2017, 37(17):5732-5741.

基于 Biome-BGC 模型的西双版纳橡胶林碳收支模拟

孙燕瓷2,马友鑫1,*,曹坤芳3,沈金祥4,张一平1,梅岑岑5,刘文俊1

1综合保护中心,西双版纳热带植物园, 动仑 666303

2 云南经济管理学院, 昆明 650106

3 亚热带农业资源保护与利用国家重点实验室,广西大学林学院,南宁 530004

4 云南国土资源职业学院,昆明 652501

5 深圳市深港产学研环保工程技术股份有限公司, 深圳 518057

摘要:以西双版纳橡胶适宜种植区(海拔 550—600m)的橡胶林(*Hevea brasiliensis*)为研究对象,应用参数同化后的 Biome-BGC 模型模拟了 1959—2012 年橡胶林的碳循环。结果表明,(1)与涡度相关监测结果相比,橡胶林年总初级生产力(Gross Primary Productivity,GPP)、年总呼吸(Total Respiration, Rt)的模拟精度分别为 98.37%和 90%。由于对年 GPP 的过低估计和对年 Rt 的 过高估计,年净生态系统交换量(Net Ecosystem Exchange, NEE)的模拟值比实测值低 157.35 g C m⁻² a⁻¹。但若考虑干胶碳(139 g C m⁻² a⁻¹),模拟值与实测值十分接近;(2)橡胶林在模拟进行的前 8 年里因异养呼吸较高,以碳排放为主, NEE 平均约 357 g C m⁻² a⁻¹),模拟值与实测值十分接近;(2)橡胶林在模拟进行的前 8 年里因异养呼吸较高,以碳排放为主, NEE 平均约 357 g C m⁻² a⁻¹;之后转为以碳固定为主,NEE 平均约-146 g C m⁻² a⁻¹;(3)橡胶林在 40 年的更新周期中可固定碳 1835 g C m⁻²,是一个 弱的碳汇。但与热带雨林相同周期固碳 6720 g C m⁻² 相比,仍为碳源。以上结果为深入了解橡胶种植对区域碳循环的影响提供 了科学依据,建议当地政府一方面要有计划的对老胶林进行更新,以维持当前橡胶林生态系统中的碳平衡;另一方面要注重对 热带雨林的保护,从而实现区域经济和生态环境保护的协调发展。 关键词;橡胶林;净生态系统交换量;Biome-BGC 模型;西双版纳

Simulation of carbon budget in rubber plantations in Xishuangbanna based on the Biome-BGC model

SUN Yanci², MA Youxin^{1,*}, CAO Kunfang³, SHEN Jinxiang⁴, ZHANG Yiping¹, MEI Cencen⁵, LIU Wenjun¹

1 Key Laboratory of Tropical Forest Ecology, Xishuangbanna Tropical Botanical Garden, Chinese Academy of Sciences, Menglun 666303, China

- 2 Yunnan College of Business Management, Kunming 650106, China
- 3 State Key Laboratory for Conservation and Utilization of Subtropical Agro-bioresources, and College of Forestry, Guangxi University, Nanning 530004, China
- 4 Department of Digital Land and Land Management, Yunnan Land and Resources Vocational College, Kunming 652501, China
- 5 Shenzhen-Hongkong Institution of Industry, Education & Research Environmental Technique Center, Shenzhen 518057, China

Abstract: The carbon (C) cycle in rubber plantations, which are located in a suitable planting region (altitude 550—600 m) in Xishuangbanna, was simulated using the Biome-BGC model for the period 1959—2012. We obtained the following results. (1) Compared with the actual measurements, the accuracy was 98.37% and 90% for the simulated annual gross primary productivity (GPP) and total respiration (Rt), respectively. Because of an underestimate of GPP and an overestimate of Rt, the simulated annual net ecosystem exchange (NEE) was 157.35 g C m⁻² a⁻¹ lower than the measured

收稿日期:2016-06-08; 网络出版日期:2017-04-22

基金项目:中国科学院战略性先导科技专项(XDA05050206)

^{*}通讯作者 Corresponding author.E-mail: may@ xtbg.ac.cn

139 g C m⁻² a⁻¹) was taken in

value. However, the accuracy was greatly enhanced when dry rubber C stock (139 g C m⁻² a⁻¹) was taken into account. (2) During the initial 8 years, rubber plantation acted as a C source because of the higher heterotrophic respiration rate, with an average simulated NEE of 357 g C m⁻² a⁻¹. Subsequently, however, the balance changed to C sequestration, with an average simulated NEE of -146 g C m⁻² a⁻¹. (3) Rubber plantation sequestrated 1 835 g C m⁻² during a 40-year rotation length, which is lower than that in tropical rain forests, which fixed 6 720 g C m⁻² a⁻¹ during the same period, indicating that rubber plantations established in areas of former tropical rain forest might lead to C release, even during a complete life cycle. These results enabled us to gain a better understanding of the impact of rubber plantation on the local carbon cycle. In order to reach a sustainable balance between the regional economy and environmental protection, it is suggested that the local government should not only regenerate older rubber plantations in a planned way to maintain C balance in the rubber plantation ecosystem, but also pay considerable attention to the protection of tropical rain forests.

Key Words: rubber plantation; net ecosystem exchange; Biome-BGC model; Xishuangbanna

自 1975 年以来,大气累积 CO₂浓度增加了 40%,21 世纪末期及以后全球气候系统变暖与累积 CO₂排放密 切相关^[1]。在热带地区,橡胶(*Hevea brasiliensis*)种植是影响区域碳循环的一个重要方面^[2-8],自《京都协议》 签订生效以来,一个国家或地区的社会经济发展与碳排放紧密相连,因此关于橡胶种植过程中碳收支的动态 变化及其对区域碳循环的准确评估,已成为全球变化研究的热点之一。

生理生态过程模型由于考虑了植物的生理生态特性,多将土壤—植被—大气连续体(SPAC)作为一个系统,从植物的生理过程反映生态系统与大气之间的物质和能量流动^[9],因此被广泛用于生态系统碳循环的研究中。比较典型的生理生态过程模型有 Forest-BGC 模型^[10]、Biome-BGC 模型^[11]、CENTURY 模型^[12]、BGC-ES 模型^[13]等。其中 Biome-BGC 模型因用 C++语言编写,易于编译和理解,且源代码开放,成为被广泛使用的一种生理生态过程模型。该模型中设置了植物光合作用、呼吸作用、蒸腾作用及凋落物分解等主要生理生态过程的循环模式与计算方法^[14],目前已被用于农作物生态系统^[15]、人为干扰森林生态系统^[16-17]、湿地红松生态系统^[18]、草地生态系统^[19]等的碳循环的模拟。利用 Biome-BGC 模型对热带人工经济林生态系统碳循环的模拟尚不多见。

西双版纳地处热带北缘,受经济利益和人口快速增长的共同驱动,自20世纪50年代以来橡胶种植业(特别是民营橡胶)迅猛发展,橡胶种植面积已超过了该区总面积的20%^[20],导致该区约139567hm²的热带雨林^[21]和364116hm²的热带自然林^[22]消失,极大地改变了区域的碳收支格局^[3]。橡胶林的最佳固碳周期是40年^[23],Song^[24]利用涡度监测技术指出,西双版纳一片33年生的橡胶林表现为碳汇。但目前还没有关于其它林龄(或发展阶段)橡胶林的研究结果,而这方面的数据是当前有效应对全球气候变化和国际气候谈判所迫切需要的。

本研究以西双版纳海拔 550—600m 橡胶适宜种植区^[25]的橡胶林为研究对象,利用 Biome-BGC 模型模拟 1959—2012 年橡胶林的碳循环,着重分析 40 年中橡胶林碳收支的时间变化规律及净生态系统交换量(Net Ecosystem Exchange, NEE),以期为研究其它海拔橡胶林的碳收支及综合评价橡胶种植对区域碳循环的影响 提供科学依据。

1 研究区域与研究方法

1.1 研究区概况

西双版纳(21°08′—22°36′N,99°56′—101°50′E)位于云南省南端,与缅甸、老挝接壤,拥有土地总面积 19120 km²。属热带北缘季风气候,年降雨量为1162.1mm,其中约85%的降雨集中在雨季(5—10月);干季降 水较少(11月至次年4月),但有雾,有雾日占70—80%,一般在22:30开始起雾,直到第二天11:00才逐渐消 散。年均温为22.3℃,最热月出现在5—6月25.8℃,最冷月为1月16.5℃,年均日照时数为2152.9h。主要植

5733

被类型有热带季节雨林、热带山地雨林、热带季节性湿润林、热带季雨林和热带山地常绿阔叶林^[26]。境内地势高差起伏较大,海拔475—2429 m,橡胶在各个海拔均有种植,目前已突破种植上限1200m^[3,21],至2014 年橡胶种植面积达35.29×10⁴hm^{2[27]}。

1.2 研究方法

5734

1.2.1 Biome-BGC 模型描述

Biome-BGC 模型是从第一代的 Forest-BGC 模型发展而来的,与 Forest-BGC 模型只适于针叶林生态系统 碳氮水循环的模拟相比,Biome-BGC 模型更具有普适性,可模拟常绿针叶林、常绿阔叶林、落叶针叶林、落叶阔 叶林、C₃草本植物、C₄草本植物和灌木林共7种植被类型的碳、氮、水的循环过程与交互影响。Biome-BGC 模型用 C 语言编写,可从美国蒙拿大大学森林学院陆地动态数值模拟团队(Numerical Terradynamic Simulation Group, NTSG)的网站下载 Biome-BGC4.2 版。模型的设计遵循物质与能量守恒定律,即进入系统的物质和能量等于留在系统中的物质和能量加上离开系统的物质和能量^[28],具体模拟原理参见 White^[14]。

1.2.2 Biome-BGC 模型参数

Biome-BGC 模型的输入参数包括样区参数、以日为步长的气象资料和生态生理常数。本研究中橡胶林的 样区参数如纬度、海拔、反照率均来自中国科学院西双版纳热带森林生态系统研究站,其他参数来自文献(表 1);1980—2012 年的日气象数据从中国科学院西双版纳热带森林生态系统研究站申请获得,1980 年以前的从 国家气象信息中心下载。日气象数据的预处理方法为,先将润年第 366 天的数据删除^[14],再用线性内插法对 缺失值进行插补后,调入 MT-CLIM 程序生成 Biome-BGC 所需要的文件;经过多次试验,生理生态参数用系统 自带的参数模拟效果最佳(表 1)。

参数	值	参数	值					
Parameters	Value	Parameters	Value					
样区参数 Site parameters								
纬度/(°)	22 *	砂粒/%	29 ^[29-30]					
根系吸水深度/m	1	粘粒/%	35 ^[29-30]					
海拔/m	570*	粉粒/%	36 ^[29-30]					
反照率/DIM	0.21 *	生物固氮量+氮肥/(kgN m ⁻² a ⁻¹)	4.246×10 ^{-3 [33-34]}					
大气氮沉降/(kgN m ⁻² a ⁻¹)	9.86×10^{-4} [31-32]							
生态生理参数 Ecophysiological parameters **								
生长期内转移期的比例	0.2	细根中易分解物质的比例	0.3					
生长期内落叶过程的比例	0.2	细根中纤维素的比例	0.5					
叶片与细根年更新比例	0.5	细根中木质素的比例	0.3					
活木质组织年更新比例	0.7	死木质组织中纤维素的比例	0.8					
整株植物年均死亡比例	0.0	死木质组织中木质素的比例	0.2					
植物火灾年均死亡比例	0.0	冠层截留系数/(mm LAI ⁻¹ d ⁻¹)	0.0					
新生细根与叶片的碳含量之比	1.0	冠层消光系数	0.7					
新生茎与叶片的碳含量之比	1.0	全部叶表面积与投影叶面积之比	2.0					
新生活木质组织与全部木质组织的碳含量之比	0.2	冠层平均比叶面积(按投影面积计算)/(m²/kg C)	12.0					
新生粗根与茎的碳含量之比	0.3	阴叶与阳叶的比叶面积之比	2.0					
用于当年生长的养分比例	0.5	活叶氮分配到 Rubisco 酶中的比例	0.1					
叶片碳氮比/(kg C/kgN)	42	最大气孔导度(按投影面积计算)/(m/s)	0.0					
再分配后的叶片凋落物碳氮比/(kg C/kgN)	49	表皮导度(按投影面积计算)/(m/s)	0.0					
细根碳氮比/(kg C/kgN)	42	边界层导度(按投影面积计算)/(m/s)	0.0					

表 1 橡胶林的 Biome-BGC 模型样区参数和生理生态参数

/+ --

缤表				
参数 Parameters	值 Value	参数 Parameters	值 Value	
活木质组织碳氮比/(kg C/kgN)	50	气孔开始缩小时的叶片水势/MPa	-0.6	
死木质组织碳氮比(需更多数据支持)/(kg C/kgN)	300	气孔完全关闭时的叶片水势/MPa	-3.9	
叶片凋落物中易分解物质的比例	0.3 *	气孔开始缩小时的饱和水气压差/Pa	1800	
叶片凋落物中纤维素的比例	0.4	气孔完全关闭时的饱和水气压差/Pa	4100	
叶片凋落物中木质素的比例	0.2			
Leaf litter lignin proportion/DIM	0.2			

DIM: Dimensionless; LAI: leaf area index; * 数据来源于中国科学院西双版纳热带雨林生态系统研究站; Data came from Xishuangbanna Station for Tropical Rainforest Ecosystem Studies; * * 数据来源于 White^[14]

1.2.3 Biome-BGC 模型同化

Biome-BCC 模型的模拟分两步实现,第一步是获得模拟的初始状态,第二步是正式运行模拟程序。初始 状态的获得有两种途径,一是直接输入长期定点观察数据最初的观测值,二是运行模型自带的 Spin-up 程序。 在 Spin-up 过程中,将模拟起点时的碳氮存量设为极低的值(叶片的碳存量为 0.001 kg C/m²,其它库的碳氮存 量均为 0 kg C/m²),反复模拟数千年,直到连续两年土壤碳含量的差异小于 0.0005 kg C/m²,默认系统达到稳 定状态^[28],Spin-up 过程结束^[35]。考虑到橡胶种植前对已有植被的清除性砍伐和烧山,若用达到稳定状态时 各个库中的碳氮存量,会对橡胶林的固碳过程造成错误的估计。因此,参考 Thornton 等的方法^[36],将茎的 1% 和粗根移入粗死木质残体库,随后的烧山使粗死木质残体库损失 50%,叶片、地上凋落物和细根全部被烧掉, 橡胶种植使叶片存有 10 g C/m²。氮肥是橡胶林生态系统中氮素的来源之一,平均每年约 3.846 g N/m^{2[34]}。

Biome-BGC 模型首先进行物候计算。模型中规定,在北半球 1 月至 7 月为生长期,11 月至次年 1 月初为 落叶期。在完全落叶期内,系统的总初级生产力(GPP)为零^[37]。尽管橡胶林在西双版纳出现 1—2 月集中落 叶的现象,但落叶和长新叶几乎同时发生,尤其在海拔 550—600m 的区域,橡胶林的日 GPP 和最低叶面积指 数并未出现为零的情况^[24,38]。综合考虑,将橡胶林视为一种常绿阔叶林进行模拟更为合理。同时考虑雾水 的影响,雾水对降水的贡献为全年降水的 1.1%^[39]。

1.2.4 模型检验参数

本研究模拟了西双版纳海拔550—600m 的橡胶林1959—2012 年的碳循环。模型检验参数为同一区域内33 年生橡胶林的涡度相关监测数据,观测铁塔装在中国科学院西双版纳热带森林生态系统研究站内单一橡胶林人工群落(21°56′N,101°15′E,海拔580 m)中^[24],观测时间为2010 年7月—2011 年6月。

1.2.5 数据处理与分析

统计分析用 SPSS 16.0,模拟值与实测值的相关性采用线性回归分析,差异显著性水平设为 a=0.05。用 SigmaPlot 12.5 软件制作图表。

2 结果与分析

2.1 模型检验

用 Biome-BGC 模型模拟了西双版纳 1959—2012 年橡胶林的碳循环,并从模拟结果中提取了与验证参数 相对应林龄橡胶林的 GPP、总呼吸(Rt)和 NEE,然后参照 Hidy^[19]的方法,从提取年份至 2011 年逐年求平均, 以消除气象数据年际间波动的影响。与原模型相比,同化后的 Biome-BGC 模型对橡胶林碳循环的模拟效果 相对较好。日 GPP 模拟值与实测值的相关系数由 0.58 提高到 0.66(表 2),误差源于对干季中期至雨季初期 (1月中旬至次年 5月)的模拟结果偏低,对雨季末期(9—10月)的模拟偏低(图 1);模型同化后对日 Rt 的模 拟效果最好,模拟值与实测值的相关性达 0.92(表 2),模拟值比实测值稍高(图 1);受 GPP 模拟值偏低和 Rt

模拟值偏高的共同影响,模型同化后对日 NEE(NEE 为负值表示碳吸收,NEE 为正值表示碳释放)的模拟效果 相对较差,模拟值与实测值的相关性仅0.39,模拟值低于实测值(表2,图1)。从年积累量来看(表3),模型同 化后年 GPP 的相对误差由-21.76%降低至-1.62%,模拟值比实测值低 41.61 g C m⁻² a⁻¹,总体精度为98.37%; 年 Rt 的相对误差由-11.74%降低到 9.04%,模拟值比实测值高 205.82 g C m⁻² a⁻¹,整体精度约 90%;年 NEE 模拟值比实测值低 157.35 g C m⁻² a⁻¹,相对误差为 63.7%,这可能与 Biome-BGC 模型未能模拟干胶产量有关。 33a 林龄橡胶林的干胶碳储量为139g Cm⁻²a^{-1[40]},因此若考虑干胶固碳量,模型同化后的模拟结果与实测值 十分接近。表明同化后的 Biome-BGC 模型可用于西双版纳橡胶林生态系统碳循环的模拟。

Table 2 Relative analysis between measured and simulated daily GPP、Rt、NEE in rubber plantations								
碳六倍长数 Ling frieder set	原模型 Original model			同化模型 Assimilated model				
w文採指致 index of carbon exchange	回归方程	R	R^2	Р	回归方程	R	R^2	Р
总初级生产力 Gross Primary Production,GPP	<i>Y</i> =0.16+0.899 <i>X</i>	0.58	0.34	<0.01	Y = -0.221 + 0.952X	0.66	0.44	<0.01
总呼吸 Total Respiration,Rt	<i>Y</i> =0.034+0.877 <i>X</i>	0.74	0.54	<0.01	<i>Y</i> =0.585+0.998 <i>X</i>	0.92	0.84	<0.01
净生态系统交换量 Net Ecosystem Exchange, NEE	Y = 0.339 + 0.346X	0.27	0.07	< 0.01	<i>Y</i> =0.041+0.424 <i>X</i>	0.39	0.15	<0.01
V.模拟值 simulated valued, X. 实测	值 measured valued							

表 2 橡胶林日 GPP、Rt、NEE 实测值与模拟值的相关性分析

表 3 橡胶林年 GPP、Rt、NEE 实测值与模拟值的误差分析 Table 3 Error analysis between measured and simulated annual GPP, Rt, NEE in rubber plantations

		•				•	
MV/		原模型 Original model			同化模型 Assimilated model		
$(g C m^{-2} a^{-1})$	SV/	RD/		SV/	RD/		
	$(g \ C \ m^{-2} \ a^{-1})$	$(g C m^{-2} a^{-1})$	KE7%	$(g C m^{-2} a^{-1})$	$(g C m^{-2} a^{-1})$	RE/%	
GPP	-2559.64	-2002.70	556.93	-21.76	-2518.03	41.61	-1.62
Rt	2312.62	2041	-271.62	-11.74	2522.44	209.83	9.07
NEE	-247.02	38.29	285.31	-115.50	-89.66	157.35	-63.70

MV:实测值, measured value; SV:模拟值, simulated value; RD: 相对差异, relative difference; RE: 相对误差; relative error

2.2 雾水对橡胶林碳循环模拟的影响

气孔是植物水气传输的重要门户,它与植物的光合作用、呼吸作用等重要生理生态过程密切相关。在 Biome-BGC 模型中,植物可利用水分的多少直接影响气孔导度。在西双版纳地区,橡胶林中有长达188d 的雾 日,雾日橡胶林冠层对雾水的截留量占全年降水量的1.1%,极大的弥补了干季降雨量的不足^[39]。为了摸清 雾水对橡胶林碳循环的影响,本研究模拟了降水中不加入雾水和加入雾水两种情况。结果表明,在降水中加 入雾水后, GPP 和 Rt 同时增加, NEE 没有明显的变化(图2)。但在降水中加入雾水后, NEE 异常值大为减 少,NEE 在 1969 年以后即保持以碳吸收为主,表明雾水对橡胶林碳收支的模拟具有促进作用,在后续分析中 均使用降水中加入雾水的模拟结果。

2.3 橡胶林碳收支的模拟

从图 3 可以看出,橡胶林自养呼吸随模拟年限的增加而逐渐增加,在模拟进行 5a 时自养呼吸即由最初的 32 g C m⁻²a⁻¹增加到 2 108 g C m⁻²a⁻¹, 之后维持在 2 100—2 600 g C m⁻²a⁻¹之间。异养呼吸的变化规律与自养 呼吸正好相反,在模拟的前 4a 里较高,平均约 1 276 g C m⁻²a⁻¹。4a 后异养呼吸迅速降低并在第 10 年左右达 到稳定状态,平均约496gCm⁻²a⁻¹,为前4a的2/5。橡胶林总呼吸随时间的变化与自养呼吸的变化基本一 致,前4a由1959年的1492gCm⁻²a⁻¹迅速增加到1962年的2374gCm⁻²a⁻¹,4a后总呼吸保持在2776gC m⁻²a⁻¹左右。

橡胶林年 GPP 和年 NPP 均在模拟第 3—4 年快速增加,之后达到稳定状态,分别保持在-266—-970 g C

37 卷

0

-2

-4

-6

-10

-12 -14

7 8 9 10 11 12

6

4

2

0

-2 -4 -6

7 8 9

10 11 12

2 3 4 5

1

月份 Month

总初级生产力 GPP/(g C m⁻² d⁻¹)

净生态系统交换量 NEE/(g C m⁻² d⁻¹)



观测值^[24] 模拟值(同化模型)

模拟值(原模型)

图 1 Biome-BGC 同化后模拟的橡胶林日 GPP(a)、Rt(b)和 NEE(c)与实测值比较

7

6

Fig.1 Comparison of simulated daily GPP (a), Rt (b) and NEE (c) in rubber plantation using the assimilated Biome-BGC model with the observed values





5737

m⁻²a⁻¹和-2413—-3226 g C m⁻²a⁻¹之间(图4)。年 NEE 在模拟进行的前 8 年里平均 357 g C m⁻²a⁻¹,且绝大多 数年份大于 0,表明该时期橡胶林以碳排放为主(共释 放碳 2855 g C/m²);8 年以后除极少数年份外,NEE 均 小于 0,平均约-146g C m⁻²a⁻¹,表现为碳汇。由前面的 分析可知,年 NEE 模拟值比观测值低 63.7%,若将年 NEE 模拟值增加 63.7%,橡胶林仍然是在模拟进行 8a 左右才由碳源转为碳汇(图 4)。由此我们可以初步判 断,橡胶种植的前 8a 里为碳源,8a 以后由碳源转为碳 汇。若以 40a 为橡胶林的最佳固碳周期^[23],在适宜种 植区橡胶林一生中可固定碳 1835 g C/m²,表现为碳汇。

通过对呼吸作用(Ra和Rh)和固碳作用(GPP、 NPP)的综合分析发现,橡胶林在模拟初期之所以表现 为碳源,主要是由较高的异养呼吸和较弱的固碳能力 (GPP、NPP均较低)引起。



图 3 1959—2012 年橡胶林年 Rt、异养呼吸(Rh)、自养呼吸(Ra) 的模拟

Fig.3 Simulation of annual Rt, heterotrophic respiration (Rh), autotrophic respiration (Ra) in rubber plantations during 1959-2012



图 4 1959—2012 年橡胶林年 NEE、GPP 和 NPP 的模拟

Fig.4 Simulation of annual NEE, GPP and NPP in rubber plantations during 1959-2012

3 讨论

本研究根据橡胶种植的实际情况,考虑了橡胶种植对已有植被的清除性砍伐和烧山行为、施肥等因素,对 模型进行了参数同化,同化后的 Biome-BGC 对橡胶林碳收支的模拟效果获得了较大的改善。对年 GPP 的模 拟精度由 78.34%提高到 98.37%,模拟值与实测值的相关性为 0.66。从 GPP 的日变化来看,对日 GPP 的模拟 值在干季中期至雨季初期(1月中旬至次年 5月)偏低,在雨季末期(9—10月)偏高。这可能与橡胶林自身的 水分利用策略有关,即橡胶林在干季转向深层土壤吸收^[41-42]。在雨季,橡胶林主要利用表层 0—30 cm 土壤中 的水分,对 70 cm 以下土层中的水分利用极少^[43];而在干季后期,因 70 cm 以上土层的水分被大量消耗,橡胶 林向深层土壤吸水深度可达 2 米以下^[41]。同时,雨季来临第一次降雨过后,橡胶树就能迅速的吸收表层土壤 中的水分,使得橡胶林能在干季生长发芽。但在 Biome-BGC 模型中,一方面植物有效吸水根系深度固定为一 层;另一方面气孔是植物-土壤-大气系统中水气交换的唯一门户,土壤水势直接影响气孔导度。因此,当根系 吸水深度被固定为 1 米时,在雨季模型极可能高估了橡胶林对深层土壤水的利用率,从而对 GPP 造成高估; 在干季则相反,模型中低估了深层土壤中可利用水分的量并限制了光合作用的进行,对 GPP 的模拟偏低。此 外,在土壤含水量较低的情况下,模型中土壤水势对水分的响应是突变型的,而实际上土壤水的渗透有一定的 过程,即滞后性。Hidy 等^[19]利用 Biome-BGC 模型模拟草地生态系统的碳收支时,也发现了这一问题,对模型 进行了改进,并取得了较好的模拟效果,但 Hidy 等人并未将改进后的源代码公开,今后的工作中我们将会在 这方面做出更多的努力。

模型同化后对 Rt 的模拟效果较好,模拟值与涡度相关监测值的相关性达 0.91,总体模拟精度为 91%。但由于对 GPP 的模拟结果偏低和对 Rt 的模拟结果偏高,导致模型对 NEE 的模拟误差较大,模拟值比实测值低 157.35 g C m⁻² a⁻¹,相对误差为 63.7%。NEE 模拟值偏低可能源于模型未能模拟干胶产量,若考虑干胶产量 (33 年生橡胶林约 139 g C m⁻² a⁻¹)^[40]的影响, NEE 模拟值与实测值十分接近,表明同化后的模型可以用来 进行橡胶林碳收支的模拟。

水分是影响 Biome-BGC 模型模拟结果的一个重要方面,鉴于西双版纳具有长达 188 d 的雾日和雾水对降 水的贡献^[39],在模拟橡胶林的碳循环时还考虑了雾水的作用。分析发现,虽然雾水对 NEE 没有明显的影响, 但却有效减少了 NEE 年际间的异常值,使橡胶林在模拟 8a 后即表现为相对稳定的碳汇。表明雾水对橡胶林 碳循环的模拟具有一定的促进作用,但不是主要影响因子。

由 NEE 的变化规律可知,橡胶林在模拟的前 8a 因异养呼吸过高以碳排放为主,表现为碳源;8a 后异养呼 吸逐渐降低,至第9年达到相对稳定的状态,平均为 500 g C m⁻²a⁻¹,橡胶林由碳源转为相对稳定的碳汇。这 一结果与 Amiro 等^[44]对受干扰的林龄系列的研究结论基本相符,其主要结论有:1)在演替初期由于光合作用 弱于呼吸作用,生态系统表现为碳源;2)从干扰期开始至干扰后 10a 左右,生态系统即可恢复为碳汇,之后碳 汇维持不变;3)干扰系列由碳源到碳汇的转变是由异养呼吸与光合作用的相对变化引起。这进一步证明同 化后的 Biome-BGC 模型适宜于橡胶林碳收支的模拟。若以 40a 更新周期计算,在橡胶适宜种植区橡胶林一生 中可固定碳 1 835 g C/m²,是一个弱的碳汇。但与西双版纳热带雨林相同周期固碳 6 720 g C/m²相比^[45],建 立于热带雨林上的橡胶林在整个生命周期中都表现为碳源。

4 结论

在橡胶适宜种植区,橡胶林在种植初期的前 8a 里以碳排放为主,主要由异养呼吸过高引起,8 年以后转为相对稳定的碳汇;若以 40a 为橡胶林的最佳固碳周期,橡胶林一生中可固定碳 1835 g C/m²,是一个弱的碳 汇。但与热带雨林相比,极可能在整个生命周期中都表现为碳汇。因此在橡胶种植过程中,一是要对老胶林 进行有计划的更新,务必考虑橡胶林的林龄结构,尽量避免盲目更新破坏橡胶林生态系统现有的碳平衡;二是 必须重视对热带雨林的保护,不宜再破坏热带雨林建立新的橡胶林。从而最大限度的降低橡胶种植对区域性 碳收支的影响,实现经济和生态环境保护的协调发展。

致谢:感谢中国科学院西双版纳热带森林生态系统研究站,及中国科学院西双版纳热带植物园唐建维研究员、 沙丽清研究员、范泽鑫副研究员、宋清海副研究员和中国科学院南京土壤研究所的递超普等对本工作所给予 的大力支持。

参考文献(References):

- [1] Stocker T F, 秦大河, Plattner G K, Tignor M M B, Allen S K, Boschung J, Nauels A, Xia Y, Bex V, Midgley P M. IPCC 2013: 决策者摘要. 政府间气候变化专门委员会第五次评估报告第一工作组报告气候变化 2013: 自然科学基础. 英国剑桥, 美国纽约: 剑桥大学出版社, 2013: 9-10.
- [2] Yang J C, Huang J H, Tang J W, Pan Q M, Han X G. Carbon sequestration in rubber tree plantation established on former arable lands in Xishuangbanna, SW China. Acta Phytoecologica Sinica, 2005, 29(2): 296-303.
- [3] Li H M, Ma Y X, Aide T M, Liu W J. Past, present and future land-use in Xishuangbanna, China and the implications for carbon dynamics. Forest Ecology and Management, 2008, 255(1): 16-24.
- [4] Ziegler A D, Fox J M, Xu J C. The rubber juggernaut. Science, 2009, 324(5930): 1024-1025.
- [5] de Blécourt M, Brumme R, Xu J C, Corre M D, Veldkamp E. Soil carbon stocks decrease following conversion of secondary forests to rubber

(Hevea brasiliensis) plantations. PLoS One, 2013, 8(7): e69357.

- [6] de Blécourt M, Hänsel V M, Brumme R, Corre M D, Veldkamp E. Soil redistribution by terracing alleviates soil organic carbon losses caused by forest conversion to rubber plantation. Forest Ecology and Management, 2014, 313: 26-33.
- [7] Blagodatsky S, Xu J C, Cadisch G. Carbon balance of rubber (*Hevea brasiliensis*) plantations: a review of uncertainties at plot, landscape and production level. Agriculture, Ecosystems & Environment, 2016, 221: 8-19.
- [8] Yang X Q, Blagodatsky S, Lippe M, Liu F, Hammond J, Xu J C, Cadisch G. Land-use change impact on time-averaged carbon balances: rubber expansion and reforestation in a biosphere reserve, South-West China. Forest Ecology and Management, 2016, 372: 149-163.
- [9] 冯险峰, 刘高焕, 陈述彭, 周文佐. 陆地生态系统净第一性生产力过程模型研究综述. 自然资源学报, 2004, 19(3): 369-378.
- [10] Running S W, Gower S T. FOREST-BGC, a general model of forest ecosystem processes for regional applications. II. Dynamic carbon allocation and nitrogen budgets. Tree Physiology, 1991, 9(1/2): 147-160.
- [11] Running S W, Hunt E R Jr. Generalization of a forest ecosystem process model for other biomes, BIOME-BGC, and an application for global-scale models//Ehleringer J R, Field C B, eds. Scaling Physiological Processes: Leaf to Globe. San Diego: Academic Press, 1993; 141-158.
- [12] Pennock D J, Frick A H. The role of field studies in landscape-scale applications of process models: an example of soil redistribution and soil organic carbon modeling using CENTURY. Soil and Tillage Research, 2001, 58(3/4): 183-191.
- [13] Ooba M, Wang Q X, Murakami S, Kohata K. Biogeochemical model (BGC-ES) and its basin-level application for evaluating ecosystem services under forest management practices. Ecological Modelling, 2010, 221(16): 1979-1994.
- [14] White M A, Thornton P E, Running S W, Nemani R R. Parameterization and sensitivity analysis of the BIOME-BGC terrestrial ecosystem model: net primary production controls. Earth Interactions, 2000, 4(3): 1-85.
- [15] Wang W L, Ichii K, Hashimoto H, Michaelis A R, Thornton P E, Law B E, Nemani R R. A hierarchical analysis of terrestrial ecosystem model Biome-BGC: equilibrium analysis and model calibration. Ecological Modelling, 2005, 220(17): 2009-2023.
- [16] Cienciala E, Tatarinov F A. Application of BIOME-BGC model to managed forests: 2. comparison with long-term observations of stand production for major tree species. Forest Ecology and Management, 2006, 237(1/3): 252-266.
- [17] Peckham S D, Gower S T, Perry C H, Wilson B T, Stueve K M. Modeling harvest and biomass removal effects on the forest carbon balance of the Midwest, USA. Environmental Science & Policy, 2013, 25: 22-35.
- [18] 曾慧卿, 刘琪璟, 冯宗炜, 王效科, 马泽清. 基于 BIOME-BGC 模型的红壤丘陵区湿地松(*Pinus elliottii*)人工林 GPP 和 NPP. 生态学报, 2008, 28(11): 5314-5321.
- [19] Hidy D, Barcza Z, Haszpra L, Churkina G, Pintér K, Nagy Z. Development of the Biome-BGC model for simulation of managed herbaceous ecosystems. Ecological Modelling, 2012, 226: 99-119.
- [20] Xu J C, Grumbine R E, Beckschäfer P. Landscape transformation through the use of ecological and socioeconomic indicators in Xishuangbanna, Southwest China, Mekong Region. Ecological Indicators, 2014, 36: 749-756.
- [21] Li H M, Aide T M, Ma Y X, Liu W J, Cao M. Demand for rubber is causing the loss of high diversity rain forest in SW China. Biodiversity and Conservation, 2007, 16(6): 1731-1745.
- [22] Huang X H, Yuan H, Yu F K, Li X Y, Liang Q B, Yao P, Shao H B. Spatial-temporal succession of the vegetation in Xishuangbanna, China during 1976-2010: a case study based on RS technology and implications for eco-restoration. Ecological Engineering, 2014, 70: 255-262.
- [23] Nizami S M, Zhang Y P, Sha L Q, Zhao W, Zhang X. Managing carbon sinks in rubber (*Hevea brasilensis*) plantation by changing rotation length in SW China. PLoS One, 2014, 9(12); e115234.
- [24] Song Q.H., Tan Z.H., Zhang Y.P., Sha L.Q., Deng X.B., Deng Y., Zhou W.J., Zhao J.F., Zhao J.B., Zhang X., Zhao W., Yu G.R., Sun X.M., Liang N.S., Yang L.Y. Do the rubber plantations in tropical China act as large carbon sinks?. iForest, 2014, 7: 42-47.
- [25] 宋清海, 张一平. 西双版纳地区人工橡胶林生物量、固碳现状及潜力. 生态学杂志, 2010, 29(10): 1887-1891.
- [26] 朱华. 论滇南西双版纳的森林植被分类. 云南植物研究, 2007, 29(4): 377-387.
- [27] 梅岑岑,马友鑫,李红梅,刘文俊,孙燕瓷,汤柔馨.西双版纳土地利用景观格局分析.云南大学学报:自然科学版(S2),2015,36 (S1):363-369.
- [28] Thornton P E, Rosenbloom N A. Ecosystem model spin-up: estimating steady state conditions in a coupled terrestrial carbon and nitrogen cycle model. Ecological Modelling, 2005, 189(1/2): 25-48.
- [29] 唐炎林,邓晓保,李玉武,张顺宾.西双版纳不同林分土壤机械组成及其肥力比较.中南林业科技大学学报:自然科学版,2007,27(1): 70-75.
- [30] Li H M, Ma Y X, Liu W J, Liu W J. Soil changes induced by rubber and tea plantation establishment: comparison with tropical rain forest soil in Xishuangbanna, SW China. Environmental Management, 2012, 50(5): 837-848.
- [31] 沙丽清,郑征,冯志立,刘玉洪,刘文杰,孟盈,李明锐.西双版纳热带季节雨林生态系统氮的生物地球化学循环研究.植物生态学报,

2002, 26(6): 689-694.

- [32] Han Y G, Fan Y T, Yang P L, Wang X X, Wang Y J, Tian J X, Xu L, Wang C Z. Net anthropogenic nitrogen inputs (NANI) index application in Mainland China. Geoderma, 2014, 231: 87-94.
- [33] Boring L R, Swank W T, Waide J B, Henderson G S. Sources, fates, and impacts of nitrogen inputs to terrestrial ecosystems: review and synthesis. Biogeochemistry, 1988, 6(2): 119-159.
- [34] Petsri S, Chidthaisong A, Pumijumnong N, Wachrinrat C. Greenhouse gas emissions and carbon stock changes in rubber tree plantations in Thailand from 1990 to 2004. Journal of Cleaner Production, 2013, 52: 61-70.
- [35] Pietsch S A, Hasenauer H, Thornton P E. BGC-model parameters for tree species growing in central European forests. Forest Ecology and Management, 2005, 211(3): 264-295.
- [36] Thornton P E, Law B E, Gholz H L, Clark K L, Falge E, Ellsworth D S, Goldstein A H, Monson R K, Hollinger D, Falk M, Chen J, Sparks J P. Modeling and measuring the effects of disturbance history and climate on carbon and water budgets in evergreen needleleaf forests. Agricultural and Forest Meteorology, 2002, 113(1/4): 185-222.
- [37] White M A, Thornton P E, Running S W. A continental phenology model for monitoring vegetation responses to interannual climatic variability. Global Biogeochemical Cycles, 1997, 11(2): 217-234.
- [38] 贾开心.西双版纳三叶橡胶林生长随海拔高度变化研究[D].景洪:中国科学院研究生院(西双版纳热带植物园),2006.
- [39] 刘文杰, 张一平, 刘玉洪, 李红梅, 段文平. 热带季节雨林和人工橡胶林林冠截留雾水的比较研究. 生态学报, 2003, 23(11): 2379-2386.
- [40] 孙燕瓷,马友鑫,曹坤芳,李红梅,何建芬,刘昌平,刘洪平,李斌.西双版纳长期橡胶种植对土壤固碳和氮的影响研究.土壤通报, 2015,46(2):412-419.
- [41] Guardiola-claramonte M, Troch P A, Ziegler A D, Giambelluca T W, Vogler J B, Nullet M A. Local hydrologic effects of introducing non-native vegetation in a tropical catchment. Ecohydrology, 2008, 1(1): 13-22.
- [42] Tan Z H, Zhang Y P, Song Q H, Liu W J, Deng X B, Tang J W, Deng Y, Zhou W J, Yang L Y, Yu G R, Sun X M, Liang N S. Rubber plantations act as water pumps in tropical China. Geophysical Research Letters, 2011, 38: L24406.
- [43] Liu W J, Li J T, Lu H J, Wang P Y, Luo Q P, Liu W Y, Li H M. Vertical patterns of soil water acquisition by non-native rubber trees (*Hevea brasiliensis*) in Xishuangbanna, southwest China. Ecohydrology, 2014, 7(4): 1234-1244.
- [44] Amiro B D, Barr A G, Barr J G, Black T A, Bracho R, Brown M, Chen J, Clark K L, Davis K J, Desai A R, Dore S, Engel V, Fuentes J D, Goldstein A H, Goulden M L, Kolb T E, Lavigne M B, Law B E, Margolis H A, Martin T, McCaughey J H, Misson L, Montes-Helu M, Noormets A, Randerson J T, Starr G, Xiao J. Ecosystem carbon dioxide fluxes after disturbance in forests of North America. Journal of Geophysical Research, 2010, 115(G4): GO0K02.
- [45] Zhang Y P, Tan Z H, Song Q H, Yu G R, Sun X M. Respiration controls the unexpected seasonal pattern of carbon flux in an Asian tropical rain forest. Atmospheric Environment, 2010, 44(32): 3886-3893.