

DOI: 10.3969/j.issn.1000-3142.2013.03.001

向悟生, 农重刚, 王斌, 等. 喀斯特季节性雨林蚬木种群的增长模型[J]. 广西植物, 2013, 33(3):285—290

Xiang WS, Nong CG, Wang B, et al. Growth models of *Excentrodendron hsienmu* population in a karst seasonal rain forest[J]. Guihaia, 2013, 33(3): 285—290

喀斯特季节性雨林蚬木种群的增长模型

向悟生^{1,2}, 农重刚³, 王斌^{1,2}, 刘晟源³, 丁涛^{1,2},
何兰军^{1,2}, 李先琨^{1,2*}, 黄甫昭^{1,2}

(1. 广西壮族自治区广西植物研究所, 广西桂林 541006; 2. 广西友谊关森林生态系统定位观测研究站,

广西凭祥 532600; 3. 广西弄岗国家级自然保护区管理局, 广西崇左 532400)

摘要: 蚬木是喀斯特季节性雨林的优势种和特征种, 研究蚬木种群的增长过程将为深入理解喀斯特季节性雨林动态提供基础。根据一个 15 hm² 固定样地的调查数据, 采用 logistic 模型及其 4 种改进模型对蚬木种群的增长过程进行了拟合, 用残差平方和、决定系数和 AIC 准则对拟合的模型进行评价。结果表明: 李新运模型和刘金福模型的拟合效果较好, 但综合考虑模型的拟合效果和模型的简洁性, logistic 模型和 S 形增长过程模型为较优模型。用 logistic 模型对蚬木种群的增长过程进行深入分析发现, 种群增长最快的时期为 50 a 左右, 而在 150 a 后, 种群逐渐进入增长饱和期。种群目前接近增长饱和期, 所以应加强保护, 以维持蚬木群落的稳定发展。

关键词: 蚬木; 种群增长; 模型; 喀斯特季节性雨林

中图分类号: Q948 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-3142(2013)03-0285-06

Growth models of *Excentrodendron hsienmu* population in a karst seasonal rain forest

XIANG Wu-Sheng^{1,2}, NONG Chong-Gang³, WANG Bin^{1,2}, LIU Sheng-Yuan³,
DING Tao^{1,2}, HE Lan-Jun, LI Xian-Kun^{1,2*}, HUANG Fu-Zhao^{1,2}

(1. Guangxi Institute of Botany, Guangxi Zhuang Autonomous Region and the Chinese Academy of Sciences, Guilin 541006,

China; 2. Guangxi Youyiguan Forest Ecosystem Research Station, Pingxiang 532600, China; 3. Longgang

National Natural Reserve Administration of Guangxi, Chongzuo 532400, China)

Abstract: *Excentrodendron hsienmu* is a dominant as well as a character species of karst seasonal rain forest. Studying on growth process of *E. hsienmu* population may provide key insights for successional dynamics and status of the karst seasonal rain forest. Population growth dynamics of *E. hsienmu* was simulated by using the logistic model and 4 modified models according to the data from a 15 hm² plot of the karst seasonal rain forest at Nonggang, south China. To determine fitting goodness of the models, residual sum of squares, correlative coefficient and Akaike Information Criterion were compared. The results showed that the fitting goodness of Li Xin-Yun model and Liu Jin-Fu modified model were the relatively better among the five models. However, the logistic model and the S-shaped growth process model were the optimal models as comparing the AIC value. Applying the logistic model, we were able to evaluate the population expansion process of *E. hsienmu*. The increasing rate of *E. hsienmu* population reached the highest peak at about 50 a, while it levelled off after 150 a. Growth of *E. hsienmu* population was currently close to saturation period, and enhanced protec-

收稿日期: 2012-10-07 修回日期: 2013-01-18

基金项目: 国家自然科学基金(31270469); 国家科技支撑计划(2011BAC09B02); 广西自然科学基金(2013GXNSFBA019076; 桂科自 0991226); 广西新世纪百千人才工程专项(2007219); GEF 小额项目(2011GXGEF005, 2011GXGEF004); 广西植物研究所基本业务费(桂植业 09021, 10007, 11001)

作者简介: 向悟生(1978-), 男, 广西桂林人, 副研究员, 主要从事植物生态学方面的研究, (E-mail) xwusheng@gmail.com。

通讯作者: 李先琨, 研究员, 主要从事植物生态学和恢复生态学方面的研究, (E-mail) xiankunli@163.com。

tion actions were consequently needed to maintain steady development of its community.

Key words: *Excentrodendron hsiennmu*; population growth; model; karst seasonal rain forest

种群的建立和增长过程是种群生态学中的核心问题,同时也是理解群落演替和动态过程的基础(Lesser *et al.*, 2012)。数学模型是定量描述种群增长过程的重要工具。通过数学模型的拟合,可以深入地分析种群的增长过程,从而为濒危物种种群的保护、有害种群的控制等提供重要依据(Lesser *et al.*, 2012; Shea *et al.*, 2010)。种群在有限的空间内一般都呈 S 形增长(黄晋彪等, 1990; Lesser *et al.*, 2012; 李新运等, 1997)。logistic 模型是描述这一生长过程的经典模型,但该模型中对密度制约效应的线性化假设往往使模拟结果产生偏差(李新运等, 1997),所以对 logistic 模型进行扩充和改进,改进的模型可用于密度制约效应非线性的情况,在实际模拟过程中取得了很好效果(Cui *et al.*, 1982; Matis *et al.*, 2004; Sakanoue, 2007)。

蚬木是广西北热带喀斯特季节性雨林优势种和关键种之一(李先琨等, 2008),广泛分布于我国桂西南岩溶山地(Tang *et al.*, 2005),在越南等东南亚国家有较多分布,与金丝李(*Garcinia paucinerkis*)、青冈(*Cyclobalanopsis glauca*)、肥牛树(*Cephalomappa sinensis*)等组成的混交林为广西南亚热带和北热带局部地区岩溶山地特有的代表性原生性植被,这种混交林是维持和改善桂西南喀斯特生态系统和生物多样性的优势植被之一(李先琨等, 2003),承载着如防止石漠化、调蓄表层岩溶带、碳库(Liu *et al.*, 2010)等重要生态功能。由于缺乏有效保护,蚬木种群数量近 30 年来一直下降,已表现为渐危状况,被列为国家二级保护植物(傅立国等, 1992)。对于蚬木的地理分布、系统发育、木材特征、营林管理已有过调查研究(广西农学院林学院林学系等, 1978; Tang *et al.*, 2005),但对蚬木种群数量增长过程的认识仍十分有限,不利于对喀斯特北热带喀斯特季节性雨林的稳定性和群落动态的认识。本研究以喀斯特季节性雨林蚬木种群为研究对象,根据广西弄岗 15 hm² 喀斯特季节性雨林固定监测样地的调查结果,用 logistic 模型及其改进模型对种群增长过程进行拟合,以期确定描述其种群增长过程的数学模型,为蚬木种群资源的保护和管理提供依据,为深入认识北热带喀斯特季节性雨林群落动态和稳定性奠定基础。

1 研究区域概况

广西弄岗国家级自然保护区地处广西龙州县中北部与宁明县西北部,呈东南—西北长条状分布,地理位置为 106°42′28″~107°04′54″E, 22°13′56″~22°33′09″N,总面积约 101 km²。区内群峰嵯峨、山弄密集,属典型的喀斯特地貌,主要地貌类型为峰丛谷地型和峰丛洼地型。该区为热带季风气候,每年有 7 个月平均气温 22 ℃,最冷月平均气温 13 ℃,年最高气温 37~39 ℃,≥10 ℃的积温为 7 344~7 930 ℃,无霜期可达 351 d 以上。年平均降水量为 1 150~1 550 mm。土壤主要有黑色石灰土、棕色石灰土。保护区植物区系主要由热带性质、北部湾植物区系和海南植物区系的优势科组成,如大戟科、无患子科、楝科、桑科、豆科等(苏宗明等, 1988)。

2 研究方法

2.1 样地设置与调查

参照 CTFS(Center for Tropical Forest Science)标准(Condit, 1995),在弄岗国家级自然保护区内设置了一个以蚬木为优势种的喀斯特季节性雨林的 15 hm² 动态监测样地。样地位于 106°57′06.90″E, 22°26′58.01″N;样地投影面积 15 hm²,呈长方形,东西长 500 m,南北宽 300 m;地形复杂,四面为陡峭坡地、中间为洼地,最小坡度为 1.37°,最大坡度为 86.29°,平均坡度为 42.87°;最高海拔 373.7 m,最低海拔 184.00 m,最大高差为 189.7 m。

用全站仪将整个样地划分为 1 500 个 10 m×10 m 的样方,并进一步将每个样方划分为 4 个 5 m×5 m 的小样方。对样地内胸径大于或等于 1 cm 的所有蚬木种群个体进行定位、挂牌、测量和鉴定,记录植株编号、名称、胸径、坐标和生长状况等。

2.2 蚬木种群增长数据资料的预处理

种群的增长是种群个体数量增加的过程,也是种群优势度(种群的胸高断面积)增加的过程(刘金福等, 2001)。由于在 15 hm² 样地调查时未记录胸径小于 1 cm 的蚬木个体,如果依据个体数量进行模型拟合,可能会产生较大偏差;通常,种群中胸径小

于 1 cm 个体的胸高断面积很小,因此,本研究采用种群胸高断面积来研究蚬木种群的增长过程,以保证拟合模型的可靠性。

蚬木是国家二级濒危保护植物,且木材极为坚硬,因此不能采用生长锥等具有破坏性的方法进行年龄测定。本研究采用原有 5 组解析木及试验观测资料(广西农学院林学院林学系等,1978;罗盛碧,1989),对蚬木胸径和年龄关系进行模型拟合,获得蚬木胸径与年龄关系的模型为: $A=1.53981D$,其中

A 为年龄, D 为胸径(单位 cm),模型的回归系数达极显著水平($P<0.001$),决定系数为 0.948,总相对误差为 10.2%。据拟合的模型和调查获得的胸径数据推算蚬木个体的年龄,在获得蚬木个体的年龄后,以 5 a 为间隔划分年龄级,统计各年龄级的胸高断面积之和。本研究假定年龄级最大的个体为种群发育的祖先,该年龄级的胸高断面积之和为种群增长的初始值,通过年龄级的倒推和各年龄级胸高断面积的累加,获得种群增长过程的研究数据(表 1)。

表 1 蚬木种群的数量增长
Table 1 Quantity of *Excentrodendron hsienmu* populations

年龄级 Age class(a)	个体数量 Number of individual	胸高断面积之和 Sum of basal area(m ²)	种群发育年龄 Growth age of population(a)	累计胸高断面积 Cumulative sum of basal area(m ²)
0~5	1110	0.28967	2.5	0.55550
6~10	282	0.46213	7.5	0.78494
11~15	128	0.65045	12.5	1.57610
16~20	89	0.89928	17.5	2.11627
21~25	67	1.08769	22.5	2.70450
26~30	45	1.12571	27.5	3.59489
31~35	41	1.42869	32.5	4.37059
35~40	24	1.09492	37.5	5.10435
41~45	12	0.71962	42.5	6.44093
46~50	18	1.33658	47.5	7.16056
51~55	8	0.73377	52.5	8.25548
56~60	7	0.77570	57.5	9.68417
61~65	7	0.89039	62.5	10.80987
66~70	4	0.58823	67.5	11.89757
71~75	3	0.54017	72.5	12.79685
76~80	4	0.79116	77.5	13.44730
81~85	1	0.22945	82.5	13.90943
86~130	1	0.55550	87.5	14.19909

2.3 密度制约下的种群增长模型及拟合

2.3.1 logistic 模型 logistic 模型最先由 Verhulst 于 1838 年提出,其微分表达式: $dN/dt=rN(1-N/K)$ (黄晋彪等,1990);它的解析解: $N=K/(1+e^{a-rt})$ (黄晋彪等,1990)。

式中, N 为种群大小, K 为环境容纳量, r 为内禀增长率, t 为种群发育年龄, a 为一般常数。模型的假设条件为种群所有个体的繁殖能力是一样的,为一常数,不受环境因子的影响;初始时具有稳定的年龄组配;增长率对于种群密度的反应是瞬时的,无时滞效应;环境容量 K 为常数;环境阻力是种群密度的线性函数(魏识广等,2008)。

2.3.2 种群增长的 S 形过程 当有利于生物生长的环境条件有限时,生物体增长量的 S 过程: $N=N_0K/(N_0+(K-N_0)e^{-Kt})$ (汪学鑫,1994)。

式中 N_0 为种群初始大小,其余参数意义及适用条件与 logistic 模型的一致。

2.3.3 崔-Lawson 模型 崔-Lawson 模型是由崔启武等于 1982 年提出的一种 logistic 改进模型,模型的积分形式: $N=(K-N)^b/e^{a-rt}$ (Cui & Lawson,1982)。

其中 a,b 为一般常数,其余参数的意义与 logistic 模型相同。模型的假设条件为密度制约效应曲线为上凸曲线,其余假设条件与 logistic 模型相同。

2.3.4 李新运种群增长模型 李新运等通过对种群增长的非线性制约机制的数学形态分析,提出了一种自适应种群增长模型:

$$N=[K/(1+K^s/N_0^s-1)e^{-srt}]^{1/s}$$
(李新运等,1997)。

式中 s 为密度制约参数,其余参数意义同 logistic 模型。模型假设条件为密度制约效应为任何曲线效应,其余假设条件与 logistic 模型相同。

2.3.5 刘金福种群增长改进模型 刘金福等(2001)提出了一个有限的空间种群增长的 Logistic 改进模型,该模型通过树种的竞争特性因子 θ 控制,将指数增长、线性制约、下凹增长和上凸增长非线性制约概

括为一个统一的自适应性的非线性制约通用模型。该模型的积分形式: $N=[K/(1+ae^{-bt})]^{1/\theta}$ 。

其中, $a=(K-N_0^{\theta})/N_0^{\theta}$, $b=r\theta$ 。在 $K^{1/\theta}/(1+\theta)^{1/\theta}$ 达到最大增长速度 $r\theta \cdot K^{1/\theta}/(1+\theta)^{(1/\theta+1)}$ 。

2.3.6 模型参数估计与评价方法 首先运用三点法估计出 logistic 模型 K 的初始值,然后将 logistic 模型进行线性转化,利用线性回归得到 K 、 r 、 a 估计值,根据估计值,运用单纯形迭代法,确定 logistic 模型的 3 个参数(马占山,1992)。其它模型以 logistic 模型参数值作为参考,预估各个参数值并代入各模型进行迭代运算,运算收敛时获得的参数值即为最终求解的参数值。以残差平方和、决定系数、赤池信息量准则(Akaike Information Criterion,AIC)来评价模型的拟合优度(Burnham *et al.*,2002)。以

上模型拟合运算均在 R 2.15.0 软件中完成。

3 结果与分析

3.1 模型的拟合结果

5 种模型拟合的参数见表 2,求解获得的各模型参数均具有统计学意义($P<0.001$)。将确定的模型参数分别代入模型中,最终获得蚬木种群的增长模型如下:Logistic 种群增长模型: $N=15.8817/(1+e^{2.9712-0.0596t})$;S 形生长过程模型: $N=15.8817/(1+19.5156e^{-0.0596t})$;崔-Lawson 模型: $N=(188.8712-N)^{0.5366}/e^{3.0187-0.0597t}$;李新运 Logistic 改进模型: $N=16.3900/(1+9.7631e^{-0.0522t})^{1.3255}$;刘金福改进模型: $N=[8.2471/(1+9.7631e^{-0.0522t})]^{1.3255}$ 。

表 2 模型拟合结果
Table 2 Results of model fitting

模型参数 Parameters of model	模型名称 Model				
	Logistic 模型	S 形模型	崔一模型	李一模型	刘一模型
K	15.8817	15.8817	188.8712	16.3900	8.2471
r	0.0597	0.0038	0.0597	0.0693	
s				0.7544	
a	2.9712		3.0187		9.7631
b			0.5366		0.0523
					0.7544
N_0		0.7741		0.7026	
残差平方和 Q	0.6947	0.6947	0.7158	0.6705	0.6705
R^2	0.9982	0.9982	0.9981	0.9983	0.9983
AIC	0.4972	0.4972	2.1170	1.8595	1.8595

从各拟合模型的残差平方和及决定系数看,崔-Lawson 模型的拟合效果稍差;Logistic 种群增长模型和 S 形生长过程模型残差平方和小于崔-Lawson 模型,而决定系数大于崔-Lawson 模型,因此这两个模型的拟合效果优于崔-Lawson 模型;李新运 Logistic 改进模型和刘金福改进模型的残差平方和最小,决定系数最高,因此拟合效果最好。但模型的选择不仅要考虑模型的拟合效果,同时也要考虑模型的简洁性,即模型参数的数量,根据基于 AIC 准则的评价结果来看,Logistic 种群增长模型和 S 形生长过程模型的参数较少,AIC 值较低,因此综合考虑模型的拟合效果和简洁性,Logistic 种群增长模型和 S 形生长过程模型是描述蚬木种群增长过程的最优模型。

5 个模型模拟的蚬木种群理论增长曲线和实际增长过程如图 1 所示。崔-Lawson 模型、Logistic模型和 S 形生长过程模型模拟的理论生长曲线相近,其中 Lo-

gistic 模型和 S 形生长过程模型模拟的曲线完全一致;李新运 Logistic 改进模型和刘金福改进模型模拟的生长曲线也一致,而这两个模型模拟的生长曲线在种群发育的后期与其它三个模型拟合的曲线存在差异。

3.2 蚬木种群增长过程的模型分析

用 logistic 模型对蚬木种群的增长过程进行深入分析,其种群增长速率随发育年龄的变化如图 2 所示。蚬木种群在前期增长速度较快,在 50 a 左右达最大值,随后种群增长速率开始下降,至 150 a 左右进入饱和状态,增长速率维持在非常低的水平。目前种群发育的年龄在 130 a 左右,已接近饱和状态。

4 讨论

种群增长过程的研究是种群科学管理、保护和利用的基础(Shea *et al.*,2010)。由于高大乔木的生

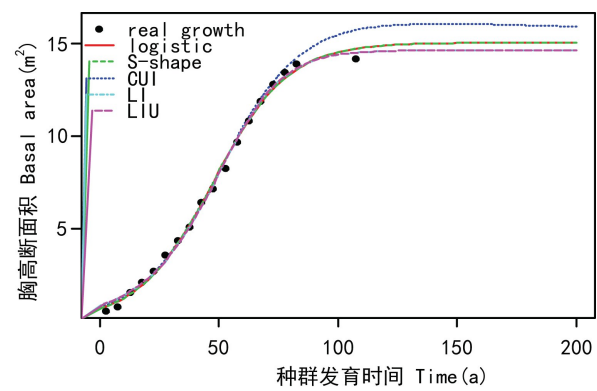


图 1 蚬木种群的实际增长过程和模型拟合的增长曲线

Fig. 1 Real growth and growth model fitting curves of *Excentrodendron hsienmu* populations

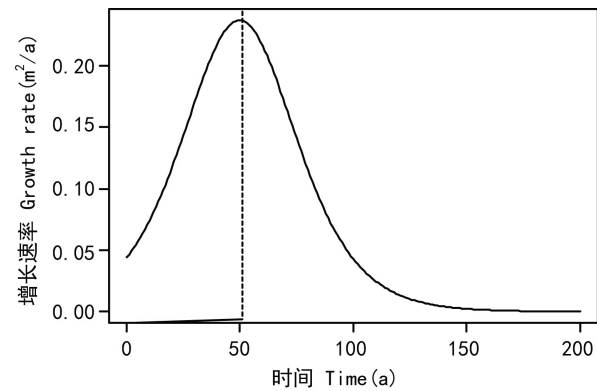


图 2 蚬木种群增长速率随种群发育年龄的变化

Fig. 2 Growth rates varying with age of *Excentrodendron hsienmu* populations

活史周期漫长,种群增长的实时数据通常不易获得,因此高大乔木种群增长动态的模型研究相对困难(Zuidema *et al.*, 2010)。一般而言,在资源有限的条件下,任何种群的增长都会受到密度制约作用的限制,其种群增长过程采用 logistic 模型及其改进模型进行拟合一般都会获得较好的拟合结果(Cui & Lawson, 1982)。一些高大乔木种群增长过程的模型拟合研究结果表明,高大乔木种群的增长过程可以被 logistic 模型及其改进模型较好地拟合(Lesser *et al.*, 2012; 刘金福等, 2001; 魏识广等, 2008; 余爱华等, 2004)。就本研究的结果而言, logistic 模型及其 4 个改进模型拟合的决定系数均在 0.99 以上,除了在蚬木种群初始增长阶段模型拟合曲线与实际生长数据偏差稍大外,其余增长阶段均可以被 5 个

模型较精确地拟合,验证了高大乔木种群增长过程可用 logistic 模型和改进模型来模拟的观点。

从蚬木种群增长过程模型拟合结果看,不同模型拟合效果存在差异。5 个模型中,崔-Lawson 模型的拟合效果较差,这和魏识广等(2008)和余爱华等(2004)的研究结果一致,原因可能是崔-Lawson 模型是针对微生物的生长过程提出的,而且只能描述密度制约效应为上凸曲线的种群增长过程,因此应用于高大乔木增长过程的模拟会出现偏差。logistic 模型和 S 形增长过程模型经过参数优化后,其拟合效果完全一致;李新运 logistic 改进模型和刘金福改进模型的拟合效果也完全一致,在实际应用中,两者中选择一个进行模拟即可。

理解蚬木种群的增长过程对种群的保育和退化喀斯特植被恢复具有重要意义。如果蚬木种群遭受严重干扰而退化,在前 50 a 加强封育管理十分必要,因为这一阶段是种群加速增长期,如果连续遭受干扰,种群将很难快速扩张。蚬木林是北热带岩溶地区最有代表性的植被类型,因此,蚬木种群的动态和稳定性直接影响到该区域季节性雨林生态系统稳定性以及生态系统服务功能的正常发挥(李先琨等, 2008)。根据特征种蚬木种群的增长特性,一旦北热带喀斯特季节性雨林遭受破坏而严重退化后,长期的封育管理是十分重要的,只有如此,才能使群落优势种能够快速增长,从而完成群落的构建过程。同时,由于喀斯特区的土壤层浅薄且覆盖度较低,能保存的土壤种子库有限,在严重退化的热带喀斯特植被生态系统中,适当增加种源可以减小种群增长的积累期,因此也是一项十分重要的管理措施。

致谢 所有参加野外调查的工作人员和学生志愿者。中国科学院植物研究所米湘成、赖江山、任海保等参加了 15 hm² 样地选址并给予调查监测技术指导;广西师范大学梁士楚教授对野外调查工作给予了大力支持;广西弄岗国家级自然保护区管理局给予大量帮助和支持,在此一并致谢。

参考文献:

广西农学院林学分院林学系等. 1978. 蚬木的生态与营林问题 [M]//中国科学院植物研究所生态室. 植物生态学研究报告集(第 1 集). 北京:科学出版社

傅立国,金鉴明. 1992. 中国植物红皮书(第一册)[M]. 北京:科学出版社

Burnham KP, Anderson DR. 2002. Model Selection and Inference: A Practical Information-theoretic Approach[M]. New York: Springer

- Condit R. 1995. Research in large, long-term tropical forest plots [J]. *Trends Ecol Evol*, **10**(1):18—22
- Cui QW, Lawson GJ. 1982. Study on models of single populations: an expansion of the logistic and exponential equations [J]. *J Theor Biol*, **98**(4):645—659
- Huang JB(黄晋彪), Zhang GH(张根海). 1990. Comparison of theory and case fitting between logistic and Cui-Lawson population increment models (Logistic, 崔-Lawson 种群增长模型理论及实例拟合比较) [J]. *Chin J Appl Ecol* (应用生态学报), **1**(4):301—305
- Lesser MR, Jackson ST. 2012. Making a stand: five centuries of population growth in colonizing populations of *Pinus ponderosa* [J]. *Ecology*, **93**(5):1 071—1 081
- Li XK(李先琨), Jiang ZC(蒋忠诚), Huang YQ(黄玉清), et al. 2008. Dynamics of dominant population and its influence on karstification in southwest Guangxi, China (桂西南岩溶山地优势植物种群动态及其对岩溶作用的影响) [J]. *Acta Geosci Sin* (地球学报), **29**(2):253—259
- Li XK(李先琨), Su ZM(苏宗明), Lü SH(吕仕洪), et al. 2003. The spatial pattern of natural vegetation in the karst regions of Guangxi and the ecological signal for ecosystem rehabilitation and reconstruction (广西岩溶植被自然分布规律及对岩溶生态恢复重建的意义) [J]. *J Mount Res* (山地学报), **21**(2):129—139
- Li XY(李新运), Zhao SL(赵善伦), You ZL(尤作亮), et al. 1997. A self-adaptive model of population growth and its parameter estimation (一种自适应的种群增长模型及参数估计) [J]. *Acta Ecol Sin* (生态学报), **17**(3):311—316
- Liu JF(刘金福), Hong W(洪伟). 2001. A modified logistic model of the growth pattern of dominance in a *Castanopsis kawakamii* Population (格氏栲种群优势度增长改进模型的研究) [J]. *Acta Phytocool* (植物生态学报), **25**(2):225—229
- Liu ZH, Dreybrodt W, Wang HJ. 2010. A new direction in effective accounting for the atmospheric CO₂ budget: Considering the combined action of carbonate dissolution, the global water cycle and photosynthetic uptake of DIC by aquatic organisms [J]. *Earth-Sci Rev*, **99**(3—4):162—172
- Luo SB(罗盛碧). 1989. An experimental study of a karst rare species *Excentrodendron hsienmu* (石山珍稀树种蚬木人工栽培试验研究) [J]. *Guangxi For Sci* (广西林业科技), **18**(4):9—13
- Ma ZS(马占山). 1992. Optimization of nonlinear ecological models with the accelerated simplex algorithm (单纯形加速法拟合生态学中的非线性模型) [J]. *J Biomath* (生物数学学报), **7**(2):160—167
- Matis JH, Kiffe TR. 2004. On stochastic logistic population growth models with immigration and multiplebirths [J]. *Theor Popul Biol*, **65**(1):89—104
- Sakanoue S. 2007. Extended logistic model for growth of single-species populations [J]. *Ecol Model*, **205**(1—2):159—168
- Shea K, Jongejans E, Skarpaas O, et al. 2010. Optimal management strategies to control local population growth or population spread may not be the same [J]. *Ecol Appl*, **20**(4):1 148—1 161
- Su ZM(苏宗明), Zhao TL(赵天林), Huang QC(黄庆昌). 1988. An investigation report of vegetation in Longgang Natural Reserve, Guangxi (弄岗自然保护区植被调查报告) [J]. *Guihaia* (广西植物), **SI**:185—214
- Tang Y, Mao LH, Gao H. 2005. Over-exploitation and lack of protection is leading to a decline of a protected calcicolous tree species *Excentrodendron hsienmu* (Tiliaceae) in China [J]. *Biol Conserv*, **126**(1):14—23
- Wang XX(汪学鑫). 1994. Differential models of ecology (生态微分模型) [J]. *J Zhejiang Agri Univ* (浙江农业大学学报), **20**(6):649—655
- Wei S(魏识广), Li L(李林), Liu H(刘海岗), et al. 2008. Analyses of the dynamic state of *Erythrophleum fordii* population (鼎湖山格木种群动态分析) [J]. *Ecol Environ* (生态环境), **17**(1):5
- Yu AH(余爱华), Song DQ(宋丁全), Liu JF(刘建锋). 2004. Case fitting of logistic model and its renewed models on *Betula luminifera* population by modified simplex method (用改单纯形法对光皮桦种群 Logistic 模型及改进模型的拟合) [J]. *Acta Agric Univ Jiangxi: Nat Sci Edit* (江西农业大学学报·自然科学版), **26**(1):59—62
- Zuidema PA, Jongejans E, Chien PD, et al. 2010. Integral Projection Models for trees: a new parameterization method and a validation of model output [J]. *J Ecol*, **98**(2):345—355

(上接第 367 页 Continue from page 367)

- Pinho-da-Silva L, Mendes-Maia PV, Garcia TM, et al. 2010. *Croton sonderianus* essential oil samples distinctly affect rat airway smooth muscle [J]. *Phytomedicine*, **17**(10):721—725
- Rakotonandrasana OL, Raharinjato FH, Rajaonarivelo M, et al. 2010. Cytotoxic 3,4-*seco*-atisane diterpenoids from *Croton barorum* and *Croton goudotii* [J]. *J Nat Prod*, **73**(10):1 730—1 733
- Robert S, Baccelli C, Devel P, et al. 2010. Effects of leaf extracts from *Croton zambesicus* Müell. Arg. on hemostasis [J]. *J Ethnopharmacol*, **128**(3):641—648
- Santos HS, Barros FWA, Albuquerque MRJ, et al. 2009. Cytotoxic diterpenoids from *Croton argyrophyllloides* [J]. *J Nat Prod*, **72**(10):1 884—1 887
- Zhao J, Fang F, Yu LZ, et al. 2012. Anti-nociceptive and anti-inflammatory effects of *Croton crassifolius* ethanol extract [J]. *J Ethnopharmacol*, **142**(2):367—373