

# 基于阶跃函数的红树林凋落物变化模型研究

刘素青<sup>1</sup>, 韩维栋<sup>1</sup>, 李际平<sup>2</sup>

(1. 广东海洋大学, 广东 湛江 524088; 2. 中南林学院 资环学院, 湖南 株洲 412006)

**摘要:** 由于凋落物随时间变化而存在峰值, 按一般的回归方法或分段拟合方法均不能建立理想的凋落物随时间变化的模型。利用阶跃函数, 解决了分段模型一直无法解决的两个问题: 一是变点的数学确定方法, 另一个是变点的连续性问题。建立了基于符号函数的阶跃函数模型, 并以此为基础, 提出了具有峰值的凋落物耦合模型。为了检验凋落物模型的效果, 以雷州半岛红树林为例, 结果表明, 决定系数 0.8 以上, 回归模型达到显著性水平。

**关键词:** 雷州半岛; 红树林; 凋落物; 模型; 阶跃函数

中图分类号: O242.1 文献标识码: A 文章编号: 1000-3096(2007)02-0035-05

红树林的生长环境比较特殊, 生长于南北回归线之间的河海交界处。红树林植物因为生长在河海交界处, 受到海水涨潮落潮的影响, 因此红树林植物大多数具有强健发达的支柱根及呼吸根, 并利用细胞内独特的构造, 储存多余的盐分或其它物质, 有利于吸附有害物质和海水净化。红树具有独特景观, 在大海上形成一道独特的风景线, 是有待开发的旅游资源。在生态方面, 红树林除了防风固岸、净化海水保护环境、为鱼虾蟹贝提供栖息场地外, 它的枯枝落叶在物质与能量循环中具有不可替代的作用, 因为在红树林中, 具有大量的动物种类, 其中海洋动物有鱼、虾、蟹、贝类等, 另外有鸟、蛇、鼠及昆虫等, 它们除以红树林作为栖息地外, 还以红树的各种器官为食, 枯枝落叶为其提供丰富的饲料<sup>[1]</sup>。

凋落物是森林系统中的重要组成部分, 早在 1876 年德国学者 Ebmayer<sup>[2]</sup> 在其经典著作“森林凋落物产量及其化学组成”便阐述了森林凋落物在森林系统中的重要性, 从此在世界范围内开展了对凋落物的研究。在中国 20 世纪 90 年代开始对红树林凋落物进行<sup>[3]</sup>, 随后有众多学者对红树林凋落物进行动态研究<sup>[4-7]</sup>。在这些研究中, 尽管均对落物的动态变化进行了研究, 但未见有凋落物随季节(时间)变化模型的提出。作者利用阶跃函数, 提出红树林凋落物模型。

## 1 试验地及其基本情况

雷州半岛位于中国大陆的最南端, 东经 109°30′ ~

110°55′, 北纬 20°12′ ~ 21°35′。东连中国南海, 西枕北部湾, 南临琼州海峡与海南相望。陆地面积 12 470 km<sup>2</sup>, 由玄武岩母质和冲积母质发育而成的红壤土, 地势平坦的丘陵地区, 海拔约 50 m。半岛属北热带海洋气候, 年平均温度 22.3 ℃, 最冷气温出现在 1 月份, 最高温度出现在 7 月份。年均日照时数约 2 000 h。全年无冬季。本研究中季节划分为: 2~4 月为春季, 5~7 为夏季, 8~10 月为秋季, 11~1 月为冬季。年降雨量 1 100~1 800 mm, 但分配不匀, 主要集中在 5~9 月间, 春、秋、冬季常出现干旱。

雷州半岛有红树林面积 7 306 hm<sup>2</sup>, 建群树种有当地的乡土树种和外来引进树种两大类。乡土红树林树种有秋茄、木榄、红海榄、白骨壤等十多种(表 1); 外来引进种是无瓣海桑(*Sonneratia apetala*), 它是于 1985 年从孟加拉国首先引到海南东寨港, 然后再引种到湛江, 是红树林中的速生乔木树种。

## 2 研究方法

### 2.1 凋落物调查

凋落物采用收集网法收集, 首先在两个样区内

收稿日期: 2005-08-02; 修回日期: 2005-12-10

基金项目: 湛江市科技局招标课题项目; 联合国环境署中国湛江红树保护项目

作者简介: 刘素青(1963), 男, 江西寻乌人, 副教授, 从事森林生态系统研究, liusuqing2001@yahoo.com.cn

分别随机设置 6 个固定样地,用尼龙收集网收集凋落物,收集网网口面积为 1 m × 1 m,深度为 30 cm,孔径为 1 mm × 2 mm,悬挂高度为 2 m。连续 5 年间,每 7 ~ 10 d 收集一次,取回后 80 °C 烘干,按月集中凋落物分叶、枝、花、果等类称质量保存,然后各组分中抽样于 105 °C 烘干至恒质量,计算出单位面积凋落物各组分干质量生物量。

生物量见图 1、2。样地 1、样地 2 两地的变化趋势是一致的,具有相同的变化规律,凋落物按季节分布:夏季 > 秋季 > 春季 > 冬季,结果与张乔民、郑逢中等<sup>[4,6]</sup>结果相同。两地叶、枯、花、果全年总量分别是:878.70,226.00,30.55,362.18 g/m<sup>2</sup>和 1 076.83,301.82,36.77,479.22 g/m<sup>2</sup>。分别占全年总生物量的 58.68%,15.09%,2.04%,24.19% 和 56.84%,15.93,1.94%,25.29%。

表 1 红树林乡土树种

Tab 1 The mangrove species in the Leizhou Peninsula

科名	种名	生活型
Acrostichaceae	卤蕨( <i>Acrostichum aureum</i> )	亚灌木
	尖叶卤蕨( <i>Acrostichum speciosum</i> )	亚灌木
Rhizophoraceae	木榄( <i>Bruguiera gymnorhiza</i> )	乔木
	角果木( <i>Ceriops tagal</i> )	灌木
	秋茄( <i>Kandelia candel</i> )	小乔木
Acanthaceae	红海榄( <i>Rhizophora stylosa</i> )	小乔木
	小花老鼠簕( <i>Acanthus ebracteatus</i> )	灌木
Combrataceae	老鼠簕( <i>Acanthus ilicifolius</i> )	灌木
	红榄李( <i>Lumnitzera littorea</i> )	灌木
Euphorbiaceae	海漆( <i>Excoecaria agallocha</i> )	小乔木
Myrsinaceae	桐花树( <i>Aegiceras corniculatum</i> )	小乔木
Sterculiaceae	银叶树( <i>Hemitelia littoralis</i> )	小乔木
Verbenaceae	白骨壤( <i>Avicennia marina</i> )	小乔木

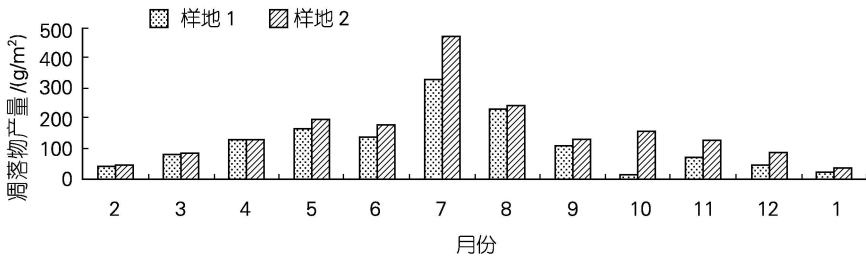


图 1 凋落物的月分布

Fig. 1 The distribution of monthly litter-fall

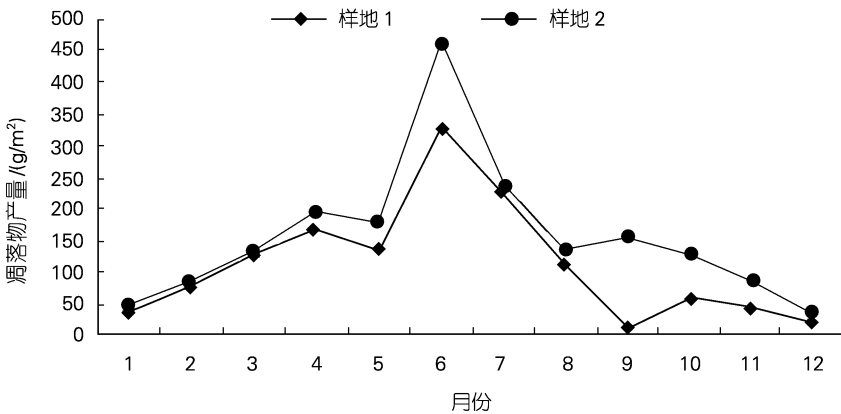


图 2 凋落物变化曲线

Fig. 2 The curve of litter fall variation

凋落物的年度变化中,有一个峰值和 2 个或多个峰值的情况<sup>[6]</sup>。从图 1、图 2 中可以看出,本研究明显具有 1 个峰值。凋落物量在 7 月份前随时间的增加而增加,7 月份后随时间的增加而减少,7 月份是凋

落物的最高峰。

## 2.2 凋落物模型选择与建立

从图 1 和图 2 中可以看出,凋谢落物随着时间(月份)的变化而变化,从春天开始,凋落随月份以逐

月增加趋势至夏季(7月),然后又以逐月减少的趋势至冬季(1月),从图1和图2中得出,最高峰是模型的转折点,在此点之前曲线的变化是一种模型,在此点之后曲线的变化为另一种模型。绝大部分研究者对此种情况下采分段拟合的方法<sup>[7-11]</sup>。在使用分段拟合方法时存在下面几个重要的且无法解决的问题,而这些问题在理论上和实际中又是至关重要的<sup>[12]</sup>:

(1) 分段拟合时由一个模型向另一种模型转变时的变点(transform point),依据原始资料变化趋势

人为确定。其实作者研究的对象很多是连续型的,原始数据调查时进行了离散化,所以曲线的变点与原始数据的变点一般情况下不是统一的,所以人为因素确定的曲线变点有很大的随机性。

(2) 用分段拟合建立的模型在整个研究空间上多数是不连续的,即在变点上不连续。而实际上曲线是连续的,不存在断点(broken point)。

为了解决上述两个问题,本研究引进阶跃函数

(Unit Step Function):

$$H_{t-t_0} = \begin{cases} 0 & t \leq t_0 \\ 1 & t > t_0 \end{cases} \quad (1)$$

表2 雷州半岛无瓣海桑群落年凋落物总量(g/m<sup>2</sup>)

Tab. 2 Litter fall in the *S. apetalata* communities on the Leizhou Peninsula(g/m<sup>2</sup>)

月份	样地 1						样地 2					
	叶	枝	花	果	月总量	占年总量比例(%)	叶	枝	花	果	月总量	占年总量比例(%)
2	28.40	9.87	0.80	1.18	40.25	2.68	40.38	4.85	0.03	0.22	45.48	2.40
3	74.33	3.92	0.30	0.40	78.95	5.27	77.90	9.15	0.12	0.23	87.40	4.61
4	120.42	8.25	0.22	3.98	132.87	8.86	118.88	11.02	0.37	3.45	133.75	7.06
5	135.28	20.52	10.82	0.00	166.62	11.12	158.77	29.22	8.48	0.00	196.47	10.37
6	109.83	10.22	4.57	12.13	136.75	9.12	142.22	12.67	5.85	19.20	179.93	9.50
7	137.42	49.02	5.50	135.65	327.58	21.85	169.62	82.07	9.85	207.52	469.05	24.76
8	65.68	66.65	3.50	92.12	227.95	15.20	83.02	63.83	6.50	90.62	243.97	12.87
9	61.17	17.85	1.92	30.65	111.75	7.59	65.65	19.10	3.73	43.12	131.60	6.94
10	69.17	21.90	2.10	50.35	143.52	9.57	88.63	21.28	1.50	43.75	155.17	8.19
11	32.73	10.77	0.80	18.85	63.15	4.21	58.98	14.77	0.30	53.10	127.15	6.71
12	26.23	4.30	0.00	15.40	45.93	3.06	42.95	28.75	0.00	16.90	88.60	4.88
1	17.87	2.75	0.03	1.47	22.12	1.47	29.83	5.12	0.03	1.12	36.10	1.91
年总量	878.70	226.00	30.55	362.18	1497.43	100.00	1076.83	301.82	36.77	479.22	1894.63	100.00
占年总量比例(%)	58.68	15.09	2.04	24.19	100.00	—	56.84	15.93	1.94	25.29	100.00	—

其中,  $t$  为时间变量,  $t_0$  为模型变化点。在本研究中  $t_0$  为凋落物的变点, 即时间  $t$  在  $t_0$  之前的模型(假设曲线为抛物线)为:

$$y = a_1 t^2 + b_1 t + c_1 \quad t \leq t_0 \quad (2)$$

时间  $t$  在  $t_0$  之后为:

$$y = a_2 t^2 + b_2 t + c_2 \quad t > t_0 \quad (3)$$

其中  $a_1, b_1, c_1, a_2, b_2, c_2$  分别为模型曲线参数。

在整个研究时间段内把(1)、(2)、(3)合并, 组成基于阶跃函数的耦合凋落物模型:

$$y = [a_1 + (a_2 - a_1)] H_{(t-t_0)} t^2 +$$

$$[b_1 + (b_2 - b_1)] H_{(t-t_0)} t + [c_1 + (c_2 - c_1)] H_{(t-t_0)} \quad (4)$$

模型(4)一般均是非线性模型, 这类模型参数求解采用高斯法给出的最小二乘法, 这种方法主要在给定的参数向量  $u^T = (a_1, a_2, b_1, b_2, t_0)$  附近对  $y_i$  做 Taylor 展开, 并取其线性近似得:

$$y_i - y(t_j, u_k) \approx J_{(t_j, u_k)} (u - u_k) + \epsilon_j$$

$$j = 1, 2, 3, \dots, n \quad (5)$$

关于  $u - u_k$  的线性模型。可以求得  $u$  的线性最小二乘估计  $\hat{u}_{k+1}$ , 其中  $J_{(t_j, u_k)}$  是  $N(t, u)$  关于  $u$  的 Jacobi 矩阵在  $t_j$  上的值。

由于(5)式是一种导数不连续函数,因此使用  $p + 1$  个参数点  $u_k (k = 1, 2, \dots, p + 1)$  上的函数值  $N(t, u_k)$  的割平面来近似由  $N(t, u)$  所张成的  $p$  维流形的分法,给出参数  $u$  的最小二乘估计。

$$y^T - y_{(t_j, u_{k+1})} \approx (\Delta y_i)^T (\Delta \Theta)^{-1} (u - u_{p+1}) + \epsilon_j$$

$$j = 1, 2, 3, \dots, n \quad (6)$$

$p$  维矩阵  $\Delta \Theta$  称为参数差分矩阵,其中第  $i$  列由参数向量的差分  $u_i - u_{p+1} (i = 1, 2, \dots, p)$  给出。 $\Delta y_i$  为函数差分向量,其第  $i$  个元素为  $N(t_j, u_j) - N(t_j, u_{p+1})$ 。记

$$A = (\Delta \Theta)^{-1} (u - u_{p+1})$$

并把它当作待估参数。则(6)是关于  $A$  的线性模型。由此可得到  $A$  的最小二乘估计  $\hat{A}$ , 则  $y_{p+2} = u_{p+1} + \Delta \Theta \hat{A}$  为(6)的最小二乘估计。以  $u_{p+2}$  代替  $u_{p+1}$ ,  $u_{p+1}$  代替  $u_p$ , ...,  $u_2$  代替  $u_1$ , 如此重复,得到一个系列  $\{u_{ij}\}$ , 当它收敛于  $\hat{u}$ , 则  $\hat{u}$  为模型(5)的最小二乘估计。为了便于计算机编程求解,把阶跃函数(1)表示为:

$$H(t - t_0) = \frac{[1 + \text{sign}(t - t_0)] \times \text{sign}(t - t_0)}{2} \quad (7)$$

其中  $\text{sign}(x)$  是符号函,当  $x > 0$  时,  $\text{sign}(x) = 1$ , 当  $x = 0$  时,  $\text{sign}(x) = 0$ , 当  $x < 0$  时,  $\text{sign}(x) = -1$ 。所以基于阶跃函数的凋落物耦合模型(4)可表示为:

$$y = [a_1 + (a_2 - a_1)] \frac{[1 + \text{sign}(t - t_0)] \text{sign}(t - t_0)}{2} t^2 + [b_1 + (b_2 - b_1)] \frac{[1 + \text{sign}(t - t_0)] \text{sign}(t - t_0)}{2} t + [c_1 + (c_2 - c_1)] \frac{[1 + \text{sign}(t - t_0)] \text{sign}(t - t_0)}{2} \quad (8)$$

### 3 结果与讨论

利用(8)式,采用 Levenberg Marquart 算法,用 MATlab 语言<sup>[13]</sup>,在计算机上求解参数  $a_1, a_2, b, b_2, t_0$  及模型决定系数  $R^2$ 。其结果见表 3 及图 3。

表 3 模型参数

Tab. 3 The parameters for the models

地点	$a_1$	$a_2$	$b_1$	$b_2$	$c_1$	$c_2$	$t_0$	$R^2$	$Q$	$F$
样地 1	7.596	4.738	- 6.206	- 127.400	53.680	870.900	6	0.856 8	12 040	< 0.01
样地 2	15.500	9.611	- 35.000	- 230.000	63.100	1 432.000	5.85	0.810 4	27 630	< 0.01

注:  $a_1, a_2, b_1, b_2, c_1, c_2, t_0$  为模型参数;  $R^2$  为决策系数;  $Q$  为模型剩余方差;  $F$  为模型  $F$  检验临界值

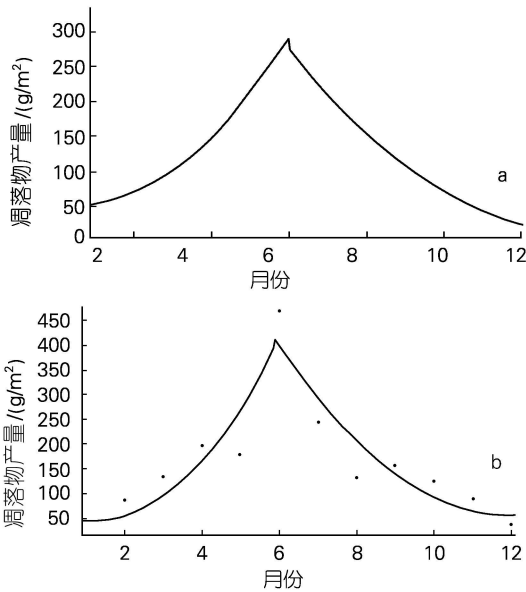


图 3 模型拟合曲线

Fig. 3 The fit curva

a. 样地 1; b. 样地 2  
a. plot 1; b. plot 2

从表 3 模型拟合情况可以看出,决定系数均在 0.8 以上(相关系数 0.9 以上),回归模型检验达到显著性水平。从图 3 也可看出,模型的研究域内是连续的,不存在断点,这种模型不论从理论上来说是可行的,解决了分段模型不连续的问题,而且实践上也是可行的,模型达到显著性水平。

根据以往研究资料<sup>[6]</sup>,福建九龙江口、香港米埔虾仁塘、深圳福田、广西英罗湾、海南东寨港、海南三亚的凋落物产量范围在 631.3~ 1 388.24 g/(m<sup>2</sup>·a)。而本研究的年凋落物总量高达 1 497.43~ 1 894.63 g/(m<sup>2</sup>·a),成为年凋落物量的最大值。这可能与湛江在 7,8 月份间遭受台风袭击有关。

#### 参考文献:

- [1] 刘素青,曾群英. 红树林在海洋经济中的地位和作用 [J], 河北林果研究, 1999, 14(1): 13-16.
- [2] Ebermayer E. Die Qesarnte Lehre der Woldstreu mit Rucksicht auf die Chemische Static woldbaues [M]. Berlin: Julius Springer, 1876.
- [3] 林鹏, 卢昌义. 海南岛河港海莲红树林凋落物动态的研究 [J]. 植物生态学与地植物学学报, 1990, 14(1): 69-74.
- [4] 郑逢中, 林鹏. 福建九龙江口秋茄红树林凋落物季节

- 动态及落叶能量季节流[J]. 厦门大学学报(自然科学版), 2000, 39(5): 693-698.
- [5] 郑逢中, 林鹏. 福建九龙江口秋茄红树林凋落物年际动态及其能流量的研究[J]. 生态学报, 1998, 18(2): 113-118.
- [6] 张乔民, 陈永福. 海南三亚河红树林凋落物产量与季节变化研究[J]. 生态学报, 2003, 23(10): 1977-1983.
- [7] 王长安. 我国科技期刊逻辑增长模型的研究[J]. 国外情报科学, 2004, 22(5): 554-557.
- [8] 王琛, 刘浩吾. 三峡泄滩滑坡滑动带土的改进 Mesi 蠕变模型[J]. 西南交通大学学报, 2004, 39(1): 15-19.
- [9] 王凤利, 马孝江. 分段拟合中消除段外模态影响的方法[J]. 大连理工大学学报, 2002, 42(6): 692-696.
- [10] 王晏民, 李德仁. 多函数分段拟合的曲线数据压缩[J]. 哈尔滨工业大学学报, 2002, 34(4): 513-517.
- [11] 肖文龙, 徐金亚. 帆边方程的拟合与风压中心的计算[J]. 生物数学, 1997, 1(4): 55-59.
- [12] 陈希孺. 变点统计分析简介(II)[J]. 数理统计与管理, 1991, 2: 52-59.
- [13] 飞思科技产品研发中心. MATLAB6.5 辅助优化计算与设计[M]. 北京: 电子工业出版社, 2003.

## Study on the model for litter fall varying in mangrove forest based on a unit step function

LIU Su-qing<sup>1</sup>, HAN Wei-dong<sup>1</sup>, LI Ji-ping<sup>2</sup>

(1. Agronomy College of Guangdong Ocean University, Zhanjiang 524088, China; 2. The School of Resource and Environment of CSFU, Zhuzhou 412006, China)

**Received:** Aug., 2, 2005

**Key words:** Leizhou Peninsula; mangrove forest; litter fall; model; unit step

**Abstract:** The quantity of detritus changes monthly and there is a peak value in its changing curve. A model for litter fall varying in mangrove forest can not be established by usual regression methods or fragmented fitting. The two questions to establish the model in common ways, one is about how to determine the transform point, the other how to make the curve continuous at the point, have been solved by a unit step function. The model of the unit step function based on a sign function was developed, and according to the model, the other litter fall ingrated model with the peak value was created. The model for mangroves detritus was tested in the Leizhou Peninsula, and the conclusion shows that the determinative coefficient is more than 0.8 and the model reached a marked level.

(本文编辑: 张培新)