

武夷山杉木林凋落物动态初探

吴承祯 洪伟*

(福建农林大学林学院, 福建 南平 353001)

摘要: 用起伏型时间序列法对武夷山国家级自然保护区杉木林凋落物月动态进行模拟, 结果令人满意, 说明起伏型时间序列分析方法可应用于森林凋落物动态模拟。

关键词: 杉木林; 凋落物; 起伏型时间序列法; 武夷山自然保护区

中图分类号: Q948.1 **文献标识码:** A **文章编号:** 1005-3395(2002)03-0201-06

Dynamics of Litter Fall in *Cunninghamia lanceolata* Forest Using Wave-type Time Series Analysis

WU Cheng-zhen HONG Wei*

(College of Forestry, Fujian Agriculture and Forestry University, Nanping 353001, China)

Abstract: According to the data collected for litter fall from *Cunninghamia lanceolata*-broadleaved mixed forest and *C. lanceolata* forest in Wuyishan National Nature Reserve in Fujian, a model of wave-type time series for analyzing the dynamics of litter fall was used to simulate the monthly change in litter fall in the two forests. Result showed that the model could satisfy the actual data. It is suggested that this method can be applied to the study of litter fall dynamics.

Key words: *Cunninghamia lanceolata* forest; Litter fall; Wave-type time series method; Wuyishan National Nature Reserve

森林凋落物是森林植被在其生长发育过程中新陈代谢的产物,是森林生态系统中养分循环的重要组成部分之一。森林凋落物是森林营养的仓库,它在维持土壤肥力方面起着重要的作用。因此,森林凋落物及其动态一直是森林生态学、生物地球化学和森林土壤学等学科的重要研究内容。但长期以来,广大生态学家在森林凋落物动态研究中,常采用定性的方法描述森林凋落物动态或通过凋落物与气候因子建立回归模型,缺乏有效的定量方法模拟森林凋落物动态^[1]。时间序列分析法是自相关分析方法,适用于长、短期预测与预报。时间序列方法有很多种,起伏型时间序列是一种新的时间序列方法,它是一种用差分使序列变为符合傅里叶级数型(一组正弦和余弦曲线的组合)变化的方法。起伏型时间序列方法在森林凋落物动态模拟与预测预报领域中的应用未见报道。

杉木是我国南方重要的造林树种,随着杉木造林面积的扩大,杉木人工林地力衰退

收稿日期: 2001-07-30 接受日期: 2001-11-27

基金项目: 福建省自然科学基金资助(B0110026)项目; 福建省科技厅重大资助项目(2000F007)。

* 通讯联系人 Corresponding author

问题愈来愈引起人们的关注^[2-5]。许多研究表明,杉木混交林比纯林能更好地维持和提高林地地力,这种有益作用是通过伴生树种的凋落物和枯死细根分解后养分归还来实现的。因此,研究天然杉木针阔混交林及杉木单优群落的凋落物动态、凋落物养分含量及分解速率等,对于掌握其凋落物动态及选择相应的有效分解措施、选择杉木混交林理想的伴生树种具有重要的理论与生态学意义。本文应用起伏型时间序列方法对武夷山国家级自然保护区杉木(*Cunninghamia lanceolata* (Lamb.) Hook.)林(天然杉木针阔混交林和杉木单优群落)凋落物动态进行模拟,以丰富和发展森林凋落物动态模拟的方法和原理。

1 研究区概况

福建武夷山国家级自然保护区位于福建省武夷山、建阳、光泽、邵武四县(市)交界处,北部与江西省毗连,北纬 27°33′-27°54′,东经 117°27′-117°51′。全境南北长达 52 km,东西相距 22 km,总面积 56 527 hm²。本区属中亚热带季风气候,平均气温 16-18℃,年降雨量 1 486-2 153 mm,年蒸发量 1 000 mm,相对湿度 78%-84%;土壤为燕山早期粗晶花岗岩发育的山地红壤、黄红壤,质地疏松,土层较厚。

该保护区是世界同纬度现存面积最大、保存最完整的中亚热带森林生态系统,于 1979 年 7 月被国务院列为国家重点自然保护区,在《中国生物多样性行动计划》中,被确定为最优先保护的生物多样性热点区之一。保护区内自然资源丰富,生态系统完整,保存了完好的地带性常绿阔叶林群落。按《中国植被》的划分,区内森林植被类型主要有常绿阔叶林、针阔叶混交林、常绿落叶阔叶混交林、针叶林、中山矮曲林、中山山顶草甸、竹林等 11 个植被类型,共有 56 个群系,170 个群丛组。武夷山自然保护区是中国东南亚大陆生物多样性最丰富的地区,被中外生物学家誉为“绿色翡翠”、“昆虫世界”、“世界生物模式标本产地”,是具有全球生物多样性保护意义的区域。1987 年 9 月,被联合国教科文组织“人与生物圈”接纳为国际生物圈保留地网。

2 资料的收集

陈金耀^[6]于 1991 年在此保护区天然杉木针阔混交林中选择具代表性的林分地段设置样地(共设置 6 块),样地面积为 20 m×20 m,样地分布于李家坡一带,平均海拔 680 m。在样地内按机械布点的方法设置 10 个 0.5 m² 凋落物收集网,并在条件相同的杉木单优群落设置 10 个凋落物收集网,收集其凋落物并与天然杉木针阔混交林对比。每月定时取回凋落物,分别按总量和各主要伴生树种的落叶量在 105℃下烘干、称量,并据此推算样地总凋落物干重。收集得到两种群落类型杉木林凋落物动态资料(表 1)^[6],本文以表 1 资料为例应用起伏型时间序列分析方法探讨武夷山杉木林凋落物动态模拟机理,以丰富森林凋落物动态研究方法,并为杉木林凋落物养分含量及分解速率研究奠定基础。

3 起伏型时间序列法

设 $X = \{x_0, x_1, x_2, \dots, x_t, \dots, x_N\}$, $t=0, 1, \dots, N$, 为起伏型时间序列。对 x_t 作差分处理:

表 1 杉木林群落凋落物干重的变化 (kg DW hm⁻²) (1991)
Table 1 Monthly change in litter fall (kg DW hm⁻²) from two forests in 1991

序号 No. (t)	月 Month	杉木针阔混交林 <i>Cunninghamia lanceolata</i> -broadleaved mixed forest							杉木单优群落 <i>Cunninghamia lanceolata</i> forest
		总凋落量 Litter fall	落叶量 Leaf fall from						
			木荷 ¹⁾	米槠 ²⁾	苦槠 ³⁾	甜槠 ⁴⁾	丝栗栲 ⁵⁾	毛竹 ⁶⁾	
0	1	290.3	14.5	5.0	8.0	18.3	12.6	14.4	129.5
1	2	341.9	17.5	15.3	8.7	25.5	14.5	11.2	250.4
2	3	409.3	22.7	18.8	15.1	38.0	19.9	7.8	284.9
3	4	536.2	46.7	59.3	33.3	93.0	36.7	7.4	401.2
4	5	521.1	27.5	58.8	14.2	26.8	101.6	14.2	147.4
5	6	431.9	16.2	12.2	8.0	25.4	88.1	9.6	131.3
6	7	500.7	21.6	15.0	13.3	39.9	34.1	8.4	138.5
7	8	310.3	18.1	9.9	11.4	24.7	19.7	7.0	121.6
8	9	274.1	21.4	10.4	10.6	36.0	19.7	7.4	96.2
9	10	395.3	28.2	6.2	12.2	45.0	17.7	15.6	163.7
10	11	715.5	49.8	13.7	28.9	84.9	31.4	33.8	558.5
11	12	308.1	16.3	5.2	8.0	21.5	12.9	25.0	195.1
总和 Total		5034.7	300.5	229.8	171.7	479.0	408.9	161.8	2618.3

1) *Schima superba*; 2) *Castanopsis carlesii*; 3) *C. sclerophylla*; 4) *C. eyrei*; 5) *C. fargesii*; 6) *Phyllostachys pubescens*.

$\Delta_b x_i = x_i - x_{i-1}$ 是一阶向后差分; $\Delta_f x_i = x_{i+1} - x_i$ 是一阶向前差分。序列 x_i 在一阶差分处理后遵从微分方程:

$$\frac{dx}{dt} = \sum_{i=0}^K (a_i \cos w_i t + b_i \sin w_i t) = a_0 + \sum_{i=1}^K (a_i \cos w_i t + b_i \sin w_i t) \quad (1)$$

式中: $w_i = \frac{2\pi i}{N+1}$, $t=0, 1, \dots, N$, $K=N/2$ 。

分别用向后差分 $\Delta_b x_i$ 和向前差分 $\Delta_f x_i$ 代替(1)式中的微分 dx , 且序列是等时距采样的, 则 $\Delta t = (t-1) - t = 1$ 代替 dt 。这样(1)式可写成:

$$\Delta_b x_i = a_0 + \sum_{i=1}^K (a_i \cos w_i t + b_i \sin w_i t) \quad (2)$$

$$\Delta_f x_i = a_0 + \sum_{i=1}^K (a_i \cos w_i t + b_i \sin w_i t) \quad (t=1, 2, \dots, N-1) \quad (3)$$

若视上面两式为用右边傅立叶级数对左边增量的预报, 并采用双向差分建模原则, 使向前差分预报误差和向后差分误差的平方和达到最小, 即运用最小二乘法原理求出估计值 $\hat{a}_0, \hat{a}_i, \hat{b}_i$ 。可得线性方程组的矩阵表达式为:

$$S\beta = Z \quad (4)$$

式中: S, Z 阵是与一阶向前差分、一阶向后差分及傅立叶级数有关的两个矩阵, 其计算方法详见文献[7]。解方程组(4)得

$$\hat{\beta} = S^{-1}Z \quad (5)$$

将微分方程(1)式积分求解:

$$\int dx = \int [a_0 + \sum_{i=1}^K (a_i \cos w_i t + b_i \sin w_i t)] dt$$

$$x_i = a_0 t + \sum_{i=1}^K \frac{a_i}{w_i} \sin w_i t + \sum_{i=1}^K \frac{b_i}{w_i} (1 - \cos w_i t) + C$$

将初始条件: $t=0$ 时 $x_i=x_0$ 代入上式, 则积分常数 $C=x_0 + \sum_{i=1}^K \frac{b_i}{w_i}$ 。

所以微分方程(1)的解为:

$$x_i = x_0 + a_0 t + \sum_{i=1}^K \frac{a_i}{w_i} \sin w_i t + \sum_{i=1}^K \frac{b_i}{w_i} (1 - \cos w_i t) \quad t=0, 1, 2, \dots, N \quad (6)$$

将方程组(4)的解(5)式 $\hat{\beta}(\hat{a}_0, \hat{a}_i, \hat{b}_i)$ 一一代入(6)式, 则可对原序列进行拟合与预测, 具体步骤请参阅文献[7,8]。

4 结果和分析

4.1 杉木林凋落物动态

用起伏型时间序列分析方法分别模拟杉木单优群落和天然杉木针阔混交林凋落物的逐月动态, 其时间序列为 1-12 月(表 1)。我们用 1-12 月的杉木单优群落凋落物总量作为建模资料, $N=11$, 时间序列长度 $N'=N+1=12$, 取 $K=N'/2=6$, $w_i = \frac{2\pi}{N'+1} i = \frac{2\pi}{13}, \frac{4\pi}{13}, \dots, \frac{12\pi}{13}$, $i=1, 2, \dots, K$ 。这里需要注意若取 $w_i = \frac{2\pi}{N'} \cdot K = \frac{2\pi}{N'} \cdot \frac{N'}{2} = \pi$, $\sin w_i = \sin \pi = 0$, 这将使矩阵 S 出现 0 行、0 列, 所以为使矩阵 S 不致出现不满秩, 在时间序列长度 N' 为偶数时可取 $K=N'/2$, $w_i = \frac{2\pi}{N'+1} i$; 而在时间序列长度 N' 为奇数时可取 $K=N/2$, $w_i = \frac{2\pi}{N'} i$ 。

根据起伏型时间序列计算方法计算矩阵 Z 、 S 中的元素, 然后通过(3)式计算得到各参数值(表 2), 杉木单优群落和天然杉木针阔混交林起伏型时间序列模型的拟合剩余离差平方和分别为 20265.34 和 23626.01, 回归指数分别为 0.9503 和 0.9349。得到杉木单优群落凋落物动态预测方程:

$$\hat{x}_i = 129.5 - 26.36089 + \sum_{i=1}^6 \frac{\hat{a}_i}{w_i} \sin w_i t + \sum_{i=1}^6 \frac{\hat{b}_i}{w_i} (1 - \cos w_i t)$$

$$\hat{x}_i = 290.3 - 37.30576 + \sum_{i=1}^6 \frac{\hat{a}_i}{w_i} \sin w_i t + \sum_{i=1}^6 \frac{\hat{b}_i}{w_i} (1 - \cos w_i t)$$

用 $t=0, 1, \dots, 11$ 代入上二式可得 1-12 月的拟合值 \hat{x}_i , 模拟效果较理想。将原序列 x_i 和拟合值 \hat{x}_i 作图比较(图 1), 两条曲线吻合较好。

4.2 杉木林凋落物起伏型时间序列模型与其它统计模型比较

根据收集得到的武夷山自然保护区区内气候观测点的各月平均气温、平均降水量与

表 2 起伏型时间序列预测模型参数值

Table 2 Parameter values of wave-type time series model

参数 Parameters	杉木单优群落 <i>Cunninghamia lanceolata</i> forest		杉木针阔混交林群落 <i>Cunninghamia lanceolata</i> -broadleaved mixed forest	
	参数 Parameters	杉木单优群落 <i>Cunninghamia lanceolata</i> forest	参数 Parameters	杉木针阔混交林群落 <i>Cunninghamia lanceolata</i> -broadleaved mixed forest
\hat{a}_0	-26.36089	37.30576	\hat{b}_1	8.180761
\hat{a}_1	-46.77954	84.13641	\hat{b}_2	131.3417
\hat{a}_2	5.260306	27.89391	\hat{b}_3	157.0294
\hat{a}_3	113.5928	101.6865	\hat{b}_4	-113.2532
\hat{a}_4	43.36414	-46.97451	\hat{b}_5	-42.81392
\hat{a}_5	50.46604	-81.7216	\hat{b}_6	108.1674
\hat{a}_6	38.79000	-52.64387		

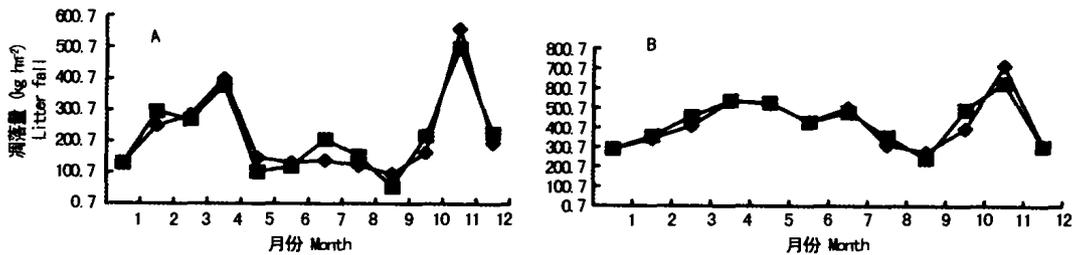


图 1 杉木单优群落(A)和天然杉阔混交林群落(B)凋落物实际值(◆)与拟合值(■)

Fig. 1 Actual (◆) and simulated values (■) of the amount of litter fall in *Cunninghamia lanceolata* forest (A) and *C. lanceolata*-broadleaved mixed forest (B)

平均相对湿度值资料，建立杉木单优群落和天然杉木针阔混交林凋落物与各月平均气温、平均降水量及平均相对湿度之间相互关系统计模型，其模型分别为：

$$\text{杉木单优群落: } y = 1854.89 - 10.32107x_1 + 0.5549931x_2 - 19.12267x_3 \quad r = 0.4899$$

$$\text{天然杉木针阔混交林: } y = 2933.329 - 4.19753x_1 + 1.13961x_2 - 32.16986x_3 \quad r = 0.5208$$

其中： y 为各月凋落物总量 (kg hm^{-2})； x_1 为各月平均气温 ($^{\circ}\text{C}$)； x_2 为各月平均降水量 (mm)； x_3 为各月平均相对湿度 (%)。

由计算得到的相关系数可知，杉木林凋落物动态的起伏型时间序列模型的拟合效果优于用气候因子与凋落物建立的数学模型，这在一定程度上说明起伏型时间序列模型确实可应用于森林凋落物动态描述。凋落物与气候因子之间所建立的统计模型相关系数较低，一方面可能是武夷山杉木林凋落物动态与气候因子之间关系不紧密，另一方面可能是所选用的线性模型本身的不足或所选自变量不妥。当然，对此模型还应进一步研究。

5 结论

已有的研究表明，差分处理相当于一个高通滤波器，而频波动是能用一个傅立叶级

数良好拟合的。需要指出的是,本建模方法虽然在形式上与傅立叶分析方法并无大的区别,但其基本思想是不同的。首先,它的预报方程(6)是一个特殊微分方程(1)的解。再则方程中的参数($\bar{a}_0, \bar{a}_i, \bar{b}_i$)是通过使向前差分 and 向后差分的预报误差最小来估计的。这种建模方法有以下优点:首先,单调型时间序列建模是通过一次或多次累加来达到使序列符合一阶单变量模型即指数曲线型,通常差分处理都可变为起伏型,因此,从原则上讲,起伏型时间序列建模方法更具普遍性。其次,本模型适合对残差序列建模,因为无论哪种模型的残差序列 $x_t^{(e)}=x_t-\hat{x}_t$ 一般都是正、负相间的数据序列,用一组正弦和余弦曲线的组合可以很好地加以描述。对于其它预测效果欠佳的模型,则可用此方法对其残差建模预测,最后将结果叠加起来预报,其预测精度将会明显提高。

森林凋落物是森林生态系统的重要组成部分,是物质循环的重要环节,前人对森林凋落物进行了大量的研究工作,但大多只采用定性的方法描述凋落物动态^[6,9-13]。本文首次采用起伏型时间序列方法模拟了森林凋落物动态,结果表明此方法能客观地描述杉木林凋落物动态规律,不仅可模拟天然杉木针阔混交林总凋落物动态,还可模拟天然林中各树种凋落物动态过程。

森林凋落物数量主要受环境因子(如纬度、经度和海拔等)和林分因子(树种、年龄和密度等)的影响,不论是凋落物月动态还是年动态,都是一个不规则的起伏型变化过程,且是一个时间序列过程,这正是起伏型时间序列方法研究的最好背景,因此此方法在森林凋落物动态研究中具有广阔的应用前景。

参考文献:

- [1] 苏宁虎. 森林植物凋落动态的数学模型 [J]. 林业科学, 1989, 25(2):162-166.
- [2] 杨承栋, 陈仲卢, 焦如珍. 发育林下植被是恢复杉木人工林地力的重要途径 [J]. 林业科学, 1995, 31(3): 275-283.
- [3] 方奇. 杉木连栽对土壤肥力及杉木生长影响 [J]. 林业科学, 1987, 23(4):384-391.
- [4] 梁宏温, 黄承标, 胡承彪. 广西宜山县不同林型人工林凋落物与土壤肥力的研究 [J]. 生态学报, 1993, 13(3): 233-242.
- [5] 梁宏温. 田林老山中山杉木人工林凋落物动态研究 [J]. 林业科学, 1993, 29(4):355-359.
- [6] 陈金耀. 天然杉木混交林及主要伴生树种凋落物动态变化 [J]. 福建林学院学报, 1998, 18(3):255-259.
- [7] 魏凤英, 曹鸿兴. 长期预测的数学模型及其应用 [M]. 北京:气象出版社, 1990. 107-115.
- [8] 吴承祯, 洪伟. 杉木数量经营学引论 [M]. 北京:中国林业出版社, 2000. 230-234.
- [9] 马志贵, 王金锡. 大熊猫栖息环境的森林凋落物动态研究 [J]. 植物生态学报, 1993, 17(2):155-163.
- [10] 林鹏, 卢昌义, 王恭礼, 等. 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报, 1990, 14(1):69-73.
- [11] Bray J R, Gorham E. Litter production in forests of the world [J]. Adv Res, 1964, 2:101-157.
- [12] 温远光, 韦炳二, 黎洁娟. 亚热带森林凋落物产量及动态的研究 [J]. 林业科学, 1989, 25(6):542-547.
- [13] 沈海龙, 丁宝永, 沈国舫, 等. 樟子松人工林下针阔叶凋落物分解动态 [J]. 林业科学, 1996, 32(5):393-402.