

下蜀森林生态系统 定位研究论文集

姜志林 主编

中国林业出版社

责任编辑 葛丽都 张德海

ISBN 7-5038-0970-1/S · 0526

定价:10元

下蜀森林生态系统
定位研究论文集

姜志林 主 编

The Proceedings of Forest Ecosystems on
Xiashu Ecological Station
Edited by Jiang Zhilin

(京)新登字 033 号

下蜀森林生态系统定位研究论文集

姜志林 主 编

中国林业出版社出版发行(北京西城区刘海胡同7号)

南京三角洲电子科技有限公司激光照排中心照排

江苏省测绘局劳动服务公司印刷厂印刷

787×1092 毫米 16 开本 11.5 印张 27.6 千字

1992 年 9 月第一版 1992 年 9 月第一次印刷

印数 1—1,000 册 定价 10 元

ISBN 7-5038-0970-1/S·0526

内 容 简 介

本论文集是林业部“七·五”科研项目——下蜀森林生态系统定位研究的部分成果,以江苏宁镇丘陵区主要森林类型栎林、杉木人工林、火炬松人工林为研究对象,研究了林木生长发育规律、森林生物量和净生产力、群落结构与动态、森林小气候特点、森林水文特性、森林营养元素循环、林茶复合生态系统等内容。这些研究作为今后深入研究森林生态系统奠定了良好的基础。论文中提出的合理经营用材林及水源涵养林的建议,可供生产部门直接应用。

本论文集对从事森林生态的教育、科研工作者及林业技术人员、学生有较大的参考价值。

前 言

森林是重要的自然资源,更是维护生物圈生态平衡的重要支柱。当前森林对全球环境影响的研究已成为国际上“研究热点”之一。随着人口的急剧增长和经济的飞速发展,森林面积日益减少,环境渐趋恶化,自然灾害不断加剧,已严重地影响人类的生存环境和社会经济的发展。但我们对森林的研究较为肤浅,尤其是对森林生物和环境间的内部运转机制、相互作用的规律性及森林生态系统的功能等知之较少。因此进一步系统地对森林生态系统进行研究,阐明森林生物系统和环境系统相互作用的机理及其规律,以及森林对全球环境的影响是十分必要的,其重要手段之一,就是对我国有代表性的森林地带进行森林生态系统定位研究。

对森林生态系统进行定位研究、长期监测和研究分析森林生长、森林生态系统的生产力和生物量、森林结构、森林生物多样性、能量流动、水分循环和营养元素循环等动态变化,分析其运动的基本规律及在人工调控下的变化。这样就能为环境保护、提高森林的多种生态效益和森林生物的生产率提供可靠的理论依据,也可为森林在全球环境变化中所起的作用提供重要的资料。

南京林业大学下蜀森林生态系统定位站是林业部重点课题森林生态系统定位研究网络系统 11 个定位站中间的 1 个。下蜀站地处宁镇山脉东段丘陵地带,在长江中下游江淮地区具有一定的代表性。该地区人口密度大,人为干扰十分严重,森林覆盖率低,水土流失面积日益扩大,水旱灾害发生频繁,木材及燃料奇缺。该地带的顶极群落是带有常绿成份的落叶阔叶林,但原始植被基本上破坏殆尽,现有森林多数为人工林及少数天然次生林。松、杉、栎、竹分布广、面积大是该地区的主要森林类型。

1986 年,经林业部科技司立项,正式建立下蜀森林生态系统定位研究站。我们对下蜀林场的杉木林、火炬松林和以栓皮栎为主的落叶阔叶林进行了比较系统的研究,主要有以下几个方面:

1. 森林结构动态的研究;
2. 森林生态系统生产力和生物量研究;
3. 森林小气候研究;
4. 森林水分平衡研究;
5. 主要营养元素生物循环的研究;
6. 枯枝落叶分解速率的研究;
7. 幼林光合和蒸腾作用的研究;
8. 幼林土壤水分运动规律的研究;
9. 松茶间作的研究。

这些研究的部分成果经整理汇集成本论文集。我们相信,这些研究成果将对长江中下游及江淮地区合理布局森林,提高森林覆盖率,发挥森林的多种生态效益及提高森林生产力,改善森林经营等有一定的参考价值。

下蜀森林生态系统定位研究站是在老一辈林学家朱济凡先生、熊文愈教授等直接指导和

关怀下建立起来的。下蜀站在林业部科技司和南京林业大学的领导和支持下,研究工作才得以正常开展。国内不少兄弟单位和美、日、德等国的林业专家对我们的工作也给予了很大的支持和帮助,在此,向大家表示深切的谢意。

先后参加本定位站研究工作的有我校森林生态教研组、气象教研组、土壤教研组、水土保持教研组、树木学教研组、植物教研组和下蜀实习林场等单位,以及 1987~1992 届的 11 位硕士研究生。这些单位的研究人员互相支持,团结协作,坚持长期的野外调查和观测工作,辛勤劳动,使研究工作得以顺利进行,借此谨表敬意。还应感谢南京林业大学下蜀林场的职工,在工作条件上予的支持和帮助!《南京林业大学学报》编辑室葛丽都、张德海等同志为本研究论文集的编辑出版付出了大量的辛勤劳动,在此谨致谢忱。

姜志林

1992. 5. 10

序

作为陆地生态系统之一,森林既是生物生育的基地,也是自然环境的主要组成部分,既是地区植被景观的代表,也是生物与环境物能交换流动的场所。众所周知,森林的一切效益,都是直接或间接通过森林生物的生命活动及其与环境相互作用产生的,涉及范围之广,影响因素之多,变化起伏之大,堪称生态系统之最。

多少年来,科学工作者从不同角度和侧面,用不同方式和手段,围绕森林的性质、组成、结构、功能、效益、发展、演替、更新等进行广泛的调查研究,取得了可喜的成绩。特别是近十余年来,借助于现代科学理论、先进技术诸如热力学熵变理论、信息论、系统分析、数学模型、计算机模拟等,进一步探索森林生态系统的物质交换、能量流动、信息传递及其经济、生态和社会效益等诸方面,使森林生态系统的研究从局部到整体,从零散到系统,从静态到动态,从定性到定量,从现象到本质,逐步深入,进展甚快。

由于森林生态系统是多输入、多输出、多时变的开放系统,并且有强烈的地区性,类型多、范围广,组成结构复杂,功能效益多样,涉及的学科门类又如此之多,只凭短暂的、零散的或局部的观测研究,显然难以取得充分的数据以揭示森林生态系统运动的内在本质和规律,也就很难得到正确的结论,从而采取相应的合理措施。因此,多学科组合的长期定位研究,进行全面、系统的观测分析,实属必由之路,当务之急。

下蜀森林生态系统定位研究站是中国森林生态系统定位研究 11 个站之一,作为华东地区北亚热带森林植被的代表,在 1986 年由林业部批准,南京林业大学森林生态教研组组建的。下蜀位于 $31^{\circ}59'N$ 江苏宁镇丘陵地区,为中国落叶阔叶林和常绿阔叶林的过渡地带。该地森林是以马尾松、杉木、栓皮栎、毛竹为主的人工林和次生林,与谷底农田呈块状或片状镶嵌,是当地居民木材、薪材、饲料、肥料的生产基地,在水土保持、作物病虫害天敌保护方面也发挥很大的作用。

1985 年以来,在林业部支持下,南京林业大学组织有关学科和研究人員,对下蜀进行本底调查和观测研究,主要研究内容有以下几个方面:(1)系统生产力的研究,包括林木生长量及生物量的研究,涉及气候、土壤、水文、动、植物及微生物等;(2)系统物能流动的研究,涉及物能流动体系、结构、流程、速率以及反馈和负反馈机制等;(3)效益的研究,包括生态效益、经济效益、林下间作,减少病虫害等;(4)系统模拟、设计的研究。

通过参与人员的辛勤劳动,通力协作,将 1986~1990 期间所取得的部分观测资料,经整理分析,总结成文,作为第一册专辑,反映下蜀森林生态系统定位研究的初期成果,并为今后的研究工作奠定基础,部门成果可为生产部门直接参考应用。本专辑也供国内同行交流,对推动森林生态系统的研究将有重要的意义。

熊文愈

1992·6

目 录

序.....	熊文愈(1)
CAR 模型在林木生长模拟研究中的应用	余燕春 姜志林(1)
火炬松人工林生物量的研究.....	姜志林 赵 珊(10)
空青山天然次生栎林的生物量结构.....	孙 多 阮宏华 叶镜中(16)
次生栎林冠层对降雨分配的影响.....	王冬米 叶镜中(23)
森林冠层对降水化学组成的影响.....	王冬米 叶镜中(30)
下蜀林场主要森林类型凋落物水文特性的研究.....	阮宏华 孙 多 叶镜中(36)
苏南丘陵主要森林类型地表径流的初步研究.....	李土生 姜志林(42)
苏南丘陵森林凋落物量及养分归还量.....	俞元春 阮宏华 费世民(50)
空青山次生栎林营养元素的含量及分布.....	阮宏华 孙多 叶镜中(56)
空青山次生栎林营养元素的动态特性.....	阮宏华 孙多 叶镜中(66)
空青山次生栎林营养元素的生物循环.....	阮宏华 孙多 叶镜中(73)
苏南丘陵杉木人工林养分循环的研究.....	俞元春 姜志林(78)
苏南丘陵火炬松林养分循环的研究.....	费世民 姜志林(90)
下蜀森林生态定位站空气温度极端值的研究.....	吴力立(117)
杉木林、火炬松林和落叶阔叶林土壤动物初步研究	李宗硕(127)
宁镇丘陵区森林土壤腐殖质的化学特征.....	李长怀 罗汝英(132)
松茶间作的经济和生态效益.....	唐荣南 汤兴陆(138)
附录 1 南京林业大学下蜀实习林场基本概况	唐荣南 马山林(146)
附录 2 南京林业大学下蜀实习林场木本植物名录	树木学教研室(152)
附录 3 南京林业大学下蜀实习林场草本植物名录	丁雨农(155)

CONTENTS

Preface	Hsiung Wenyu (1)
Application of CAR models to simulation study of tree growth	Yu Yanchun Jiang Zhilin (1)
Biomass study on loblolly pine plantation	Jiang Zhilin Zhao Shan (10)
Biomass structure of the secondary natural oakery on Kongqing hill	Sun Duo Ruan Honghua Ye Jingzhong (16)
Effects of secondary oak canopy on rainfall redistribution ...	Wang Dongmi Ye Jingzhong (23)
Effects of forest canopy on chemical components of precipitation	Wang Dongmi Ye Jingzhong (30)
Studies on the hydrologic character of the litters in the main forest stands on Xiashu Forest Farm	Ruan Honhua Sun Duo Ye Jingzhong (36)
A preliminary study on surface runoff of the main forest types on the hills in southern Jiangsu Province	Li Tusheng Jiang zhilin (42)
Forest litterfall and nutrients restitution in the hilly regions of southern Jiangsu Province	Yu Yuanchun Ruan Honghua Fei Shiming (50)
Studies on the content and distribution of nutrient elements in the secondary oak forest of Kongqing hill	Yuan Honghua Sun Duo Ye Jingzhong (56)
Studies on dynamic properties of nutrient elements in the secondary oak forest of Kongqing hill	Yuan Honghua Sun Duo Ye Jingzhong (66)
Studies on biological cycling of nutrient elements in the secondary oak forest in Kongqing hill	Yuan Honghua Sun Duo Ye Jingzhong (73)
Studies on nutrient cycling on the Chinese fir plantation in the hilly regions of southern Jiangsu Province	Yu Yuanchun Jiang Zhilin (78)
Studies on nutrient cycling on the loblolly pine plantation in the hilly regions of southern Jiangsu Province	Fei Shiming Jiang Zhilin (90)
A study on extreme air temperature in Xiashu Ecological Station	Wu Lili (117)
Studies on soil animals on Chinese fir plantation, loblolly pine plantation and oakery	Li Zongshu (127)
Chemical properties of soil humus in forests in hilly regions of Nanjing and Zhenjiang	Li Changhuai Luo Ruying (132)
Studies on ecological and economic effects of integrated pine-tea management	Tang Rongnan Tang Xinglu (138)
Appendix 1 General introduction of Xiashu Forest Farm, Nanjing Forestry University	Tang Rongnan Ma Shanlin (146)
Appendix 2 Name list of woody plants on Xiashu Forest Farm, Nanjing Forestry University	Dendrology Teaching and Research Section (152)
Appendix 3 Name list of herbaceous plants on Xiashu Forest Farm, Nanjing Forestry University	Ding Yulong (155)

CAR 模型在林木生长模拟研究中的应用

余燕春 姜志林

摘 要 对林木生长过程进行数学模拟,通常采用传统生长模型作一次性描述。本文为了提高模拟的精度,在传统模型的基础上,再用动态 CAR 模型进行第二次拟合,结果极大地提高了模拟的精度,准确再现了林木高径生长过程,为预测林木生长量和分析其生长过程的动态探索了一条新途径。

关键词 CAR 模型;生长过程;模拟

林木生长的数学模拟可用于预测生长量,也是分析林木生长动态的有力手段。长期以来,人们曾提出各种各样的数学模型对林木生长过程进行定量描述。目前经常使用的传统模型有 Logistic 曲线方程、多项式回归方程、多元回归方程等,通常采用的方法是用传统模型作一次性描述,即先用各种传统模型分别对林木生长过程拟合,再根据各回归方程的相关系数和估计标准误差等指标从中筛选出一个最优方程,并作为进一步预测和分析生长量的基础。这种方法简便易行,但作者曾发现,有的回归方程虽然相关系数很高($r=0.9996$),达极显著水平,但是其中某些样点的仿真值与实测值的离差很大(相对误差高达 58%),若用这种方程进行预测,精度不够理想。因此,作者认为,要准确模拟林木的生长过程,进而提高生长量预测的精度,一次模拟后的残差不能忽略,在某些情况必须对其再次拟合。

对于第一次模拟的残差,在目前的模拟研究中,大都将其看作为随机误差,认为它是由一些不可捉摸的因素引起的,如何用数学模型刻划这种过程呢?作者探讨性地采用了动态 CAR 模型,结果取得十分理想的效果。

1 数据的收集

作者在 1988 年 4 月至 11 月期间,对南京林业大学下蜀实习林场的一片 5 年生杉木幼林进行了观测,在林内随机地抽取了 81 株杉木作为树高、地径生长量观测的样株。在观测期内,每隔 10 天用自制的丁字尺(精确至 0.2 cm)测树高生长量,每隔 20 天用游标卡尺(精确至 0.002cm)测地径生长量,获得表 1、表 2 中的数据(为 81 个样株的平均值)。

与此同时,在距样地约 500 m 的气象站,对 14 个气象因子进行了观测。这 14 个气象因子是:平均气温、最高气温、最低气温、地表温度、最高地温、最低地温、5 cm 地温、10 cm 地温、15 cm 地温、20 cm 地温、降水量、相对湿度、水汽压和蒸发量。根据它们的日观测值计算旬平均值或旬总量以及两旬平均值或两旬总量。

下面以杉木生长过程为例,根据实测数据,给出 CAR 模型在林木生长过程模拟研究中的应用方法和结果。

表 1 树高生长量数据
Table 1 Data of tree height increment

日期(日/月)	10/4	20/4	30/4	10/5	20/5	30/5	10/6	20/6
累积生长量/cm	0.443	1.170	2.402	3.842	5.625	8.401	14.959	19.973
日期(日/月)	30/6	10/7	20/7	30/7	10/8	20/8	30/8	10/9
累积生长量/cm	26.110	24.998	38.949	44.930	52.753	60.653	66.807	73.974
日期(日/月)	20/9	30/9	10/10	20/10	30/10	10/11		
累积生长量/cm	78.018	80.585	83.263	84.843	85.047	85.04		

表 2 地径生长量数据
Table 2 Data of ground-diameter increment

日期(日/月)	20/4	10/5	30/5	20/6	10/7	30/7
累积生长量/cm	0.115	0.310	0.426	0.484	0.581	0.660
日期(日/月)	20/8	10/9	30/9	20/10	10/11	
累积生长量/cm	0.781	0.984	1.138	1.243	1.245	

2 CAR 模型建模原理

CAR 模型即带输入项的自回归模型,它是在 CARMA(带输入项的自回归滑动平均模型)的基础上发展而来的,目前已广泛用于各种动态系统的序列分析中。

若将林木生长过程视为一动态系统,设主要气象因子 $u_1, u_2, \dots, u_r$ 为该系统的输入,树高(或地径)生长量 x 为系统的输出,那么,林木生长系统可用多输入-单输出的 CAR(n)模型描述:

$$\begin{aligned} x(t) = & b_{01}x(t-1) + b_{02}x(t-2) + \dots + b_{0n}x(t-n) \\ & + b_{10}u_1(t) + b_{11}u_1(t-1) + \dots + b_{1n}u_1(t-n) \\ & + b_{20}u_2(t) + b_{21}u_2(t-1) + \dots + b_{2n}u_2(t-n) \\ & + \dots \\ & + b_{r0}u_r(t) + b_{r1}u_r(t-1) + \dots + b_{rn}u_r(t-n) \\ & + e(t) \end{aligned} \tag{1}$$

其中:

$b_{01}, b_{02}, \dots, b_{0n}, b_{10}, b_{11}, \dots, b_{rn}$ 为模型参数;

n 为模型的阶;

$e(t)$ 为零均值高斯白噪声。

令:

$$B = \begin{bmatrix} b_{01} \\ b_{02} \\ \vdots \\ b_{0m} \\ b_{10} \\ b_{11} \\ \vdots \\ b_{pm} \end{bmatrix} \quad W(t) = \begin{bmatrix} x(t-1) \\ x(t-2) \\ \vdots \\ x(t-n) \\ u_1(t) \\ u_1(t-1) \\ \vdots \\ u_p(t-n) \end{bmatrix}$$

则(1)式可写成矩阵形式:

$$x(t) = W^T(t)B + e(t) \quad (2)$$

(2)式中参数 B 的辨识方法很多^[1],为简化计算,节省参数辨识所占用的计算机内存,便于在微机上进行,本文采用递推最小二乘法(RLS)^{[2][3]}辨识参数 B 。从 N 时刻的参数估计值 $\hat{B}(N)$ 到 $N+1$ 时刻的 $\hat{B}(N+1)$ 的递推公式为:

$$\hat{B}(N+1) = \hat{B}(N) + K(N+1)[X(N+1) - W^T(N+1)\hat{B}(N)] \dots \dots \quad (3)$$

其中

$$K(N+1) = \frac{P(N)W(N+1)}{1 + W^T(N+1)P(N)W(N+1)}$$

$$P(N) = [H^T(N)H(N)]^{-1}$$

$$H(N) = [W(N+1) \ W(N+2) \ \dots \ W(N)]^T$$

在实际应用时,从 $t=n$ 开始递推,并令递推初值 $B(n) = b$ (b 为任意常数), $P(n) = \mu I$ (I 为单位阵, μ 为很大的正数)。在本文中取 $b=0$, $\mu=10000$ 。

设已递推到现在时刻,得到参数 B 的估计值为:

$$\hat{B} = [\hat{b}_{01} \ \hat{b}_{02} \ \dots \ \hat{b}_{0m} \ \hat{b}_{10} \ \hat{b}_{11} \ \dots \ \hat{b}_{pm}]^T$$

在 $\hat{B}$ 阵中,不能排除其中某些元素数值为零或接近于零的可能,这意味着(1)式中的某些自回归项或输入项可能与 $x(t)$ 关系不显著,根据建模的节省原理^[3],必须从(1)式中剔除。因此,有必要对参数进行显著性检验。本文借助文献^[3]提供的方法,通过区间估计,达到参数显著性检验的目的。若 b_{ij} 的估计置信区间包含零点,说明对应的自回归项或输入项与 $x(t)$ 的线性回归关系不显著,应该剔除。从全参模型(1)中剔除所有不显著项,重新用递推最小二乘法辨识参数。设获得缺参 CAR 模型:

$$\begin{aligned} x(t) = & b_{0f}x(t-f) + \dots + b_{0m}x(t-m) \\ & + b_{11}u_1(t-1) + \dots + b_{1q}u_1(t-q) \\ & + b_{2h}u_2(t-h) + \dots + b_{2r}u_2(t-r) \\ & + \dots \\ & + b_{pk}u_p(t-k) + \dots + b_{ps}u_s(t-s) \\ & + e(t) \end{aligned} \quad (4)$$

$$(f=1, 2, \dots, m \quad t=0, 1, 2, \dots, q \quad h=0, 1, 2, \dots, r \quad k=0, 1, 2, \dots, s)$$

由缺参模型(4)可判断,生长系统自回归变量的子阶为 m ,时滞为 f ,第一个输入变量的子阶为 q ,时滞为 l ,后效时间长度为 $q-l$;第二个输入变量的子阶为 r ,时滞为 h ,后效时间长度为 $r-h$;第 p 个输入变量的子阶为 s ,时滞为 k ,后效时间长度为 $k-s$ 。

上述建模过程编成 CAR 模型自动辨识机,在计算机上自动进行。

3 模型辨识结果及分析

在本文中,CAR 模型是用来配合传统模型拟合生长过程的。下面将传统生长模型和 CAR 模型辨识结果分别叙述如下:

3.1 第一次模拟

在用传统模型对杉木高径生长过程第一次模拟时,从下面三类模型中筛选最优方程:

3.1.1 Logistical 曲线 方程 $Y = \frac{K}{1 + We^{-rt}}$,其中 K 、 W 、 r 为三个待定参数。这里,用叠代法对它们进行辨识,叠代计算结果得到方程(1)和方程(4)(见表 3 和表 4);

3.1.2 多项式回归方程 为了用精度较高,而且表达形式比较简单多项式描述高径生长过程,作者辨识多项式回归方程采用逐步回归分析方法,从 1 次多项式(直线回归方程)开始,逐次引入高次项,剔除回归不显著的次项,直到相关系数和估计标准误趋于稳定的多项式为止。对不同多项式比较后发现,7 次多项式逐步回归方程(见表 3 方程(2))模拟树高生长过程比较理想,它的相关系数最大,估计标准误最小,而且表达形式比较简单,地径生长过程用多项式回归方程模拟效果不佳;

3.1.3 II 型“S”曲线 模型辨识结果见表 3 和表 4。

表 3 树高生长量第一次模拟辨识结果

Table 3 Identification outcome of first fitting for tree—height increment

方 程 类 型	辨 识 结 果	相关系数	估计标准误
logistical 曲线	$Y = \frac{86.9601}{1 + 128.6854e^{-0.0115t}}$	0.9972	2.4901
多项式逐步回归方程	$Y = 1.8201 - 0.1464t + 4.744 \times 10^{-3}t^2 - 3.2404 \times 10^{-12}t^6 + 1.0147 \times 10^{-14}t^7$	0.9996	0.9939
II 型“S”曲线	$P = 2.0184 + 0.0279t$	0.9638	5.2794

①Y——树高累积生长量;P——树高累积生长率的概率单位值;t——生长天数。

用传统的生长模型对高径生长过程进行第一次描述,获得回归方程(1)(2)(3)(4)(5),这 5 个方程的相关系数均在 0.92 以上,经检验都达极显著水平。比较而言,树高生长过程用 7 次多项式逐步回归方程(方程(2))模拟最佳,地径生长过程用 Logistic 曲线方程(方程(4))拟合最好。

从第一次模拟筛选出回归方程的相关系数来看,应该还是比较理想的,方程(2)的相关系数高达 0.9996,方程(4)的相关系数也达 0.9904。但是,它们在某些时点上的残差却相当大。表 7 和表 8 列出了部分时点的实测值与仿真值,从中可以看出,有些仿真值与对应的实测值的离差很大。因此,为了提高模拟的精度,下面利用 CAR 模型对第一次模拟的残差再度拟合。

3.2 第二次模拟

在用 CAR 模型对生长过程第二次模拟时,必须解决模型定阶和模型输入变量选择两个关键问题,因为它们将直接影响第二次模拟的精度。

3.2.1 模型阶数 n 的确定 林木的生长过程类似于一个记忆系统,通常现在的生长量与过去近期的生长量和气象因子关系较大,而与过去远期的关系较小。因此,在一般情况下,CAR 模型随着高阶项的不断引入,模型阶数不断增大,残差平方和会不断降低,但到一定时候,当引入的高阶项与现在生长量(t)不存在显著关系时,模型的残差平方和将不再随高阶项的引入而降低,此时的阶数即为模型合适的阶。基于以上原理,在实际辨识 CAR 模型时,从 1 阶模型

$$\begin{aligned} x(t) = & b_{01}x(t) + b_{10}u_1(t) + b_{11}u_1(t-1) \\ & + b_{20}u_2(t) + b_{21}u_2(t-1) \\ & + \dots \\ & + b_{p0}u_p(t) + b_{p1}u_p(t-1) \\ & + e(t) \end{aligned} \quad (5)$$

开始,逐步引入 2 阶项 $x(-2)$ 、 $u_1(t-2)$ 、 $u_2(t-2) \dots u_p(t-2)$ 、3 阶项 $x(t-2)$ 、 $u_1(t-3)$ 、 $u_2(t-3) \dots u_p(t-3)$ 、……,逐渐增大模型阶数。模型每增加 1 阶,便利用下面的 F 统计量对相邻两模型的残差平方和作 F 检验。

$$F = \frac{SS_1 - SS_2}{SS_2} \cdot \frac{N - n_2}{n_2 - n_1} \sim F(n_2 - n_1, N - n_2) \quad (6)$$

(其中: SS_1 为低阶模型的残差平方和, SS_2 为高阶模型的残差平方和, n_1 表示低阶模型参数个数, n_2 表示高阶参数个数, N 表示辨识模型所用数据数组)

若 F 检验显著($F \geq F_\alpha$),说明引入的高阶项能显著降低 CAR 模型的残差平方和,高阶项的引入是有效的,进一步引入更高阶项;若 F 检验不显著($F < F_\alpha$),说明高阶项的引入没有必要,则不再增大模型的阶数。 F 检验开始不显著时的低阶模型为合适阶模型。

表 4 地径生长量第一次模拟辨识结果

Table 4 Identification outcome of first fitting for ground-diameter increment

方程类型	辨识结果①	相关系数	估计标准误
logistical 曲线	$y' = \frac{1.5450}{1 + 10.6966e^{-0.0182t}}$	0.9904	0.0520
Ⅱ型“S”曲线	$P' = 3.2463 + 0.0184t$	0.9273	0.1227

① y' ——地径累积生长量; P' ——地径累积生长率的概率单位值; t ——生长天数。

3.2.2 模型输入变量的选择 为了保证模型可辨识到的阶数充分大,从 14 个气象因子中挑选几个对高径生长影响较大的主要因子作为模型的输入变量参加建模。为找出影响生长的主要因子,作者对 14 个气象观测因子与高径生长之间的关联性分别进行了关联分析^[4]。

关联分析是通过计算子因素和母因素之间的关联度,排出关联序,分析各子因素对母因素作用大小。排在关联序越前面的子因素,对母因素的作用越大。

设 14 个气象因子 $u_1, u_2, \dots, u_{14}$ 为子因素,树高生长量或地径生长量的第一次模拟的残差为母因素,利用不同时段对子、母因素的实际值进行关联分析。分析结果表明,在 14 个气象因子中,与高生长关系最大的 5 个因子依次是:降水量、相对湿度、水汽压、最低地温和最低气温;对径生长影响最大的 5 个因子分别为:5 cm 地温、平均气温、相对湿度、最高气温和 10 cm 地温。在关联分析的基础上,选择下面 4 个气象因子作为高生长 CAR 模型的输入变量。

$$U(t)=\begin{bmatrix} u_1(t) \\ u_2(t) \\ u_3(t) \\ u_4(t) \end{bmatrix}=\begin{bmatrix} \text{旬降水量} \\ \text{旬平均相对湿度} \\ \text{旬平均最低地温} \\ \text{旬平均最低气温} \end{bmatrix}$$

地径生长量相邻两采样点之间的间隔期较长(20 天),故采样点数减少,全年只获得 11 个时点上的观察值,因此,在建立地径生长 CAR 模型时,只选择与地径生长关系比较密切的两个气象因子

$$U'(t)=\begin{bmatrix} u'_1(t) \\ u'_2(t) \end{bmatrix}=\begin{bmatrix} \text{两旬平均相对湿度} \\ \text{两旬 5 cm 处平均地温} \end{bmatrix}$$

作为模型的输入变量。

建立高生长模型,以树高生长量第一次模拟的残差 $x(t)$ 为输出变量,将输出变量时间序列

$$x(1) \quad x(2) \cdots \cdots x(22)$$

的数值以及 4 个输入变量时间序列

$$u_1(1) \quad u_1(2) \cdots \cdots u_1(22)$$

$$u_2(1) \quad u_2(2) \cdots \cdots u_2(22)$$

$$u_3(1) \quad u_3(2) \cdots \cdots u_3(22)$$

$$u_4(1) \quad u_4(2) \cdots \cdots u_4(22)$$

的数值输入计算机,启动 CAR 模型自动辨识机,对高生长 CAR 模型自动辨识,结果如表 5 所示。

表 5 高生长量 CAR 模型辨识结果

Table 5 Identification outcome of CAR model for tree-height growth

模型参数	CAR(1)	CAR(2)	CAR(3)	
			CAR(3)	估计区间①
b_{01}	0.3293	0.7813	0.5969	(0.5879, 0.6059)
b_{02}		-0.6273	-0.0726	(-0.0796, -0.0657)
b_{03}			-0.5627	(-0.5711, -0.5543)
b_{10}	0.0289	0.1077	0.0578	(0.0590, 0.5659)
b_{11}	-0.0174	0.0071	0.0014	(3.1189×10 ⁻⁵ , 2.875×10 ⁻³)
b_{12}		0.0401	-0.0187	(-0.0195, -0.0180)
b_{13}			0.0016	(8.638×10 ⁻⁵ , 2.299×10 ⁻³)
b_{20}	-0.4941	-0.8073	-0.5697	(-0.5764, -0.5631)
b_{21}	0.6066	1.1615	1.1338	(1.1208, 1.1468)
b_{22}		-0.0254	0.3348	(0.3210, 0.3486)
b_{23}			-0.8025	(-0.8118, -0.7932)
b_{30}	2.5798	8.5758	7.1714	(7.1028, 7.2400)
b_{31}	1.5021	-4.6820	-5.4067	(-5.4837, -5.3296)
b_{32}		-2.4538	-4.7905	(-4.8424, -4.7387)
b_{33}			-0.1589	(-0.2092, -0.1086)
b_{40}	0.0623	-5.6582	-4.3682	(-4.4310, -4.3055)
b_{41}	-4.4591	-1.9319	-1.6204	(-1.6845, -1.5563)
b_{42}		4.4497	6.0707	(6.0151, 6.1264)
b_{43}			2.4458	(2.3953, 2.4962)
残差平方和	8.0966	3.9216	2.440×10 ⁻⁴	
估计标准误	0.6029	0.4428	0.0036	

①置信度 1-α=0.95 的估计区间

从表 5 可以看出:当 CAR 模型由 1 阶增至 2 阶时,对应的残差平方和由 8.0966 降至 3.9216,F 检验显著,当模型由 2 阶增至 3 阶时,残差平方和急剧下降,由原来的 3.9216 降至