

doi:10.16779/j.cnki.1003-5508.2018.02.001

基于树木年轮宽度的秦岭太白红杉 (*Larix chinensis*) 生长变化规律研究

史阿荣^{1,2}, 李书恒^{2*}, 侯丽², 陈兰², 白红英²

(1. 西北大学城市与环境学院, 陕西 西安 710127; 2. 西北大学陕西省地表系统与环境承载力重点实验室, 陕西 西安 710127)

摘要:采用相关性分析法、时间序列 ARIMA 模型及检验, 探讨太白红杉 BAI (Basal Areas Increment) 与地形因子 (海拔、坡度和坡向) 的关系及其生长规律。结果表明: 太白红杉平均 BAI 与海拔和坡度呈负相关关系, 南坡 BAI 生长趋势较北坡增幅大; 太白红杉第 1 次生长高峰出现在 20a 左右, 大高峰约 16 a ~ 20 a 左右出现一次, 小高峰约 4 a ~ 6 a 左右出现一次, 历史最低值和最高值出现在 1840 年和 1997 年; 太白红杉 BAI 与地形因子海拔和坡度呈较显著负相关关系, 较适宜的海拔和坡度范围分别是在 3 050 m ~ 3 150 m 和 10° ~ 20°; 生长规律为幼龄太白红杉 BAI 处于快速增长的阶段, 中龄后太白红杉 BAI 增速减缓, 但整体生长趋势呈现较平稳上升的态势。

关键词: 太白红杉; 树轮宽度; 生长规律; BAI; ARIMA 模型

中图分类号: Q945.32 文献标识码: A 文章编号: 1003-5508(2018)02-0001-06

Research on the Growth Law of *Larix chinensis* in the Qinling Mountains on the Basis of the Tree-ring Width

SHI A-rong^{1,2} LI Shu-heng^{2*} HOU Li² CHEN Lan² BAI Hong-ying²

(1. College of Urban and Environmental Science, Northwest University, Xi'an 710127, China;

2. Shanxi Key Laboratory of Earth Surface System and Environmental Carrying Capacity, Northwest University, Xi'an 710127, China)

Abstract: Studies were made of the relationship between BAI (Basal Areas Increment) and topographical factors (elevation, gradient and exposure), and discussion was made on the growth law of *Larix chinensis* by using correlation analysis method, time sequence ARIMA model and inspection. There was negative correlation between BAI and elevation or gradient. The larger the elevation or gradient were, the slower BAI would be. BAI growth tendency in the South Slope had the larger amplitude than that in the North Slope. The 1st growth peak of BAI appeared at the age of 20 a. The big peak and small peak occurred in 16 a ~ 20 a and in 4 a ~ 6 a, respectively. The historical minimum and maximum appeared in 1840 and 1997. BAI had the negative correlation with elevation and gradient. The suitable elevation and gradient were 3 050 m ~ 3 150 m and 10° ~ 20°, respectively. The growth law showed that BAI of young-aged *L. Chinensis* was in the stage of rapid growth, BAI of middle and later age had slower growth, but the general growth exhibited in the stably rising tendency.

Key words: *Larix chinensis*, Tree-ring width, The growth law, BAI, ARIMA mode

树木的生长轮, 即树轮资料具有定年准确、连续性、分辨率高以及易于获取复本等特点^[1], 采用

收稿日期: 2018-01-29

基金项目: 陕西省自然科学基金项目 (2014JQ5172); 黄土与第四纪地质国家重点实验室开放基金 (SKLLQG1611)

作者简介: 史阿荣 (1994-), 硕士研究生, 主要从事树木生长规律研究, E-mail: 842273298@qq.com

* 通讯作者: 李书恒 (1980-), 副教授, 硕士生导师, 主要从事古气候变化研究, E-mail: lish@nwu.edu.cn

树木年轮宽度值作为代用指标进行树木生长的研究,有利于探究树木生长量变化趋势^[2]。由于海拔、坡向和坡度等因子的不同,树木的生长也随之不同,随着树木年轮多样化和深入化的研究,树木年轮资料对研究树木生长规律、分析地形因子对树木生长的影响有着十分重要的作用。太白红杉(*Larix chinensis*)是秦岭高山林线森林群落的建群种^[3],研究表明太白红杉的生长发育受环境的影响较显著,如苗莉云对太白红杉群落与环境因子进行逐步多元回归和典范相关分析显示,海拔和坡度决定太白红杉群落物种多样性的主要环境因子^[4]。郭华用主成分分析研究太白山、光头山样地以及总体生境的环境因子对太白红杉种群格局的影响,结果显示太白红杉种群格局特征主要影响因子有海拔高度、坡度和坡向^[5]等。以上研究表明环境制约因子中的海拔、坡度和坡向对树木生长影响较大,因此对树木生长规律的研究必须考虑外部的生长因素,即地形因子的制约。外部的生长因素影响生长变化,内部的生长动态反映树木的生长趋势,关于太白红杉生长趋势的相关研究中,建立生长方程和生长模型是当前的主流研究方向,王孝安利用树轮资料构建4种竞争指数的太白红杉单木生长的最优模型^[6],段仁燕采用树轮资料和多元回归的方法构建的太白红杉的生长模型^[7],瞿亚明利用杉木树干材积资料建立杉木连年生长量模型^[8];肖东耀根据海拔范围和树轮资料,利用5种常用的生长模型拟合太白红杉平均胸径生长过程^[9]。以上研究考虑单木生长量、连年生长量结合回归分析时,需要添加辅助信息并建立生长曲线,个别参数获取相对困难。近年来,在树木生长量研究中出现了新的研究方向,即根据树种断面面积增长量(BAI, Basal Areas Increment)研究树木生长变化。研究表明该模型可较准确的模拟BAI的生长趋势,如王宝钦用ARMA(0,0)模型发现34个BAI序列中有30个栎树断面面积生长量可以得

到最好的模拟,而另4个用ARMA(1,0)模型可得到最好的模拟,所有黄杉和挪威云杉BAI序列都能用ARMA(1,0)模型来模拟^[10]。张荷观采用ARIMA模型研究白桦、马尾松、云杉、白杨和纸皮桦的生长量并进行模拟预测,结果显示ARIMA模型预测效果更好^[11],目前利用ARIMA模型研究太白红杉BAI生长规律尚未见报道。鉴于以上研究结果的优良性,证明该模型可根据单个变量的取值,并对其自身的变动进行预测,无须添加任何的辅助信息。本文基于太白红杉年轮宽度采用时间序列ARIMA模型模拟太白红杉BAI序列生长过程,并探讨BAI与立地因子的相关关系。希望能为保护和研究太白红杉提供新的方法和思路,为进一步探知太白红杉的生长规律奠定实践基础。

1 数据研究区

太白红杉也叫太白落叶松,是松科落叶松属红杉组的植物^[12]。形成于古冰川遗迹之上,是我国陕西唯一天然分布的落叶松,是太白山林线上限建群树种^[13]。太白红杉集中分布在太白山(N33°49'~34°10', E107°19'~107°58')地区,另外在长安光头山、牛背梁自然保护区、长青自然保护区等山头也有少量分布^[14]。采集对象木样本位于树种适生区^[3]3 000 m~3 300 m(图1)。气象站数据参考太白县气象站(N34°02', E107°19', 海拔1 543.6 m)。

共采集60棵树芯,将采集好的树芯样本按照国际通用基本处理程序^[15],结合计算机程序COFECHA^[16]。采样点信息汇总(见表1)。

2 研究方法

2.1 计算方法

利用实测轮宽数据与胸径序列得出杉木每年的

表1 太白山采样点信息

Tab. 1 Sampling information of the Taibai Mountains

| 样点编号 Sample site | 海拔 Altitude (m) | 树龄 Age (a) | 胸径 DBH (cm) | 坡度 Slope (°) | 样点编号 Sample site | 海拔 Altitude (m) | 树龄 Age (a) | 胸径 DBH (cm) | 坡度 Slope (°) |
|---------------------|--------------------|---------------|----------------|-----------------|---------------------|--------------------|---------------|----------------|-----------------|
| YWD101 | 3200 | 158 | 23.09 | 24 | YWDZ101 | 3107 | 83 | 27.07 | 11 |
| YWD102 | 3203 | 50 | 18.15 | 24 | YWDZ102 | 3107 | 87 | 24.84 | 11 |
| YWD103 | 3202 | 286 | 30.57 | 24 | YWDZ103 | 3107 | 82 | 24.52 | 11 |
| YWD104 | 3024 | 130 | 27.07 | 24 | YWDZ104 | 3107 | 100 | 30.89 | 11 |
| YWD105 | 3204 | 155 | 28.03 | 24 | YWDZ105 | 3107 | 85 | 37.42 | 11 |
| YWD201 | 3213 | 155 | 29.62 | 10 | YWDZ201 | 3093 | 116 | 30.1 | 30 |

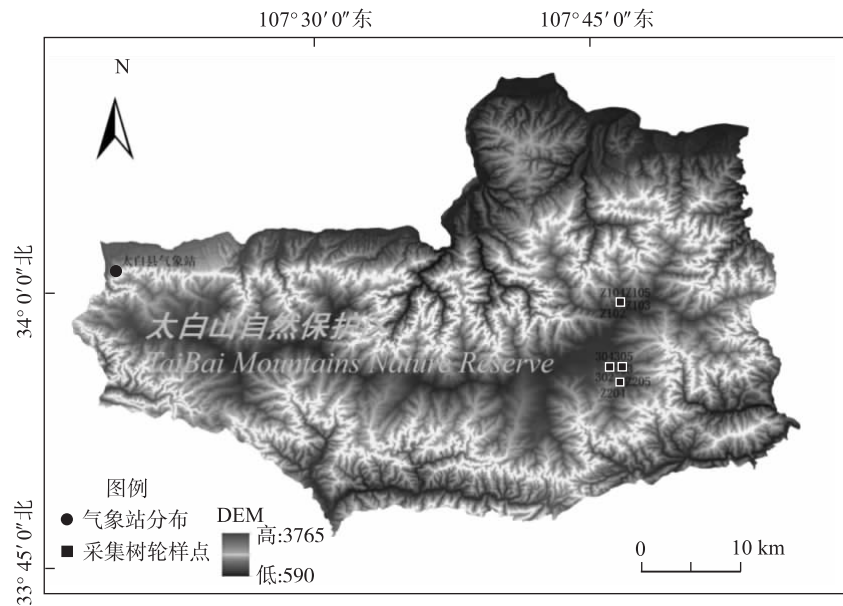


图1 采样点及气象站点的分布

Fig. 1 Distribution of sample sites and meteorological stations

胸径面积增长量(BAI)数学公式^[10]:

$$BAI = \pi(R_n^2 - R_{n-1}^2) \quad (1)$$

式(1)中:BAI表示胸径面积增长量, R_n^2 为当年胸径; R_{n-1}^2 为前1a胸径。

2.2 模拟步骤

ARIMA模型的又称为自回归移动平均模型,由自回归过程AR(p)、差分次数(d)、移动平均过程MA(q)组成。是将预测对象随时间推移而形成的数据序列视为1个随机序列,用一定的数学模型来近似描述这个序列,步骤^[11]如下:(1)根据时间序列的散点图、自相关函数和偏自相关函数图以单位根检验其方差、趋势及其季节性变化规律,对序列的平稳性进行识别。(2)若数据随着时间的变化存在一定的增长或下降趋势,则需对数据进行差分,若差分后数据存在异方差,则需采取对因变量取log值等处理。(3)根据平稳序列的自相关和偏自相关图拖尾和截尾,判断p、q的值并将其带入模型进行参数检验,检验模型是否具有统计意义。(4)进行白噪声检验,诊断残差序列是否为白噪声。(5)最后利用已通过检验的模型进行预测分析。

3 结果与讨论

3.1 海拔、坡向和坡度因子与太白红杉BAI的空间分布

依照南北坡向为划分基础,分别绘制两坡向内

不同海拔与坡度范围的太白红杉分布图,如图2所示,在海拔3000m~3300m与坡度10°~30°中,南坡样本数量明显高于北坡,从BAI生长幅度来看,南北坡海拔范围相近,坡度差异明显。

对比发现:南坡5°~25°范围太白红杉BAI_{max} = 53.91 cm²,BAI_{min} = 4.64 cm²,BAI_{mean} = 23.64 cm²;北坡25°~30°范围太白红杉BAI_{max} = 48.03 cm²,BAI_{min} = 8.59 cm²,BAI_{mean} = 21.04 cm²。由此可得,太白红杉较适宜生长区应位于海拔3080m~3200m和坡度15°~25°的地区。

3.2 海拔、坡度和坡向因子与太白红杉BAI的关系

为研究海拔、坡度与坡向3种地形因子与BAI的相关关系,采用双变量相关性分析BAI、海拔、坡向与坡度数据(见表2),显著性检验采用双侧检验(T)。由表2可知,平均BAI与海拔、坡度负相关性较显著,南坡BAI与海拔、坡度呈负相关($r = -0.640^{**}$, $P < 0.01$),另外平均BAI与南北坡向均为正相关性关系,与BAI南坡向呈显著正相关性($r = 0.496^*$, $P < 0.05$),与北坡向正相关性较弱($r = 0.371$, $P < 0.05$)。这表明海拔越高、坡度越大则BAI的生长速度就越慢,这与太白红杉的生长习性相似。

3.3 ARIMA模型模拟分析太白红杉BAI的生长趋势

树木的BAI随着生长年份的增加而增加,采用

表 2 太白红杉 BAI 与地形因子的相关分析

Tab. 2 Correlation statistics of BAI and slope, slope direction and elevation of *Larix chinensis*

| 因素 Factor | 海拔 Altitude(m) | 坡度 Slope(°) | S 坡向 South slope aspect(S) | N 坡向 North slope aspects(N) |
|--------------------------------------|-------------------|----------------|-------------------------------|--------------------------------|
| 平均 BAI Average Basal Areas Increment | -.484 * | -.511 * | .496 * | .372 |
| 南坡 BAI South Basal Areas Increment | -.573 ** | -.640 ** | .591 ** | .368 |
| 北坡 BAI North Basal Areas Increment | -.209 | -.279 | .371 | .270 |

注: ** P < 0. 01; * P < 0. 05

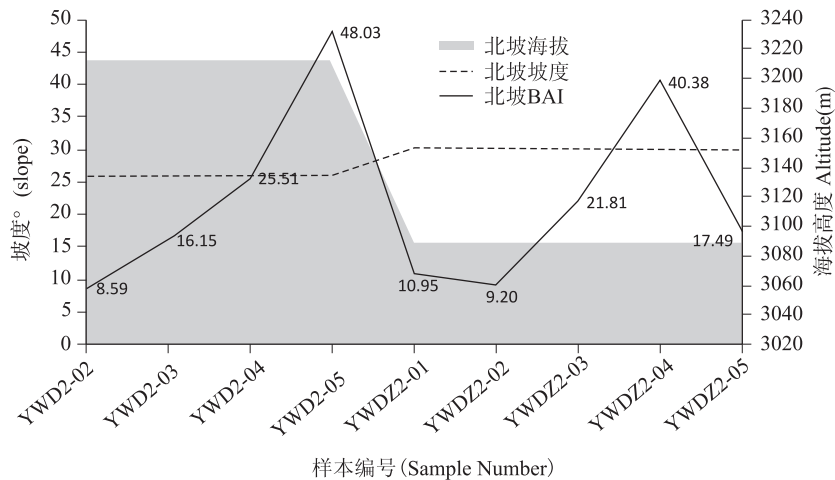
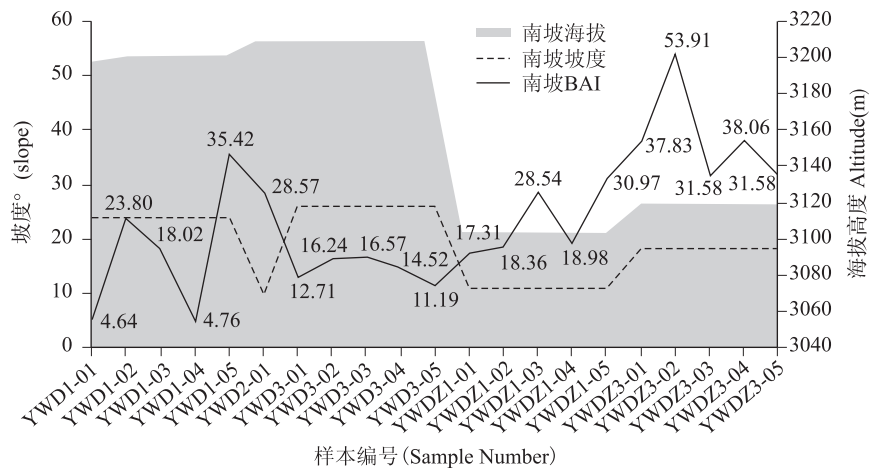


图 2 不同海拔、坡度和坡向范围的太白红杉分布图

Fig. 2 Distribution of *Larix chinensis* at different altitudes, slopes and slope aspects

时间序列 ARIMA 模型分析太白红杉 BAI 生长过程,为了消除数据的不平稳和减弱 BAI 波动幅度,对 BAI 进行一阶差分且 BAI 取 log 值,后对 log (BAI) 进行一阶差分,数据趋于平稳(见图 3)。

得到平稳的时间序列之后,对其建立 ARIMA 模型。由上可知,在本文中,在 $d = 2$ 时,数据达到平稳。由图 4 自相关与偏自相关图可知,为确保因变量之间、误差与因变量没有相关性而得到平稳的时间序列,自相关与偏自相关系数的取值缩小至 0 左右。因而建立 ARIMA 模型,选取 BIC 值最小为最终模型,模型 $BIC(BIC = k \ln(n) - 2 \ln(L))$ 值越小越

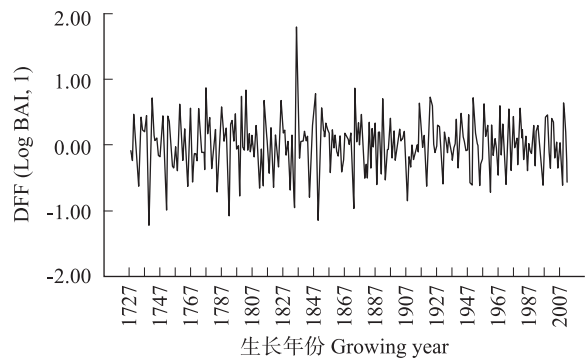


图 3 太白红杉 log(BAI) 一阶差分后与生长年份的序列图
Fig. 3 Sequence diagram of first order difference and growth year of *Larix chinensis* log(BAI)

好, k 为模型参数个数, n 为样本数量, L 为似然函数。 $k \ln(n)$ 在维数过大且训练样本数据相对较少的情况下, 可以有效避免出现维度错乱现象, 同时也避

免了选择模型是偏向于维数大的模型。 L 为似然函数, 依据使似然函数最大选择模型, 则 BIC 要最小)。

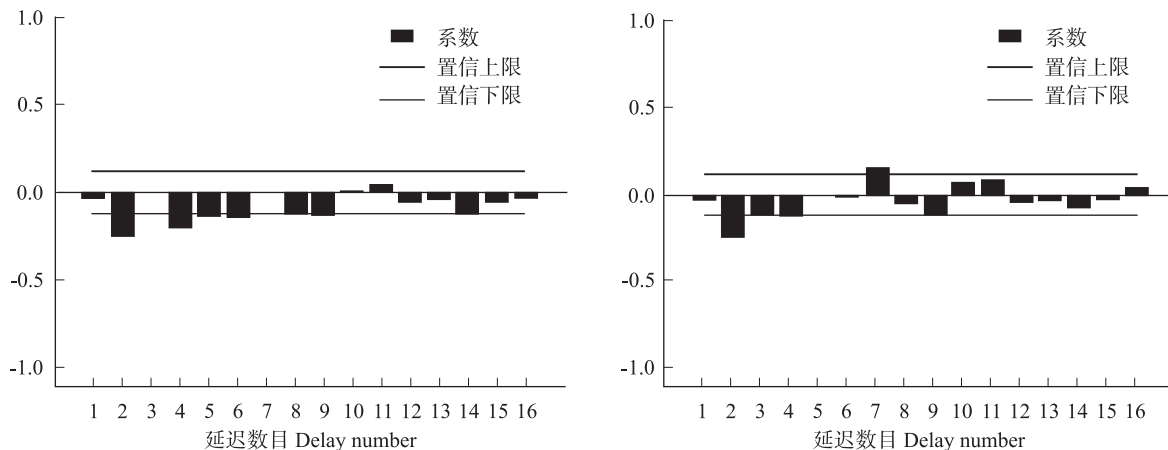


图4 太白红杉 $\log(\text{BAI})$ 一阶差分的自相关与偏自相关图

Fig. 4 Auto-correlation and partial auto-correlation maps of first order difference in $\log(\text{BAI})$ of *Larix chinensis*

由表3和表4得, ARIMA(1,1,2)模型BIC值最小且各参数的sig.值均小于0.05,表明各参数均通过显著性检验。根据上述拟合参数,组合的模型公式表示为:

$$Y = 0.011 + 1.562y_{t-1} - 0.562y_{t-2} + \varepsilon_t - 0.73\varepsilon_{t-1} - 0.269\varepsilon_{t-2} \quad (2)$$

式中 Y 为 $\log(\text{BAI})$, 且该模型的残差为白噪声。

表3 ARIMA模型统计表

Tab. 3 Statistical table of ARIMA model

| 模型类型 Model type | BIC |
|-----------------|--------|
| ARIMA(2,1,2) | -1.894 |
| ARIMA(2,1,1) | -1.905 |
| ARIMA(2,1,3) | -1.874 |
| ARIMA(1,1,2) | -1.911 |
| ARIMA(3,1,2) | -1.874 |
| ARIMA(1,1,3) | -1.891 |

表4

ARIMA模型参数统计量

Tab. 4

Parameter statistics of ARIMA model

| 模型名称 Model name | 模型变量 Model variable | 模型类型 Type of models | 滞后 Lag | 估计 Estimate | SE | T | Sig. | |
|-----------------|---------------------|---------------------|-----------|-------------|--------|-------|-------|------|
| Log BAI-模型 | Log BAI | 常数 | \ | .011 | .003 | 3.713 | .000 | |
| | | AR | 1 | .562 | .072 | 7.774 | .000 | |
| | | 差分 | \ | 1 | .013 | .013 | 3.713 | .001 |
| | | MA | 1 | .730 | .234 | 3.120 | .002 | |
| 生长年份 | 分子 | 2 | .269 | .093 | 2.907 | .004 | | |
| | | 0 | -3.726E-5 | 2.056E-5 | -1.812 | .071 | | |

根据 ARIMA(1,1,2)模型绘制太白红杉 BAI 生长模拟图(见图5)。从图5中可以看出,置信区间长度较小,预测精度较高。在1840年左右出现历史最低值,1997年左右出现历史最高值。造成特殊值出现原因有两方面:一方面,特殊年份的最高最低生长值出现,是由于1840年~1890年属于气候寒冷期,降水冬多夏少,而1997年我国大部分地区平均气温偏高,为北方近30a降水最少年份^[18],夏季北热南凉, Rolland^[19]在研究中提到,夏季温度升高对树木径向生长的抑制作用更为明显,高海拔树木在

强烈的太阳辐射下,其代谢会受到影响,进而导致树木自身缺水,使正常生长受到抑制。可见,除了中间竞争和地形因子影响以外,还受到当年气候的制约而导致太白红杉 BAI 出现历史最低值和最高值。另一方面,太白红杉随着生长年限增加生长从快速增长到之后的增长速度减缓,这是受 K 选择对策的影响,太白红杉的幼龄树皆具有较强的生存力,外加成林的保护关系使幼龄树的 BAI 增长速率持续加快,但随着年龄的增长种内的保护关系演变成竞争关系导致 BAI 的生长速率开始减慢。从大的时间

尺度来看,太白红杉 BAI 生长高峰约 10 a 1 次,BAI 年生长超过 3.0 cm^2 约有 12 a 以上,低于 1.0 cm^2 约有 9 a 左右,大幅度生长动荡期约两个阶段:第 1 个阶段为 80 a ~ 120 a,持续 40 a;第 2 个阶段为 177 a ~ 200 a,持续 23 a,两阶段间隔 57 a,后 55 a 有小幅降低阶段,持续 20 a,之后趋于平稳。

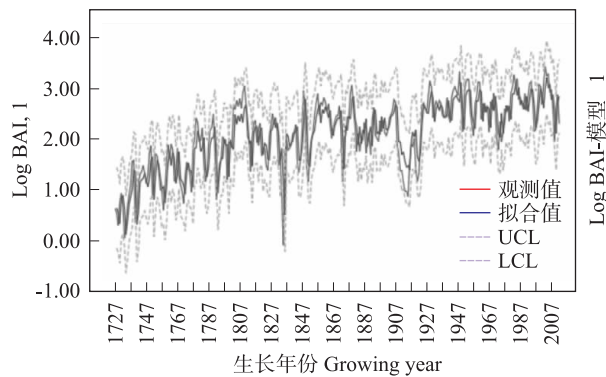


图 5 ARIMA 模型模拟太白红杉 280 年 BAI 生长趋势图
Fig. 5 ARIMA simulation of BAI growth trend of *Larix chinensis* in 280 years

利用时间序列 ARIMA 模型和相关性分析法研究了太白红杉 BAI 与地形因子(海拔、坡度、坡向)的关系和太白红杉 BAI 的生长过程,由于太白红杉 BAI 与地形因子海拔、坡度负相关显著,认为太白红杉具有生长的范围限制,海拔与坡度越大则 BAI 的生长速度就越慢,较适宜生长区应位于海拔 3 080 m ~ 3 200 m 和坡度 $15^\circ \sim 25^\circ$ 的地区;ARIMA 模型显示研究区年龄最大的太白红杉的生长趋势约 10 a 左右经历 1 次生长高峰,幼龄太白红杉 BAI 处快速增长的阶段,中龄后太白红杉 BAI 增速减缓,但整体生长趋势呈现较平稳上升的态势。

参考文献:

- [1] 吴祥定. 树木年轮分析在环境变化研究中的应用[J]. 第四纪研究. 1990, (2): 188 ~ 196.
- [2] 吴祥定, 邵雪梅. 采用树轮宽度资料分析气候变化对树木生长量影响的尝试[J]. 地理学报, 1996(s1): 92 ~ 101.
- [3] 康永祥, 刘婧辉, 代拴发, 等. 太白山不同海拔太白红杉年轮生长对气候变化的响应[J]. 西北农林科技大学学报: 自然科学版, 2010, 38(12): 141 ~ 147.
- [4] 苗莉云. 太白红杉群落交错带生态学特性的研究[D]. 陕西师范大学, 2005.
- [5] 郭华. 秦岭太白红杉种群空间分布格局研究[D]. 陕西师范大学, 2004.
- [6] 王孝安, 段仁燕, 王明利. 太白红杉单木胸径生长模型的研究[J]. 武汉植物学研究 2005, 23(2): 157 ~ 162.
- [7] 段仁燕, 王孝安, 黄敏毅. 太白红杉径向生长的预测模型[J]. 广西植物. 2009. 3. 29(2): 212 ~ 216.
- [8] 翟亚明, 杨倩. 长岭杉木树干材积连年生长量的模拟模型研究[J]. 江西农业学报, 2015(6): 27 ~ 29.
- [9] 肖东耀, 廖超英, 杨晓娟, 等. 太白山北坡太白红杉 (*Larix chinensis*) 胸径生长规律研究[J]. 西北林学院学报, 2012, 27(4): 194 ~ 198.
- [10] 王宝钦. 用年轮数据估计生长趋势[J]. 林业资源管理, 1992(1): 71 ~ 75.
- [11] 张荷观. 时间序列的 ARIMA 模型在预测树木生长量中的应用[J]. 林业科学, 1986, 22(1): 94 ~ 100.
- [12] 王战. 中国落叶松林[M]. 中国林业出版社, 1992.
- [13] 张仰梁. 陕西森林[M], 北京: 中国林业出版社, 153 ~ 156.
- [14] 孙毓, 王丽丽, 陈津, 等. 中国落叶松属树木年轮生长特性及其对气候变化的响应[J]. 中国科学: 地球科学, 2010, 40(5): 645 ~ 653.
- [15] Stokes M A, Smiley T L. An introduction to tree - ring dating [M]. University of Arizona Press, 1968.
- [16] Holmes R L. Computer-Assisted Quality Control in Tree-Ring Dating and Measurement[J]. Tree - Ring Bull, 1983, 44(3): 69 ~ 75.
- [17] 祁建, 马克明, 张育新. 北京东灵山不同坡位辽东栎 (*Quercus liaotungensis*) 叶属性的比较[J]. 生态学报, 2008, 28(1): 122 ~ 128.
- [18] 竺可桢. 中国近五千年来气候变迁的初步研究[J]. 中国科学, 1973(2): 168 ~ 189.
- [19] Rolland C. Tree - ring and climate relationships for *Abies Alba* in the internal Alps[J]. 1993, 53.
- [20] 吴祥定. 树木年轮与气候变化[M]. 北京: 气象出版社, 1990.