

树木直径生长的时间序列及灰色预测模型比较

罗旭^{1,2} 程承旗¹ 冯仲科³ 岳德鹏³ 陈晓雪³

(1 北京大学地球与空间科学学院 2 中国计量科学研究院 3 北京林业大学测绘与3S技术中心)

摘要: 该文以解析木数据为基础,从整体上对甘肃省小陇山地区的华山松等解析木的树干形状进行描述,采用R/S方法即时间序列分析法,对树木直径的生长过程进行了分析。研究发现,随着树龄的增加,直径生长的霍斯特指数(*H*指数)值也呈现增加的趋势,并以此建立了直径生长的*H*指数预测模型;同时应用灰色理论,根据得到的*H*指数数据,建立了华山松和锐齿栎的直径生长*H*指数灰色动态预测GM(1,1)模型,分析了直径生长的动态变化特征。R/S分析结果充分反映了树木直径动态生长过程随时间尺度变化的分形特征,进而为森林资源的动态监测奠定基础。

关键词: 解析木; R/S方法; 霍斯特指数; 灰色理论**中图分类号:** S771 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-1522(2008)增刊1-0208-06

LUO Xu^{1,2}; CHENG Cheng-qi¹; FENG Zhong-ke³; YUE De-peng³; CHEN Xiao-xue³. Comparative research on forecasting models of diameter growth of trees based on rescale range analysis and grey theory.

Journal of Beijing Forestry University(2008)30(Supp.1) 208-213[Ch, 14 ref.]

1 School of Earth and Space Science, Peking University, 100871, P.R. China;

2 China National Institute of Metrology, Beijing, 100013, P.R. China;

3 Institute of GIS, RS & GPS, Beijing Forestry University, 100083, P.R. China.

Based on the data of parse trees, this paper described whole trunk form of parse trees of *Pinus armandii* and *Quercus aliena* var. *acuteserrata* in Xiaolong Mountains, Gansu Province, northwestern China and analyzed the growth process adopting the R/S (rescale range analysis). The results show the Hurst index values increased with the increase of ages, and the Hurst index forecasting model of diameter growth was set up. According to grey theory and Hurst index, the grey forecasting model (GM (1,1)) of *P. armandii* and *Q. aliena* var. *acuteserrata* was established and the dynamic variation characteristics of diameter growth were analyzed. The results of R/S analysis reflect the fractal characteristics of dynamic diameter growth with time, and lay the basis for dynamic supervision of forest resources.

Key words parse tree; R/S method; Hurst index; grey theory

多数的时间记录都可以用R/S方法进行分析,R/S方法是Hurst于1965年首先提出来的,其全名是“改变尺度范围的分析”。它的基本思想是,改变所研究的时间尺度大小,研究其统计特性变化的规律,从而可以将小的时间尺度范围规律用于大的时间尺度范围,或者将大的时间尺度得到的规律用于小的尺度^[1-2]。灰色控制系统理论自1982年创立以来受到国内外许多学者的重视和称赞。在国内,灰

色控制系统理论已被成功地应用于林业生产、棉花害虫生物防治研究、灌溉决策、气象预报及形势分析研究等方面。

1 研究地点与样区概况

甘肃省小陇山自然保护区位于秦岭山脉西段及嘉陵江上游,在甘肃省小陇山林业实验局境内,东与陕西省凤县、勉县为界,南邻陕西省略阳县,西、北为

收稿日期:2007-11-10

http://www.bjfujournal.cn, http://journal.bjfu.edu.cn

基金项目:“863”国家高技术研究发展计划项目(2006AA706209-2)、国家自然科学基金项目(90302014)。

第一作者:罗旭,博士后,主要研究方向:生态环境、工程及灾变环境3S监测与预报、测绘空间技术。电话:010-51652706 Email:lhx5666@yahoo.com.cn 地址:1000871北京大学遥感楼。

责任作者:冯仲科,教授,博士生导师。主要研究方向:林业3S技术应用、精准林业。电话:010-62337963 Email:fengzhongke@126.com 地址:100083北京林业大学111信箱。

嘉陵江,位于东经 $106^{\circ}13'10''\sim106^{\circ}33'06''$,北纬 $33^{\circ}35'12''\sim33^{\circ}45'11''$ 之间,面积 3193.8 hm^2 ,主要保护我国暖温带-亚热带过渡地区原始森林生态系统。

2 方法与结果

2.1 R/S方法在树木直径生长中的分析

2.1.1 林分基础数据获取

研究所用材料系调查和收集的小陇山林业实验局党川林场标准地的资料。

课题组依据标准地的基本要求,选择林相相对整齐、具有一定代表性的地段作为固定标准地。用全站仪、围尺、罗盘仪、手持GPS、数码相机及三维激光扫描仪进行测设,即用DGPS和手持GPS精准测定样地中心、四角及标准木和优势木的坐标,以5个上面有铁钉的木桩做标准地标记,并且按顺时针编号,样地中间一根桩定位0号,另外用红油漆在界外木上标记作为固定标准地的边界,在界内每株树干

1.3 m高处画线以固定胸径的测定位置。

2.1.2 计算方法与结果

树木的直径生长程度,即为直径的生长量。一定间隔期内树木各种调查因子所发生的变化称为生长,变化量称为生长量。生长量是时间 t 的函数,时间间隔可以是1、5、10年或更长的时间,通常以年为时间的单位。影响树木生长的因子很多,其中最主要的是树种的生物学特性、树木的年龄、环境条件和人为经营措施。生长量可以作为评定立地条件好坏及经营措施效果的指标,正确的分析研究并掌握林木的生长规律,采用相应的经营管理措施,可以改善树木的生长状况,提高生长量,从而达到速生、优质、高产的目的。所以,对树木进行生长量的测定,分析其研究变化规律,在林业生产上有重要意义。

以解析木华山松(*Pinus armandii*)为例,树高为15.2 m,树龄为94年,该解析木每隔10年在0 m处的直径随时间变化的资料见表1。

表1 树龄94年的华山松直径变化表

TABLE 1 Diameter variation of 94-year-old *Pinus armandii*

树龄/a	10	20	30	40	50	60	70	80	90	94
直径/cm	2.00	5.85	9.70	15.55	23.35	31.50	37.15	41.20	44.60	47.55

根据表1计算树龄94年的华山松在0 m处直径 $\xi(n)$ 的平均值 $E[\xi(n)]$ 和均方差 S :

$$\begin{aligned} E[\xi(n)] &= \frac{1}{N} \sum_{n=1}^N \xi(n) \\ &= \frac{1}{10} \sum_{n=1}^{10} (2 + 5.85 + 9.7 + 15.5 + \\ &\quad 23.35 + 31.5 + 41.2 + 44.6 + 47.55) \\ &= 25.845 \end{aligned} \quad (1)$$

$$\begin{aligned} S &= \left\{ \frac{1}{N} \sum_{n=1}^N \{ \xi(n) - E[\xi(n)] \}^2 \right\}^{1/2} \\ &= 15.99897 \end{aligned} \quad (2)$$

对于给定的时刻 $t(t = kt_m, 1 \leq k \leq N)$,计算累积离差 $X(t, \tau)$:

$$X(t, \tau) = X(k, N) = \sum_{n=1}^k \{ \xi(n) - E[\xi(n)] \} \quad (3)$$

可以看出,此刻的累积离差表示 t 时间内树木直径生长程度相对于均值的累积偏差。在某时刻 t_1 和 t_2 ,累积离差必然会达到最大和最小值,它们的差值即为直径生长时间记录分析序列中的极差 $R(\tau)$ 。

$$\begin{aligned} R(\tau) &= R(N) = \max_{1 \leq k \leq N} X(k, N) - \min_{1 \leq k \leq N} X(k, N) \\ &\approx 72.775 \end{aligned} \quad (4)$$

极差 $R(\tau)$ 定量表示了研究时间尺度 $\tau = N \times$

t_m 内直径生长程度的最大涨落,即代表了经过 τ 年生长后,树高某处直径增加的变化^[2]。 $R(\tau)/S = 4.549$ 。

利用Hurst经验关系式,

$$\frac{R(\tau)}{S(\tau)} \sim n^H \quad (5)$$

通常把 H 称为Hurst指数。 H 值可以根据计算出的 $(\tau, \frac{R}{S})$ 值,在双对数坐标系 $(\ln \tau, \ln (\frac{R}{S}))$ 中用最小二乘法拟合式 $\frac{R(\tau)}{S(\tau)} \sim n^H$ 得到^[14]。

接下来应用相同的方法再对树龄为90、80、70、60、50、40、30、20年的解析木华山松在树高为0 m处的 $R(\tau)/S$ 值分别进行计算,得到对应的值分别为4.088、3.648、3.125、2.595、2.173、1.748、1.225、1,以这些值为 x 轴,对应的树龄为 y 轴,进行非线性拟合,得到一系列幂函数曲线(图1)。根据曲线的趋势线分析得到的幂指数,即我们所要求的 H 值。

2.1.3 讨论与分析

将计算得到的各种解析木不同年龄下直径生长的 H 值列于表2。

1)通过对图1的曲线进行趋势线分析,相关系数为0.9645。为了便于比较,文章列出了两种解析木华山松及锐齿栎(*Quercus aliena* var. *acuteserata*)分别在不同年龄下、树高0、1.3和3.6 m处直径的

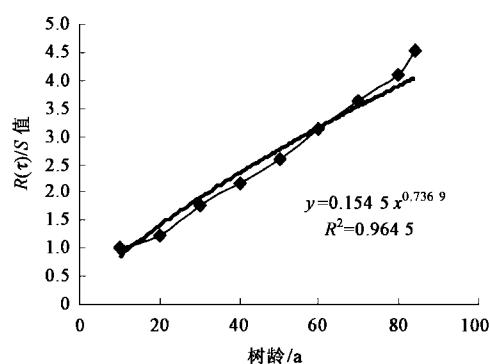


图1 树龄94年的华山松0 m处的直径生长H值趋势图

FIGURE 1 Hurst index at 0 m height of 94-year-old *Pinus armandii*

表2 各解析木在不同年龄下的H值

TABLE 2 Hurst index values of parse trees of different ages

树龄/a	H指数			
	0 m 处胸径	1.3 m 处胸径	3.6 m 处胸径	平均值
华山松	50	0.561	0.563	0.559
	60	0.606	0.621	0.618
	70	0.649	0.653	0.646
	80	0.685	0.682	0.672
	90	0.710	0.703	0.692
	94	0.737	0.728	0.712
锐齿栎	50	0.548	0.554	0.565
	60	0.581	0.595	0.601
	70	0.622	0.633	0.630
	80	0.653	0.666	0.661
	85	0.689	0.701	0.691

H指数值,相关系数均达到了0.92以上,此处不再赘述。由表2可看出,随着树龄的增加,其直径生长的H指数值也呈现增加的趋势。

2)分析这两种解析木分别在树高0 m处的直径、1.3和3.6 m处的胸径下的H指数值,发现在相同树龄下直径生长的H值非常接近,因此对相同树龄的H指数值求平均值(表2)。除此以外,从表2中还可以知道,这两种解析木的树龄在50~60年之间时,H值大约在0.55~0.6之间;树龄在60~90年之间时,H值大约在0.6~0.7之间;树龄如果可能大于90年,其H值大于0.7。

3)从以上分析中可以看出,真实的树木直径生长并非是无“记忆”的生长过程,毫无规律可循。相反,不同树种、不同年龄的情况下,直径生长时间序列都存在R/S关系,有的随时间 τ 变化得较快,有的慢些^[6]。

2.2 直径生长的H指数预测模型

通过表2可以看出,随着树龄的增加,直径生长的H指数也随之增加,因此可以根据这个规律建立直径生长的霍斯特指数(H)预测模型,用于森林生长量的预测。

2.2.1 计算方法与结果

回归分析在林业生产、森林资源调查和科学试验方面都有应用,而且应用越来越广泛。从表2我们可以看出随着树木年龄的增加,H指数呈非线性的增加。因此,我们对计算得到的H指数值进行幂指数回归分析。以表2中解析木树龄为横坐标,H指数值为纵坐标建立坐标系,得到图2、3。

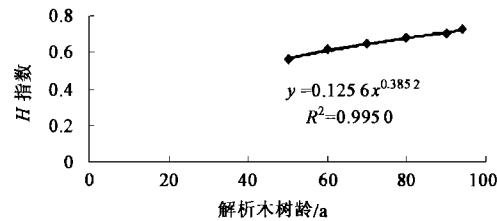


图2 华山松直径生长H值的非线性模型

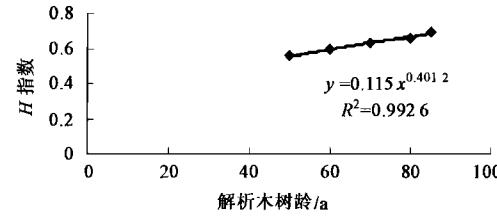
FIGURE 2 Nonlinear model of Hurst index values of *P. armandii*

图3 锐齿栎直径生长H值的非线性模型

FIGURE 3 Nonlinear model of Hurst index values of *Q. aliena* var. *acuteserrata*

经计算得到非线性方程见表3。

表3 各树种的直径生长H值预测的非线性数学模型

TABLE 3 Nonlinear forecasting models of Hurst index values of trees

树种	方程	相关系数	剩余标准差
华山松	$y = 0.1256x^{0.3852}$	0.9950	0.0093
锐齿栎	$y = 0.115x^{0.4012}$	0.9926	0.0065

从表3可以看出,解析木华山松和锐齿栎的非线性方程拟合的相关系数均达到了0.99以上,说明非线性方程拟合得相当精确。该方程可以说明直径生长的H指数值与时间序列呈幂指数函数的关系。因此,在一定程度上反映了树木直径生长的变化规律,应用该预测模型可以预测直径在未来几年的生长趋势。

2.2.2 分析与讨论

1)两种解析木的以时间 x ($x > 10$)为自变量,H指数值为因变量 y 的模型可以表明,只要输入解析木的树龄,就可以求出这两种解析木在该树龄的H指数值。模型的相关系数都在0.99以上,说明这两个数学模型均拟合得非常好。反过来,一旦确定了H值,其树龄就可以表示出来。统计意义上来说,可由标准解析木来表示该地区相同树种不同径阶树木的生长趋势。如果该地区树木足够多,那么每棵

树可按树高从小到大进行排列,在理想条件下即可看作每棵树的干形都代表了标准解析木的每1年的生长形状。R/S分析法可以很好地定量模拟树木直径生长的动态变化,是进行直径生长分析的有效方法之一。R/S分析结果充分反映了树木直径动态生长过程随时间尺度变化的固有特性及其分形特征,是其它方法所不及的。

2) 研究表明,将R/S分析理论用于华山松等树种直径生长的中长期预测,比传统途径更多地利用了时间序列中包含的丰富信息,是不同于传统确定性和随机性预测方法的一种新途径,可更好地揭示植物生长动力系统复杂的运动规律。

应该指出的是,尽管应用了R/S分析理论中的概念、方法进行预测,但仍无法减小或消除系统因内在随机因素而造成的不可预报部分,如观测资料的误差等,因此进一步探索树木直径生长的规律,改进模型,提高模型的稳定性,对于提高树木生长的趋势和预测精度是很有意义的。

2.3 灰色模型控制理论分析

2.3.1 计算方法与结果

灰色系统是既含有已知信息,又含有未知信息的系统。灰色系统重要组成部分之一的灰色预测与决策有着广泛的应用。作为一种预测模型,我们将其应用在树木直径生长H指数预测当中,应用最为广泛的GM(1,1)模型,这里GM是Grey Model的缩写,即“灰色模型”的意思,(1,1)表示所建立的微分方程是一元一阶的。这种预测方法利用连续的灰色微分模型,可对系统的发展变化进行全面的观察分析,并作出长期预测^[10-12]。

将通过时间序列分析方法求得的解析木华山松和锐齿栎的直径生长的H指数平均值,作为给定的时间序列 $x_0(t)$ 当 $t=1,2,3,4,5$ 时的值。以解析木华山松为例, $x_0(1)=0.561$, $x_0(2)=0.615$, $x_0(3)=0.649$, $x_0(4)=0.68$, $x_0(5)=0.702$ 。为削弱时间序列的随机性使规律性更加明显,采用一次累加:

$$x(t) = \begin{cases} x_0(t), t = 1 \\ \sum_{m=1}^t x_0(m), t = 2, 3, 4, 5 \end{cases} \quad (6)$$

GM(1,1)的模型是微分方程:

$$\frac{dx}{dt} + ax = b \quad (7)$$

式中,a,b为待定参数,可用Moore-Penrose Γ^- 逆矩阵的办法求得,过程如下:取 $\Delta t=1$, $\frac{dx}{dt}=x(k)-x(k-1)$,将方程(7)离散化,得

$$x(k) - x(k-1) + a \times \frac{1}{2}[x(k) + x(k-1)] = b \quad (8)$$

令 $\Delta x(k) = x(k) - x(k-1)$, $\Delta k = 1$,则 $\Delta x(k) = x_0(k)$,从而使式(8)化为

$$\frac{\Delta x(k)}{\Delta k} + \frac{1}{2}(x(k) + x(k-1)) \times a = b \quad (9)$$

以 $k=2,3,4,5$ 代入式(9),得

$$\left\{ \begin{array}{l} -\frac{1}{2}[x(2) + x(1)]a + b = x_0(2) \\ -\frac{1}{2}[x(3) + x(2)]a + b = x_0(3) \\ -\frac{1}{2}[x(4) + x(3)]a + b = x_0(4) \\ -\frac{1}{2}[x(5) + x(4)]a + b = x_0(5) \end{array} \right. \quad (10)$$

记,

$$B = \begin{pmatrix} -\frac{1}{2}[x(2) + x(1)] & 1 \\ -\frac{1}{2}[x(3) + x(2)] & 1 \\ -\frac{1}{2}[x(4) + x(3)] & 1 \\ -\frac{1}{2}[x(5) + x(4)] & 1 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} -0.869 & 1 \\ -1.501 & 1 \\ -2.165 & 1 \\ -2.865 & 1 \end{pmatrix},$$

$$Y = \begin{pmatrix} x_0(2) \\ x_0(3) \\ x_0(4) \\ x_0(5) \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 0.615 \\ 0.649 \\ 0.68 \\ 0.702 \end{pmatrix}, X = \begin{pmatrix} a \\ b \end{pmatrix}$$

则式(10)可以写成

$$BX = Y \quad (11)$$

式(11)有2个未知数、4个方程,易见它是矛盾组,其最小二乘解即为a,b的数值,于是

$$X = B^+ Y \quad (12)$$

式中, B^+ 是B的 Γ^- 逆, $B^+ = (B^T B)^{-1} B^T$ 。代入公式(12)得

$$X = \begin{pmatrix} a \\ b \end{pmatrix} = (B^T B)^{-1} B^T Y = \begin{pmatrix} -0.044 \\ 0.58 \end{pmatrix} \quad (13)$$

从而 $a=-0.044$, $b=0.58$ 。

式(7)的解称为时间响应函数,易见方程(7)的通解为

$$x(t) = [x(0) - \frac{b}{a}]e^{-at} + \frac{b}{a} \quad (14)$$

式中, $x(0)$ 为待定初始值。为此以 $t=k$ 代入式(14)中,得 $x(k) = [x(0) - \frac{b}{a}]e^{-ak} + \frac{b}{a}$,从而解出 $x(0)$ 为

$$x(0) = \frac{b}{a} + e^{ak} \left[x(k) - \frac{b}{a} \right] \quad (15)$$

代入 $x(k)$ 中,可得

$$x(k+1) = \left[x(0) - \frac{b}{a} \right] e^{-a(k+1)} + \frac{b}{a}$$

$$= \left[x(k) - \frac{b}{a} \right] e^{-a} + \frac{b}{a} \quad (16)$$

式(16)是一个递推公式,反复利用式(16)可得

$$\begin{aligned} x(k+1) &= \left[\left(x(k-1) - \frac{b}{a} \right) e^{-a} + \frac{b}{a} - \frac{a}{b} \right] e^{-a} + \frac{b}{a} \\ &= \left[x(k-1) - \frac{b}{a} \right] e^{-2a} + \frac{b}{a} \\ &= \cdots \left[x(1) - \frac{b}{a} \right] e^{-ka} + \frac{b}{a} \\ &= 13.743e^{0.044k} - 13.182 \end{aligned}$$

因此得到华山松的直径生长 H 指数的灰色预测模型为

$$\begin{aligned} x(k+1) &= 13.743e^{0.044k} - 13.182 \\ k &= 1, 2, 3, 4, \dots, n \end{aligned} \quad (17)$$

同理对锐齿栎进行相同的算法,得到的 H 指数的灰

表 4 华山松与锐齿栎的 H 指数值与灰色预测值比较表

TABLE 4 Comparison between Hurst index and grey prediction of *P. armandii* and *Q. aliena* var. *acuteserrata*

树龄/a	华山松			锐齿栎		
	H 指数值	灰色预测值	拟合误差/%	H 指数值	灰色预测值	拟合误差/%
50	0.561	0.561 0	0	0.556	0.556 4	0
60	0.615	0.618 2	0.32	0.592	0.593 7	0.16
70	0.649	0.646 0	0.35	0.628	0.625 6	0.24
80	0.682	0.675 0	0.70	0.660	0.659 5	0.08
90	0.702	0.705 5	0.35	0.699	0.691 4	0.80
100	0.740	0.737 1	0.30	0.730	0.732 7	0.31
110	0.768	0.765 2	0.27	0.758	0.771 7	1.36
120	0.794	0.804 9	1.08	0.785	0.813 6	2.87
130	0.819	0.841 1	3.02	0.811	0.857 5	4.69
140	0.843	0.879 5	3.32	0.835	0.903 7	6.86

2.3.2 比较分析与讨论

从表 4 可以看出,两种解析木的 H 指数值与灰色预测值比较得到的拟合误差值很小,说明拟合的精度非常高,预测效果很好。这表明研究设计的树木直径生长的时间序列预测模型是具有参考价值的。但是当 H 指数值达到 0.8 以上时,拟合误差突然变大,说明研究设计的树木直径生长的时间序列分析模型适用于树龄在 100 年以下的华山松和锐齿栎的直径生长预测。

灰色系统模型与一般用的回归方法建立的预测模型不同,它不需要大量的原始数据,得到的不是原始数据模型,用它预测华山松与锐齿栎的直径的未来的生长量,既可以减少时间序列的随机性,又可以提高预测精度。

3 结 论

树木直径生长的 H 指数模型研究具有生态学意义,将以往的直径生长的静态模型深化到动态预测模型,在今后森林计测学的研究中将会起到重要的作用。当我们研究某一地区今后 T 年的树木生

长趋势时,由于 R/S 经验关系式 $\frac{R(\tau)}{S(\tau)} \sim n^H$ 的存在,使得我们可以通过时间尺度的变换,将小尺度下的极差推广到大时间尺度下,并利用极差对该地区将来树木直径的生长给出最保守的估计。R/S 分析结果不仅展示了树木直径生长的规律性,而且对直径生长趋势估计也具有应用意义。将 R/S 分析理论用于树木直径生长的中长期预测,比传统途径更多地利用时间序列中包含的丰富信息,是不同于传统确定性和随机性预测方法的一种新途径,可更好地揭示植物生长动力系统复杂的运动规律。同时通过将计算得到的 H 指数值与灰色模型理论分析进行比较,可以看出通过 R/S 方法得到的华山松与锐齿栎两树种的直径生长时间序列的预测模型具有一定的理论参考价值,能够为林业经营管理提供依据。灰色理论预测模型与其它预测方法比较,具有所需样本少,收集资料容易,建模、计算方法比较简单,精度较高等优点。

参 考 文 献

- [1] 张济中. 分形 [M]. 北京: 清华大学出版社, 1995.

- ZHANG J Z. *Fractal* [M]. Beijing: Tsinghua University Press, 1995.
- [2] 吴怀宇.时间序列分析与综合[M].武汉:武汉大学出版社, 2004.
- WU H Y. *Rescale range analysis and integration* [M]. Wuhan: Wuhan University Press, 2004.
- [3] 陈颙.分形几何学[M].北京:地震出版社, 2002: 94.
- CHEN Y. *Fractal geometry* [M]. Beijing: Earthquake Press, 2002: 94.
- [4] 孙博文.分形算法与程序设计——Visual C++ 实现[M].北京:科学出版社, 2004: 46.
- SUN B W. *Fractal arithmetic and programmer——Visual C++* [M]. Beijing: Science press, 2004: 46.
- [5] 李火根, 黄敏仁.分形理论及其在植物研究中的应用[J].植物学通报, 2001, 18(6): 684-690.
- LI H G, HUANG M R. Fractal theory and the employment in plant research [J]. *Chinese Bulletin of Botany*, 2001, 18(6): 684-690.
- [6] 毕小丽, 洪伟, 吴承祯, 等.黄山松林不同树种树冠分形特征研究[J].福建林学院学报, 2001, 21(4): 347-355.
- BI X L, HONG W, WU C Z, et al. Study on fractals of crown breath of different tree in *Pinus taiwanensis* forests [J]. *Journal of Fujian College of Forestry*, 2001, 21(4): 347-355.
- [7] 高峻.分形理论及其在林业科学中的应用[J].世界林业研究, 2004, 17(6): 11-16.
- GAO J. Fractal theory and its applications in forestry [J]. *World Forestry Research*, 2004, 17(6): 11-16.
- [8] 黄勇, 周志芳, 王锦国, 等.R/S 分析法在地下水动态分析中的应用[J].河海大学学报, 2002, 30(1): 83-87.
- HUANG Y, ZHOU Z F, WANG J G, et al. Application of R/S method to dynamic groundwater analysis [J]. *Journal of Hehai University*, 2002, 30(1): 83-87.
- [9] 潘国荣.基于时间序列分析的动态变形预测模型研究[J].武汉大学学报(信息科学版), 2005, 30(6): 23-29.
- PAN G R. Forecast model of dynamic deformation based on time series analysis [J]. *Geomatics and Information Science of Wuhan University*, 2005, 30(6): 23-29.
- [10] 赵清峰.红松人工林树高生长的灰色预测[J].齐齐哈尔师范学院学报(自然学科版), 1996, 16(4): 56-61.
- ZHAO Q F. Gray prediction about height growth of Corean Pine in planted forests [J]. *Journal of Qiqihar Teachers' College (Natural Science)*, 1996, 16(4): 56-61.
- [11] 张智光, 陶冶.森林火灾受害面积的灰色预测模型的研究[J].林业科学, 1999, 35(5): 89-101.
- ZHANG Z G, TAO Y. A study of grey forecasting models of forest fire disaster area [J]. *Scientia Silvae Sinicae*, 1999, 35(5): 89-101.
- [12] 罗旭, 冯仲科, 李勇, 等.建筑变形信息系统中灰色预测理论的应用[J].哈尔滨工业大学学报, 2006, 38(9): 1 579-1 581.
- LUO X, FENG Z K, LI Y, et al. Application of gray predicting theory on buildings deformation information system [J]. *Journal of Harbin Institute of Technology*, 2006, 38(9): 1 579-1 581.
- [13] HURST H E. The long-term storage capacity of reservoirs [J]. *Transactions of the American Society of Civil Engineer*, 1951, 116: 770-780.
- [14] 苑莹, 庄新田.上海股票市场的标度特征[J].东北大学学报(自然科学版), 2006, 27(10): 1 177-1 180.
- YUAN Y, ZHUAG X T. On the scaling characteristics of Shanghai stock market [J]. *Journal of Northeastern University (Natural Science)*, 2006, 27(10): 1 177-1 180.

(责任编辑 李慧)