

不同坡向人工林红松木材碳素储存量的分形研究

秦磊¹, 郭明辉²

(1. 西南林业大学材料工程学院, 昆明 650224; 2. 东北林业大学材料科学与工程学院, 哈尔滨 150040)

[摘要] 本文以东北林业大学老山生态站阳坡和阴坡的人工林红松为研究对象, 基于分形理论, 从非线性角度出发, 对红松木材碳素储存量进行分形分析, 研究其规律性变化, 旨在明确不同地理位置间木材碳素储存能力的差异。研究表明, 老山生态站阳坡和阴坡红松木材碳素储存量的径向变异趋势相近; 阴坡的碳素储存能力高于阳坡; 阴坡红松幼龄材和成熟材碳素储存量的分形维数平均值明显高于阳坡, 其碳素储存量的梯度分布较阳坡更复杂, 且木材碳素储存效果明显优于阳坡。这为选择有利于提高木材碳素储存效果的人工林红松立地条件提供了理论依据。

[关键词] 木材; 人工林红松; 碳素储存量; 坡向; 分形

[中图分类号] S781.8 **[文献标识码]** A **[文章编号]** 1009-1742(2014)04-0034-06

1 前言

当前温室效应已成为国际社会公认的重大环境问题之一^[1]。自工业革命以来, 由于人类对化石燃料的过量使用和对森林的破坏性砍伐, 使温室气体在地球大气中积累, 导致陆地地表和海洋大气的气温不断上升^[2]。因此, 降低大气中主要温室气体二氧化碳的浓度是解决温室效应的主要途径。

木材来源于树干, 其主要构成元素中, 含碳 50%, 也就是说木材实质重量的一半就是碳元素^[3,4], 所以, 木材是一个巨大的碳素储存库, 研究木材的储碳功能极为必要。而木材的碳素储存量受树龄、遗传因素、环境因素等综合影响, 复杂化了木材碳素储存量的变异规律^[5]。而木材碳素储存量的变异就像弯曲的河流, 属于非线性的不可逆现象, 可以通过分形理论的研究方法, 从非线性角度对其进行准确描述和定量分析, 揭示各种复杂现象背后的规律性及局部和整体之间的本质联系^[6,7]。

本研究以东北林业大学帽儿山林场老山生态

站阳坡和阴坡的人工林红松木材为研究对象, 比较分析了其幼龄材和成熟材碳素储存量的径向变异规律; 并基于分形理论, 利用盒维数法, 研究了阳坡、阴坡两地的红松木材碳素储存量的分形维数及其与木材碳素储存功能的关系。这弥补了我国木材碳素储存研究的不足, 为选择高碳素储存量的人工林红松立地条件, 实现人工林红松的速生、优质和固碳功能提供了理论依据。

2 分形理论概述

2.1 分形理论的基本内涵

分形理论是美籍法国数学家 Mandelbrot 于 1975 年提出的^[8], Mandelbrot 提出将分形理论作为描述各种不规则现象的一种新方法; 它揭示了非线性系统中的有序性与无序性、确定性与随机性的统一问题, 及隐藏在复杂事物背后的有序性、规律性, 带给人们对整体与局部之间新的认识^[9]。

分形理论由于其研究对象有自相似性和曲折性两个必备特征, 能对非线性物体或系统进行

[收稿日期] 2013-12-03

[基金项目] 高等学校博士学科点专项科研基金(20110062110001)

[作者简介] 郭明辉, 1964 年出生, 女, 黑龙江哈尔滨市人, 教授, 博士, 主要研究方向为木材学、木材碳学、木材功能性改良、生物质复合材料等; E-mail: gmh1964@126.com

研究^[10]。同时,不管自然物体的构造如何复杂,分形理论都可以通过一个分形维数来表示和描述它的复杂性^[11]。

2.2 分形维数

在分形理论中,分形维数(D)是描述分形最重要的一个参数^[12]。在很多研究中都利用分形维数来定量表征一个分形集合的不规则程度或复杂性^[13],就是说,分形维数越大,研究对象越复杂。而分形图形一般都比较复杂,分形维数可以将分形图形的复杂性和不规则程度量化,这就是分形理论被广泛用于研究复杂物体的依据所在。

而且,分形维数与一般所说的维数不同,它可以是一个分数,也可以是一个无理数,由此可以说,某些极不规则的、复杂的平面曲线的分形维数在1和2之间,或者说,某些多层与多褶的曲面的分形维数在2和3之间,还可以定义直线上分形维数在0和1之间的尘埃。

测定分形维数的方法有很多,本研究中所采用的是比较直观和方便的一种,就是盒维数法(box dimension)^[14]。其具体计算方法如下。

选取边长为 r_m (m 取1,2,3,⋯, M ; $1/N \leq r_m \leq 1/2$)的小正方形去覆盖所研究的平面曲线,其中 N 为此曲线所采集的样点数。对于每个 r_m ,计算覆盖这个曲线所需要的小正方形的相应数目 N_m ,其数学表达式为

$$N(r) = r^{-Df} \quad (1)$$

式(1)中, Df 为对数坐标图的点在最小二乘法下所接近于的直线的斜率。

画出 m 取1,2,3,⋯, M 时,所对应的边长 r_m 与 N_m 的对数坐标图。其中,如果该对数坐标图的点在最小二乘法下接近于一条直线,那么说明所研究的曲线就是分形的,其斜率就是分形维数。

$$Df = \ln N(r) / \ln(1/r) \quad (2)$$

3 材料与方法

3.1 试验材料

试验材料采自东北林业大学帽儿山林场老山生态站阳坡和阴坡的人工林红松林内。其中,取样方法按照GB/T 1927—2009的有关规定进行。在每一株树木的胸高1.3 m处截取50 mm厚圆盘各一个,并标明南北方向和记号,以供试验研究之用。表1中列出了人工林红松的具体取样情况。

表1 红松的取样情况

Table 1 Sample collection of Pinus Koraiensis

地点	株数/株	树龄/a	平均树高/m	平均胸径/cm	初植密度/m	坡度	土壤类型
阳坡	5	31	13.0	22.6	1.5×1.0	坡中	白浆土
阴坡	5	31	12.8	21.2	1.5×2.0	坡中下	白浆土

3.2 木材碳素储存量计算方法

木材碳素储存量的计算方法^[15]为

$$C = R \times V \times n \times 1/2 \quad (3)$$

式(3)中, C 为木材碳素储存量; R 为胞壁率; V 为木材材积; n 为转化系数。若 C 的单位为g, V 的单位为 cm^3 ,则 n 为1;若 C 的单位为kg, V 的单位为 m^3 ,则 n 为 10^3 。

4 结果与分析

本研究首先将两地的木材碳素储存量径向变异规律进行比较分析,再从分形角度出发,为了使结果一目了然,分为幼龄材和成熟材做分析说明,分别通过生长轮中的早材、晚材和整个生长轮三部分逐步分析,通过盒维数法计算每部分碳素储存量的分形维数,然后进行对比分析,分析确定木材碳素储存效果较好的一处。其中,在幼龄材和成熟材的划分上,郭明辉教授研究得出,人工林红松幼龄材和成熟材的分界年限是第18年^[16],本研究在划分幼龄材和成熟材分界年限时将结合此结论综合考虑。

4.1 木材碳素储存量的径向变异比较

阳坡与阴坡两地的人工林红松木材样本由于在地理条件、生长环境及树高等方面的差异,其碳素储存量在试验检测值方面就存在着直观的差异。

如图1所示,自髓心向外开始,随树木不断生长,阳坡和阴坡的生长轮碳素储存量都逐渐增大,在第8年左右开始速度加快,当树木成熟后,其碳素储存量稳定了一段时间,慢慢地又都有下降的趋势,总体看,两地碳素储存量径向变异趋势相似;阳坡木材碳素储存量的最大值出现在第19年,为5.65 kg,阴坡木材碳素储存量的最大值出现在第18年,为5.98 kg,这与郭明辉教授提出的人工林红松幼龄材和成熟材的划分年限相近,故本研究选第19年和第18年分别作为阳坡和阴坡分形研究时幼龄材和成熟材的划分年限。

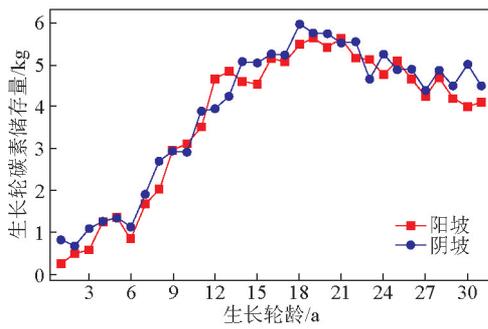


图1 阳阴坡生长轮碳素储量径向变异

Fig.1 Radial variation of growth ring carbon storage in sunny slope and shady slope

从图2、图3中可看出,阳坡、阴坡的早晚材碳素储存量的变化规律相似,均自髓心向外至第18年左右呈波动性增加,增加幅度较明显,从第19年左右开始即树木成熟后有减小趋势,最后趋于平稳状态。

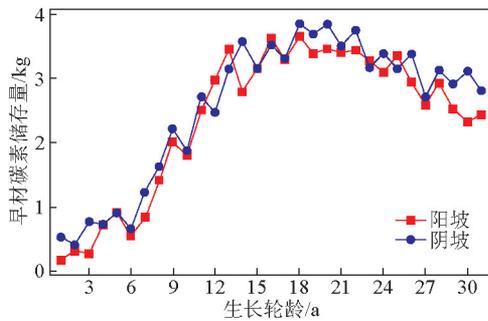


图2 阳阴坡早材碳素储量径向变异

Fig.2 Radial variation of earlywood carbon storage in sunny slope and shady slope

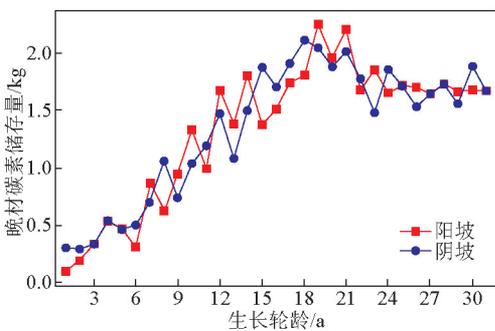


图3 阳阴坡晚材碳素储量径向变异

Fig.3 Radial variation of latewood carbon storage in sunny slope and shady slope

总体分析得出,阴坡红松的早材碳素储量基本略高于阳坡,而其晚材和生长轮碳素储量与阳

坡均成交替状态,且阴坡的生长轮碳素储量在第14年之后略高于阳坡。而且,从碳素储存量的试验检测值方面来看,阴坡的碳素储存能力高于阳坡。

4.2 幼龄材碳素储存量的分形分析

在树木生长、发育的早期,形成层原始细胞还没有完全成熟时,所形成的木材就是幼龄材,它的生长能力比较旺盛。老山生态站阳坡和阴坡人工林红松幼龄材碳素储量曲线的分形维数分析见表2。

表2 红松幼龄材碳素储量曲线的分形维数

Table 2 Fractal dimension of curve of Pinus Koraiensis juvenile wood carbon storage

地点	指标	标准差/kg	相关系数	分形维数
阳坡	生长轮碳素储量	0.164	0.996 4	1.062 8
	早材碳素储量	0.157	0.996 0	1.011 8
	晚材碳素储量	0.168	0.997 9	1.091 1
阴坡	生长轮碳素储量	0.169	0.995 4	1.090 9
	早材碳素储量	0.156	0.987 8	1.003 8
	晚材碳素储量	0.170	0.994 5	1.100 3

4.2.1 生长轮碳素储量

由表2可见,所选红松幼龄材碳素储存量的分形维数分布在1.003 8~1.100 3,再结合图4中阳坡和阴坡幼龄材部分的生长轮碳素储量曲线盒维数的点分布进行分析,其中阳坡幼龄材生长轮碳素储存量的分形维数为1.062 8,阴坡幼龄材生长轮碳素储存量的分形维数为1.090 9,可见,阴坡的幼龄材生长轮碳素储量分形维数略微大于阳坡;而且,其线性相关系数,阳坡为0.996 4,阴坡为0.995 4,相关性均非常显著。

4.2.2 早材碳素储量

由表2中红松幼龄材碳素储量曲线的分形维数及图5中阳坡和阴坡幼龄材早材部分碳素储量曲线盒维数的点分布图进行分析,可以看出,阳坡幼龄材早材碳素储存量的分形维数为1.011 8,阴坡幼龄材早材碳素储存量的分形维数为1.003 8,阳坡的幼龄材早材碳素储存量的分形维数略大于老山;而且,其线性相关系数,阳坡为0.996 0,阴坡为0.987 8,相关性均非常显著。

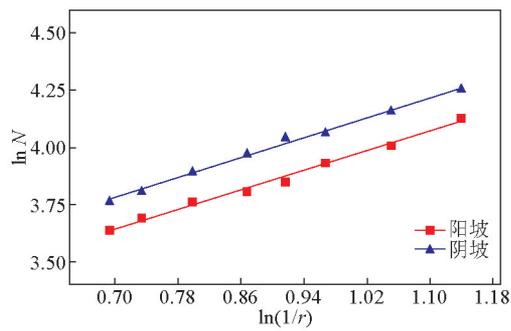


图4 阳阴坡幼龄材生长轮碳素储存量曲线盒维数的点分布

Fig.4 Box dimension's point distribution of curve of juvenile growth ring carbon storage in sunny slope and shady slope

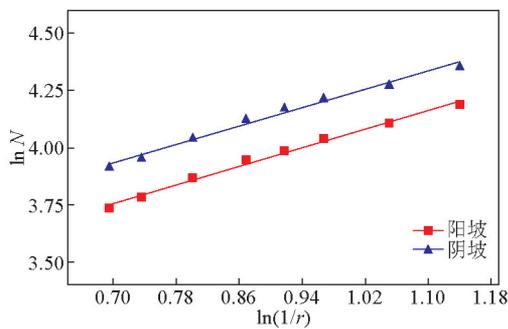


图5 阳阴坡幼龄材早材碳素储存量曲线盒维数的点分布

Fig.5 Box dimension's point distribution of curve of juvenile earlywood carbon storage in sunny slope and shady slope

4.2.3 晚材碳素储存量

由表2中红松幼龄材碳素储存量曲线的分形维数及图6中阳坡和阴坡幼龄材晚材部分碳素储存量曲线盒维数的点分布图进行分析,阳坡幼龄材晚材的碳素储存量的分形维数为1.091 1,阴坡幼龄材晚材的碳素储存量的分形维数为1.100 3,所以,阴坡的幼龄材晚材碳素储存量的分形维数大于阳坡;而且,其线性相关系数,阳坡为0.997 9,阴坡为0.994 5,相关性均非常显著。

通过对阳坡和阴坡的幼龄材部分碳素储存量的分形维数进行对比分析,从中得出,阳坡幼龄材早材部分的分形维数略大于阴坡,而幼龄材生长轮碳素储存量和晚材部分的碳素储存量均小于阴坡;而且,在一定范围内,分形维数越小,其内部复杂性和不规则性越小,可见,阳坡幼龄材碳素储存量的不规则性小于阴坡,其梯度分布较阴坡的变化幅度小。综合分析得出,就阳坡和阴坡红松幼龄材碳素

储存效果来说,阳坡早材明显优于阴坡,而晚材和整个生长轮则略劣于阴坡。

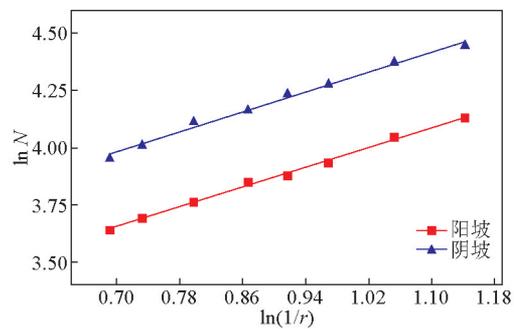


图6 阳阴坡幼龄材晚材碳素储存量曲线盒维数的点分布

Fig.6 Box dimension's point distribution of curve of juvenile latewood carbon storage in sunny slope and shady slope in sunny slope and shady slope

4.3 成熟材碳素储存量的分形分析

在树木生长过程中,形成层原始细胞分裂速度减慢时,树木的生长渐渐趋于稳定,此时所形成的木材就是成熟材,它正是由形成层生理上成熟的原始细胞所形成的。老山生态站中阳坡和阴坡处的人工林红松成熟材碳素储存量曲线的分形维数分析见表3。

表3 红松成熟材碳素储存量曲线的分形维数

Table 3 Fractal dimension of curve of Pinus Koraiensis mature wood carbon storage

地点	指标	标准差/kg	相关系数	分形维数
阳坡	生长轮碳素储存量	0.168	0.996 4	1.085 0
	早材碳素储存量	0.165	0.995 0	1.066 4
	晚材碳素储存量	0.170	0.996 9	1.103 9
阴坡	生长轮碳素储存量	0.171	0.982 9	1.102 7
	早材碳素储存量	0.170	0.994 9	1.096 7
	晚材碳素储存量	0.176	0.997 8	1.138 1

4.3.1 生长轮碳素储存量

由表3可见,所选红松成熟材碳素储存量的分形维数分布在1.066 4~1.138 1,再结合图7中阳坡和阴坡成熟材部分的生长轮碳素储存量曲线盒维数的点分布进行分析,其中阳坡成熟材生长轮碳素储存量的分形维数为1.085 0,阴坡成熟材生长轮碳素储存量的分形维数为1.102 7;可见,阴坡的成熟

材生长轮碳素储存量分形维数高于阳坡,其线性相关系数,阳坡为0.996 4,阴坡为0.982 9,相关性亦非常显著。

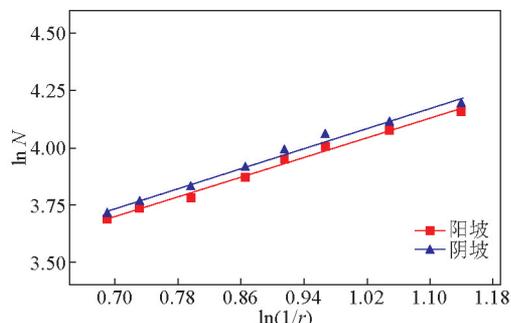


图7 阳阴坡成熟材生长轮碳素储存量曲线盒维数的点分布

Fig.7 Box dimension's point distribution of curve of mature growth ring carbon storage in sunny slope and shady slope in sunny slope and shady slope

4.3.2 早材碳素储存量

由表3中红松成熟材碳素储存量曲线的分形维数及图8中阳坡和阴坡成熟材早材部分碳素储存量曲线盒维数的点分布图进行分析,可以看出,阳坡成熟材早材碳素储存量的分形维数为1.066 4,阴坡成熟材早材碳素储存量的分形维数为1.096 7,阴坡的成熟材早材碳素储存量的分形维数明显大于阳坡;而且,其线性相关系数,阳坡为0.995 0,阴坡为0.994 9,相关性均非常显著。

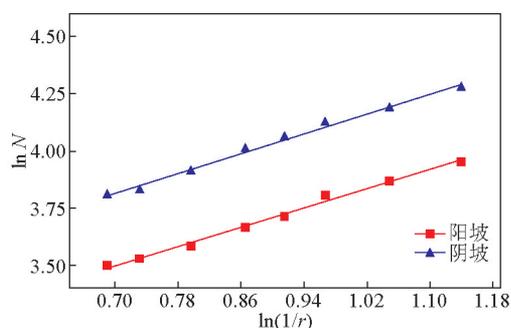


图8 阳阴坡成熟材早材碳素储存量曲线盒维数的点分布

Fig.8 Box dimension's point distribution of curve of mature earlywood carbon storage in sunny slope and shady slope in sunny slope and shady slope

4.3.3 晚材碳素储存量

由表3中红松成熟材碳素储存量曲线的分形维数及图9中阳坡和阴坡成熟材晚材部分碳素储存量

曲线盒维数的点分布图进行分析,阳坡成熟材晚材碳素储存量的分形维数为1.103 9,阴坡成熟材晚材碳素储存量的分形维数为1.138 1,所以,阴坡的成熟材晚材碳素储存量的分形维数大于阳坡;而且,其线性相关系数,阳坡为0.996 9,阴坡为0.997 8,相关性均非常显著。

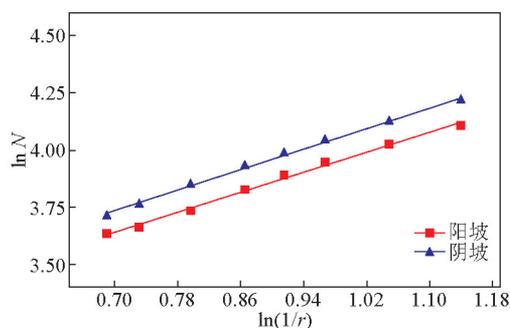


图9 阳阴坡成熟材晚材碳素储存量曲线盒维数的点分布

Fig.9 Box dimension's point distribution of curve of mature latewood carbon storage in sunny slope and shady slope in sunny slope and shady slope

通过对阳坡和阴坡成熟材部分的碳素储存量分形维数进行对比分析,可以看出,阴坡成熟材各部分的碳素储存量的分形维数均大于阳坡。可见,阴坡成熟材碳素储存量的不规则性大于阳坡,其梯度分布较阳坡的变化幅度大。总体分析得出,就阳坡和阴坡红松成熟材碳素储存效果来说,阴坡优于阳坡。

再对阳坡、阴坡处的红松幼龄材和成熟材碳素储存量的分形维数求平均值,得出,阴坡(1.088 8)高于阳坡(1.070 2),由此可见,不同坡向之间的碳素储存量分形维数存在差异,阴坡的红松木材碳素储存量的梯度分布较阳坡复杂,因此综合分析得出,阴坡处的红松木材碳素储存效果优于阳坡。

5 结语

本研究通过分形理论,对老山生态站中阳坡和阴坡人工林红松木材碳素储存量进行分形分析,研究和讨论分形维数与木材碳素储存量之间的复杂联系,得出以下研究结论。

1)老山生态站阳坡和阴坡红松木材碳素储存量的径向变异趋势相一致,阴坡红松的早材碳素储存量基本略高于阳坡,而其晚材和生长轮碳素储存量与阳坡均成交替状态,且阴坡的红松生长轮碳素

储存量在第14年之后略高于阳坡。从碳素储存量的试验检测值来分析,阴坡的碳素储存能力高于阳坡。

2) 阴坡红松幼龄材和成熟材碳素储存量的分形维数平均值高于阳坡,其碳素储存量分形维数存在差异,碳素储存量的梯度分布较阳坡的变化幅度大,阴坡碳素储存效果优于阳坡。

本研究明确了不同地理位置间木材碳素储存能力的差异,为选择有利于提高木材碳素储存效果的人工林红松立地条件提供了理论依据。对木材碳素储存量的分形仍需进一步研究。

参考文献

- [1] 方精云. 全球生态学[M]. 北京: 高等教育出版社, 2000.
- [2] Guo L L, Han S J. Long-term forest management and timely transfer of carbon into wood products help reduce atmospheric carbon [J]. *Ecological Modelling*, 2009, 220: 1719-1723.
- [3] 李 坚. 木材的碳素储存与环境效应[J]. *家具*, 2007, 3(157): 32-36.
- [4] 陈红林, 曹 健, 黄发新, 等. 提高木材碳汇的林木育种技术初

探[J]. *湖北林业科技*, 2008, 6(154): 42-46.

- [5] 陈广胜, 郭明辉, 黄 冶. 不同初植密度兴安落叶松人工林木材解剖特征的径向变异[J]. *东北林业大学学报*, 2001, 29(2): 12-16.
- [6] 费本华. 分形理论在木材科学与工艺学中的应用[J]. *木材工业*, 1999, 13(4): 27-28.
- [7] 辛厚文. 分形理论及其应用[M]. 合肥: 中国科学技术大学出版社, 1993.
- [8] Mandelbrot B B. *Fractal: Form, Chance, and Dimension* [M]. San Francisco: Freeman, 1977.
- [9] Mandelbrot B B. *The Fractal Geometry of Nature* [M]. Oxford: Macmillan, 1983.
- [10] Mandelbrot B B, Passoja D E, Paullay A J. Fractal character of fracture surfaces of metals [J]. *Nature*, 1984, 308: 721-722.
- [11] 褚武扬. 材料科学中的分形[M]. 北京: 化学工业出版社, 2004.
- [12] 江泽慧, 姜笑梅. 木材结构与其品质特性的相关性[M]. 北京: 科学出版社, 2008.
- [13] 谢和平, 薛秀谦. 分形应用中的数学基础与方法[M]. 北京: 科学出版社, 1997.
- [14] 江泽慧, 费本华, 阮锡根. 木材密度曲线的分形分析[J]. *东北林业大学学报*, 2000, 28(4): 1-3.
- [15] 郭明辉, 李 坚, 关 鑫. 木材碳学[M]. 北京: 科学出版社, 2012.
- [16] 郭明辉. 木材品质培育学[M]. 哈尔滨: 东北林业大学出版社, 2001.

Fractal study on wood carbon storage of man-planted *Pinus Koraiensis* under different exposure

Qin Lei¹, Guo Minghui²

(1. College of Material Engineering, Southwest Forestry University, Kunming 650224, China; 2. College of Material Science and Engineering, Northeast Forestry University, Harbin 150040, China)

[Abstract] The paper took the man-planted *Pinus Koraiensis* of Northeast Forestry University Laoshan Forest Farm in sunny slope and shady slope as research object, based on the fractal theory, studied the *Pinus Koraiensis* wood carbon storage through fractal analysis from the nonlinear perspective, and discussed the regular change. It aimed to ensure the difference among the capacity of wood carbon storage under different geographical location. The research results showed that, the radial variation trend of *Pinus Koraiensis* carbon storage of Laoshan Forest Farm in sunny slope was close to the shady slope, and the carbon storage capacity of shady slope was higher than that of sunny slope. The mean fractal dimension of juvenile wood and mature wood carbon storage of shady slope was obviously higher than that of sunny slope, its gradient distribution of carbon storage was more complex than sunny slope and the effect of carbon storage was superior to sunny slope. Thus, it would provide the theoretical basis for choosing the site conditions of man-planted *Pinus Koraiensis* which was beneficial to improve the wood carbon storage effect.

[Key words] wood; man-planted *Pinus Koraiensis*; carbon storage; exposure; fractal