

# 分形理论在木材科学领域中的应用

罗 蓓 赵广杰

(北京林业大学材料科学与技术学院)

**摘要:**阐述了分形理论的基本概念、分形结构的主要特征以及分维的计算方法,总结了分形理论在木材解剖学、物理学、力学、无损检测及环境学中的应用情况,讨论了利用分形理论对木材细胞壁中纳米纤维的超微构造进行定量表征的可行性。结果表明:木材细胞壁中不同尺寸纤维的结构特征和组合排布关系,符合分形体系所要求的无特征长度和自相似性两大特征,可应用分形的方法对木材细胞壁中纳米纤维的微观构造进行定量表征。

**关键词:**分形理论;木材科学;纳米纤维;超微构造;定量表征

**中图分类号:**S781.3 **文献标志码:**A **文章编号:**1000-1522(2010)03-0204-05

LUO Bei; ZHAO Guang-jie. **Application of fractal theory on wood science.** *Journal of Beijing Forestry University* (2010) **32**(3) 204-208 [Ch, 44 ref. ] College of Materials Science and Technology, Beijing Forestry University, 100083, P. R. China.

This paper describes the basic concepts of fractal theory, main characteristics of its structure, dimensional calculation methods and its application on wood anatomy, wood physics, wood mechanics, non-destructive examination and wood environics. It also discusses the feasibility of using fractal theory to describe the ultrastructure of nano-fibers in wood cell wall quantitatively. The results show that the structural characteristics and arrangement relationships of fibers of different sizes in wood cell wall possess two typically properties of fractal system, i. e., no characteristic length and self-similarity. Hence, fractal theory can be used to describe the ultrastructure of nano-fibers in wood cell wall quantitatively.

**Key words** fractal theory; wood science; nano-fibers; ultrastructure; quantitative characterization

20 世纪 70 年代, Mandelbrot 创建了分形理论体系,用定量表征自然界中传统欧式几何学不能描述的复杂而有规则的几何现象,揭示了非线性系统中有序和无序的统一、确定性和随机性的统一问题<sup>[1-3]</sup>。到了 20 世纪 80 年代后期,分形理论才开始应用于木材科学研究领域,主要涉及对木材表面和水进入木材过程的分析<sup>[4-6]</sup>。

本文总结了近年来分形理论在木材解剖构造、物理特性、力学行为、无损检测和环境学中的研究进展,为木材构造、材性及加工工艺的研究提供新思路。

## 1 分形理论概述

分形几何理论主要用于描述自然界一类极其零碎复杂的现象所具有的统计意义上的规律性。分形

(fractal) 的概念在 20 世纪 70 年代由法国数学家 Mandelbrot 提出,用于揭示非线性系统中有序与无序、确定性与随机性的统一问题<sup>[1]</sup>。一般而言,分形结构具有 2 个明显的特征:自相似性 (self similarity) 和分数维数 (no smoothing)<sup>[2]</sup>。所谓自相似性指的是事物的整体和局部具有统计意义上的相似性质,当重复放大分形结构的细部时,可以看到本身相似的结构再度出现。分形结构的自相似程度和不规则程度是用分形维数  $D$  来描述的<sup>[7]</sup>,即

$$D = \lg b / \lg a$$

式中: $a$  为原有单位与新单位的比, $b$  为 1 个原单位所度量的图形用新单位度量时所具有的个数。

其特点是  $D$  不是一个整数,而是个分数,当  $D$  为整数时则与欧氏几何的空间维数等价。

收稿日期:2009-10-20

基金项目:国家自然科学基金项目(30871967)。

第一作者:罗蓓,博士生。主要研究方向:木材科学。电话:010-62337751 Email: yizhuch@163.com 地址:100083 北京市清华东路 35 号北京林业大学材料科学与技术学院。

责任作者:赵广杰,博士,教授。主要研究方向:木材科学。电话:010-62337751 Email: zhaows@bjfu.edu.cn 地址:同上。

本刊网址: <http://www.bjfujournal.cn>; <http://journal.bjfu.edu.cn>

## 2 分形理论在木材科学中的应用

### 2.1 木材解剖构造的分形特征

#### 2.1.1 宏观构造

木材材质的变异性会受到很多因素的交互影响,如遗传基因、立地条件、气候因子、树龄等,是一种复杂多变的现象。在以往的研究中,研究者们大都采用线性回归的方法来描述木材材质沿不同方向上的变异性,但是这并不符合材质变异本身这一非线性过程的特点<sup>[8-10]</sup>。而分形理论则是定量表征非规整性复杂形状的有力工具,赵西平等<sup>[11]</sup>采用“计盒维数法”定量描述了人工林落叶松(*Larix gmelinii*)早材宽度时间序列的非线性特征。证实尽管幼龄材和过渡带早材宽度的平均值相近,但由髓心向外早材宽度曲线的分维值却在逐渐增大,反映出2个区域早材宽度波动程度的差异,从而将过渡区从幼龄材中单独划分出来是更为合理的做法。但在考察曲线分维的影响因素时,他们的结论与江泽慧等<sup>[12]</sup>同样采用“计盒维数法”分析银杏(*Ginkgo biloba*)密度曲线的分形特征时所得的结论不太一致。江泽慧等<sup>[12]</sup>在研究中发现,木材径向密度曲线的分维值除了受测定区域内密度的最大值、最小值、波动程度和生长轮宽窄的影响外,还与该区域所囊括的生长轮数目有关,但这种规律性在同一树种不同产地的样本中存在稍许差异。

#### 2.1.2 微观构造

木材是诸多空腔细胞集合而成的一种多孔介质材料。在以往研究中,研究者总是通过简化的几何体,如矩形、圆筒形等来模拟纤维的排列,将其看作一种均匀分布的连续介质,在此基础上讨论微观构造与物性间的相关性。但木材的内部构造非常复杂,纤维的形状、堆积与“容积平均”的理想假设存在较大差异。赵荣军等<sup>[13]</sup>应用杨树(*Populus* spp.)木材横切面的细胞直径分布来描述木材横切面空隙分布的分形特征,导出了不同高度处木材细胞腔直径分布的 $D$ 在1.24~1.31之间。且随着树木高度的增加,导管组织比量降低,纤维等小腔径空隙比重增大,腔径分布的 $D$ 也随之上升,相应的木材宏观物理性质,如导湿性、易染性等也会发生改变。已有研究表明,采用分形的方法来表征多孔介质材料的微观特征,从而建立其分形维数与导热、导湿等物理特性间的相关模型,其计算结果在一定条件下具有相当的可靠性<sup>[14]</sup>。

#### 2.1.3 超微构造(纤维)

天然纤维与合成纤维在本质上是有所区别的,合成纤维中的超细丝、竹节丝、异截面丝、异收缩丝等

都是一维、二维甚至三维的整数维变化,而天然纤维则是从微纤丝等基本单元的扭曲开始,经过一级级的自相似放大,形成纤维宏观上的扭曲结构,符合分形理论的分形维变化<sup>[15-16]</sup>。Li等<sup>[17]</sup>运用密度泛函数理论结合核磁共振谱研究了蛋白纤维化过程中晶胞大分子的化学位移,认为在纳米尺度上丝素蛋白的构象转变机理其实是一个成核依赖性的纤维化聚集过程。

棉纤维的微观结构与木质纤维较为相似,都由数层细胞壁围绕着中间的空腔构成一个基本单元,其扭曲的源头在 $S_1$ 和 $S_2$ 层。宏观棉纤维的分形维数约为1.005 17,比羊毛和蚕丝都大,因此棉纤维具有较好的弹性。从线密度的角度对羊毛和棉花进行分维计算可知,羊毛纤维的线密度分形维数约为0.180 6,具有十分细腻的自相似分形结构,在各级尺寸的微沟纹纤间均充满着低密度的基质,以实现自然扭曲应力的逐级传递。与之不同的是,棉纤维的自扭曲结构更为致密,各级微纤间的空隙所占比例要小得多,因此强度更大<sup>[16]</sup>。马晓军等<sup>[18]</sup>测算了木材细胞壁 $S_1$ 和 $S_2$ 层中纳米纤维的扭曲分形维数分别为2.76和1.02,反映出不同细胞壁层纤维扭转程度的不同,从而导致相应壁层在刚性和弹性上的差异。

### 2.2 木材物理性质的分形特征

#### 2.2.1 干缩湿胀与空隙结构

分形理论在木材物理性质方面的应用主要涉及分析木材表面、木材空隙结构、水进入木材的过程以及木材干缩等。费本华等<sup>[19]</sup>曾用银杏和板栗(*Castanea mollissima*)两种木材试样在同一条件下的干缩试验,建立了质量和体积变化的双对数关系,解析木材多孔性的分形特征。结果表明:随着温度的升高,木材的空隙度增大,这由它们各自Hausdorff分维值的变化可以直观地反映出来;通过Hausdorff分维值的变化,还可以预测干燥过程中材料各级空隙中不同性质水分的逸散特征。接下来该课题组又进一步测算了气干至绝干过程中,银杏和板栗分维值的变化分别在2.105 7~2.875 7和2.008 0~2.923 8之间。但在不同的升温阶段,银杏内部空隙分维值的变化始终小于板栗,说明水分移动与蒸发导致前者孔隙变化复杂程度比后者低,干燥时缺陷产生的可能性小。到了干燥后期,木材孔隙中水分迁移的路径增长阻力加大,2种树种分维值的变化均趋于稳定。可依据木材空隙分维值的变化来预测木材的干燥程度,为进一步制订合理的干燥工艺和基准提供了新思路<sup>[20]</sup>。

### 2.2.2 吸湿解吸过程

纤维在空气中吸收或放出水蒸气的能力称吸湿解湿性。Hatzikiriakos<sup>[4]</sup>率先运用分形理论研究了木材的等温吸附过程,计算了不同吸附温度下,木材的分形维数值在2.5~2.8之间。随后,Fan<sup>[6]</sup>和Hao<sup>[21]</sup>等相继测算了不同树种吸附作用和解吸作用的分形维数值,大致在2.4~2.5之间。进一步验证了木材物质表面具备分形特征,并建立了木材吸湿过程吸着等温线的动态分形模型,讨论了分形维数与含水率之间的关系。Jose<sup>[5]</sup>和Cao<sup>[22]</sup>等也提出,同经典的热力学计算方法相比,分形几何解析对木材吸湿、解吸过程的热力学计算更为简便、准确。

### 2.3 木材力学行为的分形特征

Mandelbrot等<sup>[3]</sup>采用“小岛法”对金属材料冲击断面的分形特征进行度量,分析了冲击断口的分形维数与冲击功之间的线性关系,并提出将材料断面的分维作为评价材料性能的新指标。这给了木材科学工作者很大的启发,过去研究者们大都采用传统的断裂试验方法,定量表征木材表面断裂形态时总是缺乏规律性<sup>[23-24]</sup>,因此重新选择一种合理的定量表征手段成为研究的关键。费本华等<sup>[25-27]</sup>采用“计盒维数法”描述了裂纹应力场的分形特征。结果表明:木材的断裂裂纹具有明显的分形规律,在一定标度范围内,大小不同的裂缝发育区在形态上和组合分布上都具有统计意义上的自相似特性;随着断裂过程的进行,裂纹的分形维数由直线上升转为稳定的波动,反映出木材这种强烈非均质材料断裂行为的复杂性。而木材与金属铝在近裂纹尖端和远离尖端等处应力线分形维数上的差异,也显示出材料的非均质性对断裂应力场的影响。通过研究木材断口面积在空间位置上的变化规律来描述断口的形态特征,所测得的断口截面变化维数的形式与内涵都与SIM法测出的断口分形维数相似。但是因为在制样的过程中采用了石蜡包埋技术,需对木材进行一定的软化,在切片时部分木材产生了新的裂隙,无法准确测量断口截面的周长。随后,该研究小组采用CT技术对木材断口的形貌进行扫描,很好地解决了这一问题。同时利用图像处理技术来分析木材断口的形态特征,发现不同树种的木材,其断口截面的分形维数值存在显著的差异。研究断口截面分形维数的变化,能够很好地揭示木材力学和微力学的内在联系。

### 2.4 木材无损检测中的分形特征

#### 2.4.1 表面缺陷识别

木材无损检测中最常见的方法是采用X射线照射被检木材,材质不同的区域对X射线的吸收强

度也不同,根据X射线穿透木材后能量衰减形成的谱图可以判断木材中缺陷存在的区域及遭破坏的程度<sup>[28]</sup>。随着计算机技术的发展和分形理论在图像处理领域应用的进一步成熟,研究者试图采用分形的方法从被检木材的X射线图像数据中提取缺陷部分所隐含的特征信息,再用分形维数的大小来定量描述原木图像的不规则程度。谢永华等<sup>[29]</sup>将图像处理中的小波分析与分形算法相结合搭建木材表面缺陷识别系统,对表面常见的节子、腐朽、虫眼、夹皮4类缺陷的识别准确率可达96.5%。张延林等<sup>[30]</sup>的实验以小波多分辨率下自相关分形维数作为木材缺陷类型识别的特征量,上述4种缺陷作为识别类型输出。结果表明:特征数据与选择特征量时的理论依据基本一致,目标输出的相关系数均达到0.9以上。采用小波多分辨率的分形维数作为BP神经网络的输入进行分类,算法具有较强的适应能力。

#### 2.4.2 内部腐朽、漏节

在图像处理体系中,一幅图像同一区域内相同灰度具有统计意义上的自相似性,因而可以用分形理论对其进行定量表征。在图像的边界区域其分形维数值会随着灰度值的突变而突变,在此基础上只要把分维值超出理论取值区域的点的集合求出来,就能准确定位图像的边缘区域<sup>[31]</sup>。戚大伟等<sup>[32]</sup>采用“计盒维数法”测算了原木漏节X射线图中漏节边缘的分维值大约在1.400~1.900之间,均低于图像中正常部分的分维值,因此图像的分维值可以作为区分背景部分和边缘部分的基准。与传统的sobel算法和canny算法相比,计算分维的方法能更加精确的把漏节边缘与正常材部分区分开来,且子区域分割越细致、边缘越精确。

### 2.5 木材环境学的分形特征

#### 2.5.1 纹理的灰度图像

多年来木材研究者们一直试图寻找一种定量描述木材纹理的新指标,并希望在此基础上推进木材的数字化识别技术。早在1984年,美国的Pentland等<sup>[33]</sup>就已提出大多数自然物体的表面在空间上都是分形的,则由它产生的灰度图像也具有分形的性质,并证明了大多数自然物投影成的灰度图像是具有分形特征的灰度表面,这为分形理论在图像信息提取中的应用奠定了基础。分形维数的计算有很多种方法,Sarker等<sup>[34]</sup>的经验表明,在图像处理中“计盒维数法”兼顾效率与可靠性,具有更强的可操作性。

任宁等<sup>[35]</sup>在二值图像分形维数测算的基础上对“计盒维数法”进行了改进,将图像视作三维空间

中的1个曲面, $X$ 、 $Y$ 分量对应于图像各个像素点的二维坐标, $Z$ 分量对应于图像像素点的灰度值,用“计盒维数法”计算了图像的分维值。但是当曲面的分维值很高时,会产生较大的误差,因此研究人员采用微分“计盒维数法”对测算结果进行修正,提高了纹理特征选取的精确性。计算出的分形维数值能够达到基于共生矩阵、马尔可夫随机场和频谱3种模型的能力。王晗等<sup>[36]</sup>在图像像素灰度值的取值方法上做了进一步的改进。若图像某一像素点的灰度值比所属窗口的灰度平均值大,则累加其灰度值为 $\max$ ,反之则累加其灰度值为 $\min$ 。用 $\max$ 和 $\min$ 代替Sarkar算法中的最大值和最小值,可使分形维数拟合的精确性得到很大的提高。

### 2.5.2 纹理的相似度测量法

自然界中很多视觉上差别很大的纹理却具有相似的分形维数,且不具方向性。刘泓等<sup>[37]</sup>采用改进的“计盒维数法”估计分形维数时发现仅用1个分形维数特征是无法对纹理进行分类的,也就是说单一的分形维数不足以描述纹理的全部特征。根据这一问题,赵莹等<sup>[38]</sup>定义了一种新的相似度测量方法,采用归一化切分方法作为分割策略。通过计算图像的局部分形维数,来提高特征空间中数据点分类的精确性。同时从方向性、周期性和随机性这3个维度对纹理进行描述,提取出图像中具有尺度性、方向性的分形特征。对比试验结果表明,该方法能够提高特征空间中数据点的类内紧致性,提高类内相似性,降低类间的相似性,从而产生更为清晰的类间边缘。

### 2.5.3 材表颜色

已有的基于边缘检测、区域生长和色彩滤波等技术,大都只针对灰度级别的对象,而真实世界中的对象却是丰富多彩的,采用分形理论表征木材表面颜色的变异,能更有效地描述对象的纹理特征<sup>[39]</sup>。Liu等<sup>[40]</sup>将木材表面的颜色变异用三棱镜表面积法计算的分形维数值来表征。结果表明针、阔叶树材3种基本色的分维值差异显著。木材的色变特征是由它的3种基本色分维和顺纹分维共同作用的结果,因此只要测量沿纹理和某单元色的分维就可以估算木材表面局部或整体的颜色变异。总的来说,分形特征能够综合体现几个常规纹理的特征,使常规方法需要提取的众多纹理特征可以通过少数几个分形特征就能表达,简化了纹理分析;同时使木材纹理的复杂性、随机性等难于描述的问题得以解决。

## 3 木材中的纳米分形纤维

以经典的管胞和木纤维细胞壁模型为例,木材

细胞壁由初生壁、次生壁S1、S2和S3层组成,其厚度在70~4300nm之间,由它们层层环绕组装成的细胞壁可以看作是1个纳米圆筒<sup>[41]</sup>。在Goring<sup>[42]</sup>、Westermarck<sup>[43]</sup>等提出的细胞壁断续层构造模型中,由木质素和半纤维素复合而成的Matrix部分宽约3.5nm,镶嵌于Matrix基质中的纤维素微纤丝宽约7~10nm、长约15~20nm,均属于纳米数量级。就纳米纤维的定义而言,一般指直径在1~100nm尺度范围内的超微细纤维,木材细胞壁中的微纤丝、由几束微纤丝聚集而成的纤维都属于纳米纤维的范畴<sup>[41]</sup>。通过偏光镜的观察,木材细胞壁中的纤维素存在双折射螺旋结构,这是细胞壁中真正的纳米级分形扭曲的源头。约40条左右大致平行的纤维素分子链组成了细胞壁中最小的结构单元——基本纤丝。基本纤丝之间同样存在与纤维素分子类似的组合分布关系,经过逐级放大形成1个分形自嵌套体系。可见,木材细胞壁满足了分形体系所要求具备的无特征长度和自相似性两大特征,满足进行木材细胞壁中纤维分形结构研究的基本条件<sup>[44]</sup>。

## 4 结 论

分形理论虽然在木材科学研究领域中起步较晚,还存在着许多不足,比如对分形定义的理解尚存在争议,对分形维数测量方法的可信度论证不足等,但已显示出强劲的发展潜力,为以往林业科学、木材科学、纤维科学等非线性领域中用常规线性方法难以解决的问题提供了一套很好的分析工具。作为一种天然的纤维资源,木材是国民经济的重要组成部分,独特的循环再生性使其具有非常丰富的储备量,可分解、回收利用的特性使其具有生物质资源可持续发展的显著特征。因此,研究木材细胞壁中纳米纤维的结构和特征,对于提高木材的附加值、保护和发展木材资源,对于我国全面实现可持续发展目标、用生物质资源代替石化资源的国家发展战略的实施,具有十分深远的影响。

### 参 考 文 献

- [1] MANDELBROT B B. *Fractal: form chance and dimension* [M]. San Francisco: Freeman, 1977.
- [2] MANDELBROT B B. *The fractal geometry of nature* [M]. San Francisco: Freeman, 1982.
- [3] MANDELBROT B B, PASSOJA D E, PAULLAY A J. Fractal character of fracture surfaces of metals [J]. *Nature*, 1984, 308: 721-722.
- [4] HATZIKIRIAKOS S G, AVRAMIDIS S. Fractal dimension of wood surfaces from sorption isotherms [J]. *Wood Science and Technology*, 1994, 28(4): 275-284.

- [5] JOSE A R, PAULO R C G. The fractal nature of wood revealed by water absorption [J]. *Wood and Fiber Science*, 1997, 29(4): 333–339.
- [6] FAN K, HATZIKIRIAKOS S G, AVRAMIDIS S. Determination of the surface fractal dimension from sorption isotherms of five softwoods [J]. *Wood Science and Technology*, 1999, 33(2): 139–149.
- [7] 张济忠著. 分形[M]. 北京: 清华大学出版社, 1995.
- [8] DONALDSON L A, CROUCHER M, UPRICHARD J M. Clonal variation of wood chemistry variables in radiata pine (*Pinus radiata* D. Don.) wood [J]. *Holzforschung*, 1997, 51(6): 537–542.
- [9] ZHANG S Y. Variations and correlations of various ring width and ring density features in European oak: Implications in dendroclimatology [J]. *Wood Science and Technology*, 1997, 31(1): 36–72.
- [10] 符韵林, 徐峰, 唐黎明, 等. 南带产区不同立地类型间的杉木木材解剖[J]. 北京林业大学学报, 2005, 27(1): 10–13.
- [11] 赵西平, 郭明辉, 闫丽, 等. 人工林落叶松木材早材宽度径向变异的分形分析[J]. 东北林业大学学报, 2005, 33(6): 47–51.
- [12] 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.
- [13] 赵荣军, 费本华, 张波. 杨树木材细胞腔径分布的分形表征[J]. 南京林业大学学报(自然科学版), 2008, 32(1): 133–135.
- [14] 俞自涛, 胡亚才, 田甜, 等. 木材横纹有效导热系数的分形模型[J]. 浙江大学学报(工学版), 2007, 41(2): 351–355.
- [15] 徐向春, 仲蕾兰. 吸湿性涤纶竹节丝的结构与性能研究[J]. 中国纺织大学学报, 1997, 23(5): 21–26.
- [16] 高绪珊, 董俨, 庄毅, 等. 天然纤维的分形结构和分形结构纤维的开发[J]. 合成纤维工业, 2000, 23(4): 35–38.
- [17] LI G Y, ZHOU P, SHAO Z Z, et al. The natural silks spinning process: A nucleation dependent aggregation mechanism [J]. *Eur J Biochem*, 2001, 268: 6600–6606.
- [18] 马晓军, 赵广杰, 马尔妮. 木材中的纳米分形木质纤维及碳素纤维材料的制备[J]. 纤维素科学与技术, 2006, 14(3): 47–51.
- [19] 费本华. 木材干缩的分形分析[J]. 林业科学, 2002, 38(1): 136–140.
- [20] 费本华, 赵勇, 侯祝强, 等. 干燥过程中木材内部孔隙度变化的初步研究[J]. 北京林业大学学报, 2005, 27(增刊): 1–4.
- [21] HAO B, AVRAMIDIS S. Wood sorption fractality in the hygroscopic range( II ): New model development and validation [J]. *Wood and Fiber Science*, 2003, 35(4): 601–608.
- [22] CAO J Z, KAMDEM D P. Moisture adsorption thermodynamics of wood from fractal geometry approach [J]. *Holzforschung*, 2004, 58(3): 274–279.
- [23] TRIBOULOT P, JODIN P, PLUVINAGE G. Validity of fracture mechanics concepts applied to wood by finite element calculation [J]. *Wood Science and Technology*, 1984, 18(1): 51–58.
- [24] CHUI Y H. Simultaneous evaluation of bending and shear moduli of wood and the influence of knots on these parameters [J]. *Wood Science and Technology*, 1991, 25(2): 125–134.
- [25] 费本华, 张东升. 木材断裂裂纹及应力场的分形研究[J]. 木材工业, 2003, 17(3): 7–9.
- [26] 费本华, 覃道春, 杨忠. 木材断口分形的初步研究[J]. 林业科学, 2006, 42(3): 104–107.
- [27] 费本华, 赵勇, 覃道春, 等. 应用 CT 技术研究木材断口形态特征[J]. 林业科学, 2007, 43(4): 137–140.
- [28] 孙丽萍, 张汝楠, 秦怀光. X 射线在原木无损检测中的应用[J]. 林业机械与木工设备, 2007, 35(10): 54–55.
- [29] 谢永华, 王克奇. 基于分形理论木材表面缺陷识别的研究[J]. 林业机械与木工设备, 2006, 34(7): 21–22.
- [30] 张延林, 谢永华. 木材缺陷识别方法的研究[J]. 森林工程, 2008, 24(4): 33–35.
- [31] 戚大伟. 基于分数布朗随机场与分形参数的原木漏节图像处理[J]. 林业科学, 2004, 40(4): 145–147.
- [32] 戚大伟, 李莉. 基于分形维数特征的原木漏节图像的研究[J]. 森林工程, 2007, 23(5): 11–14.
- [33] PENTLAND A P. Fractal based description of natural scenes [J]. *IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence*, 1984, 6(6): 661–674.
- [34] SARKER N, CHAUDHURI B B. An efficient approach to estimate fractal dimension of texture image [J]. *Pattern Recognition*, 1992, 25(9): 1035–1041.
- [35] 任宁, 于海鹏, 刘一星, 等. 木材纹理的分形特征与计算[J]. 东北林业大学学报, 2007, 35(2): 9–11.
- [36] 王晗, 王克奇, 白雪冰, 等. 基于分形维木材表面粗糙度的研究[J]. 森林工程, 2007, 23(2): 13–15.
- [37] 刘泓, 莫玉龙. 基于分维特征和反向传播神经网络的自然纹理识别[J]. 光学学报, 1999, 19(10): 1406–1410.
- [38] 赵莹, 高隽, 陈果, 等. 一种基于分形理论的多尺度多方向纹理特征提取方法[J]. 仪器仪表学报, 2008, 29(4): 787–791.
- [39] CHAUDHURI B B, SARKER N. Texture segmentation using fractal dimension [J]. *IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence*, 1995, 17(1): 72–77.
- [40] LIU J, FURUNO T. The fractal estimation of wood color variation by the triangular prism surface area method [J]. *Wood Science and Technology*, 2002, 36(5): 385–397.
- [41] 赵广杰. 木材中的纳米尺度、纳米木材及木材-无机纳米复合材料[J]. 北京林业大学学报, 2002, 24(5–6): 204–207.
- [42] GORING D A I. Cellulose chemistry and technology [J]. *ACS Symposium Series*, 1977, 48: 274.
- [43] WESTERMARK U. Calcium promoted phenolic coupling by superoxid radical—a possible liquification reaction in wood [J]. *Wood Science and Technology*, 1982, 16(1): 71–78.
- [44] 周峯, 姜笑梅著. 中国裸子植物材的木材解剖学及超微构造[M]. 北京: 中国林业出版社, 1994.

(责任编辑 李文军)