

# 闽南山地不同密度桉树人工林土壤肥力的分形研究

林武星<sup>1</sup> 黄雍容<sup>1</sup> 郑郁善<sup>2</sup> 谷 凌<sup>2</sup>

(1. 福建省林业科学研究院 福建 福州 350012; 2. 福建农林大学林学院 福建 福州 350002)

**摘 要:** 以分形理论对闽南山地造林密度分别为 1 125、1 225、1 325、1 625 和 2 225 株/hm<sup>2</sup> 的桉树人工林土壤结构和理化性质进行研究,建立桉树人工林土壤水稳性团聚体含量与其分形维数相关关系式,以及土壤水稳性团聚体的分形维数和对应的土壤理化性质指标的回归模型。研究结果表明,桉树林土壤水稳性团聚体的分形维数与土壤水稳性团聚体含量及理化性质呈显著回归关系,土壤水稳性团聚体含量与分形维数呈负相关。造林密度为 1 325 株/hm<sup>2</sup> 的桉树林土壤水稳性团聚体的分形维数最小,林地水稳性团聚体含量最高,土壤结构和稳性性最好。分形理论在林地土壤肥力研究上的应用为林地评价提供了新方法。

**关键词:** 桉树; 密度; 分形维数; 土壤团聚体; 土壤理化性质

**中图分类号:** S152.4; S725.2

**文献标识码:** A

桉树(*Eucalyptus*)是世界四大速生树种之一。随着短周期工业原料林迅速发展,南方各省营造了大面积的桉树人工林。由于单一或少数无性系集中成片种植、短期采伐、连栽和大量施用无机肥料等不合理的营林制度造成了桉树林病虫害、产量下降、地力衰退等系列问题<sup>[1]</sup>。理论和实践都表明,采取科学经营是确保人工林土壤肥力和稳定性的重要手段。人工林培育过程中,密度不仅是林分群落结构形成的数量基础,而且是影响人工林生长、林下植被发育和土壤肥力的关键因素<sup>[2-4]</sup>。由形状和大小各异的土壤颗粒所组成的土壤结构是一个不规则的几何形体,土壤是具有分形特征的系统<sup>[5-7]</sup>。Bartoli 等已报导分形理论在土壤结构中的研究成果<sup>[8-11]</sup>,结果都表明,用分形维数可定量描述土壤结构<sup>[12]</sup>。吴承祯<sup>[13]</sup>、刘金福<sup>[14]</sup>、何东进<sup>[15]</sup>、林武星<sup>[16]</sup>等运用分形模型研究不同林分类型土壤团粒结构取得了较好的效果。本文在前人研究的基础上,运用分形理论对福建南部丘陵山地不同密度桉树人工林土壤结构进行分形维数研究,并建立桉树土壤结构分形维

数与土壤理化性质关系模型,为桉树林造林密度选择和林地土壤评价提供科学依据。

## 1 试验地概况

试验点位于福建省南部低山丘陵区长泰岩溪国有林场,地理位置为 117°45'5"E, 24°47'24"N,年均温 21.1℃,绝对最高温度 40.9℃,绝对最低温度 -2.1℃,无霜期 328 d,年降雨量 1 533 mm,有效积温 7 394.7℃,年日照时数 2 037.4 h,为南亚热带气候。试验地位于该林场的凤山工区,林地海拔 230 ~ 290 m,长坡中部,坡度 25 ~ 31°,西南坡,土层厚度 > 80 cm,腐殖层厚 < 10 cm,土壤呈酸性,立地类型为典型的低山带长坡中部中厚土薄腐殖立地类型。

## 2 研究方法

### 2.1 试验设计和造林

采用随机区组设计,设计桉树造林密度为 1 125

收稿日期(Received date): 2012-06-14; 改回日期(Accepted): 2012-07-14。

基金项目(Foundation item): 福建省科学基金资助项目(1992-2023)、福建省森林培育与林产品加工利用重点实验室项目资助。[The project was financially supported by Fujian Provincial Science Foundation(1992-2023), Fujian Key Laboratory of Forest Cultivation and Forest Products Processing.]

作者简介(Biography): 林武星(1970-),男,福建福清人,博士,教授级高工,主要从事森林生态学研究。[Lin Wuxing, Ph.D., professor of plant ecology, currently engaged in forest ecosystems.] E-mail: linwuxing1970@163.com

(A)、1 225(B)、1 325(C)、1 625(D)和 2 225 株/hm<sup>2</sup>(E)并设置一个荒山为对照。试验 6 个处理 3 次重复,每块试验小区面积 30 m×30 m,共 18 块小区。1990 年挖穴,穴规格 70 cm×40 cm×35 cm,1991 年 1 月回表土,每穴施过磷酸钙 0.15 kg,1991-03-20 定植(容器苗)按树种源为广西钦州地区林科所培育的组培容器苗,平均苗高 25 cm,当年 8 月全面锄草 松土 1 次,并结合施硫酸铵复合肥,每穴施 0.15 kg。

## 2.2 野外资料收集与分析

造林后每年调查试验林生长情况,包括试验地内立木胸径、树高、冠幅。2000 年 5 月,对试验地内林木进行每木检尺,同时进行土壤取样,即采用每个标准地内多点分 0~20 cm、20~40 cm 土层取样带回室内分析,土壤水稳性团聚体采用机械筛分法<sup>[17]</sup>,土壤物理性质采用环刀法<sup>[18]</sup>,土壤化学性质采用常规法<sup>[17]</sup>,土壤酶活性分析<sup>[19]</sup>: 过氧化物酶、多酚氧化酶采用 A. III. bJITeH 法(1974); 转化酶活性采用 E. Hoffmann 与 A. Seegrer 法(1951); 脲酶活性采用标准扩散法; 磷酸酶活性采用 G. Hoffmann 法(1967)。不同密度桉树土壤水稳性团聚体含量、土壤酶活性、物理性质和化学性质测定结果见表 1~表 4。

## 2.3 土壤结构分形维数模型

具有自相似结构的多孔介质——土壤,由大于某一粒径  $d_i$  ( $d_i > d_{i+1}$ ,  $i = 1, 2, \dots$ ) 的土粒构成的体积  $V(\delta > d_i)$  可由类似  $Katz$ <sup>[10]</sup> 的公式表示

$$V(\delta > d_i) = A [1 - (d_i/k)^{3-D}] \quad (1)$$

式中  $\delta$  是码尺  $A$   $K$  是描述形状、尺度的常数。

通常粒径分析资料是由一定粒径间隔的颗粒重量分布表示的,以  $\bar{d}_i$  表示粒级  $d_i$  与  $d_{i+1}$  间粒径的平均值,忽略各粒级间土粒比重  $p$  的差异,即  $p_i = p$  ( $i = 1, 2, \dots$ ) 则

$$W(\delta > \bar{d}_i) = V(\delta > \bar{d}_i) p = pA [1 - (\bar{d}_i/k)^{3-D}] \quad (2)$$

式中  $W(\delta > d_i)$  为大于  $d_i$  的累积土粒重量。以  $W_0$  表示土壤各粒级重量的总和,由定义  $\lim_{i \rightarrow \infty} d_i = 0$ ,则由(2)式得

$$W_0 = \lim_{i \rightarrow \infty} W(\delta > \bar{d}_i) = pA \quad (3)$$

由(2)、(3)式导出

$$W(\delta > d_i) / W_0 = 1 - (\bar{d}_i/k)^{3-D} \quad (4)$$

设  $\bar{d}_{\max}$  为最大粒级土粒的平均直径,  $W(\delta > \bar{d}_{\max}) = 0$ , 带入(4)式有  $K = d_{\max}$ 。由此得出土壤颗粒的重量

分布与平均粒径间的分形关系式

$$W(\delta > \bar{d}_i) / W_0 = 1 - (\bar{d}_i/d_{\max})^{3-D} \quad (5)$$

或

$$(\bar{d}_i/d_{\max})^{3-D} = W(\delta < \bar{d}_i) / W_0 \quad (6)$$

## 2.4 土壤性质与分形维数相关模型

采用一元线性和非线性回归方程建立土壤理化性质( $Y$ )与分形维数( $D$ )相关模型

$$Y = a + bD \quad (7)$$

$$Y = aD^b \quad (8)$$

$$Y = aEXP^{bD} \quad (9)$$

式中  $Y$  为林地土壤理化性质指标含量;  $D$  为不同类型林分土壤结构分形维数;  $a$ 、 $b$  为参数。

## 3 结果与分析

### 3.1 不同密度桉树林土壤结构的分形维数与土壤水稳性团聚体关系

土壤是一种具有分形特征的分散多孔介质<sup>[5-7]</sup>。应用土壤结构的分形维数模型回归关系式计算得到不同密度桉树人工林土壤水稳性团聚体的分形维数(表 1)。从表 1 看出,不同密度桉树人工林土壤水稳性团聚体的分形维数在 2.699~2.793 间,表现出  $\geq 0.25$  mm 的土壤水稳性团聚体含量越高,其粒径分布的分形维数越小,亦即土壤小径级颗粒越多,土壤粘性越强,分形维数也就越大。土壤水稳性团聚体的状况是反映土壤肥力的一个重要因素,在很大程度上对土壤的机械组成性质、抗蚀性及水、肥、气、热等造成影响。 $\geq 0.25$  mm 的土壤水稳性团聚体含量高,意味着土壤疏松通气、透水性好,表层土壤中动植物活动频繁,矿化作用快,土壤自我培肥能力强。因此,土壤结构粒径分布的分形维数体现了  $\geq 0.25$  mm 的土壤水稳性团聚体含量对土壤结构与稳定性的影响趋势,土壤结构的分形维数越小,土壤结构和稳定性就越好。不同密度桉树林土壤中  $\geq 0.25$  mm 的水稳性团聚体含量( $X$ )与其分形维数( $D$ )之间关系为:  $D = 3.1806 - 0.0081X$ ,  $R^2 = 0.9502$ 。从式中可知,  $\geq 0.25$  mm 的土壤水稳性团聚体含量与其分形维数之间存在显著的直线相关( $P < 0.01$ ),分形维数增加,  $\geq 0.25$  mm 的土壤水稳性团聚体含量就减少,说明分形维数可客观表征土壤的结构性状,这就为土壤肥力状况研究增添了新指标。

### 3.2 不同密度桉树林土壤结构的分形特征对比

不同密度桉树人工林土壤水稳性团聚体的分形

维数大小顺序为  $CK(2.793) > E(2.788) > A(2.785) > D(2.779) > B(2.750) > C(2.699)$ 。密度为  $1\,325\text{ 株}/\text{hm}^2$  的桉树林其土壤粒径分布的分形维数最小(2.699),土壤的水稳性团聚体含量在 6 种类型的林地中最高(58.82%),表明桉树林经营过程中密度保持在  $1\,325\text{ 株}/\text{hm}^2$  林地土壤通透性、持水能力和稳定性最好,该林分中土壤遇雨不易分解,抗蚀性强,有利于水土保持和水源涵养,可以减少地表径流的发生。这可能是因为桉树林在经营密度为  $1\,325\text{ 株}/\text{hm}^2$  时,林冠层枝叶疏密程度和林分郁闭度适中,引起林内的光照、气温和土温等小生境条件最适宜于其中植物生长发育及微生物活动,促进了枯枝落叶的分解;而且该密度的林分使地下根系对营养的吸收、根系在各层次分布、生长和穿插都恰到好处。从而带来土壤结构较为松散、通气良好,土壤腐殖化程度高,能形成良性的土壤-生物养分小循环。6 种类型的林地中荒山(CK)土壤结构的分形维数最高(2.793),其土壤水稳性团聚体含量

最低(46.88%),土壤结构最差。这是因为荒山土壤长期暴露,每次降雨都对表层土壤直接冲刷,造成地表径流和大量表土丧失,产生土壤板结和结构恶化,土壤表层水稳性团聚体大幅度减少。

3.3 不同密度桉树林土壤结构的分形维数与土壤性质关系

土壤结构的分形维数大小反映了土壤水稳性团聚体含量的高低,而土壤水稳性团聚体是影响土壤肥力的一个重要因素,因此,土壤结构的分形维数可用于表征土壤肥力状况。一般土壤肥力常以土壤理化性质各种指标值表示。通过不同密度桉树林土壤理化性质测定结果(表 2~表 4)与相应的土壤水稳性团聚体的分形维数(见表 1)输入计算,得到土壤理化性质各种指标与土壤水稳性团聚体的分形维数之间相关模型(表 5),从中可知土壤理化性质与土壤水稳性团聚体的分形维数存在显著相关,所以可应用这些模型预测各土壤结构分形维数对应的土壤理化性质状况。

表 1 不同密度水稳性团聚体组成(0~20 cm)

Table 1 The soil water-stable aggregate constitution in different silvicultural density

密度 Stand density /(tree/hm <sup>2</sup> )	土壤水稳性团聚体含量 Content of soil water-stable aggregate constitution/%							相关系数 Correlation coefficient	分形维数 Fractal dimension
	>5.0	5.0~2.0	2.0~1.0	1.0~0.5	0.5~0.25	≥0.25	<0.25		
(A) 1125	7.53	10.12	13.33	10.96	8.63	50.57	49.43	0.995	2.785
(B) 1225	6.25	10.03	16.12	13.35	8.17	53.92	46.08	0.992	2.750
(C) 1325	3.60	11.32	17.29	15.71	8.15	58.82	41.18	0.986	2.699
(D) 1625	6.17	9.93	13.25	13.17	7.32	49.94	50.06	0.996	2.779
(E) 2225	5.03	9.15	13.27	12.79	8.01	48.25	51.75	0.991	2.788
CK	4.13	8.57	15.32	10.76	8.10	46.88	53.12	0.991	2.793

注:表中数据为湿筛测定值

表 2 土壤化学性质(0~20 cm)

Table 2 The soil chemical characteristics in different silvicultural density

密度 Stand density /(tree/hm <sup>2</sup> )	有机质 Organic matter /(g/kg)	全氮 Total N /(g/kg)	全磷 Total P /(g/kg)	水解氮 Hydrolytic N /(mg/kg)	速效磷 Available P /(mg/kg)	速效钾 Available K /(mg/kg)
(A) 1125	9.254	0.953	0.533	41.761	9.007	72.480
(B) 1225	18.696	1.179	0.591	48.394	11.624	80.463
(C) 1325	21.260	1.208	0.652	63.176	13.754	86.498
(D) 1625	17.265	1.075	0.481	61.586	12.098	80.463
(E) 2225	12.521	0.898	0.429	45.148	8.462	69.755
CK	6.124	0.537	0.465	31.156	6.125	52.148

表 3 土壤孔隙组成(0~20 cm)

Table 3 The status of soil pore components in different silvicultural density

密度 Stand density /( tree/hm <sup>2</sup> )	容重 Soil density /( g/cm <sup>3</sup> )	毛管孔隙度 capillary. porosity /%	非毛管孔隙度 Non-capillary. porosity /%	总孔隙度 Total. porosity /%	土壤通气度 Soil permeability /%
( A) 1125	1. 215	54. 87	8. 26	63. 13	29. 90
( B) 1225	1. 135	62. 32	9. 22	71. 54	41. 97
( C) 1325	0. 980	61. 36	14. 62	75. 98	40. 38
( D) 1625	1. 090	58. 06	18. 24	76. 30	36. 96
( E) 2225	1. 215	54. 17	10. 37	61. 54	29. 44
CK	1. 270	33. 14	8. 56	41. 70	10. 49

表 4 不同模式土壤酶活性(0~20 cm)

Table 4 The soil enzyme activity of different silvicultural density

密度 Stand density /( tree/hm <sup>2</sup> )	脲酶 Urease /( mg/g)	转化酶 Converting enzyme /( g/mL)	淀粉酶 Amylase /( g/mL)	磷酸酶 Phosphatase /( mg/g)	过氧化氢酶 Catalase /( mg/g)	多酚氧化酶 Polyphenol oxidase /( mg/g)
( A) 1125	3. 965	4. 239	2. 08	2. 53	9. 56	6. 86
( B) 1225	4. 034	4. 72	2. 25	2. 88	12. 17	7. 73
( C) 1325	4. 215	5. 03	2. 57	3. 15	14. 92	9. 55
( D) 1625	3. 953	4. 25	2. 09	2. 53	10. 53	6. 62
( E) 2225	3. 896	4. 13	2. 04	2. 55	9. 16	6. 87
CK	3. 813	4. 03	1. 98	2. 49	8. 86	6. 50

注: 脲酶活性以每克土样用的氨水的毫克数表示, 转化酶和淀粉酶活性以每克土样用的 0. 1 mol/L Na<sub>2</sub>S<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 的毫升数, 磷酸酶以酚的 mg/g 表示, 过氧化物酶 和多酚氧化酶以红紫培精 mg/g 表示。

表 5 不同密度土壤理化性质与分形维数相关模型

Table 5 The relation model between fractal dimension and soil physical and chemical properties of different silvicultural density

项目( y) Item	模型 Model	相关系数 Correlation coefficient	项目( y) Item	模型 Model	相关系数 Correlation coefficient
容重 Bulk density	$y = 2. 583D - 5. 9928$ $y = 0. 0017D^{6. 4137}$ $y = 0. 0018e^{2. 3368D}$	0. 882 6 0. 892 2 0. 892 4	脲酶 Urease	$y = -3. 6384D + 14. 042$ $y = 49. 234D^{-2. 4734}$ $y = 48. 111e^{-0. 9014D}$	0. 955 6 0. 950 9 0. 951 4
有机质 Organic matter	$y = -131. 66D + 378. 31$ $y = 6E + 12D^{-26. 46}$ $y = 5E + 12e^{-9. 6628D}$	0. 808 6 0. 727 7 0. 729 6	转化酶 Converting enzyme	$y = -10. 523D + 33. 504$ $y = 2799. 8D^{-6. 3496}$ $y = 2647. 6e^{-2. 3152D}$	0. 973 9 0. 967 2 0. 968 2
全氮 Total N	$y = -4. 8576D + 14. 41$ $y = 3E + 06D^{-14. 569}$ $y = 554. 07e^{-2. 2602D}$	0. 709 4 0. 638 6 0. 825 3	淀粉酶 Amylase	$y = -5. 9845D + 18. 719$ $y = 3323. 5D^{-7. 2145}$ $y = 3098. 6e^{-2. 6282D}$	0. 996 7 0. 995 3 0. 995 4
全磷 Total P	$y = -2. 1144D + 6. 3728$ $y = 24258D^{-10. 569}$ $y = 22105e^{-3. 8537x}$	0. 906 4 0. 881 4 0. 882 4	磷酸酶 Phosphatase	$y = -7. 3163D + 22. 923$ $y = 3856D^{-7. 1493}$ $y = 3606. 8e^{-2. 6054D}$	0. 984 2 0. 980 0 0. 980 6
速效磷 Available P	$y = -62. 768D + 183. 77$ $y = 3E + 08D^{-16. 982}$ $y = 3E + 08e^{-6. 1995D}$	0. 806 3 0. 752 9 0. 754 6	过氧化氢酶 Catalase	$y = -63. 718D + 187. 09$ $y = 4E + 07D^{-14. 885}$ $y = 4E + 07e^{-5. 426D}$	0. 989 7 0. 977 0 0. 977 8
速效钾 Available K	$y = -241. 97D + 742. 85$ $y = 875158D^{-9. 2368}$ $y = 819685e^{-3. 3736D}$	0. 718 0 0. 671 4 0. 673 3	多酚氧化酶 Polyphenol oxidase	$y = -31. 72D + 95. 083$ $y = 495272D^{-10. 939}$ $Y = 443716e^{-3. 9834D}$	0. 986 3 0. 985 5 0. 985 3

## 4 讨论与结论

国内学者对桉树人工林密度效应问题已有较多的报道,但基本上局限于不同密度桉树林生长效果或生态效应的研究。如杨伟东等(1997)<sup>[20]</sup>、李保福等(2000)<sup>[21]</sup>和张友育(2006)<sup>[22]</sup>研究了不同密度桉树林生长差异,郑郁善等(2000)<sup>[23]</sup>报道了不同密度桉树林水源涵养功能,洪长福等(2003)<sup>[24]</sup>研究了不同密度桉树林下植被多样性,等等。而密度对桉树人工林土壤肥力的影响研究鲜有报道,且需要采取诸多土壤物理和化学性质实测对比确定桉树林地力维持的合理密度<sup>[25]</sup>,在对表征土壤肥力的各项指标测定上较为繁琐。由于土壤颗粒存在分形特征,近年来不少学者利用分形维数开展了杉木针阔混交林、珍贵树种和沿海防护林等森林类型土壤肥力的研究并有显著成效<sup>[13-16]</sup>。本研究运用分形理论建立了不同造林密度桉树林土壤颗粒的分形维数与土壤水稳性团聚体、容重、酶活性、有机质及有效养分等土壤理化性质相关关系,通过对桉树林土壤分形维数的研究可以直接反映出桉树林土壤结构和肥力状况,这就为桉树人工林土壤评价和确定适宜造林密度提供一个简便而又科学的研究方法。

桉树是我国南方主要的短周期工业原料林树种,由于盲目追求短周期、高产量和高经济产出,片面采取大面积、高密度、勤施肥等不合理经营策略,造成了产量下降、地力衰退等严重问题。为此,从造林密度这一可控的营林环节进行研究以确保桉树林地力是一项重要的课题。本文通过对闽南山地不同造林密度桉树人工林土壤水稳性团聚体的分形维数研究,表明在山地桉树林密度为1 325株/hm<sup>2</sup>情况下,土壤水稳性团聚体的分形维数最小,土壤水稳性团聚体的含量最高,也就意味着土壤团粒结构性状最好,土壤的抗蚀性和稳定性最强。因此,从地力维护角度出发,丘陵区桉树种植区桉树林最适宜造林密度为1 325株/hm<sup>2</sup>,从而为桉树人工林可持续经营和林地持续利用提供理论依据。

## 参考文献(References)

- [1] Xie Yaojian. Primary studies on sustainable management strategy of Eucalyptus plantation in China[J]. World Forestry Research, 2003, 16(5): 59-64 [谢耀坚. 中国桉树人工林可持续经营战略初探[J]. 世界林业研究, 2003, 16(5): 59-64]
- [2] Lin Kaimin, Yu Xintuo, He Zhiying et al. Studies on biomass structure and soil fertilize in different density of Cunninghamia lanceolata stand[J]. Scientia Silvae Sinicae, 1996, 32(5): 385-391 [林开敏, 俞新妥, 何智英. 不同密度杉木林分生物量结构与土壤肥力差异研究[J]. 林业科学, 1996, 32(5): 385-391]
- [3] Sheng Weitong. A long-term study on development and succession of undergrowth vegetation in Chinese Fir plantation with different density[J]. Forest Research, 2001, 14(5): 463-471 [盛伟彤. 不同密度杉木人工林下植被发育与演替的定位研究[J]. 林业科学研究, 2001, 14(5): 463-471]
- [4] Wang Yin, Yang Zhangqi, Zhang Zhenglin et al. Effect of the density of Masson Pine on the chemical nature of the land of its artificial plantation[J]. Journal of Anhui Agricultural Science, 2010, 38(36): 20934-20935 [王胤, 杨章旗, 张振林. 林分密度对马尾松人工林林地土化性质研究[J]. 安徽农业科学, 2010, 38(36): 20934-20935]
- [5] Turcotte D L. Fractal and fragmentation[J]. Journal of Geophysical Research, 1986, 91(2): 1921-1926
- [6] Rieu M, Sposito G. Fractal fragmentation, soil porosity and soil water properties: II. Applications[J]. Soil Science Society of America Journal, 1990, 55(5): 1239-1244
- [7] Falconer K J. Fractal Geometry[M]. New York: John Wiley and Sons, 1989: 89-159
- [8] Bartoli F, Philippon R, Doirisse M et al. Structure and self-similarity in silty and sandy soils: the fractal approach[J]. Soil Science, 1991, 42(2): 167-185
- [9] Rieu M, Sposito G. Fractal fragmentation, soil porosity and soil water properties: I. Theory[J]. Soil Science Society of America Journal, 1990, 55(5): 1231-1238
- [10] Young I M, Crawford J W. The fractal structure of soil aggregates: Its measurement and interpretation[J]. Journal of Soil Science, 1991, 42: 187-192
- [11] Tyler S W, Wheatcraft S W. Fractal scaling of soil particle-size distributions: analysis and limitations[J]. Soil Science Society of America Journal, 1990, 56(2): 362-369
- [12] Li Baoguo. Application and development of fractal theory in soil science[J]. Progress in Soil Science, 1994, 22(1): 1-10 [李保国. 分形理论在土壤科学中的应用及其展望[J]. 土壤学进展, 1994, 22(1): 1-10]
- [13] Wu Chengzhen, Hong Wei. Study on fractal features of soil aggregate structure under different management patterns[J]. Acta Pedologica Sinica, 1999, 36(2): 162-167 [吴承祯, 洪伟. 不同经营模式土壤团粒结构的分形特征研究[J]. 土壤学报, 1999, 36(2): 162-167]
- [14] Liu Jinfu, Hong Wei, Wu Chengzhen. Fractal features of soil clusters under some precious hardwood stands in the central subtropical region, China[J]. Acta Ecol Sinica, 2002, 22(2): 198-205 [刘金福, 洪伟, 吴承祯. 中亚热带几种珍贵树种林分土壤团粒结构的分形特征[J]. 生态学报, 2002, 22(2): 198-205]
- [15] He Dongjin, Hong Wei, Wu Chengzhen et al. Study on characteristic index of soil fertility in Chinese Fir plantation mixed with alniphyllum fortunei[J]. Journal of Mountain Science, 2001, 19(Suppl.): 98-102 [何东进, 洪伟, 吴承祯. 杉木拟赤杨混交林

- 土壤肥力表征指标的研究[J]. 山地学报, 2001, 19(增刊): 98-102]
- [16] Lin Wuxing, Ye Gongfu, Tang Fanlin, et al. Fractal feature of soil structure and reflection on soil properties indifferent redeneration patterns of *Casuarina equisetifolia* forest in coastal sandy soil[J]. Chinese Journal of Eco-Agriculture, 2008, 16(6): 1352-1357 [林武星, 叶功富, 谭芳林. 沙岸木麻黄防护林不同更新模式土壤结构分形特征及其效应[J]. 中国生态农业学报, 2008, 16(6): 1352-1357]
- [17] Soil research institute of Chinese science academy in Nanjin. Soil physical and chemical feature [M]. Shanghai: Shanghai Science and Technical Publishing House, 1987. [中国科学院南京土壤研究所编. 土壤理化性状 [M]. 上海: 上海科学技术出版社, 1987]
- [18] Zhang Wanru. Research method of forestry soil [M], Beijing: Chinese Forestry Press, 1984 [张万儒. 森林土壤定位研究方法 [M]. 北京: 中国林业出版社, 1984]
- [19] Guan Songying. Soil enzyme and its research method [M]. Beijing: Agriculture Press, 1986: 15-36 [关松荫. 土壤酶及其研究方法 [M]. 北京: 农业出版社, 1986: 15-36]
- [20] Yang Weidong, Zhong Luosheng. Study on different density of new introduced *Eucalyptus* [J]. Ucalyptus Urophylla Science and Technology of Eucalyptus, 2: 37-41 [杨伟东, 钟罗生. 新引种的尾叶桉造林密度试验研究[J]. 桉树科技, 1997, (2): 37-41]
- [21] Lin Baofu, Zhang Shunhen. Study on growing principle and harvesting time with different planting density of *Eucalyptua Grandis E. Urophylla* plantation [J]. Journal of Fujian Science and Technology, 2000, 27: 19-22 [李宝福, 张顺恒. 不同造林密度巨尾桉生长规律及轮伐期确定[J]. 福建林业科技, 2000, 27(增): 19-22]
- [22] Zhang Youyu. Study on different tree density of *Eucalyptua* plantation in south Fujian Mountain [J]. Fujian Science & Technology of Tropical Crops, 2006, 31(2): 3-4 [张友育. 闽南山地桉树不同种植密度试验效果分析[J]. 福建热作科技, 2006, 31(2): 3-4]
- [23] Zheng Yushang, Cheng Liguang, Hong Changfu. A study on water conservation function of *Hybrid Eucalyptus grandis Eucalyptus urophylla* plantation on hills along the coast [J]. Acta Agricultural Universitatis Jiangxiensis, 2000, 22(2): 220-224 [郑郁善, 陈礼光, 洪长福. 沿海丘陵巨尾桉人工林水源涵养功能研究[J]. 江西农业大学学报, 2000, 22(2): 220-224]
- [24] Hong Changfu, Ke Jianguo, Huang Longjie. Study on biodiversity underlayer of *Eucalyptus urophylla Eucalyptus grandis* plantation [J]. Science and Technology of Eucalyptus, 2003, 2: 1-10 [洪长福, 柯建国, 黄龙杰. 尾巨桉人工林林下植被多样性研究[J]. 桉树科技, 2003, 2: 1-10]
- [25] Hong Changfu. Analysis on economical and ecological benefits of 15-year *Eucalyptus grandis Eucalyptus urophylla* plantation with different tree density [J]. Journal of Fujian College of Forestry, 2008, 28(1): 36-41 [洪长福. 不同密度 15 年生巨尾桉经济生态效益分析[J]. 福建林学院学报, 2008, 28(1): 36-41]

## Fractal Study on Soil Fertilize in Different Silvicultural Density of *Eucalyptus* Plantation in South Fujian Mountain

LIN Wuxing<sup>1</sup>, HUANG Yongrong<sup>1</sup>, ZHENG Yushang<sup>2</sup>, GU Ling<sup>2</sup>

(1. Fujian Academy of Forestry, Fuzhou Fujian 350012, China;

2. College of Forestry, Fujian Agriculture and Forestry University, Fuzhou 350002, China)

**Abstract:** The fractal theory was used to study the soil structure in different density include 1 125, 1 225, 1 325, 1 625 and 2 225 tree/hm<sup>2</sup> of *Eucalyptus* plantation in south Fujian mountain. The regression model between the fractal dimension of soil water-stable aggregate constitution and the soil physicochemical properties was build. The results were as follows. The soil fractal dimension showed significant regression relationships with physicochemical properties, specially showed negative correlation with the content of  $\geq 0.25$  mm soil water-stable aggregate constitution. The fractal dimension of soil water-stable aggregate structure in density of 1 325 tree/hm<sup>2</sup> of *Eucalyptus* plantation was the least, which showed the best in structural stability and fertility status. Application of the fractal theory on the forest soil fertility provides a new method for forest assessment.

**Key words:** *Eucalyptus* plantation; stand density; fractal dimension; soil aggregate constitution; soil physical and chemical properties