

毛竹杉木混交林土壤团粒结构的分形特征研究

何东进 洪伟 吴承祯 郑郁善

(福建农林大学林学院, 福建 南平 353001)

摘要: 运用分形理论对杉木纯林(19年生)、毛竹纯林(19年生)、6种杉木毛竹混交林(杉木19年生)的土壤团粒结构进行研究,建立了土壤团粒结构的分形维数与土壤团聚体含量、土壤结构体破坏率之间的回归模型,在此基础上,运用弹性分析与边际分析法进一步探讨了土壤团粒结构的分形维数对土壤性质变化所产生的影响效应。结果表明:土壤 >0.25 mm水稳定性团聚体含量越大,团粒结构的分形维数越小,土壤的结构与稳定性就越好;土壤团粒结构分形维数与水稳定性团聚体(>0.25 mm及 >5.0 mm)含量及结构体破坏率之间均存在极显著的回归关系;土壤团粒结构分形维数对土壤性质的变化产生较大的影响效应。本研究为毛竹杉木混交林的栽培管理,土壤肥力的科学评价提供依据。

关键词: 毛竹; 杉木; 混交林; 分形维数; 弹性分析; 边际分析

中图分类号: S152.4 **文献标识码:** A **文章编号:** 1005-3395(2002)03-0215-07

Fractal Features of Soil Aggregate Structure under Mixed Plantations of *Phyllostachys edulis* and *Cunninghamia lanceolata*

HE Dong-jin HONG Wei WU Cheng-zhen ZHENG Yu-shan

(College of Forestry, Fujian Agriculture and Forestry University, Nanping 353001, China)

Abstract: Fractal characteristics of soil aggregate structure under *Cunninghamia lanceolata* and *Phyllostachys edulis* mixed plantations in Fujian were studied by using fractal theory. Six plots with different *Cunninghamia lanceolata* and *Phyllostachys edulis* densities in mixed plantations, and two plots of pure stands of the two species were chosen. All the plants in plots were 19-year-old. Regression models for fractal dimension (D) of aggregated structure and water stable aggregate (>0.25 mm) content, and for D and destroyed structure percentage, were established. The effect of fractal dimension of aggregates on soil properties were evaluated by elasticity and limit analyses. The results showed that the higher the content of water stable aggregates (>0.25 mm or >5.0 mm) in soil, the smaller the fractal dimension of aggregates, and thus the better structure and stability the soil. The regression relationships of all the models

收稿日期: 2001-05-25 接受日期: 2001-12-07

基金项目: 福建省教育委员会自然科学基金资助项目(JA99194); 福建省自然科学基金资助项目(B0010021)。

were remarkable. Fractal dimension variation of aggregate structure had a great effect on soil properties, which will provide a scientific basis for the culture of such mixed forest.

Key words: *Phyllostachys edulis*; *Cunninghamia lanceolata*; Mixed forest; Fractal dimension; Elastic analysis; Limited analysis

森林土壤资源是林业可持续经营与环境持续发展的重要物质基础,合理地利用、保护和改善森林土壤资源以提高林地生产力一直是林业科技工作者关注的焦点^[1-4]。杉木(*Cunninghamia lanceolata*)是我国南方主要造林树种,然而,杉木人工林存在的地力衰退、林地生产力下降等问题已引起人们的广泛重视^[5-7],不少学者正在不断探索杉木混交林的合理经营模式,以提高杉木人工林的质量与产量^[8-12]。毛竹(*Phyllostachys edulis*)具有生长快、产量高、价值大等特点,杉木毛竹混交林既能改变林种单一,又能改善地力,但目前有关杉木毛竹混交林的研究却较少^[13,14]。笔者试图运用分形理论对毛竹杉木混交林不同经营模式的土壤团粒结构进行研究,以期为毛竹杉木混交林的合理培育模式、土壤肥力的科学评价提供理论依据与评价指标。

1 试验地概况和资料的收集

试验地概况 试验地设在福建省德化县戴云山脉西北面,北纬 25°48′-26°24′,东经 117°48′-118°36′,年均降雨量 1 460-1 780 mm,年相对湿度 83%左右,年均气温 18.9℃,土壤为红壤。标准地平均海拔 700 m 左右,平均坡度 25°,坡向为北坡,土层厚度大于 1 m,土壤质地多为中壤。林下植被为细齿叶柃(*Eurya nitida*)、五节芒(*Miscanthus floridulus*)和德化鳞毛蕨(*Dryopteris dehuaensis*)、斜方复叶耳蕨(*Arachniodes rhomboidea*)、狗脊蕨(*Woodwardia japonica*)等蕨类植物。

标准地的设置 试验地以杉木密度为设置标准,采用随机区组法设置固定标准地,在毛竹杉木混交林中(杉木 19 年生)按杉木密度设置:A(300 株 hm^{-2})、B(600 株 hm^{-2})、C(900 株 hm^{-2})、D(1 350 株 hm^{-2})、E(1 800 株 hm^{-2})、F(2 100 株 hm^{-2})以及 G(19 年生的杉木纯林 2 040 株 hm^{-2})、H(19 年生的毛竹纯林 1 650 株 hm^{-2})等 8 个处理。每个处理各设 3 个重复,共有 24 个标准地,每个标准地面积 25.8 m×25.8 m。所有处理在炼山后采用穴状整地、定点挖穴方法准备造林地,次年春季造林。前 3 年每年抚育 2 次,第 4、5 年各抚育 1 次,同时加强林火及病虫害等管理。

毛竹初植密度 600 株 hm^{-2} ,后来以自然生长状态,按合理经营管理保留,各处理现存毛竹平均密度分别为:A(1 755 株 hm^{-2})、B(1 665 株 hm^{-2})、C(1 605 株 hm^{-2})、D(1 545 株 hm^{-2})、E(1 245 株 hm^{-2})、F(915 株 hm^{-2})。

土壤调查 分别在每个标准地内按对角线随机布点(3 点)挖取土壤剖面,取 0-40 cm 表层土样混匀,土壤团粒结构测定用机械筛分法^[15],各经营模式土壤 0-40 cm 表层土壤团聚体重量百分比组成见表 1。

表1 各模式样地土壤团聚体组成
Table 1 Soil aggregate in different plots

模式样地 Plot patterns	土壤团聚体直径 Diameter of aggregates (mm)							结构体破坏率 (%)*	相关系数 Correlation coefficient	分形维数 Fractal dimension	
	<0.25	0.25-0.5	0.5-1	1-3	3-5	>5	>0.25				
A	湿筛 Wet sieving	8.87	3.85	8.48	7.95	8.90	11.95	41.13	9.21	0.9924	2.4762
	干筛 Dry sieving	4.07	5.40	8.05	9.60	6.95	15.70	45.30		0.9975	2.2650
B	湿筛 Wet sieving	10.45	3.79	6.54	7.55	11.47	10.20	39.55	11.52	0.9865	2.5258
	干筛 Dry sieving	5.30	4.34	6.90	10.61	7.73	15.12	44.70		0.9976	2.3287
C	湿筛 Wet sieving	12.28	4.76	7.23	7.65	7.96	10.12	37.72	13.89	0.9945	2.5792
	干筛 Dry sieving	6.20	5.35	8.37	10.17	5.69	14.28	43.80		0.9979	2.3806
D	湿筛 Wet sieving	13.56	3.65	8.54	7.00	8.51	10.04	36.44	15.65	0.9885	2.6005
	干筛 Dry sieving	6.80	2.59	8.10	10.47	6.71	15.33	43.20		0.9873	2.3823
E	湿筛 Wet sieving	14.67	4.41	5.79	6.22	9.05	9.86	35.33	16.67	0.9882	2.6391
	干筛 Dry sieving	7.60	7.76	5.38	7.56	7.19	14.62	42.40		0.9976	2.4673
F	湿筛 Wet sieving	15.80	3.45	6.87	7.56	6.68	9.64	34.20	18.37	0.9880	2.6510
	干筛 Dry sieving	8.10	4.14	7.18	9.04	7.76	13.78	41.90		0.9951	2.4549
G	湿筛 Wet sieving	17.58	3.37	3.87	8.12	8.54	8.52	32.42	21.32	0.9739	2.6843
	干筛 Dry sieving	8.80	3.79	7.66	11.91	9.60	12.05	41.20		0.9879	2.4554
H	湿筛 Wet sieving	12.70	2.82	9.00	6.87	8.51	10.10	37.30	14.46	0.9845	2.5789
	干筛 Dry sieving	6.40	7.12	10.51	6.23	5.24	14.50	43.60		0.9918	2.4090

* 结构体破坏率 = [干筛 (>0.25 mm 团聚体) - 湿筛 (>0.25 mm 团聚体)] / 干筛 (>0.25 mm 团聚体) × 100%。
Percentage of destroyed structure = (D - W) / D × 100%, D and W represent aggregates >0.25 mm by dry and wet sieving, respectively.

2 研究方法

2.1 分形几何学

分形几何学是以欧氏几何无能为力的不规则的或者支离破碎的物体为研究对象的几何学,它能够从看似混沌的物体结构中找到规律,这种规律被称作分形体(fractal)的自相似性(self-similarity)特征^[16,17]。所谓自相似性是指物体局部结构放大与整体相似的特征,即无论怎样变换尺度来观察一物体,总是存在更精细的结构并且其结构总是相似的。该特性因与尺度无关而成为分形几何学与经典欧氏几何学的主要区别,被称作分形体的本质特征。对这一特征进行描述的主要工具是分形维数(fractal dimension)。一般说来,不规则物体已不是欧氏几何意义下的0、1、2、3维的整数维的物体,其维数为非整数,故称分数维度(fractal dimension)。分形体的分数维度一般称为分形维数,分形维数才是对这类物体结构的有效表征。求算分形维数通常采用在双对数坐标下进行回归,所得拟合直线的斜率(或其转换结果)为分形维数值。

2.2 土壤团粒结构分形模型

形状与大小各不相同的土壤颗粒组成的土壤结构,在表现上反映出一个不规则的几何形体,前人研究结果表明,土壤是具有分形特征的系统^[18-22]。运用分形理论建立土壤团粒结构的分形模型过程如下:

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 的公式表示^[21]:

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

式中 δ 是码尺, A, k 是描述形状、尺度的常数, D 是分形维数。

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 表示两筛分粒级 d_i 与 d_{i+1} 间粒径的平均值,忽略各粒级间土粒比重 ρ 的差异,即 $\rho_i = \rho$ ($i=1, 2, \dots$), 则:

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

式中 $W(\delta > \bar{d}_i)$ 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,由定义有 $\lim_{i \rightarrow \infty} \bar{d}_i = 0$, 则由(2)式得: $W_0 = \lim_{i \rightarrow \infty} W(\delta > \bar{d}_i) = \rho A$ (3)

由(2)、(3)式可以导出: $\frac{W(\delta > \bar{d}_i)}{W_0} = 1 - \left(\frac{\bar{d}_i}{k}\right)^{3-D}$ (4)

设 \bar{d}_{\max} 为最大粒级土粒的平均直径, $W(\delta > \bar{d}_{\max}) = 0$, 代入(4)式有 $k = \bar{d}_{\max}$, 由此得出土粒颗粒的重量分布与平均粒径之间的分形关系式:

$$\frac{W(\delta > \bar{d}_i)}{W_0} = 1 - \left(\frac{\bar{d}_i}{\bar{d}_{\max}}\right)^{3-D} \quad (5)$$

或

$$\left(\frac{\bar{d}_i}{\bar{d}_{\max}}\right)^{3-D} = \frac{W(\delta < \bar{d}_i)}{W_0} \quad (6)$$

分别以 $\lg(W_i/W_0), \lg(\bar{d}_i/\bar{d}_{\max})$ 为纵、横坐标, 则 $3-D$ 是 $\lg(\bar{d}_i/\bar{d}_{\max})$ 和 $\lg(W_i/W_0)$ 的实验直线的斜率, 故可用回归分析方法对 D 进行测定。

2.3 土壤团粒结构分形维数对土壤性质效应函数的分析法

运用经济领域中的弹性分析法,即以某一土壤性质的变化率与土壤团聚体分形维数变化率之间的比值来表达土壤团聚体分形维数影响该土壤性质指标的效应规律。

$$EP = (\Delta Y/Y)/(\Delta D/D) = (\Delta Y/\Delta D)/(Y/D) = B \quad (7)$$

式中, EP 为土壤团聚体分形维数对土壤性质效应的弹性系数。当 $EP > 1$ 时, 效应处于递增阶段; 当 $EP < 0$ 时, 效应处于负效应阶段; 当 $0 < EP < 1$ 时, 效应处于递减阶段。

运用边际分析法分析连续追加每一单位土壤团聚体分形维数的量, 所导致受其影响的土壤性质的指标增加量情况。

$$MPP = Y/D = B(Y/D) = B(\sum Y_i / \sum D_i) \quad (8)$$

3 结果和分析

3.1 土壤团粒结构分形维数的计算

以 $\lg(W_i/W_0), \lg(\bar{d}_i/\bar{d}_{\max})$ 为纵、横坐标, 根据(6)式应用回归分析方法计算得到不同标

准地模式土壤团粒结构粒径结构的分形维数,结果列于表1。从表1可以看出,8种标准地模式土壤团粒结构粒径分布的分形维数在2.2650–2.6843之间。其中在湿筛条件下,土壤团粒结构粒径分布的分形维数在2.4762–2.6843之间;在干筛条件下,土壤团粒结构粒径分布的分形维数在2.2650–2.4554之间,两者皆表现为 $>0.25\text{ mm}$ 的团粒含量越低,其结构的粒径分布的分形维数越高。土壤分形维数是反映土壤结构几何形状的参数,在维数上表现出粘团含量越高、质地越细、分形维数越高。土壤团粒结构粒径分布的分形维数反映了土壤水稳定性团聚体含量对土壤结构与稳定性的影响趋势,即团粒结构粒径分布的分形维数愈小,则土壤愈具有良好的结构与稳定性^[22]。标准地模式A(杉木 300 株 hm^{-2} 、毛竹 $1\ 755\text{ 株 hm}^{-2}$)的土壤粒径 $>0.25\text{ mm}$ 含量最大,为45.30%,其分形维数最小,为2.2650;标准地模式G(19年生的杉木纯林 $2\ 040\text{ 株 hm}^{-2}$)的土壤粒径 $>0.25\text{ mm}$ 含量最小,为32.42%,其分形维数最大,为2.6843。因此,在不同的标准地模式中,以模式A土壤的结构与稳定性最好,而杉木纯林最差。

3.2 土壤团粒结构分形维数与土壤团聚体含量的关系

土壤团聚体和水稳定团聚体的状况是影响土壤肥力的一个重要因素,在很大程度上影响着土壤通气性^[23]。为此,分别建立了土壤团粒结构分形维数与 $>0.25\text{ mm}$ 、 $>5\text{ mm}$ 土壤水稳定性团聚体含量之间的关系(表2)。

表2 分形维数与土壤团聚体含量回归关系

Table 2 Regression relationship between fractal dimension (D) of aggregated structure and aggregate content

	回归模型 Regression models	相关系数 Correlation coefficient	F 检验值 F test value	α 值 α value
$>0.25\text{ mm}$ 水稳性团聚体含量(x_1) Content of water stable aggregates $>0.25\text{ mm}$	$D=3.6913-0.02997x_1$	-0.9748	266.9642	<0.01
$>5\text{ mm}$ 水稳性大团聚体含量(x_2) Content of water stable aggregates $>5\text{ mm}$	$D=3.0632-0.04664x_2$	-0.9408	107.8378	<0.01

经F检验,所建立的两个回归方程F值均远大于临界值 $F_{0.01}(1, 15)=8.68$,表明分形维数与 $>0.25\text{ mm}$ 水稳定性团聚体含量(x_1)以及与 $>5\text{ mm}$ 水稳定性团聚体含量(x_2)之间存在着极显著直线关系,可以用分形维数作为表征土壤通透性、抗蚀性及土壤肥力的一个指标。

3.3 土壤团粒结构分形维数对土壤性质效应函数的弹性分析与边际分析

结构体破坏率是反映土壤性质的一个重要指标^[22]。本文首先建立土壤团粒结构分形维数与结构体破坏率的回归模型(表3),在此基础上进一步进行弹性分析与边际分析。

表3表明,土壤团聚体分形维数与结构体破坏率呈显著正相关关系,分形维数越高,其结构体破坏率越大,可以利用该模型预报不同粒径结构的土壤结构体破坏率。同时为了进一步反映土壤分形维数的变化所导致的结构体破坏率变化速率及其变化量,分别用经济领域中的弹性系数与边际量加以描述,计算结果列表3中。从表3结果可以看出:

在两种过筛条件下,土壤团聚体分形维数对结构体破坏率的弹性系数(EP)均大于 1,其效应处于递增阶段。在湿筛和干筛条件下,土壤分形维数值每增加 1%,结构体破坏率分别递增 10.13%和 14.75%。边际分析结果说明,在湿筛和干筛两种过筛条件下,土壤团聚体分形维数值每增加 1,结构体破坏率变化依次为 0.7888 和 0.9330,可见在杉木毛竹混交林中,土壤团聚体分形维数的变化对结构体破坏率的影响程度较大。

表 3 分形维数(D)与土壤结构体破坏率(Y)回归模型
Table 3 Regression relationship between fractal dimension (D) of aggregated structure and percentage of destroyed structure (Y)

	回归模型 Regression models	相关系数 Correlation coefficient	F 检验值 F test value	α 值 α value	弹性系数 Elasticity coefficient	边际量 Limit value
湿筛条件 Sieved in wet	$Y=0.00112D^{0.9594}$	0.9941	501.38	<0.01	10.13	0.7888
干筛条件 Sieved in dry	$Y=0.00957D^{0.4134}$	0.9398	45.39	<0.01	14.75	0.9330

4 结论

本研究结果表明以杉木 300(株 hm^{-2}) \times 毛竹 1 755(株 hm^{-2})模式的土壤性状最理想,其分形维数与结构体破坏率均最低,而杉木纯林则最差。

土壤团粒结构分形维数与 $>0.25 \text{ mm}$ 、 $>5 \text{ mm}$ 土壤水稳定性团聚体含量之间存在显著的负相关,而与结构体破坏率存在显著的正相关。土壤团聚体分形维数的变化对结构体破坏率的影响程度较大。

本文在计算土壤团粒结构分形模型的分形维数时采用双对数线性回归法,但此法实际上是将非线性模型参数的求解转化为线性模型参数的求解。用此法求解得到的参数即分形维数对于双对数后的线性方程而言是最优的,但对于原分形模型而言则不一定是最优的。因此,建议在进行土壤团粒结构分形维数计算时采用其它的最优化方法直接求分形模型的分形维数,如采用遗传算法、改进单纯形法等^[22],这将在一定程度上提高所计算的分形维数的精度。

参考文献:

- [1] 杉木人工林集约栽培研究专题组. 杉木人工林的地力衰退及防治技术 [A]. 中国林学会森林生态学分会. 人工林地力衰退研究 [M]. 北京:中国科学技术出版社, 1992. 49-86.
- [2] 张万儒. 森林土壤生态管理 [M]. 北京:中国科学技术出版社, 1994. 1-448.
- [3] 俞新妥. 杉木人工林地力和养分循环研究进展 [J]. 福建林学院学报, 1992, 12(3):264-275.
- [4] 俞新妥, 杨玉盛, 何智英, 等. 炼山对杉木人工林生态系统的影响 [J]. 福建林学院学报, 1989, 9(3):238-255.
- [5] 方奇. 杉木连栽对土壤肥力及杉木生长影响 [J]. 林业科学, 1987, 23(4):384-391.
- [6] 马祥庆. 不同林地清理方式对杉木人工林地力的影响 [J]. 林业科学, 1995, 31(6):487-490.
- [7] 杨承栋, 张小泉, 焦如珍, 等. 杉木连栽土壤组成结构性性质变化及对生长影响 [J]. 林业科学, 1996, 32(2):175-181.
- [8] 郑郁善, 丁应祥. 观光木杉木混交林土壤肥力研究 [J]. 南京林业大学学报, 1997, 21(4):27-32.
- [9] 杨玉盛, 俞新妥, 林先富. 杉木-山苍子-作物复合经营模式土壤肥力的研究 [J]. 林业科学, 1993, 29(2):97-103.

- [10] 周东雄. 杉木深山含笑混交林土壤肥力的研究 [J]. 福建林学院学报, 1995, 15(2):220-224.
- [11] 张沈龙, 林开敏, 郑郁善. 杉木套种三年桐模式土壤肥力的研究 [J]. 福建林学院学报, 1995, 15(2):170-174.
- [12] 杨玉盛, 俞新妥. 杉木-山苍子套种模式土壤特性和短期收益的研究 [J]. 福建林学院学报, 1991, 11(3): 241-248.
- [13] 郑郁善, 李建光, 徐凤兰, 等. 杉木毛竹混交复层林生物量和结构研究 [J]. 福建林学院学报, 1997, 17(3): 227-230.
- [14] 郑郁善, 陈礼光, 洪伟. 毛竹杉木混交林生产力和土壤性状研究 [J]. 林业科学, 1998, 34(专刊1):16-25.
- [15] 中国科学院南京土壤研究所. 土壤理化分析 [M]. 上海:上海科学技术出版社, 1978. 73-256.
- [16] Mandelbrot B B. Form Chance and Dimension [M]. San Francisco:Freeman, 1977. 1-234.
- [17] Mandelbrot B B. The Fractal Geometry of Nature [M]. San Francisco:Freeman, 1982. 45-256.
- [18] Turcotte D L. Fractal fragmentation [J]. Geography Res, 1986, 91(12):1921-1926.
- [19] Rieu M, Sposito G. Fractal fragmentation, soil porosity and soil water properties: II. Application [J]. Soil Sci Soc Amer J, 1991, 55:1239-1244.
- [20] Falconer K J. Fractal Geometry [M]. New York:John Wiley and Sons, 1989. 89-159.
- [21] 杨培岭, 罗远培, 石元春, 等. 用粒径的重量分布表征的土壤分形特征 [J]. 科学通报, 1993, 38(20):1896-1899.
- [22] 吴承祯, 洪伟. 杉木数量经营学引论 [M]. 北京:中国林业出版社, 2000. 298-300.
- [23] 刘克锋, 韩劲. 土壤肥科学 [M]. 北京:中国建筑工业出版社, 1995. 32.

《中国南方果树》和《柑桔与亚热带果树信息》2003 年征订启事

《中国南方果树》是由中国农业科学院柑桔研究所主办的专业技术期刊,为中国期刊方阵双效期刊。报道内容分三大板块:一是柑桔类果树,二是荔枝、龙眼、香蕉、芒果、杨梅、枇杷等其他常绿果树,三是梨、桃、苹果、葡萄、李等落叶果树。对落叶果树,突出在南方温暖湿润气候条件下与北方不同的栽培管理、病虫害防治特点及适宜发展的品种。双月刊。每期定价 4.00 元,全年 24.00 元。各地邮局办理订阅,邮发代号:78-13。漏订者可直接与本编辑部联系,常年办理邮购。编辑部地址:重庆北碚歇马中国农业科学院柑桔研究所内;邮编:400712;联系电话:(023)68242146;传真:(023)68242912。

《柑桔与亚热带果树信息》是由中国农业科学院柑桔研究所主办。报道分析与南方果业(包括常绿果树和落叶果树)有关的科技、经济、政策信息,注重信息报道“快、全、便、准”。信息主要来源:一是从国内外数百种杂志、报纸中精选,二是分布于各地的数百名通讯员的稿件,三是特约专家撰文,四是业内人士的自由来稿。主要栏目:“专家论坛”、“区域果业”、“市场分析”、“果乡短波”、“产销快讯”、“海外传真”、“实用技术·柑桔”、“实用技术·常绿果树”、“实用技术·落叶果树”、“病虫草害防治”等。月刊,每期定价 3 元,全年共 36 元。各地邮局均可办理订阅,邮发代号:78-10。另外,可随时向中国南方果树信息中心邮购,汇款地址:重庆市北碚区歇马镇中国农业科学院柑桔研究所,邮编:400712。电话:(023)68242903、68242146。