

杉木拟赤杨混交林土壤肥力表征指标的研究

何东进, 洪伟, 吴承祯, 郑郁善

(福建农林大学林学院资源与环境系, 福建 南平 353001)

摘要: 运用分形理论探讨了杉木拟赤杨混交林6种不同模式土壤结构的分形特征, 计算了土壤团聚体、策团聚体与机械组成的分形维数, 并建立分形维数与 $> 0.25\text{ mm}$ 水稳定性团聚体、土壤结构体破坏率、土壤结构系数、土壤分散系数 $> 0.01\text{ mm}$ 水稳定性微团聚体及 $> 0.01\text{ mm}$ 土壤机械组成等土壤肥力指标之间的回归模型。结果表明: $> 0.25\text{ mm}$ 土壤水稳定团聚体 $> 0.01\text{ mm}$ 土壤水稳定性微团聚体含量越大, 团粒结构的分形维数越小, 土壤肥力越高; 在6种杉木杨混交林模式中, 以杉木拟赤杨3:1与拟赤杨纯林培肥土壤能力最佳, 杉木纯林最差; 所建立的分形维数与各土壤肥力指标之间的模型均存在显著的回归关系, 因此, 分形维数可以作为表征土壤肥力的一个新指标, 从而为山地土壤肥力的科学评价提供了有力的手段。

关键词: 杉木; 拟赤杨; 混交林; 土壤肥力; 分形维数; 表征指标

中图分类号: S718

文献标识码: A

杉木(*Cunninghamia lanceolata*)是我国南方主要造林树种, 由于杉木人工林的大面积营造导致阔叶林面积急剧减少, 引起了地方衰退、环境恶化、林分稳定性下降、生产力逐代递减等问题^[1~4], 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^[5~8]。拟赤杨(*Alniphyllum fortunei*)具有生长快、干形直、材质好、适应性强等特点, 是重要的速生乡土树种, 常与杉木混生于天然林中, 目前多处于野生状态^[9]。营造针阔混交林, 发挥阔叶树的凋落物多、易分解、养分丰富等优点, 具有较好的培肥土壤功能^[10], 可增加林分生物多样性与稳定性。为此, 笔者在前人研究的基础上, 运用分形理论对杉木拟赤杨混交林的土壤肥力进行更深入的研究, 为杉木拟赤杨的培育模式与林地土壤的科学评价提供依据。

1 试验地概况

试验地^[9]设在松溪县城关镇, 地理位置 $27^{\circ}35'N$, $118^{\circ}41'E$ 。属亚热带季风湿润气候, 年均气温 $18.1^{\circ}C$ 年均相对湿度79, 地带性植被为常绿阔叶林、杉松针叶林毛竹林为主。林地土壤为暗红壤, 海拔高度 $270\text{ m} \sim 400\text{ m}$, 坡度 $23^{\circ} \sim 25^{\circ}$, 坡向为南坡, 土

层深厚肥沃。

采用随机区组法进行试验设计, 处理包括: 杉木和拟赤杨混交林, 混交比例为5:1(A)、4:1(B)、3:1(C)、2:1(D)以及拟赤杨纯林(E), 杉木纯林(F)等6种, 每个处理重复4次, 共设置24块 $25.8\text{ m} \times 1.82\text{ m}$ 。

每年调查各标准地林分生长情况。1994年底进行全面调查(包括标准地内林木胸径、树高、冠幅), 采用间接收获法调查乔木生物量。土壤取样采用多点(4点)分层取样法, 取 $0\text{ cm} \sim 20\text{ cm}$ 取样混合均匀后取 1 kg 左右做室内土样分析。土壤团聚体采用机械筛分法, 土壤机械组成和微团聚体采用吸管法^[11]。不同模式土壤团聚体组成、土壤团聚体组成及土壤机械组成分析结果列于表1, 2。

2 研究方法

分形理论由B. B. Mandelbort于20世纪70年代建立的^[14~19]。它主要应用于研究自然界和人类社会中存在着的无特征尺度却有自相似性的体系中, 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, 总是存在更精继的结构并且其结构总是相似的。对于这一特征进行描述的主要工具是分形维数。求算分形维数

收稿日期: 2001-09-25。

基金项目: 福建省教育委员会科学基金资助项目(JA99194)。

作者简介: 何东进(1969-), 男(汉族), 福建福鼎人, 副教授, 硕士。主要从事数量生态与生态的教学与科研工作, 在《林业科学》、《应用与环境生物学报》、《应用生态学报》等刊物上发表学术论文30篇。

表 1 各模式土壤团聚体组成(%)

Table 1 The soil aggregate constitution in different stands

模式 Patterns	团聚体直径 Diameter of aggregates(mm)							结构体破坏率 Percentage of destroyed structure(%)	分形维数 Fractal dimension	相关系数 Correlation coefficient
	> 5	5~2	2~1	1~0.5	0.5~0.25	< 0.25	> 0.25			
A	13.1 15.7	16.9 19.6	18.2 23.4	16.5 19.3	6.5 10.0	28.8 12.5	71.2 87.5	18.65	2.6712 2.4678	0.9859 0.9790
B	12.8 14.0	16.1 17.9	18.5 20.1	14.0 18.2	8.9 12.1	29.7 17.7	70.3 82.3	14.58	2.6849 2.5619	0.9904 0.9822
C	15.2 16.6	18.3 19.0	21.5 23.6	13.4 17.8	7.3 10.0	24.3 13.1	75.7 86.9	12.89	2.6283 2.4808	0.9888 0.9821
D	8.3 9.1	14.2 15.8	22.7 25.0	17.2 20.5	9.1 12.3	28.5 17.1	71.1 82.9	14.23	2.6677 2.5469	0.9785 0.9708
E	20.3 21.1	20.5 22.7	17.3 20.5	11.7 13.2	5.8 7.2	24.4 15.4	75.6 84.6	10.64	2.6330 2.5157	0.9919 0.9925
F	24.1 40.4	16.5 16.6	12.7 13.4	10.8 11.3	6.9 7.1	29.0 11.4	71.0 88.6	19.86	2.6906 2.4722	0.9956 0.9974

注: 结构体破坏率=[干筛(>0.25mm 团聚体)-湿筛(>0.25mm 团聚体)]/干筛(>0.25mm 团聚体)×100%, 分母为干筛, 分子为湿筛; 数据来源文献^[9]

表 2 各模式土壤机械组成和微团聚组成(%)

Table 2 soil particles and micro-aggregate constitution in different stands

模式 Patterns	粒径 Diameter (mm)							分散系数 Disperse coefficient	结构系数 Structure coefficient	分形维数 Fractal dimension	相关系数 Correlation coefficient
	1~0.25	0.25~ 0.05	0.05~ 0.01	0.01~ 0.005	0.005~ 0.001	< 0.01	> 0.01				
A	30.01 19.56	11.57 10.65	14.01 12.28	19.54 19.67	14.30 13.55	10.57 24.09	55.69 42.49	43.88	56.12	2.7025 2.8055	0.9570 0.9670
B	23.69 18.73	14.97 12.25	19.02 12.23	18.12 15.61	14.50 13.64	9.70 27.54	57.68 43.21	35.22	64.78	2.6821 2.8233	0.9578 0.9792
C	29.75 24.32	17.31 15.11	23.01 15.78	6.43 3.94	15.10 14.32	8.04 26.53	70.07 55.21	31.66	68.34	2.6616 2.8494	0.9759 0.9962
D	28.71 19.35	13.52 11.33	19.55 14.81	15.72 14.73	12.10 11.35	10.30 27.43	61.88 45.49	36.23	63.77	2.6896 2.8242	0.9720 0.9844
E	36.57 28.31	13.14 10.53	23.44 18.67	7.54 5.27	11.20 10.72	8.20 26.50	71.15 57.51	30.94	69.06	2.6587 2.8663	0.9852 0.9954
F	23.10 19.56	13.53 11.25	10.86 9.72	19.46 18.04	18.30 15.71	11.78 25.98	50.49 40.29	45.38	54.62	2.7226 2.7994	0.9459 0.9663

注: 分散系数=(水散性粘粒/总粘粒)×100%; 结构系数=100%-分散系数; 分子—土壤微团聚体; 分母—机械组成。数据来源文献^[5]。

通常采用在双对数坐标下进行线性回归, 所得拟合直线的斜率(或其转换结果)为分形维数值。因此, 分形理论的主要研究内容是分形体的分形维数及自相似性规律。

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^[14~15]。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 ($d_i > d^{i+1}$ $i=1, 2, \dots$) 的土粒构成的体积 V ($\delta > d_i$) 可由类似 Katz 的公式表示:

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

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} 间粒的平均值,忽略各粒级间土粒比重 ρ 的差异,即 $\rho_i = p(i=1, 2, \dots)$,则:

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

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

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

由(2)、(3)式可以导出

$$\frac{W(\delta > \bar{d}_i)}{W_0} = 1 - \left[\frac{\bar{d}_i}{k} \right]^{3-D} \quad (4)$$

设 \bar{d}_{\max} 为最大粒级间的平均直径, $W(\delta > \bar{d}_{\max}) = 0$,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

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

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

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。

3 结果与分析

3.1 土壤颗粒结构分形维数的计算

分别以 $\lg(\bar{d}_i/\bar{d}_{\max})$ 为纵、横坐标,根据(6)式应用回归分析方法计算得到不同混交模式土壤团聚体结构、土壤微团聚体结构与土壤机械组成的分形维数,结果列于表1~表2。从表1结果可以看出,6种

混交模式土壤团聚体结构的分形维数在2.4722~2.6906之间,表现为 >0.25 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,在维数上表现出粘粒含量越高、质地越重、分形维数越高。土壤团粒结构粒径分布的分形反遇了土壤水稳定性团聚体及水稳定性微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九愈小,则土壤愈具有良好的结构与稳定性。6种混交模式中以杉木拟赤杨3:1与拟赤杨纯林的分形维数较小,结构体破坏率较低,其土壤结构与稳定性较好,杉木纯林虽然在干筛下分形维数最小,但在湿筛下分形维数最大,结构体破坏率在6种模式中也是最大,可见杉木纯林的结构与稳定性最差。表2表明, >0.01 mm的土壤微团聚体含量越高,分形维数越小;而 >0.01 mm土壤机械组成含量越高,其分形维数则越大。土壤中微团聚体含量能反映土壤的团聚善和土壤可侵蚀性。不同模式混交林较杉木纯林都有不同程度地改善土壤微团聚体状况,有利于林地水土保持,其中以杉木拟赤杨3:1与拟赤杨纯林的土壤团聚状况水土保持功能最强,而杉木纯林最差。

3.2 分形维数与土壤肥力指标的关系

土壤水稳定团聚体的状况是影响土壤肥力的一个重要因素,土壤机械组成与微团聚体组成状况体现了土壤质地、通透性及排水能力的大小,土壤结构体破坏率、结构系数(分散系数)等指标反映了土壤结构的稳定性与保肥能力,为此,笔者在前面研究的基础上,进一步建立分形维数与土壤肥力指标之间的关系,结果列于表3。

表3 分形维数与土壤肥力指标间的回归关系

Table 3 The regression relationships between D and soil fertility indexes

自变量 Independent variable x	回归模型 Regression models	相关系数 Correlation coefficient	F 检验值 F test value
>0.25 mm 水稳定团聚体含量(x_1)	$D = 3.5362 - 0.01197x_1$	-0.9936 **	771.148
结构体破坏率(湿筛下)(x_2)	$D = 2.4742 - 0.01355x_2$	-0.8033 *	7.275
结构体破坏率(干筛下)(x_3)	$D = 3.1552 - 0.04696x_3$	-0.7553 *	5.314
>0.01 mm 水稳定性团聚体含量(x_4)	$D = 2.8602 - 0.00284x_4$	-0.9536 **	40.164
>0.01 mm 土壤机械组成(x_5)	$D = 2.6644 + 0.00346x_5$	0.9702 **	64.130
分散系数(以微团聚体考虑)(x_6)	$D = 2.5423 + 0.00386x_6$	0.9652 **	54.499
结构系数(以微团聚体考虑)(x_7)	$D = 2.2988 - 0.00386x_7$	-0.9652 **	54.490
分散系数(以机械组成考虑)(x_8)	$D = 2.9738 + 0.00392x_8$	-0.9325 **	26.678
结构系数(以机械组成考虑)(x_9)	$D = 2.5821 + 0.00392x_9$	0.9325 **	26.675

$F_{0.01}(1, 11) = 9.65$; $F_{0.01}(1, 5) = 16.30$; $F_{0.05}(1, 11) = 4.48$; $F_{0.05}(1, 5) = 6.61$

由表 3 结果可知, 所建立的分形维数与土壤肥力指标之间的回归方程 F 值均大于其相应临界值, 表明分形维数与各土壤指标均存在显著或极显著的直线关系, 其中与 $> 0.25 \text{ mm}$ 水稳定团聚体含量、结构体破坏率 $> 0.01 \text{ mm}$ 水稳定性微团聚体含量、结构系数(以微团聚体考虑)、分散系数(以机械组成考虑)等指标呈负相关, 而与 $> 0.01 \text{ mm}$ 土壤机械组成、分散系数(以微团聚体考虑)、结构系数(以机械组成考虑)等指标呈正相关, 说明分形维数能够十分理想地反映了土壤结构稳定性、通透性、抗蚀性等特点, 因此, 可以用分形维数作为表征土壤培肥能力的一个重要指标。

4 小结与讨论

土壤粒径分布的分形维数不仅能够表征土壤粒径大小的影响, 而且还能反映质地均一程度、土壤通透性、抗蚀性及土壤肥力。本文运用分形理论计算了杉木拟赤杨 6 种混交林的土壤团聚体结构、土壤微团聚体结构及土壤机械组成的分形维数, 结果表明: 土壤 $> 0.25 \text{ mm}$ 的团粒含量、 $> 0.01 \text{ mm}$ 的土壤微团聚体含量、 $< 0.01 \text{ mm}$ 土壤机械组成含量越低, 其结构的粒径分布的分形维数越高, 土壤的结构性、稳定性与水土保持能力愈强, 反之, 土壤的培肥能力则较差。

杉木拟赤杨混交林树冠层厚, 叶面积大, 结构复杂, 形成有利于林木生长的森林小气候。混交林内光照强度减弱, 散射光增加, 分布较合理, 温度变化幅度小, 温度大且稳定, 空气中 CO_2 浓度高, 有数量多、成分复杂的枯枝落叶, 林下微生物多, 土壤酶活性强, 加速了枯落物的分解, 改善土壤结构和理化性质, 从而提高了林地土壤肥力。研究结果可以看出, 杉木拟赤杨混交林各模式均有不同程度地改善了土壤状况, 其中以杉木拟赤杨 3:1 与拟赤杨纯林为最佳, 而杉木纯林则最差, 因此, 营造杉木混交林是实现杉木与林地资源可持续发展的重要途径之一。

分形维数与土壤水稳定团聚体含量、结构体破坏率、水稳定性微团聚体含量、土壤机械组成等土壤指标间均存在显著的回归关系, 因此, 将作为研究不规则客体有效工具的分形理论用来描述土壤肥力等

特征是可行的, 同时由于分形维数能够客观表征土壤团粒结构的水稳定性团聚体、水稳定性微团本及粒径大小组成, 应该作 表征土壤肥力的一个测定指标, 人而为科学评价土壤肥力提供有力的手段。

参考文献:

- [1] 盛伟彤. 人工林地力衰退研究[M]. 北京: 中国林业出版社, 1992, 243~283.
- [2] 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.
- [3] 马祥床. 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.
- [4] 杨承栋, 魏以荣, 冯福娟. 杉木连栽土壤组成结构性变化及对生长影响[J]. 林业科学, 1996, 32(2): 175~181.
- [5] 郑郁善, 邱尔发, 徐道旺. 拟赤杨杉木混交林培肥土壤的研究[J]. 福建林学院学报, 1997, 17(4): 331~335.
- [6] 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.
- [7] 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.
- [8] 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.
- [9] 郑万钧. 中国树木志[M]. 北京: 中国林业出版社, 1985, 1629~1631.
- [10] 俞新妥. 混交林营造原理与技术[M]. 北京: 中国林业出版社, 1989, 5~18.
- [11] 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.
- [12] Mandelbrot B B. Form chance and Dimension. [M]. San Francisco: Freeman, 1977, 1~234.
- [13] Mandelbrot B B. The fractal geometry of nature. [M]. San Francisco: Freeman, 1982, 45~256.
- [14] Turcotte D L. Fractal fragmentation[J]. Geography Res., 1986, 91(12): 1921~1926.
- [15] Falconer K J. Fractal geometry[M]. John wily and sons, 1989, 89~159.
- [16] 杨培岭, 罗远培, 石元春. 用粒径的重量分布表征的土壤分形特征研究[J]. 科学通报, 1993, 38(20): 1896~1899.
- [17] 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.
- [18] 吴承祯, 洪伟. 紫色土壤分形特征及土壤可蚀性关系研究[J]. 土壤侵蚀与水土保持学报, 1998, 4(6): 36~41.
- [19] 吴承祯, 洪伟. 采伐剩余分解过程中土壤分形维数与土壤性质变化关系研究[J]. 农业系统科学与综合研究, 1998, 14(3): 192~196.

Study on Characteristic Index of Soil Fertility in Chinese Fir Plantation Mixed with *Alniphyllum Fortunei*

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

(*Department of Resources and Environment, Fujian Forestry College Nanping 353001 China*)

Abstract: The fractal characteristic of soil structure under six different patterns of Chinese fir plantation mixed with *Alniphyllum fortunei* was discussed and the fractal dimension of soil aggregate structure, soil micro-aggregate structure and soil mechanical composition were calculated in this paper. Then, the relationships between soil fractal dimension and $>0.25\text{mm}$ content of water stable aggregates, percentage of destroyed structure, disperse coefficient, structure coefficient, $>0.01\text{mm}$ content of water stable micro-aggregates and $>0.01\text{mm}$ mechanical composition were built. The results show that the higher the $>0.25\text{mm}$ content of water stable aggregates and $>0.01\text{mm}$ water stable micro-aggregates in soil, the smaller the fractal dimension of soil aggregates, and the higher the soil fertility. The pattern of Chinese fir plantation mixed with *Alniphyllum fortunei* (3: 1) and pure *Alniphyllum fortunei* plantation had a better fertilizing ability. The regression relationships of mine built models were all remarkable. Therefore, the fractal dimension of soil structure could be used as a index in characterizing the soil fertility and it also provided a scientific basis in evaluating the mountain soil fertility.

Key words: Chinese fir; *Alniphyllum fortunei*; the mixed forest; soil fertility; fractal dimension; characteristic index