

不同经营模式土壤团粒结构的 分形特征研究*

吴承祯 洪伟

(福建林学院资源与环境系, 南平 353001)

摘要 土壤团聚体和水稳性团聚体的状况是影响土壤肥力的一个重要因素。本文运用分形模型对不同林分经营模式土壤团粒结构进行研究,探讨了分形维数与土壤肥力的关系。结果表明:土壤水稳性团聚体及水稳性大团聚体含量越大,团粒结构的分形维数越小,土壤肥力越高;土壤团粒结构的分形维数与水稳性团聚体含量及水稳性大团聚体含量之间存在显著回归关系;分形模型为土壤肥力研究提供新方法。

关键词 分形维数, 团粒结构, 经营模式

中图分类号 S152.4

作为当代新兴学术思潮的分形论,从 B. B. Mandelbort 1967 年在美国《科学》杂志上发表题为“英国的海岸线有多长”起,到他的专著《Fractal: Form Chance and Dimension》(1977)^[1]及《The Fractal Geometry of Nature》(1982)^[2]发表为标志而建立起来。今天,分形论已倍受自然科学家和社会科学家的极大关注,并被逐渐地应用于自然界和人类社会到处存在着的无特征尺度却有自相似性的体系中,成为研究和处理复杂现象的强有力的理论工具^[3]。

形状与大小各异的土壤颗粒组成的土壤结构,表现上反映出一个不规则的几何形体。已有的研究表明,土壤是具有分形特征的系统^[4~6]。Turcotte^[4]提出了多孔介质材料的粒径分布公式为 $N(\delta > d_i) \propto d_i^{-D}$,式中 N 是粒径大于 d_i 的总数; D 是粒径分布的分形维数。由于 N 值不能直接通过实验得到,其值受到假设与实际符合程度的影响,也影响了 D 值的准确计算。基于在通常的土壤分析中,得到的均为土壤粒径的重量分布值,杨培岭等^[7]提出用粒径的重量分布取代粒径的数量分布来描述土壤分形特征的模型,则比较精确、简便。

土壤团聚体和水稳性团聚体的状况是影响土壤肥力的一个重要因素,其在一定程度上乃至很大程度上影响土壤通气性与抗蚀性。本文应用分形模型对福建省不同林分经营模式土壤团粒结构进行分形维的研究,并对它们的结构特性作了进一步的分析和探讨,从而为土壤肥力特征描述提供新尺度、新方法。

* 福建省财政厅重点资助项目(96闽财农预字015)

收稿日期:1997-06-20;收到修改稿日期:1997-12-31

1 分形模型

分形 Fractal 一词是由 Mandelbort 以拉丁文 *Fractus* (断裂和碎片) 为根创造的新词, 用来描述一些非常不规则以至不适宜视为经典几何研究的对象, 试图透过混乱现象和不规则构型揭示隐藏于现象背后的局部与整体的本质联系和运动规律。

对于分形, 至今尚无精确的定义, 最好可将其视为具有精细的自相似结构、不能用传统的几何语言描述、“分形维数”大于它的拓扑维数、可以简单的方法定义而由迭代方法产生的集合 F 。

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 Kat_z 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:

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

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:

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

由 (2)、(3) 式导出:

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

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 $K = \bar{d}_{\max}$ 。由此得出土壤颗粒的重量分布与平均粒径间的分形关系式:

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

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, 不难看出 $3 - D$ 是 $\lg(\bar{d}_i / \bar{d}_{\max})$ 和 $\lg(W_i / W_0)$ 的实验直线的斜率, 因此, 要测定 D 即可用回归分析方法。

2 材料与方 法

2.1 试验地概况

在福建省北部地区收集试验材料。试验区属中亚热带季风气候, 年均气温在 17.5~19.3℃, 年均降水

量在 1700~1900mm, 年 > 10℃ 的积温在 5000℃ 以上。地貌为中低山丘陵构造地貌, 试验地土壤为山地黄红壤、山地暗红壤、山地红壤。

2.2 不同林分经营模式土壤团粒结构数据的收集

在福建省建瓯市, 分别在杉木-山苍子模式(杉木与山苍子混交, 记为 A)、杉木-山苍子-黄豆模式(杉木与山苍子混交林下种黄豆, 记为 B)、杉木-山苍子-烟叶模式(杉木与山苍子混交林下种烟叶, 记为 C)、杉木纯林模式(记为 D)林分中建立 20m × 20m 标准地各两块, 土壤为山地黄红壤^[9]; 在福建省南平市溪后安曹下, 分别在杉木丰产林模式(记为 E)、杂木林模式(记为 F)林分中设置 20m × 20m 标准地 9 块, 土壤为山地暗红壤^[9]; 在福建省沙县水南林场, 分别于杉木~深山含笑模式(杉木与深山含笑混交林, 记为 G)及杉木纯林模式(记为 H)林分内建立 20m × 20m 标准地各 3 块, 土壤为山地红壤^[10]; 在福建省尤溪县城关镇 5 年生的杉木幼林套种三年桐模式(记为 I)及杉木纯林模式(记为 J)林分内设置 20m × 20m 标准地, 土壤为山地红壤^[11]。在以上各标准地内按梅花型随机布点(5 点), 取 0~20cm 表土土样混匀, 土壤团粒结构测定用机械筛分法^[12], > 0.25mm 团聚体称为水稳性团聚体, 而 > 5mm 团聚体称为水稳性大团聚体。各试验地概况见文献[9~11]。各经营模式土壤 0~20cm 表层土壤团粒结构见表 1。

表1 不同经营模式土壤团聚体组成(%)

Table 1 Composition of soil aggregates under different management patterns (%)

模式类型 Pattern type	团聚体大小 Aggregate size (mm)						结构破坏率(%) Structural damage (%)	相关系数 Correlation coefficient	分形维数 Fractal dimension
	>5	5~2	2~1	1~0.5	0.5~0.25	>0.25			
A	35.95	18.54	11.97	11.84	7.40	85.70	4.22	0.998	2.522
	39.29	13.86	15.67	12.14	8.53	89.48			
B	10.37	17.08	14.93	16.73	14.03	73.14	12.88	0.985	2.670
	14.39	15.34	20.89	18.37	13.84	85.95			
C	29.91	12.83	10.57	12.09	11.50	76.90	11.20	0.996	2.653
	36.10	14.71	12.88	11.84	11.06	86.60			
D	12.53	20.90	16.04	15.54	12.73	78.74	10.02	0.990	2.611
	20.30	14.87	24.03	15.67	12.64	87.51			
E	14.90	18.89	16.24	17.66	13.51	81.20	7.17	0.984	2.584
	21.32	16.49	19.96	17.33	12.37	87.47			
F	21.54	21.53	16.72	17.80	9.34	86.93	5.14	0.989	2.487
	22.16	18.16	20.96	20.30	10.06	91.64			
G	6.04	20.34	19.64	22.04	5.28	73.34	8.11	0.971	2.638
	8.50	20.37	19.42	24.08	8.47	80.90			
H	4.34	5.83	20.50	23.08	8.04	71.79	20.07	0.966	2.671
	9.08	23.78	22.80	24.88	9.28	89.82			
I	28.52	15.89	14.89	12.95	7.42	79.67	14.42	0.996	2.603
	38.32	23.51	14.35	10.79	6.12	93.09			
J	19.69	16.16	16.35	14.88	7.95	75.03	16.99	0.993	2.646
	29.09	28.48	8.28	14.62	9.93	90.39			

* 分母-干筛, 分子-湿筛; 表中资料来源于文献[9~12]。

3 结果与分析

应用回归分析法计算得到不同经营模式土壤团粒结构的粒径分布的分形维。10种经营模式土壤团粒结构的粒径分布的分形维数在 2.337~2.671 之间(表 1),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。土壤被认为是一种具有分形特征的分散多孔介质,是因为它的结构性状具有统计意义上的自相似性质。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性团聚体及水稳性大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(表 1)。团聚体含量与团粒结构粒径分布的分形维数 D 的关系列于表 2。

表2 分形维数与土壤团聚体含量回归关系

Table 2 The regression relation between D and the content of soil aggregates

自变量 x	回归模型	相关系数
Independent variable x	Regression model	Correlation coefficient
水稳性团聚体含量 (x_1)	$D=3.506-1.147x_1$	-0.964
水稳性大团聚体含量 (x_2)	$D=4.143-1.907x_2$	-0.942

分形维数与水稳性团聚体含量 (x_1)、水稳性大团聚体含量 (x_2) 之间存在显著直线关系 ($P < 0.01$),说明分形维数能客观反映团粒结构的结构性状,从而为土壤的通透性及抗蚀性以及土壤肥力的表征提供一个新指标。

在 10 种不同经营模式中,杂木林模式 (F) 土壤的团粒结构的粒径分布的分形维数最小,说明其土壤的水稳性团聚体含量较高,土壤有机胶结水稳性团聚体含量较杉木丰产林模式 (E) 增加以及林下植被和枯枝落叶的有益作用促使土壤结构稳定性提高。模式杉木-山苍子-黄豆 (B) 土壤的团粒结构的粒径分布的分形维数最大,说明其结构和稳定性较差。

在人工混交林模式中,模式杉木-山苍子 (A) 土壤的团粒结构的粒径分布的分形维数最小,反映出其土壤水稳性团聚体及水稳性大团聚体含量较大,而其结构体分散率较小,表明土壤具有良好的结构与稳定性。这与该模式郁闭时间早,较大数量山苍子落叶覆盖地表及山苍子根系密布土壤表层对土壤起着穿插、挤压和根系枯死有关(与纯林模式相比)。因此,模式 A 具有良好土壤培肥能力,不但有利于杉木幼林生长,也有一定的短期收益,是我国南方优良杉木混农林业模式之一^[13~14]。

4 讨论

土壤团粒结构粒径分布的分形维数不仅能够表征土壤团聚体粒径大小的影响,而且还能反映质地均一性的程度、土壤通透性及抗蚀性以及土壤肥力。所以在用团粒结构分形维来表达土壤通透性、抗蚀性以及土壤肥力时,不仅团粒结构的粘粒含量对土壤粒径分布的分形特征影响很大,同时单一粒级的集中程度对分形维数的数值也会产生重要影响。

分形维数越高,表明土壤水稳性团聚体及水稳性大团聚体含量越低,表征了土壤结构

越紧实的特性。分形维数越低,表明土壤水稳性团聚体及水稳性大团聚含量较高,表征了相对越松散、通透性越好的土壤结构性状。因此,分形维数能客观表征土壤团粒结构的水稳性团聚体及水稳性大团聚体含量及粒径大小组成,不失为一个理想的土壤肥力测定指标。

10种不同的经营模式土壤团粒结构的分形特征计算表明,混交模式比纯林模式的土壤团粒结构的分形维数要小,说明混交林经营模式土壤的水稳性团聚体及水稳性大团聚体含量较大,土壤具有良好的结构与稳定性。而又以天然混交林(杂木林)为最小,表明其土壤结构、通气、抗蚀性最好,具有良好肥力。在人工混交林中,以模式杉木-山苍子(A)为我国南方优良杉木混农林业模式之一。

本文研究表明,分形维数与土壤水稳性团聚体和水稳性大团聚体含量有明显对应关系,所以作为一种研究和处理不规则客体的理论工具,分形学应该能用来描述土壤肥力等特征。而且本文已初步揭示其规律性,因此进一步深入探讨分形学在土壤结构性状与土壤肥力方面的应用也就显得十分必要。

参 考 文 献

1. Mandelbrot B B. Form chance and Dimension. San Francisco: Freeman, 1977. 1~234
2. Mandelbrot B B. The fractal geometry of nature. San Francisco: Freeman, 1982. 45~256
3. 林鸿溢,李映雪. 分形论——奇异性探索. 北京理工大学出版社,1992. 43~78
4. Turcotte D L. Fractal fragmentation. J. Geography Res., 1986, 91(12):1921~1926
5. Rieu M, Sposito G. Fractal fragmentation, soil porosity and soil water properties II. Application. Soil. Sci. Am. J., 1991, 55:1231~1238
6. Falconer K J. Fractal geometry. John wiley and sons. 1989. 89~159
7. 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. 科学通报,1993,38(20):1896~1899
8. 杨玉盛,俞新妥,林先富等. 杉木-山苍子-作物复合经营模式土壤肥力的研究. 林业科学,1993,29(2):97~103
9. 林光耀,杨玉盛,杨伦增等. 杉木林取代杂木林后土壤结构特性变化的研究. 福建林学院学报,1995,15(4):289~292
10. 周东雄. 杉木深山含笑混交林土壤肥力的研究. 福建林学院学报,1994,4(3):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. 福建林学院学报,1995,15(2):170~174
12. 中国科学院南京土壤研究所. 土壤理化分析. 上海科技出版社,514~521
13. 杨玉盛,林先富,邹双全. 杉木套种山苍子模式的结构与生物量初步研究. 福建林学院学报,1991,11(4):341~348
14. 杨玉盛,俞新妥. 杉木-山苍子套种模式土壤物理特性和短期收益的研究. 福建林学院学报,1991,11(3):241~248

STUDY ON FRACTAL FEATURES OF SOIL AGGREGATE STRUCTURE UNDER DIFFERENT MANAGEMENT PATTERNS

Wu Cheng-zhen Hong Wei

(*Fujian Forestry College, Nanping 353001*)

Summary

The status of soil aggregates is an important factor affecting soil fertility. In this work, the fractal model was used to study the soil aggregate structure under different stand management patterns and to inquiry the relation between fractal dimension and soil fertility. The results indicated that the higher the content of water stable aggregates and water stable big aggregates in soil, the smaller the fractal dimension of soil aggregates, and the higher the soil fertility. There were remarkable regression relationships between the fractal dimension of soil aggregates and the contents of water stable aggregates and water stable big aggregates. The fractal model could be a new tool for the research on soil fertility.

Key words Fractal dimension, Aggregate structure, Management pattern