

中亚热带几种珍贵树种林分土壤团粒结构的分维特征

刘金福,洪伟,吴承祯

(福建农林大学林学院,福建南平 353001)

摘要:应用分形原理、弹性分析及边际分析方法,对中亚热带几种珍贵树林表层土壤团粒结构进行研究,提出采用 $Y = aD_{\omega}^{\beta_1} D_{\alpha}^{\beta_2}$ 模型,探讨了分形维数与土壤肥力的关系以及土壤团聚体分形维数变化对林地土壤性质影响的效应。研究结果表明:中亚热带珍贵树种林分土壤 $>0.25\text{ mm}$ 的团聚体、水稳性团聚体的团粒含量越高,团粒结构的分形维数越小,表征土壤肥力较高;土壤团粒结构的分形维数与土壤团聚体、水稳性团聚体之间存在显著回归关系;土壤团聚体结构分形维数与土壤性质之间存在显著相关定量关系;7 种珍贵树种林分中,格氏栲天然林土壤结构的稳定性、水源涵养、自肥能力均比其它珍贵树林优越。分形维数为不同珍贵树种林分表层土壤肥力特征描述提供新尺度、新方法,也为中亚热带珍贵树种林地土壤科学管理提供依据。

关键词: 中亚热带;珍贵树种;土壤分形特征;土壤肥力;弹性分析;边际分析

Fractal Features of Soil Clusters Under Some Precious Hardwood Stands in the Central Subtropical Region, China

LIU Jin-Fu, HONG Wei, WU Cheng-Zhen (Forestry College of Fujian Agriculture and Forestry University, Nanping 353001, China). *Acta Ecologica Sinica*, 2002, 22(2): 197~205.

Abstract: Based on the fractal theory, elasticity analysis and marginal yield analysis, this paper studied the fractal model of soil cluster structures under different precious hardwood stands in the central subtropical region of China. It has been proposed that the model $Y = aD_{\omega}^{\beta_1} D_{\alpha}^{\beta_2}$ can be used for the analysis of the relations between fractal dimension of soil cluster structure and soil fertility, as well as the effects of soil cluster fractal changes on the soil natures in the forest stands. The results showed that the more the contents of the cluster $>0.25\text{ cm}$ and the water-stable cluster, the less the fractal dimension of soil cluster and the higher the soil fertility were. There existed close relationship between fractal dimension of soil cluster and the contents of soil cluster or water-stable cluster composition in the hardwood stands. There also existed remarkable quantity relationship between fractal dimension of soil clusters and soil fertility under different hardwood stands. *Castanopsis kawakamii* stand has the greatest advantages in the soil structure stability, soil and water conservation, soil self-fertilization capability in comparison among all the 7 hardwood stands. Obviously the fractal model have provided a new means and a new scale for the description of soil fertility, and at the some time it will lay a solid foundation for the forest soil management of the different precious tree stands in the central subtropical region of China.

Key words: subtropical region; precious hardwood; fractal dimension, soil fertility; elasticity analysis; marginal yield analysis

文章编号: 1000-0933(2002)02-0197-09 中图分类号: S718.5 文献标识码: A

基金项目: 福建省教委科学基金资助项目(K20043)

本文得到北京林业大学李俊清教授的悉心指导, 谨此致谢。

收稿日期: 2000-08-06, 修订日期: 2001-09-18

作者简介: 刘金福(1966~), 男, 福建永春人, 博士, 副教授。主要从事森林生态学、数量生态学研究。

森林土壤资源不仅为林业可持续经营提供了物质基础,而且是环境持续发展的物质基础。我国南方自然条件优越,气候温暖湿润,雨量充沛,土壤肥沃,阔叶树种类繁多,资源较丰富。然而长期以来,阔叶林由于乱砍滥伐,致使丰富的阔叶林资源日趋减少,尤其许多珍贵树种如格氏栲、楠木、樟树等日趋贫乏,有些甚至濒临灭绝,列为国家重点保护对象。众多研究表明,阔叶林冠层较厚,枝叶较浓密,凋落物量大,易分解,归还林地养分大于吸收养分,具有较高涵养水源、改良土壤的能力。可见,乱砍滥伐珍贵阔叶树种,是导致林地生产力下降和生态环境的变化的重要原因之一。如何合理利用、保护和改良森林土壤资源及提高林地生产力一直是林业、生态等领域关注的焦点,并在许多方面开展了研究^[1~3]。

自然界大部分物体往往处于无序的、不稳定的、非平衡的和随机的状态之中,其主要特征难以用经典的几何理论加以解释。但从 1967 年 B. B. Mandelbort 在美国《科学》杂志上首次发表题为“英国的海岸线有多长”论文起,分形论倍受自然科学家和社会科学家的极大关注,能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,具有广阔的应用前景。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状,具有统计意义上的自相似性质,已有的研究表明,土壤是具有分形特征的系统^[4,5]。Turcotte 提出了多孔介质材料的粒径分布与分形维数关系公式^[4];杨培岭等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^[6],则较精确、简便;吴承祯等提出运用分形模型分析不同林分经营模式土壤团粒结构^[7]。

福建林学院三明莘口教学林场 1961 年在中亚热带格氏栲天然林(格氏栲保护区内)采伐迹地上及其周围小湖工区进行引种栽珍贵阔叶树种试验亦近 40 a,有关格氏栲天然林与试验的珍贵树种林涵养水源、肥沃土壤的功能及森林生态效应的差异研究已陆续报道,如杨玉盛等报道不同起源格氏栲林分结构、地力、水源涵养功能及根际土壤微生物生化特性等差异^[8~11],李家和等对不同起源格氏栲林分下土壤微生物生态分布作初步研究^[12]等,均为格氏栲林资源管理和保护提供依据。但其涉及到珍贵阔叶树种的林分土壤特性的研究仅局限于性质的测定上,且应用弹性分析和边际分析等数学方法探讨土壤团聚体分维变化对几种珍贵阔叶树种林地土壤肥力的影响,尚未见报。因此,笔者试图在前人研究基础上,运用分形模型描述中亚热带珍贵阔叶树种林分土壤团粒结构分维特征,并对其结构特性作了进一步分析和探讨,同时应用数学方法定量分析几种珍贵阔叶树种林分土壤团聚体分维特征对土壤性质指标变化的效应,为中亚热带珍贵阔叶树种林分土壤肥力特征描述提供新尺度、新方法。这对格氏栲天然林土壤养分循环、防止地力衰退、保护和合理利用森林土壤资源提供理论依据,也对中亚热带常绿阔叶林多样性保护、地力维持及合适混交树种选择具有一定指导意义。

1 试验地自然概况

试验地位于福建三明市西南 20 多公里处的格氏栲天然林采伐迹地上及其周围的莘口教学林场小湖工区,地理位置位于北纬 26°07′~26°11′、东经 117°24′~117°27′,海拔 150~650 m,属福建武夷山东伸支脉地带,东南方为戴云山支脉,属中亚热带季风型气候,年均温度为 19.4℃,极端最低温为-5.5℃,最高温为 40℃,大于 10℃年积温为 6215℃;年均降雨量 1500 mm,3~8 月份的降雨量为全年的 75%;年均相对湿度 79%;年均风速 1.6 m/s。格氏栲天然林土壤亚类型主要暗红壤,其次紫色土,土层较厚,腐殖质含量丰富,水肥条件均较好。格氏栲天然林终年树冠浓绿,林相整齐,物种丰富,郁闭度多达 0.8 左右,树形优美,树干通直,形成中亚热带常绿阔叶林所特有的外貌特征,是我国目前面积最大保存最为完好的罕见的格氏栲天然林^[13~25]。小湖工区土壤亚类型主要为红壤、暗红壤、黄红壤、紫色土,大部分为重壤质土;小湖工区植被主要由人工营造的阔叶林及种类不多的针叶林组成。格氏栲天然林由毛竹林、油茶及撩荒地,经天然演替而形成;小湖工区的几种珍贵树种阔叶林自 1963 年起先后在松杂采伐混交林采伐、火烧后依树种生物特性及对立地条件要求,采用实生苗营造成林,造林密度介于 167~300 株/667 m² 之间,格氏栲天然林内的楠木人工林是 1967 年格氏栲天然林采伐后也采用实生苗营造的。

2 研究方法

2.1 资料收集与数据

根据试验区珍贵树种分布状况,结合地质地貌、土壤特点设置标准地(20 m×20 m);在小湖工区左侧

格氏栲自然保护区内(紫色砂页岩发育的重壤质紫色土)的格氏栲(*Castanopsis kawakamii*)天然林、楠木(*Phoebe bourmei*)人工林内分别建立标准地各一块;小湖工区忠山路楠木垄(变质砂砾岩发育的重壤质山地红母壤)的楠木人工林、格氏栲人工林内各建立一块标准地;在小湖工区大垄(粉砂岩发育的重壤质暗红壤)的杉木(*Cunninghamia lanceolata*)、福建柏(*Fokicnia hodginsii*)人工林内各建立两块标准地及鄂西红豆(*Ormosia hosiei*)人工林(砂页岩发育的重壤质暗红壤)内建立一块标准地。在各所设置的样地内按随机布点(3点)原则,取0~20 cm表层土样带回实验室,将同一标准地不同样点的样品经混合后供分析;土壤团粒结构的测定采用《土壤理化分析》中的常规方法^[26];各试验地概括及资料收集具体方法详见《格氏栲、米槠、楠木等10个珍贵树种引种栽培试验研究》鉴定材料,7种珍贵树种林分土壤表层(0~20 cm)试验结果见表1~表3。

2.2 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^[27]的公式表示:

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

式中, δ 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 $\bar{d}_i$ 表示两筛分粒级 d_i 与 d_{i+1} 间粒径的平均值, $W(\delta > \bar{d}_i)$ 为大于 $\bar{d}_i$ 的累积土粒重量, W_0 为土壤各粒级重量的总和,可导出^[6,7]:

$$W(\delta > \bar{d}_i)/W_0 = 1 - (\bar{d}_i/k)^{3-D} \tag{2}$$

设 $\bar{d}_{\max}$ 为最大粒级土粒的平均直径, $W(\delta > \bar{d}_{\max}) = 0$,代入(2)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:

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

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, D 为土壤分形维数(简称分维,下同)。

2.3 建模方法

对于林地土壤物理及化学性质均采用下列非线性回归方程,建立预测模型,即:

$$Y = aD_w^{\beta_1} D_d^{\beta_2} \tag{4}$$

式中, Y 为林地土壤性质指标含量; D_w 、 D_d 分别为林分湿筛、干筛条件下土壤团聚体结构分维; a 、 β_1 、 β_2 为参数。

2.4 分维对土壤性质效应分析

2.4.1 土壤团聚体分维对土壤性质效应的弹性系数(EP) 为了反映某一土壤性质的变化率与土壤团聚体分维的变化率的比值,以表达土壤团聚体分维影响该土壤性质指标的效应规律,引入经济领域中常用的弹性系数分析法:

$$EP = (\Delta Y/Y)/(\Delta D/D) = (\Delta Y/\Delta D)/(Y/D) = \beta \tag{5}$$

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。

2.4.2 土壤团聚体分维对土壤性质影响的边际量分析 为了能反映连续追加每一单位土壤团聚体分维的量,所导致受其影响的土壤性质的指标增加量情况,亦引用经济领域中常用的边际分析法进行分析:

$$MPP = \partial Y/\partial D = \beta(Y/D) = \beta(\Sigma Y_i/\Sigma D_i) \tag{6}$$

MPP 为边际产量, ΣY_i 为各林地土壤性质指标含量的和, ΣD_i 各林地土壤团聚体结构分维和。

3 结果与分析

3.1 土壤团粒结构分形特征

运用回归分析法,由(3)式计算出7种珍贵树种林分土壤团粒结构的分维,回归分析的相关系数均在0.904以上,线性相关极显著($p < 0.01$),结果见表1。土壤被认为是一种具有分形特征的分散多孔介质,分维是反映土壤团粒结构的参数,由表1可知7种珍贵树种林分表层土壤团粒结构的分维均在2.316~2.779之间,在维数上表现为 < 0.25 mm的粘粒含量高、质地细的土壤,其分维也高,即 > 0.25 mm的团粒

含量越低,其结构的分维越高。同时,土壤团粒结构的分维反映了 $>0.25\text{ mm}$ 粒径的土壤团聚体(干筛条件)、土壤水稳性团聚体(湿筛条件)含量对土壤结构与稳定性的影响趋势,即团粒结构的分维越小,则土壤越具有良好的结构与稳定性。土壤团聚体、水稳性团聚体含量(X)与团粒结构的分维(D)关系如下:

$$D = 3.521037 - 0.01158526 X \quad (R = -0.9374) \tag{7}$$

由此可见,分维与团聚体、水稳性团聚体含量(X)之间存在极显著直线关系($p<0.01$),说明分维能客观反映团粒结构的结构性状,为中亚热带土壤的通透性、抗蚀性以及土壤肥力的表征提供一个 新的指标。

3.2 几种珍贵树种林分土壤团粒结构分维特征比较

采用分形理论分析中亚热带 7 种珍贵树种林分土壤团粒结构分维特征的差异性规律。由表 1 可知,土壤团粒结构分维大小次序为:湿筛条件下,杉木人工林(2.779) $>$ 格氏栲人工林(2.767) $>$ 楠木人工林(保护区内)(2.766) $>$ 建柏人工林(2.744) $>$ 楠木人工林(忠山路)(2.728) $>$ 鄂西红豆人工林(2.661) $>$ 格氏栲天然林(2.560);干筛条件下为楠木人工林(保护区内)(2.706) $>$ 楠木人工林(忠山路)(2.669) $>$ 杉木人工林(2.652) $>$ 格氏栲人工林(2.651) $>$ 建柏人工林(2.562) $>$ 鄂西红豆人工林(2.554) $>$ 格氏栲天然林(2.316)。可见,无论湿筛条件还是干筛条件,7 种珍贵树种林分中,格氏栲天然林土壤团粒结构的分维最小,其土壤团聚体、水稳性团聚体含量分别为 94.540%、83.770%,在所有林分中最高,组成状况最好,土壤结构破坏率除略高于鄂西红豆人工林 0.16%外,在各林分中偏小,即格氏栲天然林土壤结构稳定性较好。这与格氏栲林长期自然演替过程中林分具有多层次结构、林分生物量组成及分布较为合理、林分地上部分持水量大且土壤腐殖质积累多,每年有大量的凋落物归还土壤,土层有机质高,速效性养分供应林木生长发育的能力强,加上格氏栲林林分年龄较大,不同种类植物根系在不同土层中穿插、挤压,使得土体构型空虚有关。而杉木林土壤团粒结构的分维为最大,土壤结构破坏率 22.61%,近似最高,表明其结构与稳定性差,与微生物难以分解针叶有关。

从人工林来看,鄂西红豆人工林土壤团粒结构的分维最小,仅次于格氏栲天然林,其土壤团聚体、水稳性团聚体含量分别为 85.020%、75.468%,土壤结构破坏率仅 11.23%,即在人工林分中土壤结构团聚体状况最好,破坏率最小。可能与土壤腐殖质含量相对较多,有机物分解和腐殖质再合成的强度较强,使土壤中的养分不易流失有关。

从同一树种来看,格氏栲人工林土壤团粒结构的分维较大,其土壤团聚体含量、水稳性团聚体分别低于格氏栲天然林 19.550%和 21.577%,结构破坏率是天然林的 1.85 倍左右,表明其土壤结构团聚体状况明显比格氏栲天然林差。格氏栲保护区内的楠木人工林土壤团粒结构的分维略高于忠山路楠木林的楠木林,反映其土壤 $>0.25\text{ cm}$ 团聚体含量略高于忠山路楠木林 0.33%,土壤结构破坏率亦高出 0.84%,而其 $>5\text{ cm}$ 的水稳性大团聚体达 36.182%,是忠山路楠木林 4.65 倍,表征保护区内的楠木人工林土壤较为紧实,基本呈大块状结构,可能与保护区内的楠木人工林土壤是由紫色页岩发育而成的紫色土、质地较粘重,以及其幼树生长缓慢,郁闭时间较长,雨滴直接冲击地表,加上枯枝落叶层量较少,导致土壤板结的结果有关。可见,忠山路楠木林土壤团粒结构、土壤肥力、抗蚀性均比保护区内楠木人工林好。相比之下,建柏人工林土壤团粒结构的分维亦较大,即土壤的团聚体状况稍差,土壤结构破坏率为 7 种林分中最大,却比杉木林地土壤结构好,其团聚体和水稳性团聚体分别比杉木林高 3.189%和 5.61%, $>5\text{ cm}$ 的水稳性大团聚体亦比杉木林高,与营造时和樟树混交,改善土壤结构有关。

从表 1 发现,格氏栲、建柏、鄂西红豆等人工林土壤 >0.25 的团聚体、水稳性团聚体含量分别均在 75%和 65%以上,反映经过造林后的珍贵树种林分的土壤结构有所改善,但均存在林分年龄较短,林分单层,林下植被稀少,林分正处于速生阶段,因此由腐殖质胶结形成的团聚体、水稳性团聚体均比格氏栲天然林小。从而表明格氏栲天然林土壤团粒结构的分维比人工林来的大,表层土壤的结构稳定性比人工林好。可见从一个侧面反映中亚热带珍贵树种林分土壤团聚体结构分形维数越小,土壤肥力越高。

3.3 各土壤性质与分维关系模型

为了进一步分析数据,将表 2、表 3 数据输入计算机,运用(4)式求解得到各土壤性质与土壤团聚体结构分维的回归模型列入表 4。由表 4 可

表 1 不同林分土壤团聚体组成^①

Table 1 The composition of soil cluster under different precious hardwood stands

地点 Sites	林分类型 Forest type	团聚体大小 Cluster composition size (mm)						结构体破坏率(%) Percent of construction damage	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			
大垄 Da long	建柏人工林	10.027	12.633	12.944	12.862	16.749	65.215	22.79	2.744	0.983
	Plantation of <i>F. H</i>	15.080	25.030	5.030	20.990	18.340	84.470		2.562	0.968
	杉木人工林	3.681	10.151	8.400	14.721	24.073	62.026	22.61	2.779	0.940
	Plantation of <i>C. L</i>	5.160	15.240	5.770	19.540	33.150	78.860		2.652	0.904
	鄂西红豆人工林	8.400	12.795	13.946	20.831	19.496	75.468	11.23	2.661	0.958
	Plantation of <i>O. H</i>	17.550	19.490	7.180	22.940	17.860	85.020		2.554	0.963
忠山路 Zhong- shan rode	楠木人工林	7.778	11.976	13.399	19.987	12.844	65.984	12.01	2.728	0.974
	Plantation of <i>P. B</i>	15.520	18.910	5.040	20.260	15.260	74.990		2.669	0.980
	格氏栲人工林	7.121	9.661	10.186	16.540	18.685	62.193	21.07	2.767	0.963
	Plantation of <i>C. K.</i>	22.660	13.450	4.650	17.310	20.735	78.800		2.651	0.964
格氏栲保护区 Natural reserve of <i>C. K</i>	格氏栲天然林	27.980	19.050	13.820	12.160	10.760	83.770	11.39	2.560	0.998
	Natural forest of <i>C. K.</i>	39.430	26.000	5.390	15.120	8.600	94.540		2.316	0.989
	楠木人工林	36.182	7.380	6.563	6.304	9.210	65.639	12.85	2.766	0.965
	Plantation of <i>P. B.</i>	40.710	10.780	2.590	5.760	15.480	75.320		2.706	0.962

分子为湿筛条件、分母为干筛条件;结构体破坏率=(干筛—湿筛)>0.25 mm 的团聚体含量/干筛>0.25 mm 的团聚体含量×100%

表 2 不同林分土壤化学性质^①

Table 2 The chemical properties under different precious hardwood stands

林分类型 ¹⁾	有机质 (%) ⁹⁾	全 N(%) ¹⁰⁾	全 P(%) ¹¹⁾	水解 N ¹²⁾ (μg·g ⁻¹)	速效 P ¹³⁾ (μg·g ⁻¹)	速效 K ¹⁴⁾ (μg·g ⁻¹)	代换性盐基总量 ¹⁵⁾ (m·mol·kg ⁻¹)	水解性总酸质 ¹⁶⁾ (m·mol·kg ⁻¹)	C/N
建柏人工林 ²⁾	3.417	0.0971	0.0796	93.66	3.57	70.4	15.4	154.73	20.41
杉木人工林 ³⁾	3.103	0.0942	0.0569	92.86	3.08	72.1	56.8	137.19	19.11
鄂西红豆人工林 ⁴⁾	2.349	0.0716	0.0645	83.77	2.66	77.8	25.3	85.61	32.81
楠木人工林 ⁵⁾	2.534	0.1051	0.0488	108.67	3.93	95.3	15.9	60.32	13.98
格氏栲人工林 ⁶⁾	2.713	0.1103	0.0414	121.37	4.40	104.8	25.5	80.55	14.27
格氏栲天然林 ⁷⁾	5.357	0.1985	0.0542	154.50	6.69	136.6	45.4	167.52	15.95
楠木人工林 ⁸⁾	1.838	0.0843	0.0421	67.52	3.08	47.3	11.0	86.49	12.65

1) Forest type, 2) Plantation of *F. H*, 3) Plantation of *C. L*, 4) Plantation of *O. H*, 5) Plantation of *P. B*, 6) Plantation of *C. K.*, 7) Natural forest of *C. K.*,

8) Plantation of *P. B.*, 9) Organic matter, 10) Total-N, 11) Total-P, 12) Hydrolysis-N, 13) Available-P, 14) Available-K, 15) Total exchangeable salt, 16) Total hydrolysis acid

知,不论是干筛还是湿筛得到的土壤团聚体分维多与各土壤性质存在显著相关(除全 P、盐基总量、C/N、总孔隙度外),因此,利用这些模型反映土壤团聚体分维对中亚热带珍贵树种林分土壤性质指标值的影响。

表 3 不同林分土壤水分物理性质^①

Table 3 The hydro-physical properties under different precious hardwood stands

林分类型 ¹⁾	容重 ⁹⁾ (g·cm ⁻³)	毛管孔隙度 (%) ¹⁰⁾	非毛管孔隙度 (%) ¹¹⁾	总孔隙度 (%) ¹²⁾	非毛管孔隙度/毛管孔隙度 ¹³⁾	土壤通气度 (%) ¹⁴⁾	自然含水量 (%) ¹⁵⁾	毛管持水量 (%) ¹⁶⁾	最大持水量 (%) ¹⁷⁾	田间持水量 (%) ¹⁸⁾
建柏人工林 ²⁾	1.132	40.50	9.45	49.95	23.33	24.15	22.79	35.78	44.13	29.13
杉木人工林 ³⁾	1.158	37.63	10.43	48.05	27.71	22.60	22.23	32.78	41.76	26.13
鄂西红豆人工林 ⁴⁾	1.170	45.53	7.37	52.90	16.19	18.05	29.80	38.95	45.27	32.34
楠木人工林 ⁵⁾	1.380	42.52	4.04	46.56	9.50	11.05	25.73	30.81	33.74	24.20
格氏栲人工林 ⁶⁾	1.162	39.70	9.81	49.50	24.70	17.52	27.55	34.17	42.62	27.56
格氏栲天然林 ⁷⁾	0.800	36.81	10.99	47.80	29.86	24.12	29.60	46.01	60.18	39.36
楠木人工林 ⁸⁾	1.444	42.86	4.53	47.39	10.57	14.13	23.05	29.68	32.83	23.03

1) Forest type, 2) Plantation of *F. H.*, 3) Plantation of *C. L.*, 4) Plantation of *O. H.*, 5) Plantation of *P. B.*, 6) Plantation of *C. K.*, 7) Natural forest of *C. K.*, 8) Plantation of *P. B.*, 9) Volume weight, 10) Capillary porosity, 11) Non-capillary pore, 12) Total porosity, 13) Non-capillary/Capillary, 14) Natural water content, 15) Capillary water-holding, 16) Most water-holding, 17) Field water-holding, 18) Soil permeability

表 4 分形维数与土壤性质关系模型

Table 4 Model on relationship between soil fractal dimension and soil feature

项 目 ¹⁾	模 型 ²⁾	$R^{3)}$	弹性系数(%) ⁴⁾		边际量 ⁵⁾	
			湿筛 ⁶⁾	干筛 ⁷⁾	湿筛 ⁶⁾	干筛 ⁷⁾
有机质 ⁸⁾	$Y=1.303908D_w^{11.87659}D_d^{-11.65151}$	0.9680	11.8766	-11.6515	13.3175	-13.7111
全 N ⁹⁾	$Y=0.07709079D_w^{4.605277}D_d^{-6.958391}$	0.8540	4.6053	-6.9584	0.1844	-0.2924
全 P ¹⁰⁾	$Y=0.007831805D_w^{6.753635}D_d^{-5.06846}$	0.4670	6.7536	-5.0685	0.1378	-0.1085
水解 N ¹¹⁾	$Y=579.8758D_w^{2.98117}D_d^{-4.986119}$	0.7506	2.9812	-4.9861	113.3064	-198.8781
速效 P ¹²⁾	$Y=31.40549D_w^{3.393087}D_d^{-5.806957}$	0.8037	3.3931	-5.8070	4.8937	-8.7891
速效 K ¹³⁾	$Y=11230.77D_w^{-1.685035}D_d^{-3.406587}$	0.7431	-1.6850	-3.4066	-53.5792	-113.6745
盐基总量 ¹⁴⁾	$Y=6.960084D_w^{12.8037}D_d^{-12.16463}$	0.4394	12.8037	-12.1646	131.5739	-131.1867
水解性总酸质 ¹⁵⁾	$Y=0.08875196D_w^{22.86156}D_d^{-16.60355}$	0.9352	22.8616	-16.6036	929.1140	-708.1426
C/N	$Y=300.6278D_w^{-2.960353}D_d^{3.1216616}$	0.2010	-2.9604	0.1217	-20.1217	0.8678
容重 ¹⁶⁾	$Y=0.3943197D_w^{-4.223661}D_d^{5.579128}$	0.9644	-4.2237	5.5791	-1.8326	2.5404
毛管孔隙 ¹⁷⁾	$Y=198.3271D_w^{-4.0360228}D_d^{3.917143}$	0.7864	-4.3602	2.9171	-60.6414	45.9971
非毛管孔隙 ¹⁸⁾	$Y=0.001706286D_w^{24.68097}D_d^{-17.10945}$	0.8185	24.6810	-17.1095	73.5302	-53.4929
总孔隙度 ¹⁹⁾	$Y=57.36898D_w^{-0.1178075}D_d^{-0.0456469}$	0.1349	-0.1178	-0.0456	-2.1209	-0.8624
非毛管孔隙/毛管孔隙 ²⁰⁾	$Y=0.0008673703D_w^{29.02874}D_d^{-20.02216}$	0.8282	29.0287	-20.0222	216.6838	-156.8432
土壤通气度 ²¹⁾	$Y=0.0495415D_w^{18.03706}D_d^{-12.75002}$	0.9035	18.0371	-12.7500	124.9174	-92.6669
自然含水量 ²²⁾	$Y=2337.46D_w^{-6.333499}D_d^{1.907718}$	0.8142	-6.3335	1.9077	-60.2347	19.0403
毛管持水量 ²³⁾	$Y=470.6433D_w^{-0.02731803}D_d^{-2.705468}$	0.9607	-0.0273	-2.7055	-0.3567	-37.0761
最大持水量 ²⁴⁾	$Y=146.8187D_w^{160351}D_d^{-5.689299}$	0.9553	4.1604	-5.6893	65.7887	-94.4141
田间持水量 ²⁵⁾	$Y=645.5076D_w^{0.03177987}D_d^{-3.323786}$	0.9570	0.0318	-3.3238	0.3374	-37.0279
结构破坏率 ²⁶⁾	$Y=1.494159E-06D_w^{28.06072}D_d^{-12.50087}$	0.9752	28.0607	-12.5009	168.2300	-78.0505

1)Item, 2)Model, 3)Correlation coefficient, 4)Elasticity coefficient, 5)marginal yield, 6)Dry sieving, 7)Wet sieving, 8) Organic matter, 9)Total-N, 10)Total-P, 11)Hydrolysis-N, 12) Available-P, 13) Available-K, 14) Total exchangeable salt, 15)Total hydrolysis acid, 16)Volume weight, 17)Capillary porosity, 18)Non-capillary pore, 19)Total porosity, 20) Non-capillary porosity, 21)Soil permeability, 22) Natural water content, 23) Capillary water-holding, 24) Most water-holding, 25)Field water-holding, 26)Percent of construction damage

3.4 分维对各土壤性质变化的弹性分析及边际分析

3.4.1 分维对各土壤性质变化的弹性分析 应用(5)式计算出干、湿条件下土壤团聚体分维对各土壤性质变化的弹性系数,结果见表4。干筛条件下,除容重、毛管孔隙、自然含水量外,土壤团聚体分维对各土壤性质变化的弹性分析系数均小于0,属于 $EP<0$,效应处于各土壤性质变化负效应,土壤分维每增加1%,有机质、全N、全P、水解N、速效P、速效K、盐基总量、水解性总酸质、C/N、非毛管孔隙、总孔隙度、非毛管孔隙/毛管孔隙、土壤通气度、毛管持水量、最大持水量、田间持水量、结构破坏率分别减少11.65%、6.96%、5.07%、4.99%、5.81%、3.41%、12.16%、16.60%、-0.12%、17.11%、0.05%、20.02%、12.75%、2.71%、5.69%、3.32%、12.50%,而容重、毛管孔隙、自然含水量的弹性系数大于1,效应处于递增变化,表明土壤分维每增加1%,容重、毛管孔隙、自然含水量均分别按5.58%、2.92%、1.91%递增。而湿筛条件下,土壤团聚体分维对有机质、全N、全P、水解N、速效P、盐基总量、水解性总酸质、非毛管孔隙、非毛管孔隙/毛管孔隙、土壤通气度、最大持水量、结构破坏率等土壤性质变化的弹性分析系数均大于1,属于 $EP>1$,效应处于各土壤性质变化递增效应,表明土壤分维每增加1%,相应的土壤性质分别增加11.88%、4.61%、6.75%、2.98%、3.39%、12.80%、22.86%、24.68%、29.03%、18.04%、4.16%、28.06%;对速效K、C/N、容重、毛管孔隙、总孔隙度、自然含水量、毛管持水量等土壤性质变化的弹性分析系数均小于0,属于 $EP<0$,田间持水量的弹性分析系数介于0~1,效应均处于各土壤性质递减变化,土壤分维每增加1%,相应的土壤性质分别减少1.69%、2.96%、4.22%、4.36%、0.12%、6.33%、0.03%、-0.03%。

3.4.2 分维对各土壤性质变化的边际分析 应用(6)式计算出湿、干筛条件下土壤团聚体分维对各土壤性质变化的边际分析量,见表4。在不同过筛条件下,土壤团聚体分维对各土壤性质变化的边际分析量亦有明显不同。湿筛条件下,土壤团聚体分维每增加一个单位值,林地土壤的有机质、全N、全P、水解N、速效P、速效K、盐基总量、水解性总酸质、C/N、容重、毛管孔隙、非毛管孔隙、总孔隙度、非毛管孔隙/毛管孔隙、土壤通气度、自然含水量、毛管持水量、最大持水量、田间持水量、结构破坏率等土壤性质变化依次为13.32%、0.18%、0.14%、113.31%、4.89%、-53.58%、131.58%、929.11%、-20.12%、-1.83%、-60.64%、73.53%、-2.12%、216.68%、124.92%、-60.23%、-0.36%、65.79%、0.34%、168.23%;干筛条件下,土壤团聚体分维每增加一个单位值,林地土壤的上述各项土壤性质变化依次为-13.71%、-0.29%、-0.11%、-198.88%、-8.79%、-113.67%、-131.19%、-708.14%、0.87%、2.54%、45.99%、-53.49%、-0.86%、-156.84%、-92.67%、19.04%、-37.08%、-94.41%、-37.03%、-78.05%。由边际分析可知,土壤团聚体分维的变化对水解N、速效K、盐基总量、水解性总酸质、毛管孔隙、非毛管孔隙、非毛管孔隙/毛管孔隙、土壤通气度、最大持水量、结构破坏率影响程度较大。

4 讨论

4.1 土壤团粒结构的分维不仅能表征中亚热带土壤团聚体粒径大小的影响,且反映质地均一性的程度、土壤通透性、抗蚀性及土壤肥力。在用团粒结构分维来表达土壤通透性,抗蚀性以及土壤肥力时,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维的数值也产生重要影响。分维越高,表征了土壤结构越紧实;分维越低,表征了土壤结构性状相对越松散、通透性越好,林地表层土层生物活动加强,矿化作用加快,导致土壤养分、土壤物理性质得到改善,有利于林木生长及林地肥力的提高。可见,分维能客观表征土壤团粒结构的团聚体、水稳性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。

4.2 中亚热带几种珍贵树种林分的土壤团粒结构的分维特征研究表明:无论湿筛条件还是干筛条件,起源于天然的格氏栲林土壤团粒结构的分维是所有林分中最小,林分结构稳定性最好,团粒水稳性能较好,土壤通透性较好,具有较高的水源涵养、水土保持功能以及良好的自我培肥功能。可见加强对日益减少的天然常绿阔叶林的保护并开展相应的研究,对保持和提高地带性常绿阔叶林多样性,充分发挥并改善环境的有益功能,是极其重要的。在人工林中,鄂西红豆人工林中土壤结构团聚体状况最好,破坏率最小,表明该树种人工林有数据土壤肥力恢复的有效方法上,应该特别引起足够重视与有效推广。

4.3 作为一种研究和处理不规则客体的理论工具,分形学能用来描述土壤肥力特征,揭示其规律性,分维

与土壤团聚体组成存在明显对应关系。考虑到样地调查资料的局限性,本研究仅初步建立中亚热带珍贵树种林分土壤团粒结构的分维与土壤性质之间的定量关系模型,并进行弹性分析和边际分析。结果表明:在中亚热带几种珍贵树种林分中,湿筛条件的土壤团聚体结构分维与多数土壤性质呈正效应,每增加 1% 的分维,土壤性质变化的弹性系数为 $-6.33\% \sim 29.03\%$,每连续追加一个单位分维,土壤性质变化的边际量为 $-53.58\% \sim 929.11\%$;而干筛条件的土壤团聚体结构分维与大部分土壤性质呈负效应,每增加 1% 的分维,土壤性质变化的弹性系数为 $-20.02\% \sim 5.58\%$,每连续追加一个单位分维,土壤性质变化的边际量为 $-708.14\% \sim 46.00\%$ 。可见,湿筛、干筛条件下土壤分形特征对土壤性质影响程度显然不一样,这对进一步深入探讨分形学在土壤结构性状与土壤肥力特征的应用具有十分重要意义。

4.4 研究表明,起源不同的格氏栲林,对土壤团粒结构、培肥土壤功能的影响产生较大差异。而本研究所讨论几种珍贵树种人工林土壤结构分维特征差异的比较基于人工林起源一致,即均为实生苗营造为前提的,至于人工林的不同起源对土壤结构的影响有待于进一步探讨。

参考文献

- [1] Yu X T(俞新妥). A summary of the studies on the plantation productivity and nutrient cycling in Chinese fir plantation ecosystem. *Journal of Fujian College of Forestry*(in Chinese)(福建林学院学报),1992,12(3):264~275.
- [2] Yu X T(俞新妥),Yang Y S(杨玉盛),He Z Y(何智英),et al. Effect of control burning on the ecological system of Chinese fir plantation. *Journal of Fujian College of Forestry*(in Chinese)(福建林学院学报),1989,9(3):238~255.
- [3] Yang Y S(杨玉盛),Li Z W(李振问),Yu X T(俞新妥),et al. Study on changes of soil fertility as affected by the replacement of broadleaved stand by Chinese fir stand in Nanping. *Acta Phytocologica Sinica* (in Chinese)(植物生态学报),1994,18(3):236~242.
- [4] Turcotte D L J. Fractal fragmentation. *Geophys. 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] Yang P L(杨培岭),Luo Y P(罗远培),Shi Y C(石元春). Fractal feature of soil on expression by weight distribution of grain size. *Chinese Science Bulletin*(in Chinese)(科学通报),1993,38(20):1896~1899.
- [7] Wu C Z(吴承祯),Hong W(洪伟). Study on fractal features of soil aggregate structure under different management patterns. *Acta Pedologica Sinica*(in Chinese)(土壤学报),1999,36(2):162~167.
- [8] Yang Y S(杨玉盛),Zhou S Q(邹双全),Liu A Q(刘爱琴),et al. A study on the water conservation function of the natural forest of GE's evergreen chinquapin. *Journal of Natural Resources*(in Chinese)(自然资源学报),1992,7(3):217~233.
- [9] Yang Y S(杨玉盛),Li Z W(李振问),Liu A Q(刘爱琴),et al. Studies on soil fertility for natural forest of *Castanopsis kawakamii* replaced by broadleaf plantation. *Journal of Northeast Forestry University*(in Chinese)(东北林业大学学报),1993,21(5):14~21.
- [10] Yang Y S(杨玉盛),Zhou S Q(邹双全),Zhu J M(朱锦懋),et al. Structure and sustainable productivity power of soil in natural forestry and plantation of *Castanopsis kawakamii*. In: *A collection of theses on the second youth academic annual meetings of china science & technology association(Agriculture part)*(in Chinese). Beijing: Chinese Science & Technology Press,1995. 400~404.
- [11] Yang Y S(杨玉盛),He Z M(何宗明),Zhou S Q(邹双全),et al. A study on the soil microbes and biochemistry of rhizospheric and total soil in natural forest and plantation of *Castanopsis kawakamii*. *Acta Ecologica Sinica*(in Chinese)(生态学报),1998,18(2):198~202.
- [12] Li J H(李家和),Li J F(李金锋). A preliminary study on ecological distribution of soil microorganism under different original *Castanopsis kawakamii* stands. *Subtropical Plant Research Communications*(in Chinese)(亚热带植物通讯),1995,1(1):1~23.
- [13] Liu J F(刘金福),Hong W(洪伟). A study on the community ecology of *Castanopsis kawakamii*-study on the niche

- of the main population in *Castanopsis kawakamii* community. *Acta Ecologica Sinica*(in Chinese)(生态学报). 1999, **19**(3):347~352.
- [14] Liu J F(刘金福), Hong W(洪伟). A study on forecast of population dynamics of *Castanopsis kawakamii*. *Chinese Journal Apply Environment Biology* (in Chinese)(应用与环境生物学报). 1999, **5**(3):247~253.
- [15] Liu J F(刘金福), Hong W(洪伟), Li J H(李家和), et al. Population ecology of *Castanopsis kawakamii*. Ⅲ. Growth dynamics of dominance of *Castanopsis kawakamii* population. *Chinese Journal of Applied Ecology*(in Chinese)(应用生态学报). 1998, **9**(5):453~457.
- [16] Liu J F(刘金福), Hong W(洪伟). Time species model of individual age and diameter in *Castanopsis kawakamii* population. *Acta Phytocologica Sinica*(in Chinese)(植物生态学报). 1999, **23**(3):283~288.
- [17] Liu J F(刘金福), Hong W(洪伟), Li M J(李茂瑾). A study on regulative model of *Castanopsis kawakamii* population. *Journal of Tropical and Subtropical Botany*(in Chinese)(热带亚热带植物学报). 1998, **6**(4):309~314.
- [18] Liu J F(刘金福), Hong W(洪伟). A study of the population ecology of *Castanopsis kawakamii*. Ⅶ. The distribution pattern intensity and grain for *Castanopsis kawakamii* population. *Journal of Zhongnan Forestry University*(in Chinese)(中南林学院学报). 1999, **19**(1):59~63.
- [19] Liu J F(刘金福), Hong W(洪伟), Chen Q L(陈清林). Study on the population ecology in *Castanopsis kawakamii*. V. The spatial distribution pattern and dynamics of *Castanopsis kawakamii* population. *Journal of Fujian College of Forestry*(in Chinese)(福建林学院学报). 1999, **19**(2):118~123.
- [20] Liu J F(刘金福), Hong W(洪伟). Ecological studies on *Castanopsis kawakamii* population. Ⅵ. Weibull Model of spatial pattern. *Journal of Fujian College of Forestry*(in Chinese)(福建林学院学报). 1999, **19**(3):212~215.
- [21] Liu J F(刘金福), Hong W(洪伟), Li J H(李家和). A study on the community ecology of *Castanopsis kawakamii*. Ⅱ. A study on the competition of dominant species in *Castanopsis kawakamii* forests. *Journal of Fujian College of Forestry*(in Chinese)(福建林学院学报). 1998, **18**(1):24~27.
- [22] Liu J F(刘金福), Hong W(洪伟). The evaluation of *Castanopsis kawakamii* nature reserve in Sanming of Fujian province. *Journal of Jilin Forestry University*(in Chinese)(吉林林学院学报). 1999, **15**(2):70~73.
- [23] Liu J F(刘金福), Hong W(洪伟). A modified logistic model of the growth pattern of dominance in a *Castanopsis kawakamii* population. *Acta Phytocologica Sinica*(in Chinese)(植物生态学报). 2001, **25**(2):225~229.
- [24] Liu J F(刘金福), Hong W(洪伟), Fan H B(樊后保), et al. Study on the inter-specific association of species in the vegetation layer in *Castanopsis kawakamii* forest. *Scienia Silvae Sinicae*(in Chinese)(林业科学). 2001, **37**(4):117~123.
- [25] Liu J F(刘金福), Hong W(洪伟), Lin S X(林升学). Structure feature of diameter distribution on main tree population natural forests of *Castanopsis kawakamii*. *Journal of Fujian College of Forestry*(in Chinese)(福建林学院学报). 2001, **21**(4):325~328.
- [26] The soil research institute in Nanjing. *Soil physicochemistry analysis*(in Chinese). Shanghai:Shanghai Science & Technology Press, 1978.
- [27] Katz A J, Thompson A H. *Phys. Rev. Lett.*, 1985, **54**(12):1325~1328.