

川南天然常绿阔叶林人工更新后土壤团粒结构的分形特征

龚 伟 胡庭兴 王景燕 宫渊波 冉 华 张世熔 廖尔华

(四川农业大学生态林业工程省级重点实验室,四川雅安 625014)

摘 要 运用分形模型研究了川南天然常绿阔叶林及其人工更新成樟木(*Sassafras tzumu*)林、柳杉(*Cryptomeria fortunei*)林和水杉(*Metasequoia glyptostroboides*)林后土壤团粒结构,探讨了分形维数与林地土壤水源涵养功能、肥力特征和微生物数量之间的关系。结果表明,天然常绿阔叶林人工更新后土壤团粒结构的分形维数和结构体破坏率增大、土壤物理性质变差、养分含量和微生物数量降低。3种人工林中,樟木林较好、水杉林次之、柳杉林最差;土壤团聚体、水稳性团聚体和水稳性大团聚体含量越高分形维数越小;在湿筛条件下,土壤结构体破坏率随分形维数的降低而减小,土壤团粒结构的分形维数与土壤物理性质、养分含量和微生物数量之间存在显著的回归关系。这表明天然常绿阔叶林人工更新后由于不同林分对林地土壤组成结构的维护效果不同,导致更新后林地土壤物理、化学和生物性质变化,林地土壤团粒结构的变化,进而影响其分形维数的大小。因此,分形维数可作为天然常绿阔叶林及其人工更新后林地土壤水源涵养功能、肥力特征和微生物活动情况的一项综合性定量化评价指标。同时,为保护天然常绿阔叶林、选择适宜的更新树种和天然常绿阔叶林人工更新后林地土壤的科学管理提供依据,也为退耕还林中树种的选择提供参考。

关键词 天然常绿阔叶林 人工更新 分形维数 团粒结构

STUDY ON FRACTAL FEATURES OF SOIL AGGREGATE STRUCTURE UNDER NATURAL EVERGREEN BROADLEAVED FOREST AND ARTIFICIAL REGENERATION IN SOUTHERN SICHUAN PROVINCE

GONG Wei, HU Ting-Xing, WANG Jing-Yan, GONG Yuan-Bo, RAN Hua, ZHANG Shi-Rong, and LIAO Er-Hua

Sichuan Provincial Key Laboratory of Ecological Forestry Engineering, Sichuan Agricultural University, Ya'an, Sichuan 625014, China

Abstract *Aims* Fractal theory, a study tool popular in recent years, offers a new means to quantitatively investigate soil structure. Soil structure is the basis of soil fertility, which is the basic property of soil. It can be comprehensively reflected by soil physical, chemical and organism properties, and change of soil structure will result in changes in other soil properties. Fractal features of soil aggregate structure under natural evergreen broadleaved forest and regeneration of artificial systems is rarely studied. We chose to study natural evergreen broadleaved forest and three artificial plantations of *Sassafras tzumu*, *Cryptomeria fortunei* and *Metasequoia glyptostroboides* in southern Sichuan Province. Our objective was to determine a) effects of artificial regeneration on fractal features of soil aggregate structure, b) effects of different plantations on fractal dimension of soil aggregate structure, c) relationships between fractal dimension and soil physical properties, nutrient content and microbe number, and d) use of fractal dimension of soil aggregate structure for evaluating the water conservation, fertility and microbe activity of soil.

Methods Soils were collected from each forest to determine a) fractal dimension of soil aggregate structure using Yang Peiling's approach and b) soil physical and chemical properties and soil microbe number. The relationship between fractal dimension and soil physical properties, nutrient content and microbe number was analyzed with regression analysis.

Important findings Natural evergreen broadleaved forest and artificial regeneration resulted in increased fractal dimension of soil aggregate structure and percent of construction damage, poorer soil physical properties and reduced nutrient content and number of microbes. The higher the content of aggregates, water-stable aggregates

and water-stable big aggregates in soil, the smaller the fractal dimension of soil aggregate structure. With wet sieving condition and decreased fractal dimension, the percent of construction damage decreased. There were close relationships between fractal dimension of soil aggregate structure and soil natural water content, bulk density, capillary porosity, non-capillary porosity, original infiltration coefficient, stable infiltration coefficient, content of organic matter, total-N, hydrolysis-N, total-P, available-P, total-K, available-K and the number of bacteria, fungi and actinomycetes. Different stands had different effects for maintenance of soil structure, which resulted in changes of soil physical, chemical and organism properties under natural evergreen broadleaved forest and artificial regeneration, and changes of soil aggregate structure had an effect on the value of fractal dimension. This indicates that fractal dimension can be used as a comprehensive quantitative index to evaluate water conservation function, fertility states and microbe activity of soil for natural evergreen broadleaved forest and artificial regeneration. It provides a solid foundation for protecting natural evergreen broadleaved forest, choosing appropriate trees for its artificial regeneration, managing soil after artificial regeneration and choosing trees for converting farmland to forest.

Key words natural evergreen broadleaved forest, artificial regeneration, fractal dimension, aggregate structure

分形几何(Fractal geometry)是由法国数学家曼德勃罗特(Mandelbort)开创出的一门新的数学分支,与传统的几何(如Euclid几何、微分几何)不同,分形几何能够在更深层次上更加深刻地描述、研究和分析自然界中普遍存在的杂乱无章的、不规则的和随机的现象。土壤作为一种由不同颗粒组成、具有不规则形状和自相似结构的多孔介质,具有一定的分形特征(Turcotte, 1986; Rieu & Sposito, 1991a, 1991b; 李保国, 1994)。Arya和Paris(1981)及Turcotte(1986)首先研究了土壤颗粒的分形现象及其分形维数的计算方法,但这些方法难于直接利用常规实验数据进行计算,故计算精度受到影响。目前土壤粒径分形维数常用的计算方法为杨培岭法和AR法。杨培岭法是基于在通常的土壤分析中,得到的均为不同土壤粒径的重量分布值,据此杨培岭等(1993)将Katz和Thompson(1985)的粒径计算方法进行改进,用土壤粒径的重量分布取代数量分布直接计算粒径分布的分形维数,表征土粒直径的大小和质地组成的均匀程度;AR法是Alexandra和Renduo(1998)综合Friesen和Mikula(1988)、Pachepsky等(1995)、Bird等(1996)等学者的研究成果,采用积分法推导出土壤颗粒粒级质量、粒径与土粒表面分形维数的关系,据此张世熔等(2002)做了进一步推导,改进成土粒粒级重量百分含量、粒径与土粒表面分形维数的关系,仍可根据常规土壤颗粒组成测定结果计算土粒的分形维数。杨培岭法和AR法各有自己的优点,前者可以利用常规实验数据直接求得分形维数,比较精确、简便(宫阿都和何毓蓉, 2001),后者得到的分形维数明确表征土粒表面的分形维数(拓扑维数为2),介于2~3之间(董连科, 1991),杨

培岭法求出的分形维数是指粒径分布的分形维数,而AR法求出的分形维数是指颗粒表面的分形维数,用于定量化表征土壤质地的分异更好(廖尔华等, 2002)。

土壤的粒径分布资料常被用来分析和预测土壤的物理性质如持水量、容积密度、渗透率和孔隙度等(Scott & Stephen, 1989, 1992)。近几年来,运用各种分形模型计算土壤颗粒(杨培岭等, 1993; 张世熔等, 2002)、团聚体(吴承祯和洪伟, 1999; 刘金福等, 2002)和孔隙度(Brakensiek *et al.*, 1992; Rawls *et al.*, 1993; Zeng *et al.*, 1996)的分形维数来表征土壤质地和结构组成及其均匀程度,成为定量描述土壤结构特征的新方法。土壤结构是土壤肥力的基础,土壤结构体的空间排列特性影响着土壤的孔性和机械物理性质,以及土壤中水、气、热和养分等行为(沈慧等, 2000)。在吴承祯和洪伟(1999)提出分形学应该能够用来描述土壤肥力等特征之后,不同学者对土壤团粒或颗粒结构分形维数与土壤容重、孔隙度、通气度、自然含水率、持水量、排水量、养分含量、土壤酶活性等的关系研究报道较多(张世熔等, 2002; 刘金福等, 2002; 梁士楚和王伯荪, 2003; 程先富等, 2003; 苏永中和赵哈林, 2004; 封磊等, 2004),而对分形维数与土壤渗透性和微生物数量之间的关系研究报道较少。目前,有关川南天然常绿阔叶林人工更新后土壤团粒结构分形特征方面的研究尚未见报道。因此,本文采用杨培岭法对川南林区天然常绿阔叶林及其人工更新成檫木(*Sassafras tzumu*)林、柳杉(*Cryptomeria fortunei*)林和水杉(*Metasequoia glyptostroboides*)林后土壤团粒结构分形特征进行研究,同时探讨土壤团粒结构分形维数与

土壤自然含水率、容重、孔隙度、渗透速率、养分含量和土壤微生物数量的关系,以期为保护天然常绿阔叶林 科学合理地经营和利用林地资源和选择适宜的造林树种或更新树种提供科学资料,为退耕还林中因地制宜地选择适宜的造林树种提供参考。

1 材料和方法

1.1 试验区自然概况

研究区位于四川省沐川县国有林场,距沐川县城 19.5 km。地理位置为 103°47′~103°49′ E, 28°29′~28°54′ N 之间,地处五指山东北尾部,地形起伏大,南北走向,地势南高北低,多陡坡、断岩,海拔在 1 100~1 550 m 之间,坡度 25°~35°左右。气候属亚热带湿润季风气候,根据沐川县森林经营所气象站(海拔 1 097 m)历年气象观测资料统计,全年日平均气温 12.8℃,绝对最高气温 30℃,绝对最低气温 -10℃,全年降水量 1 780 mm,降雨天数 254 d 左右,7~8 月为雨季,月平均 331.6 mm。土壤以黄壤为主,部分地区有黄棕壤和紫色土。试验地林分为天然常绿阔叶林、檫木林、柳杉林和水杉林,天然常绿阔叶林郁闭度在 0.9 以上,檫木林、柳杉林和水杉林分别是 1988、1990 和 1992 年天然常绿阔叶林皆伐后于 1989、1991 和 1993 年人工植苗形成的纯林,林分郁闭度分别为 0.9、0.8 和 0.8。

1.2 研究方法

在调查试验地的基础上,根据典型性和代表性的原则分别在坡向、坡度、坡位和海拔高度基本一致的天然常绿阔叶林及其人工更新后形成的檫木林、柳杉林和水杉林中建立 20 m×20 m 的标准地 3 个。在每个标准地内采用蛇形 5 点取样法按 0~20、20~40 cm 土层用环刀采样测定土壤物理性质,同时分层取土壤混合样测定土壤团粒结构(吴承祯和洪伟,1999;刘金福等,2002)。微生物数量和土壤养分含量。测定方法:土壤团粒结构采用机械筛分法(GB7847-87),微生物数量采用稀释平板法(许光辉和郑洪元,1986),有机质采用重铬酸钾氧化-外加热法(GB7857-87),全氮采用半微量凯氏法(GB7848-87),碱解氮采用碱解-扩散法(GB7849-87),全磷采用 NaOH 碱熔-钼锑抗比色法(GB7852-87),速效磷采用 0.03 mol·L⁻¹ NH₄F+0.025 mol·L⁻¹ 盐酸浸提法(GB7853-87),全钾采用 NaOH 碱熔-火焰光度法(GB7854-87),速效钾采用 1 mol·L⁻¹ 乙酸铵浸提-火焰光度法(GB7856-87)。在 2004 年 7 月中旬和 2005

年 7 月中旬共进行两次采样分析。

1.3 分形维数模型(杨培岭等,1993;吴承祯和洪伟,1999)

具有自相似结构的多孔介质的土壤,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:

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

式中 δ 是码尺, A 、 k 是描述形状、尺度的常数。

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:

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

式中 $W(\delta > \bar{d}_i)$ 为大于 \bar{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 $\lim_{i \rightarrow \infty} d_i = 0$, 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:

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

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

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

$$\text{或 } (\bar{d}_i/\bar{d}_{\max})^{3-D} = W(\delta > \bar{d}_i)/W_0 \quad (6)$$

对上式两边取对数,即得:

$$(3-D)\lg(\bar{d}_i/\bar{d}_{\max}) = \lg[W(\delta > \bar{d}_i)/W_0] \quad (7)$$

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。因此,要测定 D 即可用回归分析方法。

2 结果与分析

2.1 土壤团粒结构分形特征

由表 1 可知,天然常绿阔叶林及其人工更新成檫木林、柳杉林和水杉林后 0~20 和 20~40 cm 土层土壤团粒结构的分形维数在 2.120~2.764 之间。在分形维数上表现为 >0.25 mm 的团粒含量高, <0.25 mm 的粘粒含量低的土壤其分形维数低,反之, >0.25 mm 的团粒含量低, <0.25 mm 的粘粒含量高、质地细的土壤其分形维数高。

在湿筛条件下测得的 >0.25 mm 团聚体称为水

表 1 天然常绿阔叶林人工更新后土壤团聚体组成(%)
Table 1 Composition of soil aggregates under natural evergreen broadleaved forest and artificial regeneration

林分类型 Forest type	土层 Soil layer (cm)	团聚体大小 Cluster composition size(mm)						结构体破 坏率 ⁵⁾ (%)	分形 维数 ⁶⁾	相关 系数 ⁷⁾
		> 5	5 ~ 2	2 ~ 1	1 ~ 0.5	0.5 ~ 0.25	> 0.25			
天然常绿阔叶林 ¹⁾	0 ~ 20	<u>54.499</u>	<u>17.387</u>	<u>9.134</u>	<u>7.113</u>	<u>2.829</u>	<u>90.962</u>	6.614	<u>2.415</u>	<u>0.980</u>
		62.593	18.745	6.587	6.877	2.602	97.404		2.120	0.994
	20 ~ 40	<u>63.765</u>	<u>13.345</u>	<u>5.702</u>	<u>4.729</u>	<u>2.154</u>	<u>89.695</u>	7.469	<u>2.473</u>	<u>0.945</u>
		68.106	14.547	5.441	5.974	2.867	96.935		2.183	0.987
檫木林 ²⁾	0 ~ 20	<u>63.163</u>	<u>12.754</u>	<u>6.334</u>	<u>5.322</u>	<u>2.220</u>	<u>89.793</u>	7.221	<u>2.469</u>	<u>0.951</u>
		70.707	16.200	4.269	3.909	1.697	96.782		2.184	0.971
	20 ~ 40	<u>50.844</u>	<u>16.723</u>	<u>8.725</u>	<u>8.118</u>	<u>3.601</u>	<u>88.011</u>	7.556	<u>2.489</u>	<u>0.981</u>
		62.877	18.879	5.433	5.403	2.613	95.205		2.274	0.980
柳杉林 ³⁾	0 ~ 20	<u>21.743</u>	<u>18.688</u>	<u>13.363</u>	<u>17.377</u>	<u>10.411</u>	<u>81.582</u>	14.147	<u>2.579</u>	<u>0.992</u>
		63.017	16.638	5.504	6.523	3.343	95.025		2.293	0.984
	20 ~ 40	<u>4.209</u>	<u>9.695</u>	<u>7.684</u>	<u>21.672</u>	<u>18.828</u>	<u>62.088</u>	34.604	<u>2.764</u>	<u>0.946</u>
		67.510	16.183	4.533	4.281	2.435	94.942		2.301	0.967
水杉林 ⁴⁾	0 ~ 20	<u>54.612</u>	<u>14.753</u>	<u>7.817</u>	<u>6.923</u>	<u>3.536</u>	<u>87.641</u>	8.693	<u>2.506</u>	<u>0.972</u>
		60.158	17.587	6.637	8.040	3.563	95.985		2.235	0.993
	20 ~ 40	<u>38.673</u>	<u>15.876</u>	<u>11.655</u>	<u>11.826</u>	<u>6.123</u>	<u>84.153</u>	12.138	<u>2.551</u>	<u>0.994</u>
		70.397	14.209	4.206	4.516	2.451	95.779		2.265	0.969

分子为湿筛条件、分母为干筛条件 Numerator and denominator of the data in table were measured under the wet sieving and dry sieving , respectively
1) Natural evergreen broadleaved forest 2) *Sassafras tzumu* forest 3) *Cryptomeria fortunei* forest 4) *Metasequoia glyptostroboides* forest 5) Percentage of construction damage 6) Fractal dimension 7) Correlation coefficient

稳性团聚体 , > 5 mm 团聚体称为水稳性大团聚体 (吴承祯和洪伟, 1999)。对水稳性团聚体(X_1)、水稳性大团聚体(X_2)和结构体破坏率(X_3)与土壤团粒结构分形维数 D (湿筛条件) 进行回归分析发现存在显著的直线关系 , 其关系式分别为 : $D = 3.464\ 3 - 0.011\ 1X_1$ ($R = -0.982\ 6^{**}$)、 $D = 2.734\ 7 - 0.004\ 6X_2$ ($R = -0.918\ 6^{**}$)、 $D = 0.011\ 0X_3 + 2.394\ 8$ ($R = 0.970\ 7^{**}$)。对干筛条件下测得的 > 0.25 mm 团聚体(X_4)与土壤团粒结构分形维数 D (干筛条件) 进行回归分析发现也存在显著的直线关系 , 其关系式为 : $D = 8.631\ 6 - 0.066\ 7X_4$ ($R = -0.982\ 2^{**}$)。以上的分析结果说明土壤团粒结构的分形维数能够反映土壤水稳性团聚体含量、水稳性大团聚体含量和土壤结构体破坏率对土壤结构与稳定性的影响趋势 , 土壤水稳性团聚体和水稳性大团聚体含量高其分形维数小 , 则土壤结构体破坏率小 , 反之土壤水稳性团聚体和大团聚体含量低其分形维数大 , 则土壤结构体破坏率高 , 团聚体含量越高团粒结构的分形维数越小 , 则土壤越具有良好的结构与稳定性。

2.2 土壤团粒结构分维特征比较

由表 1 可知 , 土壤团粒结构的分形维数在湿筛条件下 0 ~ 20 cm 土层天然常绿阔叶林 < 檫木林 < 水杉林 < 柳杉林 , 20 ~ 40 cm 土层天然常绿阔叶林 < 檫木林 < 水杉林 < 柳杉林 , 在干筛条件下 0 ~ 20 cm 土层天然常绿阔叶林 < 檫木林 < 水杉林 < 柳杉林 , 20 ~ 40 cm 土层天然常绿阔叶林 < 水杉林 < 檫木林 < 柳杉林。在干筛和湿筛条件下 0 ~ 20 cm 土层土壤团粒结构的分形维数都低于 20 ~ 40 cm 土层。从以上结果可以看出 , 无论在湿筛条件下还是在干筛条件下 0 ~ 20 和 20 ~ 40 cm 土层天然常绿阔叶林土壤团粒结构的分形维数最小 , 其土壤团聚体、水稳性团聚体含量 0 ~ 20 cm 土层分别为 97.404%、90.962% , 20 ~ 40 cm 土层分别为 96.935%、89.695% , 在各林分中最高 , 组成状况最好 , 且土壤结构破坏率最低 0 ~ 20 cm 土层为 6.614% , 20 ~ 40 cm 土层为 7.469% , 均低于 3 种人工林相对应的土层 , 所以天然常绿阔叶林土壤结构稳定性较好。这与天然常绿阔叶林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 , 枯落物层蓄积量高(天然常绿阔叶林枯落物层蓄积

量分别是檫木林、柳杉林和水杉林的 2.58、22.73 和 1.42 倍) 土层有机质高,速效性养分供应林木生长发育的能力强,植物根系在土层中穿插、挤压过程中使得土体构型空虚有关。3 种人工林均处于幼林阶段,天然常绿阔叶林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高,因此由腐殖质胶结形成的团聚体、水稳性团聚体均高于人工林。

3 种人工林土壤团聚体、水稳性团聚体含量在 0~20 cm 土层,檫木林分别为 96.782% 和 89.793%; 水杉林分别为 95.985% 和 87.641%,柳杉林分别为 95.025% 和 81.582%; 20~40 cm 土层,檫木林分别为 95.205% 和 88.011%,水杉林分别为 95.779% 和 84.153%,柳杉林分别为 94.942% 和 62.088%。土壤结构体破坏率在 0~20、20~40 cm 土层,檫木林分别为 7.221% 和 7.556%,水杉林分别为 8.693% 和 12.138%,柳杉林分别为 14.147% 和 34.604%。相比之下,檫木林和水杉林土壤团粒结构分形维数较小、土壤团聚体和水稳性团聚体含量较高、土壤结构体破坏率较低,土壤结构稳定性较好,而柳杉林土壤团粒结构分形维数较大、土壤团聚体和水稳性团聚体含量较低、土壤结构体破坏率较高,土壤结构稳定性较差。导致这一现象的原因可能与 3 种林分地表枯落物的形成和分解有关,由于檫木属于阔叶落叶树种,每年有大量的落叶归还土壤,且林下枯落物丰富,枯枝落叶分解快(陈卓梅等,2002),水杉也属于落叶树种,每年也有大量的枯落物归还土壤,而柳杉属于常绿树种,归还土壤的枯落物量较少。柳杉与前两者相比,其幼树生长缓慢,郁闭时间较长(中国树木志编委会,1977),而且地表枯落物层蓄积量

较少,雨滴直接冲击地表,造成土壤板结。

2.3 分形维数与土壤物理性质的关系

由表 2 可知,0~20、20~40 cm 土层土壤自然含水率、毛管孔隙、非毛管孔隙、初渗系数和稳渗系数天然常绿阔叶林高于人工林,而土壤容重天然常绿阔叶林低于人工林。3 种人工林中,0~20、20~40 cm 土层土壤自然含水率、毛管孔隙、非毛管孔隙、初渗系数和稳渗系数檫木林>水杉林>柳杉林,0~20 cm 土层土壤容重水杉林<檫木林<柳杉林,20~40 cm 土层檫木林<水杉林<柳杉林,同时,各林分 0~20 cm 土层土壤容重均小于 20~40 cm 土层,而 0~20 cm 土层土壤自然含水率、毛管孔隙、非毛管孔隙、初渗系数和稳渗系数均大于 20~40 cm 土层。这说明天然常绿阔叶林转变为人工林后,土壤容重升高,土壤自然含水率、毛管孔隙、非毛管孔隙、初渗系数和稳渗系数降低。

对土壤物理性质和土壤团粒结构分形维数回归分析结果表明(表 3),不论是干筛还是湿筛得到的土壤团粒结构分形维数与土壤物理性质均存在显著的相关性,说明土壤团粒结构分形维数高,则土壤自然含水率、毛管孔隙、非毛管孔隙、初渗系数和稳渗系数低,反之则高;分形维数高,则土壤容重高,反之则低。因此,这一结果表明土壤团粒结构分形维数值的高低能够反映土壤物理性质的优劣。

2.4 分形维数与土壤养分的关系

由表 4 可知,0~20、20~40 cm 土层土壤有机质、全氮、碱解氮、全磷、速效磷、全钾、速效钾含量,天然常绿阔叶林>檫木林>水杉林>柳杉林,且 0~20 cm 土层土壤养分含量高于 20~40 cm 土层。这

表 2 天然常绿阔叶林人工更新后土壤物理性质
Table 2 Soil physical properties under natural evergreen broadleaved forest and artificial regeneration

林分类型 Forest type	土层 (cm) Soil layer	自然含 水率 ⁵⁾ (%)	容重 ⁶⁾ (g·cm ⁻³)	毛管孔隙 ⁷⁾ (%)	非毛管 孔隙 ⁸⁾ (%)	初渗系数 ⁹⁾ k ₁₀ (mm·min ⁻¹)	稳渗系数 ¹⁰⁾ k ₁₀ (mm·min ⁻¹)
天然常绿阔叶林 ¹⁾	0~20	132.9±8.4	0.48±0.05	64.3±4.9	9.5±1.4	5.76±2.29	1.39±0.95
	20~40	112.0±5.7	0.59±0.02	62.0±3.2	7.8±3.1	4.76±3.07	1.19±0.37
檫木林 ²⁾	0~20	100.8±6.9	0.75±0.08	58.8±6.0	8.5±4.2	4.97±2.63	0.98±0.45
	20~40	81.9±5.1	0.78±0.03	57.4±3.5	7.4±4.6	3.55±1.03	0.85±0.47
柳杉林 ³⁾	0~20	48.5±3.5	0.92±0.13	50.6±3.2	7.6±5.7	2.51±1.74	0.58±0.31
	20~40	38.1±4.4	1.27±0.10	41.2±3.4	4.6±1.9	2.10±1.16	0.26±0.17
水杉林 ⁴⁾	0~20	87.5±5.2	0.71±0.15	57.6±10.6	8.0±5.0	3.15±2.52	0.94±0.32
	20~40	69.4±4.1	0.84±0.01	56.6±3.3	7.4±1.5	2.72±1.16	0.79±0.54

1)~4): 见表 1 See Table 1 5) Natural water content 6) Bulk density 7) Capillary porosity 8) Non- capillary porosity 9) Original infiltration coefficient 10) Stable infiltration coefficient

说明天然常绿阔叶林人工更新后土壤养分含量下降。3 种人工林由于树种不同和对林地土壤养分的改善和维护作用不同导致土壤养分含量的差异。

对土壤养分含量和土壤团粒结构分形维数回归分析结果表明(表 5),不论是干筛还是湿筛得到的

土壤团粒结构分形维数与土壤养分含量呈显著负相关,说明了土壤团粒结构分形维数高,则土壤有机质、全氮、碱解氮、全磷、速效磷、全钾、速效钾含量低,反之则高。以上结果表明土壤团粒结构分形维数值的高低能够表征土壤养分含量状况。

表 3 分形维数与土壤物理性质的关系
Table 3 Relationship between fractal dimension and soil physical properties

项目 Item	拟合回归方程 Linear regression equation		相关系数 Correlation coefficient	
	湿筛 Wet sieving	干筛 Dry sieving	湿筛 Wet sieving	干筛 Dry sieving
自然含水率 ¹⁾	$D = 2.780\ 8 - 0.003\ 0\ X$	$D = 2.393\ 0 - 0.001\ 9\ X$	- 0.884 9 **	- 0.953 9 **
容重 ²⁾	$D = 2.185\ 7 + 0.435\ 4\ X$	$D = 2.053\ 9 + 0.224\ 6\ X$	0.966 0 **	0.833 7 **
毛管孔隙 ³⁾	$D = 3.339\ 8 - 0.014\ 4\ X$	$D = 2.634\ 2 - 0.007\ 2\ X$	- 0.975 6 **	- 0.811 7 *
非毛管孔隙 ⁴⁾	$D = 3.081\ 3 - 0.072\ 4\ X$	$D = 2.501\ 8 - 0.035\ 5\ X$	- 0.947 7 **	- 0.777 5 *
初渗系数 ⁵⁾	$D = 2.774\ 5 - 0.066\ 1\ X$	$D = 2.402\ 8 - 0.046\ 3\ X$	- 0.816 9 *	- 0.958 2 **
稳渗系数 ⁶⁾	$D = 2.780\ 7 - 0.286\ 4\ X$	$D = 2.377\ 4 - 0.166\ 8\ X$	- 0.934 9 **	- 0.911 0 **

1) Natural water content 2) Bulk density 3) Capillary porosity 4) Non- capillary porosity 5) Original infiltration coefficient 6) Stable infiltration coefficient * : $p < 0.05$ ** : $p < 0.01$

表 4 天然常绿阔叶林人工更新后土壤养分含量
Table 4 Soil nutrient content under natural evergreen broadleaved forest and artificial regeneration

林分类型 Forest type	土层 Soil layer (cm)	有机质 Organic matter (g·kg ⁻¹)	全氮 Total-N (g·kg ⁻¹)	碱解氮 Hydrolysis-N (mg·kg ⁻¹)	全磷 Total-P (mg·kg ⁻¹)	速效磷 Available-P (mg·kg ⁻¹)	全钾 Total-K (g·kg ⁻¹)	速效钾 Available-K (mg·kg ⁻¹)
天然常绿 阔叶林 ¹⁾	0 ~ 20	115.8 ± 6.7	1.40 ± 0.15	236.9 ± 20.4	243.5 ± 16.4	2.07 ± 0.19	31.4 ± 2.2	47.3 ± 5.9
	20 ~ 40	64.3 ± 4.9	0.84 ± 0.07	157.9 ± 16.8	214.8 ± 15.5	1.16 ± 0.08	31.1 ± 1.9	31.9 ± 3.2
樟木林 ²⁾	0 ~ 20	89.2 ± 6.0	1.22 ± 0.05	178.7 ± 12.9	236.6 ± 12.1	1.62 ± 0.10	30.6 ± 1.1	45.6 ± 6.3
	20 ~ 40	52.0 ± 5.2	0.76 ± 0.11	145.4 ± 7.7	188.9 ± 9.0	0.98 ± 0.15	28.3 ± 2.5	26.4 ± 2.3
柳杉林 ³⁾	0 ~ 20	30.9 ± 3.0	0.59 ± 0.02	92.7 ± 4.3	195.6 ± 12.1	0.83 ± 0.08	22.5 ± 1.7	30.8 ± 3.9
	20 ~ 40	17.8 ± 4.4	0.30 ± 0.01	52.4 ± 5.0	139.4 ± 6.8	0.67 ± 0.13	20.8 ± 2.5	20.6 ± 1.8
水杉林 ⁴⁾	0 ~ 20	75.1 ± 7.3	1.13 ± 0.14	163.6 ± 10.7	223.9 ± 12.2	1.29 ± 0.07	29.9 ± 1.8	41.3 ± 4.6
	20 ~ 40	38.2 ± 5.9	0.57 ± 0.06	90.3 ± 7.9	179.3 ± 18.2	0.79 ± 0.05	24.3 ± 1.4	24.7 ± 1.7

1) ~ 4) 见表 1 See Table 1

表 5 分形维数与土壤养分的关系
Table 5 Relationship between fractal dimension and soil nutrient content

项目 Item	拟合回归方程 Linear regression equation		相关系数 Correlation coefficient	
	湿筛 Wet sieving	干筛 Dry sieving	湿筛 Wet sieving	干筛 Dry sieving
有机质 Organic matter	$D = 2.696\ 5 - 0.002\ 7\ X$	$D = 2.342\ 9 - 0.001\ 8\ X$	- 0.832 8 *	- 0.933 5 **
全氮 Total-N	$D = 2.736\ 6 - 0.241\ 8\ X$	$D = 2.358\ 4 - 0.148\ 7\ X$	- 0.843 6 **	- 0.867 8 **
碱解氮 Hydrolysis-N	$D = 2.757\ 2 - 0.001\ 6\ X$	$D = 2.369\ 8 - 0.001\ 0\ X$	- 0.890 4 **	- 0.907 5 **
全磷 Total-P	$D = 3.100\ 2 - 0.002\ 8\ X$	$D = 2.550\ 1 - 0.001\ 6\ X$	- 0.896 9 **	- 0.840 8 **
速效磷 Available-P	$D = 2.730\ 5 - 0.169\ 9\ X$	$D = 2.379\ 4 - 0.125\ 4\ X$	- 0.752 9 *	- 0.930 4 **
全钾 Total-K	$D = 3.150\ 6 - 0.022\ 7\ X$	$D = 2.583\ 2 - 0.012\ 8\ X$	- 0.892 1 **	- 0.846 1 **
速效钾 Available-K	$D = 2.792\ 3 - 0.007\ 8\ X$	$D = 2.407\ 4 - 0.005\ 2\ X$	- 0.729 3 *	- 0.818 8 *

* : $p < 0.05$ ** : $p < 0.01$

2.5 分形维数与微生物数量的关系

由表 6 可知 ,各土层土壤微生物数量 细菌数量占绝对优势 ,真菌和放线菌数量在整个微生物数量组成中占有比例较小 ,且真菌数量小于放线菌。出现这种现象的原因可能是因为细菌喜欢湿润并能耐受低氧 ,真菌耐干且对土壤中氧气含量较敏感 ,而放线菌具有喜热耐旱的特性 ,在雨季土壤含水量高 ,氧气的扩散作用降低 ,真菌是首先的受害者(张萍和冯志立 ,1997)。由于本研究是在雨季进行 ,研究区雨季平均月降雨量较大 ,导致土壤含水率较高(表 2) ,从而影响了真菌和放线菌的正常活动 ,可能是导致各林分土壤真菌和放线菌数量较少的原因。各林分 0~20、20~40 cm 土层土壤细菌、真菌和放线菌数量

天然常绿阔叶林 > 檫木林 > 水杉林 > 柳杉林 ,且 0~20 cm 土层土壤微生物数量均高于 20~40 cm 土层 ,这与表层土壤有机物质含量高、通气性好、温度和湿度较适合微生物生长有关(张萍和冯志立 ,1997)。3 种人工林 ,由于土壤有机物质和土壤物理性质等的不同导致了土壤微生物数量的差异。

对土壤微生物数量和土壤团粒结构分形维数回归分析结果表明(表 7) ,不论是干筛还是湿筛得到的土壤团粒结构分形维数与细菌、真菌和放线菌数量呈显著负相关 ,说明土壤团粒结构分形维数高 ,则土壤微生物数量少 ,反之则多。以上结果表明土壤团粒结构分形维数值的高低也能够反应土壤微生物数量的多寡 ,从而反应出微生物的活动情况。

表 6 天然常绿阔叶林人工更新后土壤微生物数量 Table 6 Soil microbe number under natural evergreen broadleaved forest and artificial regeneration					
林分类型 Forest type	土层(cm) Soil layer	细菌 Bacteria (10 ⁶ · g ⁻¹ 干土)	真菌 Fungi (10 ³ · g ⁻¹ 干土)	放线菌 ⁵⁾ (10 ³ · g ⁻¹ 干土)	微生物总数 ⁶⁾ (10 ⁶ · g ⁻¹ 干土)
天然常绿阔叶林 ¹⁾	0~20	9.25 ± 1.13	4.89 ± 0.63	11.91 ± 1.43	9.26
	20~40	7.45 ± 0.82	1.55 ± 0.21	4.64 ± 0.48	7.45
檫木林 ²⁾	0~20	6.10 ± 1.02	3.48 ± 0.75	8.12 ± 1.16	6.11
	20~40	5.98 ± 0.48	0.96 ± 0.11	3.82 ± 0.42	5.98
柳杉林 ³⁾	0~20	3.96 ± 0.44	1.63 ± 0.29	5.69 ± 0.88	3.97
	20~40	3.88 ± 0.28	0.14 ± 0.02	1.71 ± 0.15	3.88
水杉林 ⁴⁾	0~20	5.96 ± 1.01	2.81 ± 0.45	7.76 ± 1.34	5.97
	20~40	5.05 ± 0.54	0.72 ± 0.09	3.53 ± 0.31	5.05
1)~4): 见表 1 See Table 1 5) Actinomyces 6) Total microbes					

表 7 分形维数与微生物数量的关系 Table 7 Relationship between fractal dimension and soil microbe number				
项目 Item	拟合回归方程 Linear regression equation		相关系数 Correlation coefficient	
	湿筛 Wet sieving	干筛 Dry sieving	湿筛 Wet sieving	干筛 Dry sieving
细菌 Bacteria	$D = 2.819\ 2 - 0.048\ 4\ X$	$D = 2.431\ 0 - 0.033\ 4\ X$	-0.807 2 *	-0.932 1 **
真菌 Fungi	$D = 2.628\ 3 - 0.048\ 2\ X$	$D = 2.301\ 2 - 0.034\ 3\ X$	-0.717 4 *	-0.853 0 **
放线菌 Actinomyces	$D = 2.671\ 3 - 0.023\ 8\ X$	$D = 2.326\ 4 - 0.016\ 0\ X$	-0.722 7 *	-0.813 1 *
* : $p < 0.05$ ** : $p < 0.01$				

3 结论与讨论

土壤团聚体状况是影响土壤肥力的一个重要因素 ,它是土壤肥力的中心调节器 ,在很大程度上影响土壤通气性和抗蚀性 ,任何土壤的退化首先将表现出土壤团粒结构的消失 ,团聚体百分比是决定土壤侵蚀、压实、板结等物理过程速度和幅度的关键指标之一(Rattan , 2000)。影响团聚体的形成及其稳定

性的因素很多 ,如成土母质、土地利用方式、耕作及管理制度、气候条件、植被覆盖情况、土壤本身的物理化学性状以及人为因素等(章明奎和何振立 ,1997 ; Barral *et al.* , 1998 ; Salako *et al.* , 1999)。天然常绿阔叶林人工更新成檫木林、柳杉林和水杉林后土壤团聚体含量减少分形维数升高 ,由于天然常绿阔叶林转变成人工林后成土母质、气候条件没有发生根本性的改变 ,因此导致天然常绿阔叶林人工

更新后土壤团聚体含量减少分形维数升高的原因是天然常绿阔叶林转变为人工林后土地利用方式、管理制度和植被覆盖状况的变化引起林地土壤物理性质和化学性质的变化,从而影响团聚体的形成和稳定性。所以天然常绿阔叶林土壤团聚体含量高、团聚体分形维数低、结构体破坏率低。

土壤结构优劣最终决定于土壤的团粒结构好坏,好的土壤粒径分布均匀,粘粒含量适中,土壤大团聚体含量高,这一方面是由于随着土壤结构演变,粘粒有向下淋溶和悬移的趋势(孙波等,1999)。所以一般下层土壤的粘粒含量高于上层,但粘粒的增加意味着土壤更紧实,必然占用通气孔隙,孔隙过小则土壤持水也多以低效或无效的非活性水为主,土壤的水容量和热容量降低,加剧了土壤的水肥矛盾。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,在分形维数上表现出粘粒含量越高、质地越细,分形维数越高(吴承祯和洪伟,1999)。因此,各林分 0~20 cm 土层土壤团聚体含量、孔隙度、渗透系数、养分含量和微生物数量均高于 20~40 cm 土层,0~20 cm 土层土壤团粒结构的分形维数、容重和结构体破坏率均低于 20~40 cm 土层。

森林具有最大的水源涵养和水土保持功能,林地上部分的持水量通常仅占林分水源涵养能力的 15% 以下,而森林土壤则是森林涵养水源的主体(郑郁善等,1997;陈卓梅等,2002)。土壤水分贮蓄量和贮蓄方式受其物理性质影响很大,土壤总贮水量是毛管孔隙和非毛管孔隙水分贮蓄量之和,反映了土壤贮蓄和调节水分的潜在能力(王勤等,2003)。土壤渗透性能是林分水源涵养功能的重要指标之一,林地土壤的渗透能力直接影响土壤的涵蓄水性能,土壤渗透能力强意味着降水可很快入渗并贮存于林地土壤,反之,则以地表径流流失(郝占庆和王力华,1998)。已有的研究表明土壤团粒结构分形维数对土壤孔隙度、持水量、排水量等有一定的影响作用(刘金福等,2002;封磊等,2004),本研究也发现在干筛和湿筛条件下土壤团粒结构分形维数都与土壤毛管孔隙、非毛管孔隙和渗透系数呈显著的直线相关。因此,作者认为土壤团粒结构的分形维数可作为评价林地土壤水源涵养功能的一个新指标。

吴承祯和洪伟(1999)提出,分形维数能客观表征土壤团粒结构的团聚体、水稳性团聚体及粒径大小组成,为理想的土壤肥力测定指标。已有的研究表明,土壤颗粒组成或团粒组成的分形维数在作为土壤肥力诊断指标等方面具有很好的应用潜力(刘

金福等,2002;程先富等,2003;苏永中和赵哈林,2004;封磊等,2004)。本研究也发现在干筛和湿筛条件下土壤团粒结构分形维数均与土壤有机质、全氮、碱解氮、全磷、速效磷、全钾、速效钾含量呈显著的直线相关,说明各林分土壤团粒结构的分形维数能够表征各林分土壤肥力状况。但刘金福等(2002)的研究表明无论是湿筛还是干筛得到的土壤团粒结构分形维数均与土壤全磷含量相关性不显著,程先富等(2003)的研究也如此,这可能与两位学者所采集的土壤样品之间成土母质各不相同有关。

由于团聚体内存在毛管孔隙、各团聚体间又存在通气的大孔隙,因而土壤微生物的嫌气、好气过程同时存在,不仅有利于微生物的活动,增加速效养分含量,且能使有机质等养分消耗减慢(中国科学院南京土壤研究所,1978)。通过研究发现土壤团粒结构分形维数与土壤细菌、真菌和放线菌数量呈显著的直线相关,说明分形维数能够反映土壤微生物数量变化状况。因此,作者认为土壤团聚体分形维数也可以作为评价微生物活动情况的一个新指标。

天然常绿阔叶林人工更新后土壤团粒结构的分形维数升高、结构体破坏率增加、物理性质变差、养分含量降低、微生物数量减少。由于更新树种不同对土壤团聚体、物理性质、养分和微生物的影响也不同,3 种人工林总的来说檫木林较好,水杉林次之,柳杉林最差。因此,目前应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,以保持和提高地带性常绿阔叶林生物多样性,充分发挥其改善环境的生态功能,而且在天然常绿阔叶林人工更新过程中应选择适宜造林树种并使之在短期内达到郁闭以保护和维持原有林地土壤的生态功能。土壤结构是土壤肥力的基础,而土壤肥力是土壤的基本属性,是土壤物理、化学和生物性质的综合反映(沈慧等,2000)。土壤分形特征是对土壤组成结构的描述,而这种结构又决定或影响了土壤的其它性质,宫阿都和何毓蓉(2001)及苏永中和赵哈林(2004)的研究认为分形维数可以作为土壤退化评价的一项综合性指标,结合本文研究和其他学者的研究结果,作者认为土壤团粒或颗粒粒径的分形维数既可以作为土壤退化评价的一项综合性指标,也可以表征土壤肥力状况,同时还可以作为土壤水源涵养功能和土壤微生物活动情况评价的一个新指标。

参 考 文 献

Alexandra K, Renduo Z (1998). Estimating the soil water retention

- from particle-size distribution: a fractal approach. *Soil Science Society of America Journal*, 62, 171 – 179.
- Arya LM, Paris JF (1981). A physicoempirical model to predict the soil moisture characteristic from particle-size distribution and bulk density data. *Soil Science Society of America Journal*, 45, 1023 – 1031.
- Barral MT, Arias M, Guerif J (1998). Effects of iron and organic matter on the porosity and structural stability of soil aggregates. *Soil and Tillage Research*, 46, 162 – 172.
- Bird NRH, Bartoli F, Dexter AR (1996). Water retention models for fractal soil structures. *European Journal of Soil Science*, 47, 1 – 6.
- Brakensiek DL, Rawls WJ, Longsdon SD (1992). Fractal description of macroporosity. *Soil Science Society of America Journal*, 56, 1721 – 1723.
- Cheng XF(程先富), Shi XZ(史学正), Wang HJ(王洪杰) (2003). Fractal characteristics of particle of arable layers in hilly region of red soil. *Scientia Geographica Sinica(地理科学)*, 23, 617 – 621. (in Chinese with English abstract)
- Chen ZM(陈卓梅), Zheng YS(郑郁善), Huang XH(黄先华), Wang SF(王舒凤), Dong LS(董林水), Chen LG(陈礼光) (2002). A study on water conservation function of mixed forests of *Taiwania flousiana* Gaussen. *Journal of Fujian College of Forestry(福建林学院学报)*, 22, 266 – 269. (in Chinese with English abstract)
- Dong LK(董连科) (1991). *Fractal Theory and Application(分形理论及其运用)*. Liaoning Science and Technology Press, Shenyang, 5 – 7. (in Chinese)
- Editorial Board of China Tree Annals(中国树木志编委会) (1977). *Afforestation Techniques of Main Tree Species in China(中国主要树种造林技术)*. China Agriculture Press, Beijing, 29 – 31, 36 – 38, 545 – 547. (in Chinese)
- Feng L(封磊), Hong W(洪伟), Wu CZ(吴承祯), Song P(宋萍) (2004). Fractal feature of soil aggregation in different management patterns of Chinese fir plantation mixed with *Tsoongiodendron odorum*. *Journal of Mountain Science(山地学报)*, 22, 315 – 320. (in Chinese with English abstract)
- Friesen JP, Mikula RJ (1988). Fractal space and rock permeability implications. *Physical Review B*, 38, 2635 – 2638.
- Gong AD(宫阿都), He YR(何毓蓉) (2001). Study on fractal features of soil structure of degraded soil in dry and hot valley region of Jinsha river. *Journal of Soil and Water Conservation(水土保持学报)*, 15(3), 112 – 115. (in Chinese with English abstract)
- Hao ZQ(郝占庆), Wang LH(王力华) (1998). Water conservation capacities of soils with major forest types in mountainous regions of East Liaoning Province. *Chinese Journal of Applied Ecology(应用生态学报)*, 9, 237 – 241. (in Chinese with English abstract)
- Katz AJ, Thompson AH (1985). Fractal sandstone pores: implication for conductivity and pore formation. *Physical Review Letters*, 54, 1325 – 1328.
- Liang SC(梁士楚), Wang BS(王伯荪) (2003). Fractal characteristics of soil particle-size distribution of *Bruguiera gymnorhiza* community in mangrove area of Yingluo Bay Guangxi Province. *Journal of Tropical Oceanography(热带海洋学报)*, 22(1), 17 – 22. (in Chinese with English abstract)
- Liao EH(廖尔华), Zhang SR(张世熔), Deng LJ(邓良基), Xiang HY(项虹艳) (2002). Fractal dimensions of particle in the hill area and their applications. *Journal of Sichuan Agricultural University(四川农业大学学报)*, 20, 242 – 245, 281. (in Chinese with English abstract)
- Li BG(李保国) (1994). Application and expectation of fractal theory in soil science. *Progress in Soil Science(土壤学进展)*, 22(1), 1 – 10. (in Chinese)
- Liu JF(刘金福), Hong W(洪伟), Wu CZ(吴承祯) (2002). Fractal features of soil clusters under some precious hardwood stands in the central subtropical region, China. *Acta Ecological Sinica(生态学报)*, 22, 1998 – 2005. (in Chinese with English abstract)
- Nanjing Soil Sciences Institute, Chinese Academy of Sciences(中国科学院南京土壤研究所) (1978). *Physical and Chemical Analysis Methods of Soils(土壤理化分析)*. Shanghai Scientific and Technical Publishers, Shanghai, 514 – 515. (in Chinese)
- Pachepsky YA, Shcherbakov RA, Korsunskaya LP (1995). Scaling of soil water retention using a fractal model. *Soil Science*, 159, 99 – 104.
- Rattan L (2000). Physical management of soils of the tropics: priorities for the 21st century. *Soil Science*, 165, 191 – 207.
- Rawls WJ, Brakensiek DL, Longsdon SD (1993). Predicting saturated hydraulic conductivity utilizing fractal principles. *Soil Science Society of America Journal*, 57, 1193 – 1197.
- Rieu M, Sposito G (1991a). Fractal fragmentation, soil porosity and soil water propenies I. Theory. *Soil Science Society of America Journal*, 55, 1231 – 1238.
- Rieu M, Sposito G (1991b). Fractal fragmentation, soil porosity and soil water propenies II. Application. *Soil Science Society of America Journal*, 55, 1239 – 1244.
- Salako FK, Babalola O, Hauset S, Kang BT (1999). Soil macroaggregate stability under different fallow management systems and cropping intensities in south western Nigeria. *Geoderma*, 91, 103 – 123.
- Scott WT, Stephen WW (1989). Application of fractal mathematics to soil water retention estimation. *Soil Science Society of America Journal*, 53, 987 – 996.
- Scott WT, Stephen WW (1992). Fractal scaling of soil particlesize distributions: analysis and limitation. *Soil Science Society of America Journal*, 56, 362 – 369.
- Shen H(沈慧), Jiang FQ(姜凤岐), Du XJ(杜晓军), Guo H(郭浩), Wang SZ(王世忠) (2000). Study on soil fertility of water and soil conservation forest and its evaluation indexes. *Journal of Soil and Water Conservation(水土保持学报)*, 14

- (2), 60 – 65. (in Chinese with English abstract)
- Su YZ(苏永中), Zhao HL(赵哈林) (2004). Fractal features of soil particle size distribution in the desertification process of the farm land in Horqin Sandy Land. *Acta Ecologica Sinica*(生态学报), 24, 71 – 74. (in Chinese with English abstract)
- Sun B(孙波), Zhang TL(张桃林), Zhao QG(赵其国) (1999). Fertility evaluation of red soil derived from quaternary red clay in low-hilly region in middle subtropics. I. Evolution of soil physical fertility. *Acta Pedologica Sinica* (土壤学报), 36, 35 – 47. (in Chinese with English abstract)
- Turcotte DL (1986). Fractal fragmentation. *Journal of Geography Research*, 91, 1921 – 1926.
- Wang Q(王勤), Zhang ZY(张宗应), Xu XN(徐小牛) (2003). Soil properties and water conservation function of different forest types in Dabieshan District, Anhui. *Journal of Soil and Water Conservation*(水土保持学报), 17(3), 59 – 62. (in Chinese with English abstract)
- Wu CZ(吴承祯), Hong W(洪伟) (1999). Study on fractal features of soil aggregate structure under different management patterns. *Acta Pedologica Sinica*(土壤学报), 36, 162 – 167. (in Chinese with English abstract)
- Xu GH(许光辉), Zheng HY(郑洪元) (1986). *Soil Microbe Analysis Method Handbook*(土壤微生物分析方法手册). China Agriculture Press, Beijing, 91 – 137. (in Chinese)
- Yang PL(杨培岭), Lou YP(罗远培), Shi YC(石元春) (1993). Fractal feature of soil on expression by weight distribution of particle size. *Chinese Science Bulletin*(科学通报), 38, 1896 – 1899. (in Chinese)
- Zeng Y, Gantzer CJ, Payton RL, Anderson SH (1996). Fractal dimension and lacunarity determined with X-ray computed tomography. *Soil Science Society of America Journal*, 60, 1718 – 1724.
- Zhang MK(章明奎), He ZL(何振立) (1997). Effect of parent materials on formation of aggregates. *Tropical and Subtropical Soil Science*(热带亚热带土壤科学), 6, 198 – 202. (in Chinese with English abstract)
- Zhang P(张萍), Feng ZL(冯志立) (1997). Biological nutrient cycling of secondary forests in Xishuangbanna. *Acta Pedologica Sinica*(土壤学报), 34, 418 – 426. (in Chinese with English abstract)
- Zhang SR(张世熔), Den LJ(邓良基), Zhou Q(周倩), Wu GF(伍国锋) (2002). Fractal dimensions of particle surface in the plowed layers and their relationships with main soil properties. *Acta Pedologica Sinica*(土壤学报), 39, 221 – 226. (in Chinese with English abstract)
- Zheng YS(郑郁善), Guo HT(郭海涛), Xu FL(徐凤兰), Chen DX(陈登雄) (1997). Hydrologic effect of mixed stands of *Michelia fujianensis* with *Cunninghamia lanceolata*. *Journal of Fujian College of Forestry*(福建林学院学报), 17, 126 – 130. (in Chinese with English abstract)

责任编辑：张金屯 责任编辑 张丽赫