

# 闽南山地 3 种典型植被类型土壤分形与养分特征

林狄显

(福建省永春大荣国有林场, 福建 永春 362617)

**摘要:** [目的] 探索闽南山地不同植被类型土壤分形特征及其与表层土壤颗粒组成、养分含量的相关关系, 为评价闽南山地典型植被类型土壤质量, 开展土地利用结构调整、土壤侵蚀防治及生态修复等提供参考。[方法] 选取土壤颗粒体积分形维数模型对 3 种典型植被类型林地土壤的分形维数  $D$  值进行计算, 并与土壤颗粒组成及土壤养分进行相关性分析。[结果] 土壤颗粒体积分形维数  $D$  值从大到小依次为次生林 > 马尾松林 > 柑橘林; 分形维数  $D$  值与土壤黏粒和粉粒体积百分数存在显著正相关关系, 与砂粒体积百分含量呈显著负相关 ( $p < 0.05$ ); 土壤 pH 值、全氮、全磷、全钾、水解性氮、有效磷、速效钾和有机碳含量从大到小均为: 次生林 > 马尾松林 > 柑橘林; 土壤容重为柑橘林 > 马尾松林 > 次生林; 分形维数  $D$  值与柑橘林的土壤水解性氮含量呈显著正相关, 与马尾松林的水解性氮含量、土壤全磷、全钾含量呈显著正相关, 与次生林的土壤全磷含量、水解性氮含量呈显著正相关, 与有机碳含量均呈显著负相关。[结论] 闽南山地不同植被类型会显著影响表层土壤体积分形维数及养分含量, 利用土壤体积分形维数可一定程度上反映不同植被类型的土壤颗粒组成及其养分含量。

**关键词:** 植被类型; 土壤颗粒组成; 土壤养分; 分形维数

文献标识码: A

文章编号: 1000-288X(2017)03-0048-05

中图分类号: S152

**文献参数:** 林狄显. 闽南山地 3 种典型植被类型土壤分形与养分特征[J]. 水土保持通报, 2017, 37(3): 48-52. DOI:10.13961/j.cnki.stbctb.2017.03.008; Lin Dixian. Characteristics of soil fractal and nutrient under three typical vegetation types in mountainous region of Southern Fujian Province[J]. Bulletin of Soil and Water Conservation, 2017, 37(3): 48-52. DOI:10.13961/j.cnki.stbctb.2017.03.008

## Characteristics of Soil Fractal and Nutrient Under Three Typical Vegetation Types in Mountainous Region of Southern Fujian Province

LIN Dixian

(Fujian Yongchun Darong State-owned Forest Farm, Yongchun, Fujian 362617, China)

**Abstract:** [Objective] In order to provide theoretical basis for the evaluation of mountain soil quality under typical vegetation types, land use structure adjustment, soil erosion control and ecological restoration in Southern Fujian Province, we explored the fractal characteristics of soils under different vegetation types in Southern Fujian Province and analyzed the correlations of fractal characteristics with soil particle composition and nutrient content. [Methods] The fractal dimension  $D$  values of the soil under three typical vegetation forests in a mountainous region of Southern Fujian Province were calculated using the fractal dimension model of soil particle volume, and their correlations with soil particle composition and soil nutrients were analyzed. [Results] The fractal dimension  $D$  values of the soil particle volume, in descending order, were the secondary forest, the Masson pine forest, and the citrus forest respectively. The fractal dimension  $D$  value was significantly and positively correlated with the volume percentage of the soil particles of clay and that of powder, and significantly and negatively correlated with the mass percentage of the sand ( $p < 0.05$ ). With regard to the soil pH value, the contents of total nitrogen, total phosphorus, total potassium, hydrolytic nitrogen, available phosphorus, available potassium and organic carbon, their descending order was secondary forest > Masson pine forest > citrus forest; while for soil bulk density, it had a rank as citrus forest >

收稿日期: 2017-03-09

修回日期: 2017-03-14

资助项目: 福建省省级财政森林培育一营林工程项目(2136203); 泉州市科技局计划项目(2015N3)

第一作者: 林狄显(1984—), 男(汉族), 福建省永春县人, 本科, 工程师, 从事森林资源培育管理工作。E-mail: 570919929@qq.com。

Masson pine forest > the secondary forest. The correlation analysis showed that the fractal dimension  $D$  value was significantly and positively correlated with the content of hydrolytic nitrogen in the soil of citrus forest, while it was significantly and negatively correlated with its organic matter. With respect to the Masson pine forest, it had a significant positive correlation with the contents of total phosphorus and total potassium in the soil, and had an extremely significant and positive correlation with the content of hydrolytic nitrogen. At the same time, it had a significant negative correlation with the content of organic carbon. With respect to the secondary forest, it had an extremely significant positive correlation with the content of total phosphorus in the soil ( $p < 0.01$ ), a significant positive correlation with the content of hydrolytic nitrogen, a significant negative correlation with the content of available potassium and organic carbon. [Conclusion] Vegetation types in the southern Fujian mountain area significantly affected the fractal dimension and nutrient contents of the surface soil, and it is possible to use the soil fractal dimension to reflect the soil particle composition and nutrient contents of different vegetation types.

**Keywords:** vegetation type; soil particle size distribution; soil nutrient; fractal dimension

土壤作为不规则形状和自相似结构的复杂多孔介质,由不同颗粒构成,具有特定的分形特征。通过计算土壤颗粒分形维数,不仅可以分析比较同一研究区域不同土地利用类型土壤颗粒的粒径分布及其质地均匀程度的差异,还能在一定程度上反映该研究区域的土壤发生、土壤物理化学性质、土壤受侵蚀退化的程度等<sup>[1]</sup>。国内外已有许多研究者对不同研究区域不同森林类型的土壤分形特征及其与土壤性质的相关性进行了大量研究<sup>[2-6]</sup>,但结果都大相径庭,这与土壤本身复杂的结构组成和影响土壤性质随机多变的环境因素有关<sup>[7]</sup>。尽管如此,利用不同土壤分形特征及其与土壤性质间特定的相关关系,可作为快速准确提取不同研究区域不同土地利用类型大量土壤质量信息的重要指标。鉴于此,本文以闽南山地 3 种典型植被类型林地土壤为研究对象,选取土壤颗粒体积分形维数模型并计算各植被类型林地土壤的分形维数,与土壤颗粒组成及土壤理化性质等进行相关性分析,以期为闽南山地典型森林植被类型土壤质地及其养分状况提供重要参数,并为研究区土地利用结构调整、土壤侵蚀防治及生态修复等提供基础科学资料。

## 1 试验地概况

试验点位于福建省永春大荣国有林场(25°27′—25°32′N, 117°49′—117°59′E)。该经营区横跨下洋、一都 2 个乡镇,北接大田县,南与牛姆林自然保护区毗邻,拥有典型的亚热带森林植被类型。经营面积达 1 500 hm<sup>2</sup>,森林蓄积量 1.16 × 10<sup>5</sup> m<sup>3</sup>,经营区主要树种为杉木、马尾松。近 10 a 来,大力发展珍贵乡土树种 200 hm<sup>2</sup>。经营区全年降水量达 1 800 ~ 2 100 mm,全年无霜期有 280 d,土壤以红壤为主。试验地中次生林和马尾松人工林分别位于该林场的新山工区 053 林班 07 大班 040 小班和 054 林班 12 大班 010 小班,柑橘林位于南山工区的 053 林班 01 大班 050 小班。

次生林为当地风水林,林龄超过 40 a,优势树种以米槠、福建青冈和山苍子等为主,具有清晰的乔木层、灌木层和草本层。马尾松林为 1975 年造林。柑橘林前茬为马尾松人工林,1970 年造林,1993 年伐除种植柑橘,每年 6 月和 9 月进行劈草除灌。样地基本情况详见表 1。

表 1 试验样地基本情况

土地利用类型	植被类型	经纬度	海拔/ m	坡向/ 坡位	坡度/ (°)	林龄/ a	林分密度/ (株·hm <sup>-2</sup> )	树高/ m	胸径/ cm	土壤类型	母岩
经济林	柑橘林	E117°57′59″, N25°29′59″	660	南/中	26	24	600	3.5	9.2(地)	红壤	花岗岩
用材林	马尾松林	E117°49′32″, N25°29′09″	960	西南/中	29	42	1 980	11.2	15.4	红壤	花岗岩
水源涵养林	次生林	E117°50′17″, N25°29′20″	990	西南/中	28	≥40	1 380	9.6	13.8	红壤	花岗岩

## 2 材料与方法

### 2.1 样品采集

2016 年 11 月,在永春大荣国有林场选取柑橘林、

马尾松人工纯林和次生林三种典型植被类型,分别布设 20 m × 60 m 的样地,进行每木检尺与林下植被群落调查。然后沿矩形样地的长边采用 S 型布点法在样地内分别设置 15 个采样点,共计 45 个样点。再用

环刀和铝盒分别采集各样点表层 0—20 cm 的原状土样和 2 kg 左右的混匀鲜土样,编号后将混匀土样带回实验室去除凋落物和根系,进行风干处理。

## 2.2 测定方法

**2.2.1 土壤粒径分布测定** 将风干土样研磨过 2 mm 筛,取 0.500 g 在 250 ml 超纯去离子水中浸泡 36 h,然后搅拌 10 min 静置,至固液分层抽去上层清液,再利用超声波分散 0.5 min,最后采用英国马尔文公司的 MS-2000 型激光衍射粒度分析仪测定土壤粒径分布。该仪器测量范围为 0.02~2000  $\mu\text{m}$ ,重复测量误差控制在  $\pm 2\%$  以内。

**2.2.2 土壤性质测定** 土壤容重采用环刀法,土壤 pH 值采用杭州美控自动化技术有限公司生产的 MIK-PH160 型 pH 测试仪进行测定,全氮采用上海力辰科技 KDN-08A 型凯氏定氮仪测定,全磷采用碱溶—钼锑抗比色法,全钾采用碱溶—火焰光度计法,水解性氮采用碱解扩散法,有效磷采用  $\text{NaHCO}_3$  浸提—钼锑抗比色法,速效钾采用  $\text{CH}_3\text{COONH}_4$  浸提—火焰光度计法,有机碳采用德国 Elementar Vario EL III 元素分析仪测定。

**2.2.3 土壤粒径分级与土壤质地分类** 土壤粒径分级标准采用美国分级制,即 0~0.002,0.002~0.05,0.05~0.1,0.1~0.25,0.25~0.5 和 0.5~2 mm,共 6 级;土壤质地分类标准也采用美国分类制,分为 <0.002 mm 的黏粒、0.002~0.05 mm 的粉粒和 0.05~2 mm 的砂粒。

## 2.3 模型选择

土壤体积分形维数的计算采用王国梁<sup>[8]</sup>推导的公式:

$$\frac{V_{r<R}}{V_T} = \left(\frac{R}{\lambda_V}\right)^{3-D}$$

式中: $D$ ——土壤体积分形维数; $V_{r<R}$ ——粒径小于某粒级  $R$  的土壤颗粒累积体积; $V_T$ ——土壤颗粒总体积; $R$ ——某粒级范围上下限的算术平均值(mm); $\lambda_V$ ——某粒级的上限值(mm)。

## 2.4 数据处理

应用公式计算土壤体积分形维数时,先将公式两边以 10 为底数取对数,变换得到  $\lg(V_{r<R}/V_T) = (3-D) \lg(R/\lambda_V)$ ,然后以  $\lg(V_{r<R}/V_T)$  为纵坐标, $\lg(R/\lambda_V)$  为横坐标作双对数曲线,再将各取样点的土壤粒径分布数据绘于图上,并利用最小二乘法拟合成一条斜率为  $3-D$  的直线,最后求出分形维数  $D$  值。Microsoft Excel 2003 绘制图表,SPSS 17.0 进行方差分析与相关性分析。

# 3 结果与分析

## 3.1 3 种典型植被土壤颗粒分形特征

由图 1 可知,3 种植被类型土壤分形维数在 2.6248~2.7418。其中,次生林最大,马尾松林次之,柑橘林最小。方差分析显示,柑橘林的土壤分形维数与马尾松林和次生林有显著差异( $p < 0.05$ ,下同),马尾松林和次生林间差异不显著。

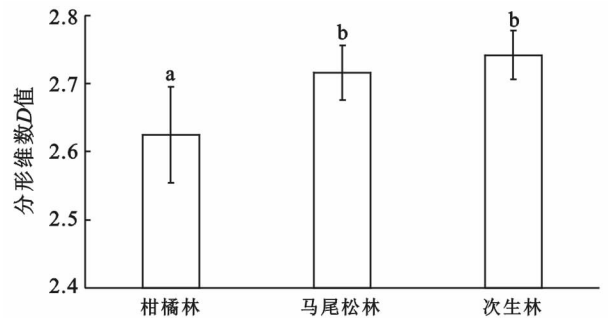


图 1 不同植被类型土壤分形维数  $D$  值的变化

对 3 种典型植被土壤采样点的土壤颗粒组成进行分类可知,柑橘林的土壤颗粒组成以砂粒和粉粒为主,分别占 53.33% 和 46.67%;马尾松林以粉粒和黏粒为主,分别占 60% 和 40%;次生林则以粉粒为主。方差分析结果显示,各土壤质地分形维数  $D$  值均存在显著差异,说明闽南山地不同植被类型土壤质地可以借助分形维数  $D$  值来进行判断。

## 3.2 3 种典型植被土壤颗粒分形维数与土壤颗粒组成的关系

对 3 种典型植被不同粒径土壤颗粒体积百分含量分别与分形维数  $D$  值进行相关分析可知(详见图 2),黏粒与粉粒体积百分含量均与分形维数  $D$  值呈显著正相关,相关系数  $R^2$  分别为 0.938 4 和 0.671 4;砂粒体积百分含量则与分形维数  $D$  值呈显著负相关,相关系数为  $R^2 = 0.784 4$ 。

## 3.3 3 种典型植被土壤颗粒分形维数与土壤性质的关系

由表 2 可以看出,3 种植被类型林地土壤的 pH 值、全氮、全磷、全钾、水解性氮、有效磷、速效钾和有机碳含量从大到小均为:次生林 > 马尾松林 > 柑橘林,土壤容重为柑橘林 > 马尾松林 > 次生林。方差分析结果显示,3 种植被类型林地土壤全氮、全磷、水解性氮、有效磷含量均存在显著差异;土壤容重、全磷、全钾和有机碳含量表现为马尾松林和次生林差异不显著,但均与柑橘林差异显著;土壤速效钾含量表现为马尾松林与柑橘林和次生林差异不显著,但柑橘林和次生林差异显著;土壤 pH 值表现为 3 种植被类型间差异不显著。

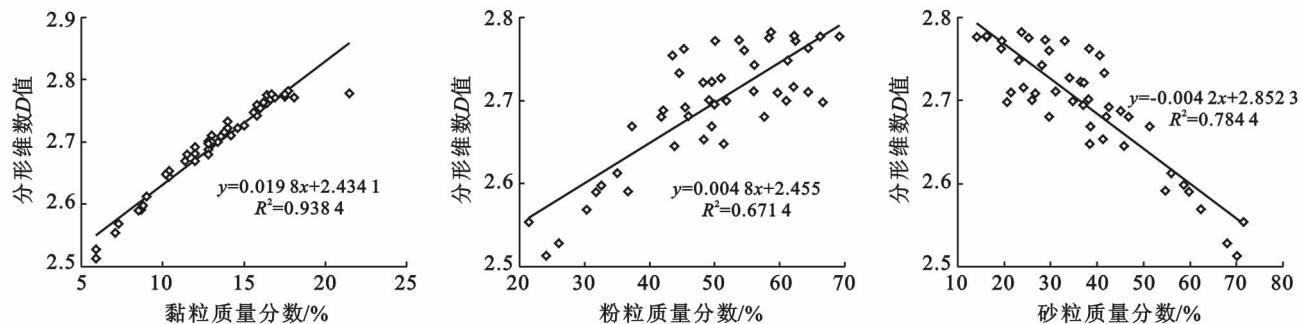


图 2 分形维数  $D$  值与不同土壤粒径体积分数的关系

表 2 不同植被类型表层土壤性质比较

植被类型	pH 值	土壤容重/ ( $g \cdot cm^{-3}$ )	全氮/ ( $g \cdot kg^{-1}$ )	全磷/ ( $g \cdot kg^{-1}$ )	全钾/ ( $g \cdot kg^{-1}$ )	水解性氮/ ( $mg \cdot kg^{-1}$ )	有效磷/ ( $mg \cdot kg^{-1}$ )	速效钾/ ( $mg \cdot kg^{-1}$ )	有机质/ ( $g \cdot kg^{-1}$ )
柑橘林	$4.510 \pm 0.130^a$	$1.479 \pm 0.042^b$	$1.224 \pm 0.078^a$	$0.203 \pm 0.014^a$	$5.108 \pm 0.435^a$	$52.409 \pm 2.443^a$	$1.903 \pm 0.231^a$	$51.078 \pm 4.601^a$	$34.298 \pm 1.096^a$
马尾松林	$4.590 \pm 0.120^{ab}$	$1.327 \pm 0.057^a$	$1.468 \pm 0.127^b$	$0.251 \pm 0.009^b$	$5.640 \pm 0.287^b$	$57.353 \pm 1.706^b$	$2.494 \pm 0.105^b$	$53.246 \pm 2.170^{ab}$	$41.284 \pm 1.418^b$
次生林	$4.620 \pm 0.120^{ab}$	$1.318 \pm 0.038^a$	$1.713 \pm 0.215^c$	$0.276 \pm 0.011^{bc}$	$5.496 \pm 0.342^b$	$78.162 \pm 3.821^c$	$2.710 \pm 0.170^c$	$70.345 \pm 3.808^c$	$44.105 \pm 1.124^b$

注：“±”表示标准差；不同字母表示差异显著， $p < 0.05$ 。

对 3 种植被类型土壤性质与分形维数  $D$  值进行相关分析(表 3)结果表明,分形维数  $D$  值与柑橘林的土壤水解性氮含量呈显著正相关,与有机质呈显著负相关;与马尾松林的土壤全磷、全钾含量呈显著正相

关,与水解性氮含量呈极显著正相关,与有机碳含量呈显著负相关;与次生林的土壤全磷含量呈极显著正相关,与水解性氮含量呈显著正相关,与速效钾和有机质含量呈显著负相关。

表 3 不同植被类型表层土壤性质与分形维数  $D$  值的相关性

植被类型	pH 值	土壤容重	全氮	全磷	全钾	水解性氮	有效磷	速效钾	有机碳
柑橘林	0.197 7	0.495 3	0.157 5	0.391 9	0.261 7	0.581 7*	-0.116 3	-0.250 9	-0.469 0*
马尾松林	-0.0856	0.363 4	0.257 8	0.494 2*	0.458 8*	0.744 3**	-0.106 5	-0.394 2	-0.458 1*
次生林	0.096 5	0.205 3	0.215 8	0.714 2**	0.394 0	0.654 6*	-0.274 3	-0.452 7*	-0.472 2*

注：\*表示  $P < 0.05$  水平显著相关；\*\*表示  $p < 0.01$  水平极显著相关。

## 4 讨论

土壤颗粒的分形特征与单纯的土壤粒径分布相比,具有更丰富的内涵,它不仅能体现土壤粒径格局,更重要的是能定量描述土壤颗粒的几何形态,从而在一定程度上反映土壤的物理性质<sup>[1]</sup>。本研究表明,次生林的土壤质地以黏粒为主,分形维数  $D$  值最大,因此土壤孔隙度较大,蓄水保肥能力较强,因为次生林受人为干扰的影响小,丰富的植被、土壤动物及微生物群落能够对林地土壤形成良好的保护和改良作用,阻滞土壤流失,增加粉黏粒等细颗粒物质的含量<sup>[9]</sup>。马尾松人工林和柑橘林受人为干扰强度大,林分结构单一,林下植被稀少,不易增加土壤细颗粒物质,其中柑橘林受长期的劈草除灌等经营措施的影响,致使裸露的地表在降雨的侵蚀作用下,引发水土流失,降低土壤分形维数  $D$  值。从这个意义上讲,土壤的分形特征可以在一定程度上反映闽南山地不同土地利用类型的水土保持效益。

本研究中,土壤颗粒分形维数  $D$  值与黏粒、粉粒

和砂粒的相关关系分比为  $D = 0.0198C_{黏} + 2.4341$  ( $R^2 = 0.9384$ )、 $D = 0.0048C_{粉} + 2.4550$  ( $R^2 = 0.6714$ )和  $D = -0.0042C_{砂} + 2.8523$  ( $R^2 = 0.7844$ ),这与肖灵香等<sup>[5]</sup>对亚热带 4 种典型森林类型土壤颗粒分形特征的研究结论中  $D = 0.0067C_{黏} + 2.6564$  ( $R^2 = 0.8856$ )、 $D = -0.0031C_{砂} + 2.8454$  ( $R^2 = 0.4542$ )相似,与  $D = -0.0012C_{粉} + 2.8163$  ( $R^2 = 0.0378$ )不同,这可能是由于肖灵香采用的中科院南京土壤研究所提出的土壤颗粒分级标准与本研究采用的美国土壤颗粒分级标准不同所致,但总体上均表现为土壤质地越细,分形维数越大,反之相反。因此分形维数  $D$  值还可作为判断闽南山地不同植被类型土壤质地的重要指标。

研究发现,红壤中游离的铁、铝氧化物及高比表面积的土壤黏粒对土壤中磷素具有极强的吸附能力<sup>[10]</sup>。本研究中,马尾松林和次生林由于受到人为干扰较少,土壤发育程度较高,具有更多的游离铁、铝氧化物及土壤黏粒对磷素进行吸附固定,并转化成难以

移动的难溶性磷酸盐,因此分形维数  $D$  值较高的马尾松林和次生林,土壤全磷含量也较高,而柑橘林由于经营目标的不同,需对林地土壤进行翻垦等高强度人为干扰措施,因此土壤发育程度较低,土壤对磷素的固定作用较轻,因此相关性不显著。

土壤颗粒分形维数是土壤团聚体数量的量化反映,而有机碳是形成团聚体的胶结物质,因此有机碳将对土壤团聚体的分形维数起重要作用<sup>[11-12]</sup>。次生林土壤微生物群落复杂多样,对以阔叶树为主的次生林的凋落物(凋落物以凋落叶为主)分解速率快,土壤有机碳含量高,有利于土壤团聚体的形成,而大团聚体的形成将使描述土壤粒径分布的分形维数  $D$  值降低;虽然马尾松林地受干扰较柑橘林轻,但由于凋落物分解速率慢<sup>[13]</sup>,土壤有机碳含量相较于次生林低,不利于土壤大团聚体的形成;柑橘林地受土壤侵蚀的影响,土壤有机碳含量最小,土壤团聚体含量相应也最低。

研究表明,土壤全氮量 90% 以上以有机态的形式存在,但是有机态氮只有经过矿化作用成为无机态氮才能被植物吸收利用,其中氨化作用、硝化作用和反硝化作用是有机态氮重要的矿化过程<sup>[14]</sup>,余砾等<sup>[15]</sup>研究表明,土壤水解性氮含量对土壤总氮矿化量的贡献最大,土壤黏粒含量与水解性氮含量呈正相关关系。本研究中,土壤颗粒分形维数  $D$  值与水解性氮呈显著正相关关系,而  $D$  值又与土壤黏粒含量呈正相关,这是因为体积较大的有机态氮在土壤微生物的作用下,分解成水溶性无机态氮,无形中增大了土壤分形维数  $D$  值。其他土壤性质指标与土壤分形维数  $D$  值的相关性不显著,具体原因还需要进一步研究验证。本研究结果表明,通过对土壤分形特征的计算分析,能够侧面反映出闽南山地不同植被类型土壤性质的许多重要信息。

## 5 结论

(1) 柑橘林的土壤颗粒组成以砂粒和粉粒为主,分别占 53.33% 和 46.67%;马尾松林以粉粒和黏粒为主,分别占 60% 和 40%;次生林则以粉粒为主。三种植被类型土壤颗粒体积分形维数从大到小依次为次生林(2.7419) > 马尾松林(2.7160) > 柑橘林(2.6248)。方差分析显示,柑橘林的土壤分形维数与马尾松林和次生林有显著差异性( $P < 0.05$ ),马尾松林和次生林间差异不显著。

(2) 分形维数  $D$  值与土壤黏粒和粉粒体积百分数间存在显著正相关关系,相关系数分别为  $R^2 = 0.9384$  和  $R^2 = 0.6714$ ,砂粒质量百分含量则与分形维数  $D$  值呈显著负相关,相关系数为  $R^2 = 0.7844$ 。

(3) 三种植被类型林地土壤的 pH 值、全氮、全磷、全钾、水解性氮、有效磷、速效钾和有机质含量从大到小均为次生林 > 马尾松林 > 柑橘林,土壤容重为柑橘林 > 马尾松林 > 次生林。

(4) 相关性分析表明,分形维数  $D$  值与柑橘林的土壤水解性氮含量呈显著正相关,与有机质呈显著负相关;与马尾松林的土壤全磷、全钾含量呈显著正相关,与水解性氮含量呈极显著正相关,与有机质含量呈显著负相关;与次生林的土壤全磷含量呈极显著正相关,与水解性氮含量呈显著正相关,与速效钾和有机质含量呈显著负相关。

## [ 参 考 文 献 ]

- [1] 李鹏,徐康.分形理论在土壤学研究中的应用进展[J].江西农业学报,2013,25(4):78-84.
- [2] Castrignano A, Stelluti M. Fractal geometry and geostatistics for describing the field variability of soil aggregation[J]. Journal of Agricultural Engineering Research, 1999,73(1):13-18.
- [3] Zeleke T B, Si B C. Characterizing scale-dependent spatial relationships between soil properties using multifractal techniques[J]. Geoderma, 2006,134(3):440-452.
- [4] 李琰.不同土地利用方式下紫色土团聚体分形特征和肥力研究[D].重庆:西南大学,2008.
- [5] 肖灵香.亚热带 4 种森林类型土壤粒径分布的分形特征与养分含量[D].湖南 株洲:中南林业科技大学,2015.
- [6] 陈梦棋.重庆市土地整理项目土壤颗粒分形与养分特征研究[D].重庆:重庆师范大学,2015.
- [7] 侯占峰,韩靖玉,鲁植雄.分形理论在土壤科学中的应用现状与研究展望[J].内蒙古农业大学学报,2010,31(3):317-320.
- [8] 王国梁,周生路,赵其国.土壤颗粒的体积分形维数及其在土地利用中的应用[J].土壤学报,2005,42(4):545-550.
- [9] 于东明,胡小兰,张光灿,等.江子河小流域不同植被类型土壤粒径的多重分形特征[J].中国水土保持科学,2011,9(5):79-85.
- [10] 李杰,石元亮,陈智文.我国南方红壤磷素研究概况[J].土壤通报,2011,42(3):763-768.
- [11] 赵鹏,史东梅,赵培,等.紫色土坡耕地土壤团聚体分形维数与有机碳关系[J].农业工程学报,2013,29(22):137-144.
- [12] 谢贤健,张继.巨桉人工林下土壤团聚体稳定性及分形特征[J].水土保持学报,2012,26(6):175-179.
- [13] 尤龙辉,叶功富,陈增鸿,等.滨海沙地主要优势树种的凋落物分解及其与初始养分含量的关系[J].福建农林大学学报:自然科学版,2014,43(6):585-591.
- [14] 王艳杰,邹国元,付桦,等.土壤氮素矿化研究进展[J].中国农学通报,2005,21(10):203-208.
- [15] 余砾,高明,慈恩,等.不同耕作方式下土壤氮素矿化和硝化特征研究[J].生态环境学报,2010,19(3):733-738.