

广东省不同母质发育土壤颗粒分布的分形维数特征

姜 坤, 秦海龙, 卢 瑛, 贾重建, 刘红宜, 崔启超

(华南农业大学资源环境学院, 广州 510642)

摘要: 采集广东省主要成土母质(玄武岩、砂页岩、第四纪红土和花岗岩)发育的林地、耕地和园地土壤剖面各发生层土壤,测定了土壤颗粒组成、有机质、CEC 等理化性质,探讨了不同母质发育土壤颗粒分布的分形维数特征及其与土壤理化性质的关系。结果表明,玄武岩、第四纪红土、花岗岩和砂页岩发育土壤分形维数变幅分别为 2.923 9~2.981 2, 2.858 8~2.937 7, 2.769 3~2.923 1 和 2.544 6~2.885 6;玄武岩和第四纪红土发育土壤颗粒分布分形维数与砂页岩发育土壤存在显著差异。土壤颗粒分布的分形维数随土壤深度增加呈增大的趋势,相同母质发育土壤的深层土壤颗粒分布的分形维数接近一致。玄武岩和第四纪红土发育土壤颗粒分布的分形维数在不同深度土壤之间变幅较小,砂页岩和花岗岩发育土壤变幅较大。土壤颗粒分布的分形维数与砂粒含量呈极显负相关,与黏粒含量呈极显著正相关,与土壤全磷、速效钾、全铁、CEC、有机质、全氮、碱解氮呈极显著或显著正相关;土壤颗粒分布的分形维数可以作为表征土壤肥力状况指标。

关键词: 分形特征; 颗粒组成; 成土母质; 土壤肥力指标; 广东省

中图分类号: S152.3 **文献标识码:** A **文章编号:** 1009-2242(2016)06-0319-06

DOI: 10.13870/j.cnki.stbcxb.2016.06.053

Fractal Dimension of Particle-Size Distribution for Soils Derived from Different Parent Materials in Guangdong Province

JIANG Kun, QIN Hailong, LU Ying, JIA Chongjian, LIU Hongyi, CUI Qichao

(College of Natural Resources and Environment, South China Agricultural University, Guangzhou 510642)

Abstract: Soil samples under different land uses, including woodland, cultivated dryland and orchard, were collected from profile horizons which derived from main parent materials (including basalt, sand-shale, Quaternary red soil and granite) in Guangdong Province, soil physico-chemical properties such as soil particle-size composition, organic matter, CEC, etc. were determined. The fractal dimension of particle-size distribution (PSD) for soils derived from different parent materials and its relationship with soil properties were studied. The results indicated that the range of fractal dimension of PSD for soils derived from basalt, Quaternary red soil, granite and sand-shale were 2.923 9 to 2.981 2, 2.858 8 to 2.937 7, 2.769 3 to 2.923 1, and 2.544 6 to 2.885 6, respectively. The fractal dimension of PSD for soils derived from basalt, Quaternary red soil and sand-shale were significantly different. The fractal dimension of soil PSD showed an increasing trend with increasing soil depth, and the fractal dimension of soil PSD was almost the same in deep horizons of soils derived from the same parent material. The fractal dimension of soil PSD had smaller variation between soil at different depth in soil profiles derived from basalt and Quaternary red soil, however, the variation was larger for soils derived from sand-shale and granite. The fractal dimension of soil PSD was significantly negatively correlated with sand content, but was significantly positively correlated with clay content, soil total P, available K, total Fe, CEC, soil organic matter, total N, available N. The fractal dimension of soil PSD could be applied as a quantitative index reflecting soil fertility.

Keywords: fractal dimension; particle-size distribution; parent material; soil fertility index; Guangdong Province

收稿日期:2016-06-15

资助项目:国家自然科学基金面上项目(41271233);广东省公益研究与能力建设项目(2014B020206002);国家科技基础性工作专项重点项目(2008FY110600,2014FY110200)

第一作者:姜坤(1990—),男,硕士研究生,主要从事耕地土壤质量提升的研究。E-mail:861958757@qq.com

通信作者:卢瑛(1966—),男,博士,教授,博士生导师,主要从事土壤发生与分类、耕地质量提升、土壤重金属污染控制与修复研究。E-mail: luying@scau.edu.cn

土壤是由大小、形状不同的固体组分和孔隙以一定的形式连结所形成的具有自相似结构的多孔介质，具有一定的分形特性^[1-2]。杨培岭等^[3]通过粒径分布与对应的质量分布相联系，提出了确定土壤颗粒大小分布分形维数的方法，该方法成为国内外学者表征土壤颗粒分形特征的主要方法之一。近年来，土壤颗粒组成的分形维数已成为定量描述土壤特征的重要参数之一。研究表明，土壤颗粒分布的分形维数与土壤类型、土壤母质、海拔、土地利用方式、地貌类型、植被类型密切相关^[2,4-8]；土壤颗粒分布的分形维数能反映土壤颗粒组成或质地的均一程度及通气透水性^[3,9]，可以用来模拟和预测土壤水分特征^[10]、表征土壤沙漠化和土壤退化程度^[11-12]、比较成壤强度及发育环境^[13]；土壤粒径分布分形维数与土壤有机质、全氮、全磷、CEC 等肥力因子具有显著的相关性^[14-18]，分形理论显示出巨大的应用价值与潜力。

广东省地处我国华南地区，成土母质种类多，风

化程度高，但不同母质发育的土壤颗粒分布的分形特征研究鲜见报道。本研究以广东省主要成土母质(玄武岩、花岗岩、砂页岩、第四纪红土)发育的土壤为对象，探讨土壤颗粒分布的分形特征及其与土壤主要肥力因子的关系，确立不同母质发育土壤和不同深度土壤颗粒分布的分形维数变化规律，以期为区域土壤肥力评价、土壤利用管理提供理论参考。

1 材料与方法

1.1 样品采集

选取广东省内由玄武岩、花岗岩、第四纪红色黏土、砂页岩母质发育的旱地、林地、果园的地块，挖掘土壤剖面，采集各发生层土壤样品共计 56 个，玄武岩、花岗岩、第四纪红色黏土、砂页岩母质土壤样品分别为 15,14,13,14 个，土壤样品采集时间为 2011—2012 年，样品采集后带回实验室自然风干，然后分别制备过 2,0.25,0.15 mm 筛的土壤样品，自封袋保存备用。各采样点基本情况见表 1。

表 1 采样地点信息

剖面编号	采样地点	经纬度	母质类型	利用类型	土壤类型
B-1	湛江市徐闻县曲界镇三河村	N20°28′58″, E110°20′09″	玄武岩	园地(菠萝园)	普通黄色湿润铁铝土
B-2	湛江市雷州市英利镇英利村	N20°35′00″, E110°04′00″		早耕地(甘蔗)	普通暗红湿润铁铝土
B-3	湛江市徐闻县海安镇	N20°16′31″, E110°12′05″		林地(桉树)	普通暗红湿润铁铝土
S-1	肇庆市高要市回龙镇刘村	N22°57′58″, E112°41′13″	砂页岩	早耕地(番薯、花生)	铁质酸性湿润淋溶土
S-2	韶关市乐昌市廊田镇龙山村	N25°13′1″, E113°27′3″		林地(竹、马尾松)	普通筒育湿润富铁土
S-3	广州市增城市华南农业大学科研基地	N23°14′49″, E113°38′14″		园地(荔枝、油茶)	黏化强育湿润富铁土
Q-1	云浮市罗定市船步镇云罗村	N22°35′00″, E111°38′36″	第四纪红土	早耕地(木薯、花生)	黄色筒育湿润富铁土
Q-2	韶关市南雄市水口镇水口村	N25°08′58″, E114°27′53″		林地(桉树、松树)	表蚀筒育湿润富铁土
Q-3	清远市英德市英红镇英红华侨茶场	N24°15′24″, E113°16′17″		园地(茶园)	普通筒育湿润富铁土
G-1	潮州市饶平县饶洋镇大埔背村	N24°5′43″, E116°53′18″	花岗岩	早耕地(番薯、花生)	普通筒育湿润富铁土
G-2	广州市天河区华南农业大学树木园	N23°9′21″, E113°21′16″		林地(竹子、荷木)	腐殖黏化湿润富铁土
G-3	阳江市江城区双捷镇	N21°55′04″, E111°50′36″		园地(荔枝、龙眼)	普通黄色湿润铁铝土

1.2 土壤分析方法

土壤颗粒组成采用吸管法测定，根据美国农业部制将土壤颗粒级别分为粗砂粒(2~0.5 mm)、中砂粒(0.5~0.25 mm)、细砂粒(0.25~0.05 mm)、粉粒

(0.05~0.002 mm)和黏粒(<0.002 mm)；土壤有机碳含量采用重铬酸钾外加热法测定；土壤全氮含量采用半微量开氏法测定；土壤碱解氮含量采用碱解扩散法测定；全磷含量采用酸溶—钼锑抗比色法测定；有

效磷含量采用碳酸氢钠浸提—钼锑抗比色法测定;全钾含量采用酸溶—火焰光度法测定;速效钾含量采用乙酸铵浸提—火焰光度法测定;全铁含量采用三酸消煮—邻菲罗啉比色法;CEC 采用乙酸铵—EDTA 交换法^[19]测定。

1.3 分形维数计算方法

根据杨培岭等^[3]提出的利用土壤颗粒的重量分布来计算土壤颗粒分布的分形维数,其计算公式为:

$$\frac{W(\delta<\overline{d_i})}{W_0}=\left(\frac{\overline{d_i}}{\overline{d_{\max}}}\right)^{3-D}$$
 (1)

式中: $\overline{d_i}$ 为表示粒级 d_i 与 d_{i+1} 间粒径的平均值; $\overline{d_{\max}}$ 为含量中最大粒级土粒的平均直径; $W(\delta<\overline{d_i})$ 为粒径小于 $\overline{d_i}$ 的累积土粒质量; W_0 为土壤各粒级质量的总和。由(1)式可知,各土壤颗粒的粒径及小于某一粒径土壤重量可通过土壤的机械分析确定,然后对该式两边取对数,分别 $\lg(W(\delta<d_i)/W_0)$ 、 $\lg(\overline{d_i}/\overline{d_{\max}})$ 为纵、横坐标,进行线性拟合, $3-D$ 则是线性拟和方

程的斜率; D 为土壤颗粒分形维数,无量纲。

1.4 数据分析

试验数据采用 Excel 2013 和 SPSS 18.0 软件进行统计分析。

2 结果与分析

2.1 不同母质发育土壤颗粒分布特征

由表 2 和图 1 可知,玄武岩、第四纪红土发育的土壤以黏粒含量最高,变幅分别为 58.8%~87.7%,38.4%~64.4%;不同母质发育土壤黏粒平均含量为玄武岩(70.45%)>第四纪红土(55.03%)>花岗岩(35.97%)>砂页岩(23.34%)。砂页岩、花岗岩发育的土壤以砂粒(0.05~2.00 mm)含量最高,变幅分别为 8.3%~82.4%,28.4%~67.6%;不同母质发育土壤砂粒平均含量为砂页岩(47.02%)>花岗岩(42.78%)>第四纪红土(21.64%)>玄武岩(9.22%)。差异显著性分析结果表明,不同母质发育土壤的砂粒和黏粒的含量存在显著差异($P<0.05$)。

表 2 土壤颗粒的粒径分布与分形特征

剖面 编号	采样 深度/cm	颗粒组成/%					分形 维数 D	决定 系数 R^2
		粗砂	中砂	细砂	粉粒	黏粒		
		2~0.5 mm	0.5~0.25 mm	0.25~0.05 mm	0.05~0.002 mm	<0.002 mm		
B-1	0—100	0.32	0.40	2.62	16.59	80.08	2.9681	0.85
B-2	0—117	0.57	0.84	10.41	21.70	66.47	2.9396	0.90
B-3	0—150	4.03	1.61	6.87	22.68	64.81	2.9389	0.92
S-1	0—118	18.96	16.85	29.02	19.26	15.91	2.7134	0.86
S-2	0—128	2.04	1.95	12.59	48.90	34.52	2.8422	0.99
S-3	0—120	21.87	24.82	12.96	14.77	25.59	2.8095	0.95
Q-1	0—116	3.55	4.56	7.94	24.19	59.76	2.9265	0.96
Q-2	0—150	7.72	5.61	18.41	20.23	48.03	2.8786	0.98
Q-3	0—115	2.14	2.09	12.88	25.59	57.30	2.9183	0.92
G-1	0—118	17.66	23.83	17.83	12.65	28.04	2.8741	0.97
G-2	0—154	17.97	10.84	4.41	27.92	38.86	2.8798	0.96
G-3	0—135	21.80	7.94	6.06	23.18	41.03	2.8144	0.96

注:表中各剖面颗粒组成、分形维数为不同发生层的加权平均值。

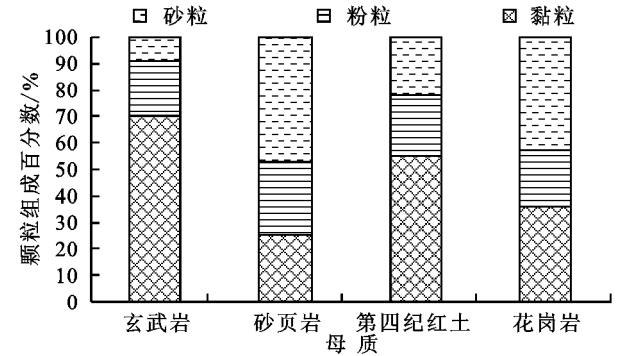


图 1 不同母质发育土壤颗粒分布

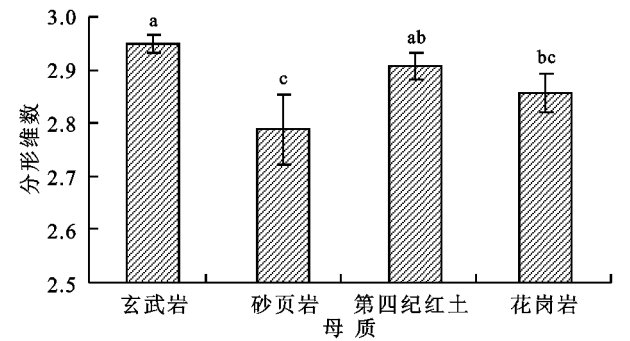
2.2 不同母质发育土壤颗粒分布的分形特征

从图 2 可以看出,土壤颗粒分布的分形维数平均值为玄武岩(2.948 9)>第四纪红土(2.907 8)>花岗岩(2.856 1)>砂页岩(2.788 4),不同母质发育土

壤颗粒分布的分形维数存在差异。玄武岩、第四纪红土发育土壤与砂页岩发育土壤、玄武岩发育土壤与花岗岩发育土壤颗粒分布分形维数差异显著。因此,成土母质对土壤颗粒分布的分形维数有较大影响,这与成土母质矿物组成和土壤风化发育程度有关。李德成等^[4]研究表明,成土母质越易风化和风化程度越高,则土壤质地越细,相应的土壤颗粒组成的分形维数则越大,玄武岩、砂页岩、花岗岩发育土壤颗粒分布分形维数大小关系与本研究结果一致。

不同母质发育土壤砂粒、黏粒含量存在较大的差异。玄武岩和第四纪红土发育土壤黏粒含量最高,砂粒含量最低,以美国农业部的土壤质地类别划分标准,土壤多为黏土;砂页岩发育土壤黏粒含量最低,砂粒含量最高,多为砂质黏土或砂质壤土;花岗岩发育

土壤多为砂质黏壤土或黏壤土。不同质地类别土壤颗粒分布的分形特维数存在显著差异(表 3)。比较不同质地类别土壤颗粒组成分形维数发现,黏土、粉质黏土、黏壤土、砂质黏壤土、砂质壤土土壤颗粒分布的分形维数依次降低,相同质地类别不同母质发育的土壤颗粒分布的分形维数也存在差异,玄武岩发育的黏土分形维数显著大于第四纪红土;花岗岩和砂页岩发育的砂质黏壤土分形维数之间差异不显著(表 3)。这与前人研究结果基本一致^[7]。

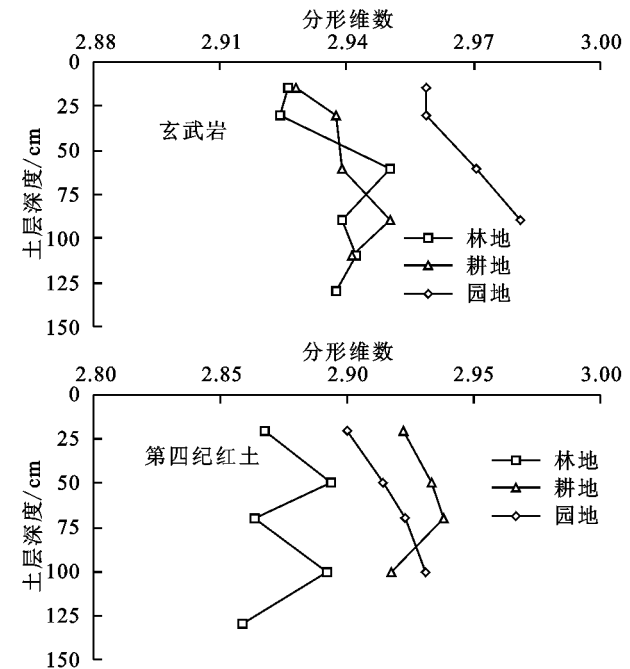


注:图柱上不同小写字母表示母质间差异显著($P<0.05$)。

图 2 不同母质发育土壤分形维数

2.3 土壤颗粒分布的分形维数在剖面中的变化

从图 3 可以看出,玄武岩、第四纪红土、砂页岩和花岗岩发育的早耕地和园地土壤、花岗岩母质发育的林地土壤颗粒分布的分形维数随着土壤深度增加逐渐增大。相同母质发育土壤颗粒分布分形维数在不同土地利用类型下随着土壤深度增加逐渐接近;玄武岩、第四纪红土发育土壤颗粒分布分形维数在不同深



度土壤之间变化幅度较小,而砂页岩、花岗岩变化幅度较大。总体上,随土壤深度增加土壤颗粒分布的分形维数逐渐增大。相同母质土壤颗粒分布的分形维数随深度增加逐渐稳定,说明成土母质是决定深层土壤颗粒分布分形维数的关键因素。这与王贤等^[7]研究结果基本一致,但刘阳等^[20]研究冀北山地典型森林土壤颗粒分形特征时发现土壤颗粒分布分形维数随土层深度增加而呈减小趋势,与本研究结论相反。这可能与矿物风化、黏粒迁移有关,广东省位于亚热带、热带地区,高温多雨,岩石风化、黏化作用强烈,黏化过程以淋溶淀积黏化为主,以致下层土壤黏粒含量高,颗粒分布分形维数增大。而冀北山地位于温带地区,气温低、降雨量少,土壤矿物风化弱,土壤黏化过程弱且以残积黏化为主,因此土壤黏粒含量在上部土层含量高,土壤颗粒分布分形维数随土层深度增加而呈减小趋势。

表 3 土壤质地与分形维数关系

质地类别	成土母质	分形维数	
		变幅	均值±标准差
黏土	玄武岩	2.9239~2.9812	2.9456±0.016a
	第四纪红土	2.8588~2.9377	2.9042±0.025b
粉质黏土	砂页岩	2.8714~2.8856	2.8785±0.010bc
黏壤土	花岗岩	2.8445~2.8760	2.8586±0.012c
砂质黏壤土	花岗岩	2.7722~2.8397	2.8137±0.032d
	砂页岩	2.7819~2.8126	2.7986±0.014d
砂质壤土	砂页岩	2.6339~2.7693	2.6960±0.088e

注:表中同一列不同小写字母表示土壤分形维数差异显著($P<0.05$)。

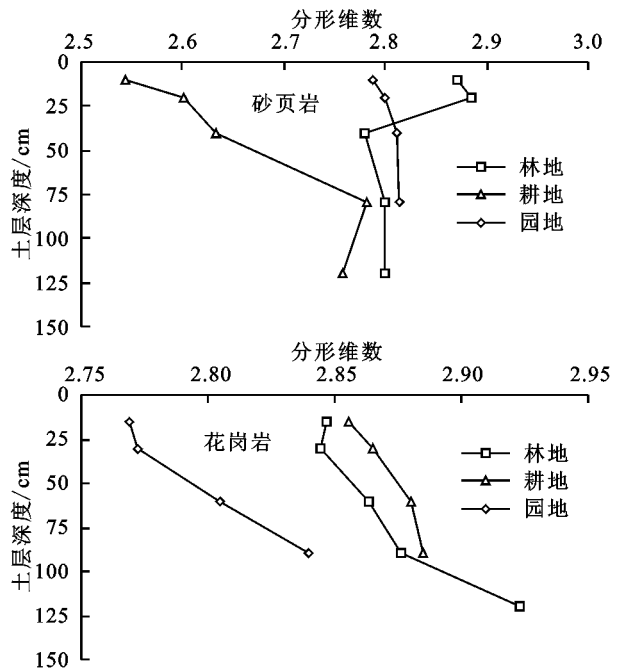


图 3 土壤剖面分形维数变化

2.4 土壤颗粒分布分形维数与颗粒组成的关系

相关性分析结果(图 4)显示,土壤颗粒组成分形

维数与土壤砂粒含量呈极显著负相关($P<0.01$),与黏粒含量呈极显著正相关($P<0.01$),与粉粒含量相

关性不显著。这表明土壤颗粒分布的分形维数对各个粒级土粒含量反映程度的大小不同,土壤中砂粒含量越少,黏量越高,分形维数越大。砂粒及黏粒相对含量决定土壤颗粒组成的分形维数。其他学者在不同条件下的研究均得到土壤砂粒、黏粒含量与土壤颗粒组成分形维数之间相关一致性的结论^[2,7,13],苏永忠等^[11]、柳妍妍等^[12]、吕胜桥等^[14]、Ersahin 等^[15]研究表明粉粒含量与土壤颗粒组成分形维数呈显著相关性,与本研究结论不一致。本研究区域位于我国热带、亚热带区域,高温多雨的气候条件促进了矿物风化,土壤中残存的可风化矿物很少,岩石中的石英颗粒变成了土壤中砂粒,而可风化矿物成为土壤黏粒的主要来源,通常土壤中黏粒(如玄武岩母质发育土壤等)或砂粒(如花岗岩母质发育土壤等)含量高,土壤粉粒含量不高,因此,粉粒不是决定土壤颗粒组成分形维数的关键因素。而粉粒含量与土壤颗粒组成分形维数呈显著相关性的区域主要位于我国温带、寒温带地区,土壤类型为主要雏形土或新成土等。因此,土壤颗粒组成分形维数与土壤粉粒含量之间关系存在地域性或土壤类型之间的差异。

2.5 土壤颗粒分布的分形维数与土壤肥力因子的相关性

相关分析结果(表 4)表明,土壤颗粒分布的分形维数与土壤全磷、速效钾、全铁、CEC 呈现极显著正相关,与土壤有机质、全氮、碱解氮呈现显著正相关,与土壤有效磷、全钾相关性不显著。邓良基等^[18]研究表明土壤颗粒分形维数与全氮、全钾、速效钾、有机质、CEC、全磷呈极显著正相关性,其他研究得到土壤颗粒分布的分形维数与土壤有机质^[14]、土壤 CEC^[15]、

土壤全氮^[16]、土壤全磷^[17]等呈显著相关性,与本研究结果一致。这进一步表明土壤肥力因子与土壤颗粒分形维数值密切相关,土壤颗粒分布的分形维数可以作为表征土壤肥力状况指标。

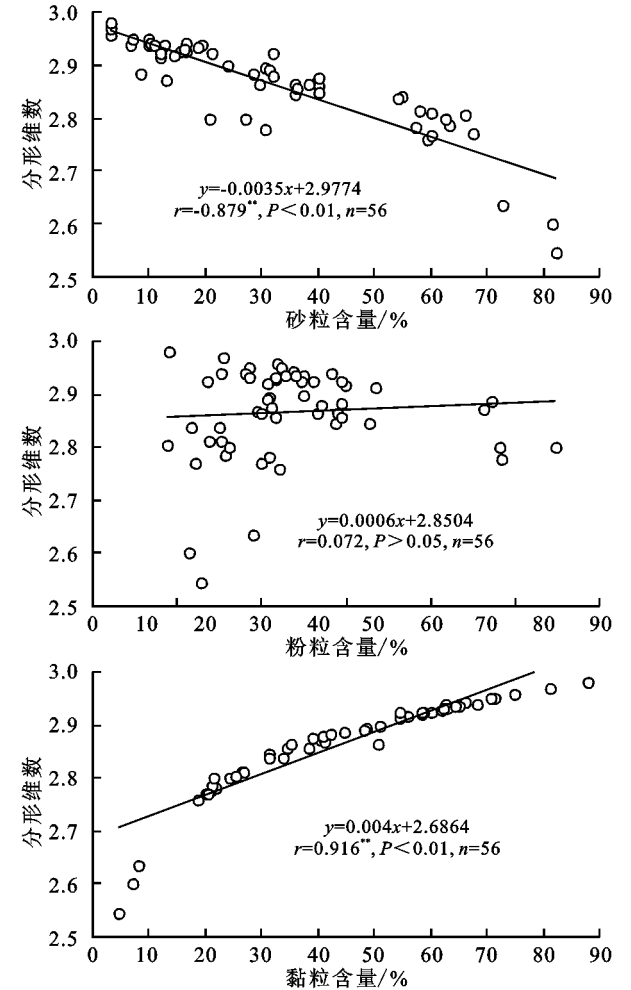


图 4 土壤颗粒分布分形维数与各粒级含量的关系

表 4 土壤颗粒分布的分形维数与土壤肥力因子的相关性 (n=56)

项目	有机质	全氮	全磷	全钾	碱解氮	有效磷	速效钾	全铁	CEC
分形维数	0.279*	0.340*	0.546**	-0.060	0.271*	-0.034	0.456**	0.775**	0.683**

注: ** 表示 0.01 水平(双侧)上显著相关; * 表示 0.05 水平(双侧)上显著相关。

3 结论

(1)广东省玄武岩、第四纪红土、花岗岩和砂页岩母质发育土壤颗粒分布的分形维数分别为 2.923 9~2.981 2,2.858 8~2.937 7,2.769 3~2.923 1 和 2.544 6~2.885 6,不同母质发育土壤分形维数差异显著,分形维数平均值为玄武岩土壤>第四纪红土土壤>花岗岩土壤>砂页岩土壤;玄武岩、第四纪红土发育土壤分形维数与砂页岩发育土壤存在显著差异。

(2)广东省玄武岩、第四纪红土、花岗岩和砂页岩母质发育土壤颗粒分布的分形维数随土层深度增加逐渐增加,深层土壤颗粒分布的分形维数逐渐接近一致。玄武岩、第四纪红土发育土壤分形维数在剖面上变化幅度较小,砂页岩、花岗岩发育土壤变化幅度较大。

(3)土壤颗粒分布的分形维数与土壤砂粒、黏粒含量呈现极显著的相关性,土壤颗粒分布的分形维数随黏粒含量增加而增大,随砂粒含量增加而减小。不同质地类别土壤颗粒分布的分形维数呈现显著的差异性,黏土分形维数最大。土壤颗粒分布的分形维数与全磷、速效钾、全铁、CEC、有机质、全氮、碱解氮呈极显著或显著正相关,可以作为表征土壤肥力状况指标。

参考文献:

[1] Dathe A, Eins S, Niemeyer J, et al. The surface fractal dimension of the soil-pore interface as measured by image analysis[J]. Geoderma, 2001, 103(1): 203-229.
[2] 黄冠华,詹卫华. 土壤颗粒的分形特征及其应用[J]. 土壤学报, 2002, 39(4): 490-497.
[3] 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[J]. 科学通报, 1993, 38(20): 1896-1899.
- [4] 李德成, 张桃林. 中国土壤颗粒组成的分形特征研究[J]. 土壤与环境, 2000, 9(4): 263-265.
- [5] 程先富, 赵明松, 史学正, 等. 兴国县红壤颗粒分形及其与环境因子的关系[J]. 农业工程学报, 2007, 23(12): 76-79.
- [6] 宋孝玉, 李亚娟, 李怀有, 等. 不同地貌类型及土地利用方式下土壤粒径的分形特征[J]. 西北农林科技大学学报(自然科学版), 2009, 27(9): 155-160, 167.
- [7] 王贤, 张洪江, 程金花, 等. 重庆四面山几种林地土壤颗粒分形特征及其影响因素[J]. 水土保持学报, 2011, 25(3): 154-159.
- [8] Liu X, Zhang G C, Heathman G C, et al. Fractal features of soil particle-size distribution as affected by plant communities in the forested region of Mountain Yimeng, China[J]. Geoderma, 2009, 154(1/2): 123-130.
- [9] 张世熔, 邓良基, 周倩, 等. 耕层土壤颗粒表面的分形维数及其与主要土壤特性的关系[J]. 土壤学报, 2002, 39(2): 221-226.
- [10] Fazeli M, Shorafa M, Khojasteh D N, et al. A fractal approach for estimating soil water retention curve[J]. Environmental Management, 2010, 1(7): 177-183.
- [11] 苏永中, 赵哈林. 科尔沁沙地农田沙漠化演变中土壤颗粒分形特征[J]. 生态学报, 2004, 24(1): 71-74.
- [12] 柳妍妍, 胡玉昆, 公延明. 高寒草原不同退化阶段土壤颗粒分形特征[J]. 水土保持通报, 2013, 33(5): 138-142.
- [13] 文星跃, 黄成敏, 黄凤琴. 岷江上游河谷土壤粒径分形维数及其影响因素[J]. 华南师范大学学报(自然科学版), 2011, 2(1): 80-86.
- [14] 吕圣桥, 高鹏, 耿广坡, 等. 黄河三角洲滩地土壤颗粒分形特征及其与土壤有机质的关系[J]. 水土保持学报, 2011, 29(6): 134-138.
- [15] Ersahin S, Gunal H, Kutlu T, et al. Estimating specific surface area and cation exchange capacity in soils using fractal dimension of particle-size distribution[J]. Geoderma, 2006, 136(3/4): 588-597.
- [16] Xu G, Li Z, Li P. Fractal features of soil particle-size distribution and total soil nitrogen distribution in a typical watershed in the source area of the middle Dan River, China[J]. Catena, 2013, 101(2): 17-23.
- [17] Liu X, Li Z, Li P. Particle fractal dimension and total phosphorus of soil in a typical watershed of Yangtze River, China[J]. Environmental Earth Sciences, 2015, 73(10): 6091-6099.
- [18] 邓良基, 林正雨, 高雪松, 等. 成都平原土壤颗粒分形特征及应用[J]. 土壤通报, 2008, 39(1): 38-42.
- [19] 张甘霖. 土壤调查实验室分析方法[M]. 北京: 科学出版社, 2012.
- [20] 刘阳, 陈波, 杨新兵, 等. 冀北山地典型森林土壤颗粒分形特征[J]. 水土保持学报, 2012, 26(3): 159-163, 168.
- (上接第 283 页)
- [4] Smith J U, Smith P, Monaghan R, et al. When is a measured soil organic matter fraction equivalent to a model pool? [J]. European Journal of Soil Science, 2002, 53(3): 405-416.
- [5] 刘中良, 宇万太. 土壤团聚体中有机碳研究进展[J]. 中国生态农业学报, 2011, 19(2): 447-455.
- [6] 徐江兵, 李成亮, 何园球, 等. 不同施肥处理对旱地红壤团聚体中有机碳含量及其组分的影响[J]. 土壤学报, 2007, 44(4): 675-682.
- [7] 王雪芬, 胡锋, 彭新华, 等. 长期施肥对红壤不同有机碳库及其周转率的影响[J]. 土壤学报, 2012, 49(5): 954-961.
- [8] 王朔林, 王改兰, 赵旭, 等. 长期施肥对栗褐土有机碳含量及其组分的影响[J]. 植物营养与肥料学报, 2015, 21(1): 104-111.
- [9] 张蕾, 尹力初, 易亚男, 等. 改变施肥管理后不同肥力稻田土壤 CO₂ 排放特征[J]. 生态学报, 2015, 35(5): 1399-1406.
- [10] Six J, Elliott E T, Paustian K. Soil macroaggregate turnover and microaggregate formation: A mechanism for C sequestration under no-tillage agriculture[J]. Soil Biology and Biochemistry, 2000, 32(14): 2099-2103.
- [11] Bronick C J, Lal R. Soil structure and management: A review[J]. Geoderma, 2005, 124(1/2): 3-22.
- [12] 易亚男, 尹力初, 张蕾, 等. 施肥对不同地下水位水稻土团聚体组成及有机碳分布的影响[J]. 水土保持学报, 2013, 27(5): 34-36.
- [13] Whalen J K, Chang C. Macroaggregate characteristics in cultivated soils after 25 annual manure applications[J]. Soil Science Society of America Journal, 2002, 66(5): 1637-1647.
- [14] Sleutel S, Neve S D, Németh T G, et al. Effect of manure and fertilizer application on the distribution of organic carbon in different soil fractions in long-term field experiments[J]. European Journal of Agronomy, 2006, 25(3): 280-288.
- [15] 张敬业, 张文菊, 徐明岗, 等. 长期施肥下红壤有机碳及其颗粒组分对不同施肥模式的响应[J]. 植物营养与肥料学报, 2012, 18(4): 869-876.
- [16] 梁尧, 韩晓增, 宋春, 等. 不同有机物料还田对东北黑土活性有机碳的影响[J]. 中国农业科学, 2011, 44(17): 3565-3574.