

DOI: 10.11766/trxb201904280012

徐加盼, 李继洪, 魏玉杰, 张光辉, 阳邦戈, 蔡崇法. 不同母质类型发育土壤颗粒组成分形特征[J]. 土壤学报, 2020, 57(5): 1197–1205.
XU Jiapan, LI Jihong, WEI Yujie, ZHANG Guanghui, YANG Bangge, CAI Chongfa. Fractal Characteristics of Particle Composition for Soils Developed from Different Parent Materials[J]. Acta Pedologica Sinica, 2020, 57(5): 1197–1205.

不同母质类型发育土壤颗粒组成分形特征*

徐加盼¹, 李继洪², 魏玉杰^{1†}, 张光辉¹, 阳邦戈¹, 蔡崇法^{1,3}

(1. 华中农业大学资源与环境学院, 武汉 430070; 2. 中国电力工程顾问集团中南电力设计院有限公司, 武汉 430071; 3. 农业农村部长江中下游耕地保育重点实验室, 武汉 430070)

摘要: 为探讨母质类型对土壤粒径分布非均匀性和土壤结构异质性的影响, 采用激光粒度分析方法和分形理论, 研究了冲积物、花岗岩残积物、第四纪红黏土及浅海沉积物四种母质类型发育土壤的颗粒组成、分形特征及土壤理化性质对颗粒组成及分形参数的影响。结果表明: (1) 花岗岩残积物以及浅海沉积物发育的土壤粒径分布范围大, 大颗粒含量高, 非均匀性较小。冲积物和第四纪红黏土发育的土壤颗粒集中分布在 2~200 μm 的细颗粒区域, 异质性较大。(2) 从土壤颗粒体积分形维数 (D 值) 看, 母质类型对不同发生层颗粒组成的均匀性影响有所差异。冲积物和花岗岩残积物发育的土壤颗粒分布的不均匀性从 A 层向 C 层递减, 浅海沉积物发育的土壤从 A 层向 C 层, 颗粒分布的不均匀性递增, 第四纪红黏土发育的土壤三个发生层颗粒分布的均匀性相近; 从 D_0 值看, 母质类型对不同发生层颗粒组成的分布范围影响较小。(3) 不同母质类型土壤的 pH、CEC、游离氧化物、蛭石及高岭石含量等与土壤粒径分布的异质性和分布范围表现出的差异一致 ($P < 0.05$)。以上结论表明, 母质类型对土壤粒径分布及分形特征影响显著。

关键词: 母质类型; 土壤颗粒组成; 多重分形; 激光粒度分析

中图分类号: S152.7 **文献标志码:** A

Fractal Characteristics of Particle Composition for Soils Developed from Different Parent Materials

XU Jiapan¹, LI Jihong², WEI Yujie^{1†}, ZHANG Guanghui¹, YANG Bangge¹, CAI Chongfa^{1,3}

(1. College of Resources and Environment, Huazhong Agricultural University, Wuhan 430070, China; 2. Central South Electric Power Design Institute CO., LTD. of China Power Engineering Consulting Group, Wuhan 430071, China; 3. Key Laboratory of Arable Land Conservation, Middle and Lower Reaches of Yangtze River of Ministry of Agriculture and Rural Affairs, Wuhan 430070, China)

Abstract: **【Objective】** To explore the influence of different parent materials on the heterogeneity of soil particle size distribution and soil structure, **【Method】** laser particle size analysis and fractal techniques were used to investigate particle composition with its fractal characteristics of soils developed from alluvium, granite residues, quaternary clay and neritic deposit. **【Result】** The results showed that: 1) a wider range of particle size distribution, higher content of coarse particles but less

* 国家自然科学基金项目 (41630858, 41807065) 和中国博士后基金项目 (2018M640714) 资助 Supported by the National Natural Science Foundation of China (Nos. 41630858, 41807065) and the China Postdoctoral Science Foundation (No. 2018M640714)

† 通讯作者 Corresponding author, E-mail: wyj@mail.hzau.edu.cn

作者简介: 徐加盼 (1993—), 男, 湖北孝感人, 硕士研究生, 主要研究方向: 土壤结构与功能。E-mail: jappaxu@163.com

收稿日期: 2019-04-28; 收到修改稿日期: 2020-01-13; 优先数字出版日期 (www.cnki.net): 2020-04-30

heterogeneity was observed for soils developed from granite residues and neritic deposit, while higher concentration of fine particles within a range of 2~200 μm and higher heterogeneity for soils developed from alluvium and quaternary clay. 2) according to the D values, the influence of parent materials on the heterogeneity of particle composition varied with pedogenic layers. The heterogeneity of particle size distribution declined from A to C layer for soils developed from alluvium and granite, however, an opposite trend was observed for soils developed from neritic deposit, and less significant difference in different pedogenic layers for soils developed from quaternary clay. In addition, the type of parent materials had less influence on the range of particle size distribution among pedogenic layers in accordance with the results of D_0 . 3) the degree of heterogeneity and particle size range were significantly determined by soil pH, CEC, free oxides, vermiculite and kaolinite in soils developed from different parent materials ($P < 0.05$). 【Conclusion】 The above results showed that the parent materials had a significant effect on soil particle size distribution and its fractal characteristics.

Key words: Parent materials; Soil particle size distribution; Multifractal technique; Laser particle size analysis

土壤粒径分布 (Particle size distribution, PSD) 反映了土壤风化成土过程, 与土壤结构、水分运动过程及肥力密切相关, 并直接影响土壤侵蚀与土地退化, 是重要的土壤物理特性之一, 定量研究和描述土壤粒径分布特征是土壤物理学研究的重点之一^[1-2]。母质是地壳表层的岩石矿物经过风化作用形成的风化产物, 它是形成土壤的物质基础, 是构成土壤的骨架, 对成土过程和土壤不同发生层特性有深刻影响^[3]。土壤粒径分布受很多因素的影响, 现在对于其影响因素的研究, 大多集中在土地利用类型^[4-6], 植被类型^[7-9], 耕作施肥措施、水分状况等^[10-12]方面, 关于母质对于土壤粒径分布产生影响的研究较少。

由于土壤颗粒具有不规则形状和自相似结构的特性, 其分布呈现非均匀性, 传统的土壤质地分类系统不能科学地反映土壤颗粒的分布特征, 因此可以利用分形几何学来研究土壤的形状特征^[13-14]。目前关于土壤结构的分形模型多是基于土壤结构的单一分形 (monofractal) 特征而提出的^[15-17], 但单一分形只能对土壤微观结构进行整体性、平均性的描述与表征。近年来, 国内外学者^[6, 14, 18-20]提出采用多重分形理论得到的土壤粒径的分形维数可以间接反映土壤粒径分布的自相似性、差异性和土壤颗粒分布的均匀程度, 是描述土壤粒径分布的新途径。本研究采用激光粒度仪获得土壤粒径分布数据, 运用分形和多重分形的方法探讨了不同母质类型发育土壤的粒径分布特征, 探讨了土壤各项理化性质和分形参数的相关性, 为研究母质类型对于土壤粒径分布的影响机理提供参考。

1 材料与方法

1.1 供试材料

本研究以热带-亚热带地区四种不同母质发育的典型土壤为研究对象, 在丘陵地区采集典型剖面不同发生层 (A、B、C) 的土壤样品。其中, 冲积物、花岗岩残积物、第四纪红黏土以及浅海沉积物分别取自河南郑州、湖北咸宁、湖南长沙以及海南文昌。四个区域年均气温为 14~24 $^{\circ}\text{C}$, 年均降雨量为 640~1 778 mm, 采样区域以及土壤样品详细信息见表 1。

1.2 样品处理与分析

将各区域不同发生层采集的土壤经过风干处理之后, 去除大于 2 mm 的砂砾以及植物细根等杂质, 供试土样的粒径分析在华中农业大学资源与环境学院土壤物理实验室进行, 采用 MS3000 型激光粒度分析仪 (英国) 进行土壤 PSD 分析, 测量范围为 0.1~3 000 μm , 每个样品重复测量三次, 前处理方法参考管孝艳等^[21]。采用美国土壤质地分类系统, 计算各个粒级土壤颗粒的比例。

土壤理化性质的测定均采用常规分析法^[22], 其中, 土壤干密度采用环刀法; 土壤 pH 采用 pH 计; 阳离子交换量 (CEC) 采用乙酸铵交换法; 土壤有机质 (OM) 采用重铬酸钾外加热法; 游离铁、铝氧化物采用柠檬酸钠-重碳酸钠-连二亚硫酸钠法浸提, 然后使用等离子发射光谱法测定; 土壤黏土矿物采用虹吸法。

表 1 供试土壤基本信息

Table 1 Basic information of testing soil

采样点 Sampling site	采样深度 Sampling depth/cm	土样编号 Sample	母质类型 Parent material types	土壤类型 Soil types	经纬度 Latitude and longitude	年均气温 Average annual temperature/ (°C)	年均降雨量 Average annual rainfall/ mm
郑州 Zhengzhou	0~20	ZZA	冲积物 Alluvium	褐土	113°32'E/34°54'N	14.2	641
	20~80	ZZB		Cinnamon soil			
	80~	ZZC					
咸宁 Xianning	0~20	XNA	花岗岩残积物 Granite residues	棕红壤	114°22'E/30°01'N	16.8	1 577
	20~70	XNB		Brown-red soil			
	70~	XNC					
长沙 Changsha	0~30	CSA	第四纪红黏土 Quaternary clay	红壤	112°46'E/28°22'N	17	1 422
	30~160	CSB		Red soil			
	160~	CSC					
文昌 Wenchang	0~25	WCA	浅海沉积物 Neritic deposit	砖红壤	110°41'E/19°39'N	23.9	1 722
	25~120	WCB		Laterite			
	120~	WCC					

1.3 土壤粒径分布的单分形参数

根据公式计算土壤颗粒体积分形维数^[23]

$$D = 3 - \frac{\lg(R_i / R_{\max})}{\lg[V_{(r < R_i)} / V_r]}$$

式中， D 为土壤颗粒体积分形维数； $V_{(r < R_i)}$ 为大于某一特定粒径 R 的土壤颗粒构成的体积； V_r 为土壤颗粒的总体积； R_i 为某一土壤粒径； R_{\max} 为最大粒径。具体计算中，首先求出土壤样品不同粒径 R_i 的 $\lg(R_i / R_{\max})$ 和 $\lg[V_{(r < R_i)} / V_r]$ 值，并将二者进行线性拟合分析求得斜率 K ，则土壤分形维数为 $D=3-K$ 。

1.4 土壤粒径分布的多重分形参数

取激光粒度仪测量区间 $I=[0.01, 2000]$ ，测量得到的分析结果是 100 个子区间（粒径段）的相对应的土壤颗粒的体积百分含量，即 $V_1, V_2, V_3, \dots, V_{100}$ ，相对应的子区间分别为 $I_i=[\phi_i, \phi_{i+1}]$ ， $i=1, 2, 3, \dots, 100$ ， I_i 对应的粒径分布子区间的体积分数即为 V_i 。根据激光粒度仪划分区间的原理，在测定区间 $I=[0.01, 2000]$ 内， $\log[\phi_{i+1}, \phi_i]$ 为常数，为使用多重分形方法分析区间 I 的土壤颗粒粒径分布特征，

须使各子区间长度相同，故作变换 $\phi_i = \log(\phi_i, \phi_1)$ ， $i=1, 2, 3, \dots, 100$ ，由此构造一个新的无量纲区间 $J=[0, 5]$ ，其中有 100 个等距离的子区间 $J_i=[\phi_i, \phi_{i+1}]$ ， $i=1, 2, 3, \dots, 100$ 。

在区间 J 中，有 $N_{(\varepsilon)} = 2^K$ 个相同大小 $\varepsilon = 5 \times 2^{-K}$ 的小区间，为使最小的子区间包含测量值，本文 K 的取值范围为 1~6。由此区间 J 被 2、4、6、8、16、32 和 64 等分，对应的区间大小依次为 2.5、1.25、0.625、0.312、0.156 和 0.078。 $\mu_i(\varepsilon)$ 为每个子区间土壤粒径分布的概率密度，即为落在子区间 J_i 内所有测量值 V_i 的加和，其中 $V_i = v_i / \sum_{i=1}^{100} v_i$ ， $i=1, 2, 3, \dots, 100$ 。利用 $\mu_i(\varepsilon)$ 构建一个配分函数族为

$$\mu_i(q, \varepsilon) = \mu_i(\varepsilon)^q / \sum_{i=1}^n \mu_i(\varepsilon)^q$$

式中， $\mu_i(q, \varepsilon)$ 为第 i 个子区间的 q (q 为实数) 阶概率； $\sum_{i=1}^n \mu_i(\varepsilon)^q$ 是对所有子区间的 q 阶概率求和。则粒径分布多重分形的广义维数谱为

$$D(q) = \frac{1}{q-1} \lim_{\varepsilon \rightarrow 0} \frac{\log \left[\sum_{i=1}^{n(\varepsilon)} \mu_i(\varepsilon)^q \right]}{\log \varepsilon} \quad (q \neq 1)$$

$$D(1) = \lim_{\varepsilon \rightarrow 0} \frac{\sum_{i=1}^{n(\varepsilon)} \mu_i(\varepsilon) \log \mu_i(\varepsilon)}{\log \varepsilon} \quad (q = 1)$$

则可得到粒径分布的奇异性指数

$$\alpha(q) = \lim_{\varepsilon \rightarrow 0} \frac{\sum_{i=1}^{n(\varepsilon)} \mu_i(q, \varepsilon) \log(\mu_i(1, \varepsilon))}{\log \varepsilon}$$

则相对于 $\alpha(q)$ 的粒径分布多重分形谱函数为

$$f[\alpha(q)] = \lim_{\varepsilon \rightarrow 0} \frac{\sum_{i=1}^{n(\varepsilon)} \mu_i(q, \varepsilon) \log(\mu_i(q, \varepsilon))}{\log \varepsilon}$$

广义维数谱 $D(q)$ 能够详细地反映出土壤粒径分布的局部特征和非均匀性。当 $q=0, 1$ 时, 对应得到 D_0, D_1 。 D_0 是容量维数, 也称为计盒维数, 提供土

壤 PSD 的基本信息, $D_0=1$ 表示各尺度上各个分区域的体积百分比均不为 0, $D_0=0$ 表示各尺度上各个分区域的体积百分比均为 0。 D_1 为信息维数, 为衡量土壤 PSD 的异质性提供了工具, D_1/D_0 可以用来衡量分布的异质程度。

奇异性指数 α 与多重分形谱函数 $f[\alpha(q)]$ 能够表述粒径分布多重分形的局部特征。多重分形谱的谱宽 ($\Delta\alpha = \alpha_{\max} - \alpha_{\min}$) 反映整个分形结构上物理量概率测度分布的不均匀程度。 $\Delta\alpha$ 越大, 土壤粒径分布越不均匀。

1.5 数据处理与分析

本文采用 IBM SPSS Statistics 22 对土壤母质类型和土壤各项基本理化性质分别进行了单因素方差分析, 分析了分形参数和基本理化性质之间的相关性, 用 Excel 2010 绘制了土壤颗粒分布频率曲线。

2 结果与讨论

2.1 土壤基本理化性质

不同母质类型土壤的基本理化性质及 Duncan 检验分析如表 2 所示。可以看出: 除土壤阳离子交

表 2 土壤基本理化性质

Table 2 Basic physical and chemical properties of soil

土样编号 Sample	容重 Bulk density/ (g·cm ⁻³)		阳离子交换量 CEC/ (cmol·kg ⁻¹)				黏土矿物含量 Clay mineral content/%		
		pH	有机质 OM/ (g·kg ⁻¹)	游离氧化铁 Fe _d / (g·kg ⁻¹)	游离氧化铝 Al _d / (g·kg ⁻¹)	蛭石 Vermiculite	水云母 Water mica	高岭石 Kaolinite	
ZZA	1.39±0.03c	7.47±0.03c	9.87±0.14g	16.88±1.13c	7.63±0.44g	1.13±0.10h	0.17±0.01b	0.67±0.02a	0.16±0.01f
ZZB	1.38±0.01c	7.93±0.02a	6.20±0.05i	3.17±0.06ij	7.02±0.10g	1.04±0.03h	0.21±0.00b	0.65±0.02a	0.13±0.02f
ZZC	1.30±0.04de	7.75±0.02b	5.35±0.03j	4.05±0.10i	6.39±0.26g	1.04±0.10h	0.34±0.01a	0.55±0.03c	0.12±0.01f
XNA	1.35±0.03cd	5.01±0.03j	12.15±0.03e	11.62±0.22e	12.96±0.36f	2.62±0.17g	0.00d	0.04±0.00e	0.94±0.03a
XNB	1.34±0.01cd	5.22±0.04hi	8.61±0.07h	7.27±0.27g	17.83±0.44e	4.95±0.26f	0.1±0.00c	0.06±0.01e	0.93±0.02a
XNC	1.28±0.02e	5.35±0.03g	5.61±0.03j	5.49±0.30h	18.70±1.32e	5.64±0.35f	0.1±0.00c	0.07±0.02e	0.92±0.01ab
CSA	1.46±0.02b	5.58±0.01f	15.38±0.30c	8.51±0.26f	40.94±1.56d	8.95±0.36d	0.00d	0.64±0.01ab	0.30±0.00e
CSB	1.39±0.01c	5.92±0.05d	13.84±0.12d	2.65±0.08j	40.83±0.60d	8.39±0.35d	0.00d	0.61±0.02b	0.31±0.01e
CSC	1.54±0.01a	5.82±0.02e	16.31±0.22b	2.30±0.12j	48.05±0.40c	7.02±0.10e	0.00d	0.25±0.01d	0.67±0.03d
WCA	0.90±0.04h	5.29±0.07gh	11.92±0.11ef	24.63±0.95b	158.99±2.00b	13.86±0.44c	0.00d	0.00f	0.85±0.02c
WCB	1.14±0.02f	5.31±0.03g	11.49±0.16f	28.67±0.91a	164.61±3.03a	15.97±0.61a	0.00d	0.00f	0.88±0.02bc
WCC	1.07±0.01g	5.17±0.01i	19.40±0.74a	13.50±0.44d	164.55±3.00a	14.82±0.26b	0.00d	0.00f	0.92±0.03ab

注: 数据采用 Duncan 检验, 同列不同字母表示差异显著 ($P < 0.01$)。 Note: Duncan test was used for data, and the different letter in the same column indicated that the difference was significant ($P < 0.01$) .

换量和有机质外，其他各项性质均表现为不同母质类型土壤之间的差异程度大于相同母质类型不同发生层土壤之间的差异程度，其中 4 种母质类型不同发生层土壤的有机质还表现从 A 层向 C 层递减的趋势，这是因为土壤表层有机质积累丰富，靠近母质，土壤有机质含量降低^[24]。土壤 pH、游离氧化物、蛭石含量表现出显著差异。其中，郑州冲积物母质发育的土壤 pH>7 呈碱性，其他三种母质发育的土壤为酸性，pH 均在 5.0~6.0 之间；游离氧化物和蛭石含量则呈现从南到北递减的趋势。

2.2 不同土壤粒径的分布特征

从 4 种不同母质类型的土壤颗粒分布频率曲线可以看出，母质类型为冲积物的 ZZA、ZZB、ZZC 以及母质类型为第四纪红黏土的 CSA、CSB、CSC 这两组土壤频率分布曲线的变化幅度较小，土壤颗

粒集中分布在 2~200 μm 的细颗粒区域，分布的异质性较小，三个不同发生层土壤之间的差异性也较小；而花岗岩残积物发育的 XNA、XNB、XNC 及浅海沉积物发育的 WCA、WCB、WCC 这两组土壤的颗粒分布的均匀程度相对较大，不同发生层土壤之间的差异性大。

土壤颗粒组成的统计分析（表 3）表明：各粒级土粒之间差异显著，其中以粉粒体积分数最高，在 32.15%~93.13% 之间（平均为 63.41%）；其次是极细砂粒和细砂粒，分别在 0.67%~39.90%（平均为 14.24%）和 1.19%~27.97%（平均为 12.00%），而黏粒、中砂粒、粗砂粒和极粗砂粒体积分数相对较低，分别在 0.83%~36.65%（平均为 5.42%）、0~12.64%（平均为 4.36%）、0~2.35%（平均为 0.53%）、0~0.18%（平均为 0.46%）。

表 3 不同母质类型土壤颗粒组成

Table 3 Soil particle composition of different parent material types

土样编号 Sample	黏粒 Clay/%	粉粒 Silt/%	砂粒 Sand/%				极粗砂粒 Very coarse sand
			极细砂粒	细砂粒	中砂粒	粗砂粒	
			Very fine sand	Fine sand	Medium sand	Coarse sand	
	<0.002 mm	0.002~0.05 mm	0.05~0.1 mm	0.1~0.25 mm	0.25~0.5 mm	0.5~1 mm	1~2 mm
ZZA	1.69	51.34	29.52	15.84	1.59	0.00	0.00
ZZB	1.27	49.99	39.42	9.31	0.00	0.00	0.00
ZZC	0.99	49.44	39.90	9.70	0.00	0.00	0.00
XNA	1.78	73.07	7.31	9.36	7.04	1.25	0.18
XNB	1.50	58.76	11.25	15.82	10.16	2.35	0.16
XNC	0.83	40.36	16.36	27.97	12.64	1.72	0.12
CSA	5.25	86.26	2.46	4.02	2.03	0.03	0.00
CSB	2.44	88.85	2.67	3.80	2.22	0.02	0.00
CSC	3.89	93.13	0.67	1.19	1.09	0.03	0.00
WCA	1.24	79.04	4.26	9.97	5.22	0.28	0.00
WCB	7.51	58.54	11.62	15.53	6.15	0.64	0.00
WCC	36.65	32.15	5.47	21.54	4.19	0.00	0.00

从相同母质发育的不同发生层的土壤来看，除文昌浅海沉积物发育的土壤外，黏粒含量均有从 A 层向 C 层递减的趋势；除长沙冲积物外，其他三种母质发育的土壤的粉粒含量也均有从 A 层向 C 层递减的趋势；砂粒含量则未表现出明显随着发生层递变的规律。从不同母质发育的 3 个土壤的平均值来

看，黏粒体积分数表现为 WC（浅海沉积物）>CS（第四纪黏土）>XN（花岗岩）>ZZ（冲积物），分别为 15.14%、3.86%、1.37%、1.32%，地域上表现为从南至北依次减少；粉粒表现为 CS>XN>WC>ZZ，分别为 89.41%、57.40%、56.58%、50.25%，均在 50% 以上；砂粒体积分数表现为 ZZ>XN>WC>

CS, 分别为 48.43%、41.24%、28.29%、6.73%。

四种母质发育的土壤的黏、粉、砂体积分数均差异明显, 说明母质对土壤颗粒组成的影响显著。其中文昌浅海沉积物发育的砖红壤的黏粒含量最高, 而郑州冲积物发育的褐土的砂粒含量最高, 各类型土壤粉粒含量的平均值均高于 50%。黏粒含量和粉粒含量随着土壤发生层有一定的递变规律, 说明对于不同的发生层, 母质对颗粒组成的影响具有差异。

2.3 不同母质类型土壤粒径分布的分形特征

四个区域不同母质类型土壤颗粒分形参数见表 4。可以看出, 4 种母质类型下 12 个不同土壤颗粒单分形维数 D 值介于 1.79~2.63 之间。从不同母质发育的三个土壤的平均值来看, WC (2.40) > XN (2.32) > CS (2.27) > ZZ (1.91), 文昌浅海沉积物发育的土壤颗粒组成不均匀性最大, 颗粒分布在较宽的粒径范围, 而郑州冲积物发育的土壤颗粒分布最集中, 与土壤粒径分布频率曲线 (图 1) 表现出的颗粒分布异质性的结果一致, 分形维数越大, 土壤质地越不均匀。此外, 冲积物和花岗岩残积物发育的两组土壤, 分形维数从 A 层向 C 层递减, 说明土壤颗粒分布的不均匀性随着土壤深度的增加而减小; 浅海沉积物发育的土壤相反, 土壤颗粒分布从 A 层向 C 层, 不均匀性增大; 第四纪红黏土发育

的三个发生层土壤的单分形维数差异不大, 说明不同采样深度的土壤均匀性相近。

在本研究中, 各个土壤样品的粒径分布均是连续的 (图 1), 分析的上下限均介于 0.01~2 000 μm , 所以 D_0 值越大, 就代表土壤粒径的分布范围越宽。如表 4 所示, 从相同母质发育的三个土壤 D_0 的平均值来看, 说明文昌浅海沉积物发育的土壤 D_0 值最大, 粒径分布范围较宽, 咸宁花岗岩残积物发育的土壤其次, 长沙第四纪红黏土发育的土壤再次, 而郑州冲积物发育的土壤 D_0 最小, 粒径分布范围最窄。各母质发育的不同发生层土壤之间, D_0 值的差异不明显, 粒径分布范围较一致。

从相同母质发育的三个土壤的 D_1 的平均值来看, CS、ZZ、XN 及 WC 组土壤分别为 0.89、0.84、0.84 和 0.83, 表明长沙第四纪红黏土发育的土壤异质性最大, 粒径分布范围集中在较小的区域, 而文昌浅海沉积物发育的土壤异质性最小, 粒径分布较均匀。ZZ、XN、WC 组土壤 D_1 值相差不大, 远小于 CS 组。

四种母质发育的土壤 $\Delta\alpha$ 差异较大, 其中文昌浅海沉积物和咸宁花岗岩残积物发育的土壤的 $\Delta\alpha$ 的值较大, 粒径分布范围较大, 非均匀程度较小, 这与 D_0 值反映的规律基本一致。

表 4 土壤粒径分布的分形参数

Table 4 Fractal parameters of soil particle size distribution

土壤编号 Sample	D	D_0	D_1	D_1/D_0	$\Delta\alpha$
ZZA	2.10	0.93	0.85	0.91	0.73
ZZB	1.84	0.93	0.84	0.90	0.77
ZZC	1.79	0.93	0.84	0.90	0.77
XNA	2.42	0.95	0.86	0.91	0.82
XNB	2.32	0.95	0.83	0.88	1.08
XNC	2.24	0.94	0.82	0.87	1.23
CSA	2.28	0.94	0.91	0.97	0.21
CSB	2.24	0.93	0.89	0.95	0.36
CSC	2.28	0.93	0.88	0.94	0.31
WCA	2.23	0.95	0.87	0.92	0.89
WCB	2.35	0.95	0.77	0.82	0.72
WCC	2.63	0.95	0.85	0.89	1.31

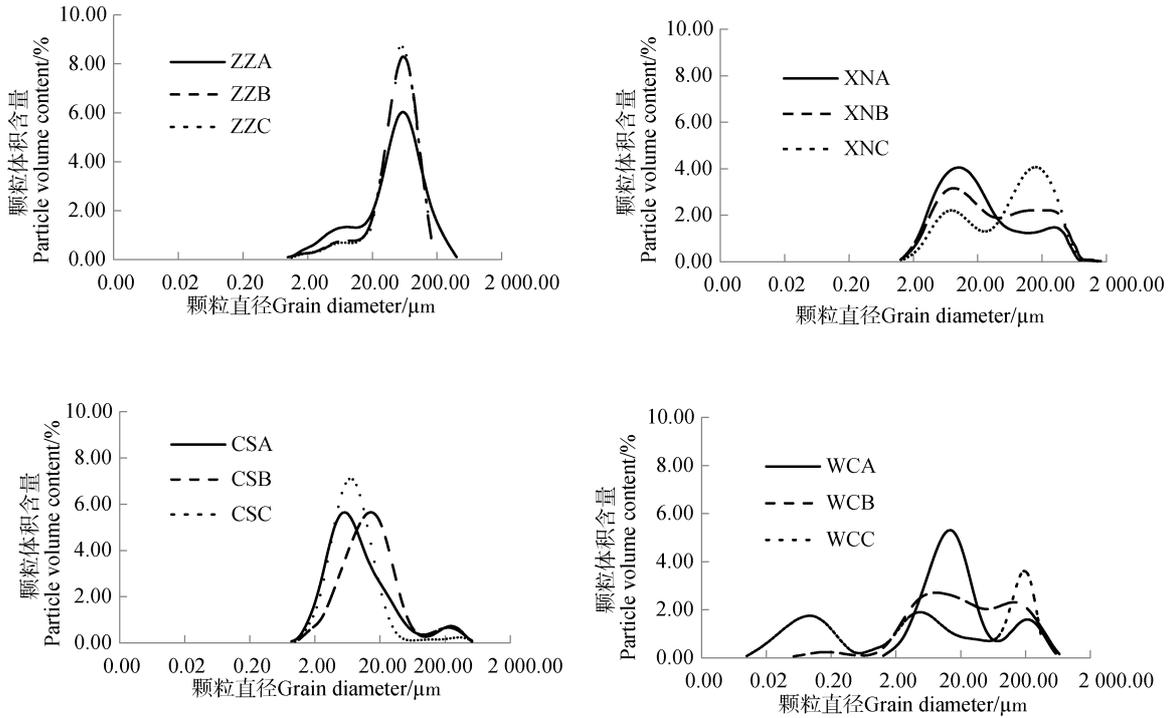


图 1 不同母质类型土壤颗粒分布频率曲线

Fig. 1 Soil particle distribution frequency curves of different parent material types

2.4 分形维数与基本理化性质相关性

将基本理化性质与分形参数做相关分析 (表 5), 结果表明: 土壤颗粒组成与 CEC 以及蛭石含量的相关性较明显。其中, 土壤阳离子交换量与土壤黏粒含量呈正相关, 与粉粒含量呈极显著正相关, 与砂粒含量呈极

显著负相关, 这是因为土壤中的黏粒和粉粒等细颗粒含量越高, 土壤吸附阳离子的能力就越强, CEC 含量越高。此外, 在三种黏土矿物中, 蛭石含量与土壤颗粒组成的相关性较大, 这是因为不同母质类型的土壤的蛭石含量和土壤颗粒组成均有显著的地带性差异。

表 5 土壤颗粒组成及分形参数与土壤基本性质的相关性

Table 5 Correlation analysis of fractal parameters and basic properties

	干密度 Dry density	pH	CEC	OM	Fe _d	Al _d	黏土矿物含量 Clay mineral content/%		
							蛭石 Vermiculite	水云母 Water mica	高岭石 Kaolinite
黏粒	0.067	-0.382	0.576	0.420	0.547	0.654*	-0.515	-0.094	0.127
粉粒	0.181	-0.422	0.930**	-0.061	0.273	0.420	-0.709*	0.027	0.064
砂粒	-0.180	0.439	-0.952**	0.012	-0.320	-0.473	0.734*	-0.016	-0.075
D	-0.261	-0.884**	0.743**	0.331	0.541	0.647*	-0.862**	0.441	-0.666*
D ₀	-0.635*	-0.842**	0.368	0.574	0.673*	0.685*	0.692*	0.438	-0.887**
D ₁	0.354	-0.061	0.5	-0.432	-0.215	-0.085	-0.195	0.101	0.406
D ₁ /D ₀	0.416	0.126	0.376	-0.515	-0.34	-0.223	-0.029	-0.001	0.562
Δα	-0.592*	-0.195	-0.256	-0.265	0.223	0.083	0.006	-0.203	-0.603*

注: *表示显著相关 (P<0.05), **表示极显著相关 (P<0.01)。Note: *stands for relation is significant (P<0.05), **stands for relation is very significant.

各分形参数中, 单分形参数 D 及容量维数 D_0 与 pH、CEC、游离氧化物、蛭石及高岭石含量均表现出显著相关关系。这是因为 D 和 D_0 表现的土壤粒径分布的异质性和分布范围与以上理化性质呈现出一致的差异。其中, 土壤 pH 与 D 及 D_0 均表现为极显著负相关 ($P < 0.01$), 这是因为从北至南, 土壤样品的酸性逐渐增强, pH 呈减小的趋势, 而所采集土样的粒径分布范围和均匀性却随着采样区域纬度的降低有增大的趋势。同样, 游离铁铝氧化物也呈现从北至南递增的趋势, 与 D 及 D_0 均表现为显著正相关。而整体来看, D_1 、 D_1/D_0 及 $\Delta\alpha$ 与各种理化性质的相关性不显著。

3 结 论

本文旨在通过分形理论探究不同母质发育土壤在颗粒组成特征的差异, 研究发现: 花岗岩残积物以及浅海沉积物发育的土壤分布范围大, 大颗粒含量高, 土壤颗粒分布的非均匀性较小。冲积物和第四纪黏土发育的土壤颗粒集中在 $2\sim 200\ \mu\text{m}$ 的细颗粒区域, 土壤粒径分布的异质性较大。从 D 和 D_0 值反映的结果来看, 母质类型对不同发生层颗粒组成的均匀性的影响有所差异, 对不同发生层颗粒组成的分布范围的影响较小。不同母质类型土壤的 pH、CEC、游离氧化物及蛭石含量表现出的地带性差异与土壤粒径分布的异质性和分布范围表现出来的差异基本一致, 这是因为不同母质受到地域环境的影响也存在显著差异。试验也有欠考虑之处: 由于侧重于方法应用的探索, 为丰富研究样品, 本研究重点考虑了我国中南部地区几种典型母质发育的土壤, 使得研究范围涉及了不同气候带。总体而言, 已有的研究方法和结果能够清晰地阐释不同母质发育土壤颗粒组成的差异, 关于引起颗粒组成差异的内在机理则有待于深入剖析。

参考文献 (References)

- [1] Wei Y J, Wu X L, Cai C F. Splash erosion of clay-sand mixtures and its relationship with soil physical properties: The effects of particle size distribution on soil structure[J]. *Catena*, 2015, 135: 254—262.
- [2] Mao D L, Cai F Y, Fang D X, et al. Fractal characteristics of grain size of sand and dust in aeolian sand movement in cele oasis-desert ecotone in Xinjiang, China[J]. *Acta Pedologica Sinica*, 2018, 55 (1): 88—99. [毛东雷, 蔡富艳, 方登先, 等. 新疆策勒绿洲—沙漠过渡带风沙运动沙尘物质粒径分形特征[J]. 土壤学报, 2018, 55 (1): 88—99.]
- [3] Wu Q T. *Environmental soil science*[M]. Beijing: China Agriculture Press, 2011. [吴启堂. 环境土壤学[M]. 北京: 中国农业出版社, 2011.]
- [4] Ji H P, Wei J. Soil particles features under three land-use types in purple soil catchment[J]. *Journal of Irrigation and Drainage*, 2016, 35 (3): 95—99. [嵇慧萍, 韦杰. 紫色土小流域三种土地利用类型土壤颗粒特征[J]. 灌溉排水学报, 2016, 35 (3): 95—99.]
- [5] Peng G, Xiang N, Lv S Q, et al. Fractal characterization of soil particle-size distribution under different land-use patterns in the Yellow River Delta Wetland in China[J]. *Journal of Soils and Sediments*, 2014, 14 (6): 1116—1122.
- [6] Fang X C, Wang C H, Zhang R H, et al. Soil particle size distribution characteristics under different land use types in Yinghe Watershed of Funiu Mountain Area[J]. *Science of Soil and Water Conservation*, 2017, 15 (3): 9—16. [方肖晨, 王春红, 张荣华, 等. 伏牛山区迎河小流域不同土地利用类型的土壤粒径分布特征[J]. 中国水土保持科学, 2017, 15 (3): 9—16.]
- [7] Liu Z Q, Gao J X, Tian M R, et al. Fractal dimension characteristics of soil particle size under different plant communities in ecological restoration area[J]. *Chinese Journal of Ecology*, 2017, 36 (2): 303—308. [刘志强, 高吉喜, 田美荣, 等. 生态修复区植物群落土壤粒径的分维特征[J]. 生态学杂志, 2017, 36 (2): 303—308.]
- [8] Niu X, Gao P, Wang B, et al. Fractal characteristics of soil retention curve and particle size distribution with different vegetation types in mountain areas of Northern China[J]. *International Journal of Environmental Research and Public Health*, 2015, 12 (12): 15379—15389.
- [9] Gao C Y, Zhao Q H, Liu Q. Fractal characteristic of soil particle size under different vegetation types in riparian zone of the main stream of Beijiang river[J]. *Research of Soil and Water Conservation*, 2016, 23 (3): 37—42. [高传友, 赵清贺, 刘倩. 北江干流河岸带不同植被类型土壤粒径分形特征[J]. 水土保持研究, 2016, 23 (3): 37—42.]
- [10] Tang G M, Xu W L, Sheng J D, et al. The variation of soil organic carbon and soil particle-size in Xinjiang oasis farmland of different years[J]. *Acta Pedologica Sinica*, 2010, 47 (2): 279—285. [唐光木, 徐万里, 盛建东, 等. 新疆绿洲农田不同开垦年限土壤有机碳及不同粒径土壤颗粒有机碳变化[J]. 土壤学报, 2010, 47 (2): 279—285.]
- [11] Deng Y S, Ding S W, Qiu X Z, et al. Spatial distribution of collapsing alluvial soil fertility in Ganxian County,

- Jiangxi Province[J]. *Science of Soil and Water Conservation*, 2015, 13 (1): 47—53. [邓羽松, 丁树文, 邱欣珍, 等. 赣县崩岗洪积扇土壤肥力的空间分异规律[J]. *中国水土保持科学*, 2015, 13 (1): 47—53.]
- [12] Xia J W, Wei Y J, Cai C F. Correlations between characteristic curves of physical properties of weathered granite soils[J]. *Acta Pedologica Sinica*, 2017, 54 (3): 581—589. [夏金文, 魏玉杰, 蔡崇法. 花岗岩风化土物理特征曲线间的相关性研究[J]. *土壤学报*, 2017, 54 (3): 581—589.]
- [13] Wei Y J, Wu X L, Pi J P, et al. Fractal dimension and physical characteristics of clay-sand mixtures[J]. *Science of Soil and Water Conservation*, 2013, 11 (6): 74—80. [魏玉杰, 吴新亮, 皮江平, 等. 土沙混合对土壤粒度分维值及物理特性的影响[J]. *中国水土保持科学*, 2013, 11 (6): 74—80.]
- [14] Guan X Y, Yang P L, Lü Y. Relationships between soil particle size distribution and soil physical properties based on multifractal[J]. *Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery*, 2011, 42(3): 44—50. [管孝艳, 杨培岭, 吕焯. 基于多重分形的土壤粒径分布与土壤物理特性关系[J]. *农业机械学报*, 2011, 42 (3): 44—50.]
- [15] Deng Y S, Li S X, Ding S W, et al. Research on different soil layers of collapsing gully fractal characteristics and erosion characteristics in Tongcheng[J]. *Resources and Environment in the Yangtze Basin*, 2016, 25(1): 63—70. [邓羽松, 李双喜, 丁树文, 等. 鄂东南崩岗不同层次土壤分形特征及抗蚀性研究[J]. *长江流域资源与环境*, 2016, 25 (1): 63—70.]
- [16] Li X P, Liu J L, Zhang J B, et al. Analysis of fractal magnitude of soil particles in loamy Chao soils in North China Plain[J]. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering*, 2014, 30 (4): 118—124. [李晓鹏, 刘建立, 张佳宝, 等. 华北冲积平原壤质潮土的土壤粒径分形空间尺度分析[J]. *农业工程学报*, 2014, 30 (4): 118—124.]
- [17] Su Y Z, Zhao H L. Fractal features of soil particle size distribution in the desertification process of the farmland in Horqin Sandy Land[J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2004, 24 (1): 71—74. [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.]
- [18] Min X Y, Li X J, Li Q C. Influence of mechanical compaction on reclaimed soil particle size distribution multifractal characteristics[J]. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering*, 2017, 33 (20): 274—283. [闵祥宇, 李新举, 李奇超. 机械压实对复垦土壤粒径分布多重分形特征的影响[J]. *农业工程学报*, 2017, 33 (20): 274—283.]
- [19] Wei Y J, Wu X L, Xia J W, et al. Variation of soil aggregation along the weathering gradient: Comparison of grain size distribution under different disruptive forces[J]. *PLoS One*, 2016, 11 (8): e0160960. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0160960>.
- [20] Filgueira R R, Fournier L L, Cerisola C I, et al. Particle-size distribution in soils: A critical study of the fractal model validation[J]. *Geoderma*, 2006, 134(3/4): 327—334.
- [21] Guan X Y, Yang P L, Ren S M, et al. Heterogeneity analysis of particle size distribution for loamy soil based on multifractal theory[J]. *Journal of Basic Science and Engineering*, 2009, 17 (2): 196—205. [管孝艳, 杨培岭, 任树梅, 等. 基于多重分形理论的壤土粒径分布非均匀性分析[J]. *应用基础与工程科学学报*, 2009, 17 (2): 196—205.]
- [22] Lu R K. *Methods for Chemical Analysis of Soil Agriculture*[M]. Beijing: China Agricultural Science and Technology Press, 2000. 鲁如坤. *土壤农业化学分析方法*[M]. 北京: 中国农业科技出版社, 2000.
- [23] Wang D, Fu B J, Chen L D, et al. Fractal analysis on soil particle size distributions under different land-use types: A case study in the loess hilly areas of the Loess Plateau, China[J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2007, 27 (7): 3081—3089. [王德, 傅伯杰, 陈利顶, 等. 不同土地利用类型下土壤粒径分形分析——以黄土丘陵沟壑区为例[J]. *生态学报*, 2007, 27 (7): 3081—3089.]
- [24] Tang M Y, Ding J L, Xia N, et al. Distribution of soil organic matter content and its affecting factors in oases typical of arid region[J]. *Acta Pedologica Sinica*, 2017, 54 (3): 759—766. [唐梦迎, 丁建丽, 夏楠, 等. 干旱区典型绿洲土壤有机质含量分布特征及其影响因素[J]. *土壤学报*, 2017, 54 (3): 759—766.]

(责任编辑: 檀满枝)