

# 东北黑土无机颗粒和有机无机复合体的分形特征

郑庆福<sup>1</sup> 赵兰坡<sup>2</sup> 齐 广<sup>3</sup>

1. 内蒙古民族大学分析测试中心, 通辽 028000;

2. 吉林农业大学资源与环境学院/吉林省生态恢复与生态系统管理省部共建国家重点实验室培育基地, 长春 130118;

3. 内蒙古民族大学学报编辑部, 通辽 028000

**摘要** 利用颗粒分形理论对东北黑土土壤无机颗粒和有机无机复合体的分形维数进行计算, 并分析其分布特征以及与土壤肥力的关系。结果表明: 东北黑土无机颗粒分形维数主要分布在 2.80~2.90, 与各粒级均呈极显著相关。有机无机复合体的分形维数主要分布在 2.66~2.93, 与黏、粉粒级有机无机复合体分别呈极显著正相关和负相关。无机颗粒和有机无机复合体的分形维数间的回归方程  $y=88.18x-60.73x^2+10.57x^3$ , 表明无机颗粒复合有机质可降低土壤的分形维数, 但受低温的影响, 也可能使土壤复合度降低, 进而增加土壤的分形维数。土壤颗粒的分形维数与肥力的相关分析证实无机颗粒复合有机质后, 可增强土壤养分的保蓄能力, 并在养分释放过程中起到缓释作用。

**关键词** 黑土; 无机颗粒; 有机无机复合体; 分形维数; 土壤肥力

**中图分类号** S 153.67    **文献标识码** A    **文章编号** 1000-2421(2013)02-0054-07

土壤主要由无机颗粒及其有机无机复合体组成, 受自然风化和地质过程作用以及人为措施的干扰, 其在形态、结构、功能等方面表现较为复杂<sup>[1]</sup>, 具有一定的研究难度。1975 年曼德尔布罗特提出分形理论后, 人们便将其引入土壤研究中。在此后的多项研究中, 证明分形理论可以有效的解决土壤结构的研究难题<sup>[2]</sup>, 如反映黏土颗粒的尺度分布和空间填充性能, 以及表征土壤透气性和聚合物填充性, 同时也有力地证明了土壤颗粒具有自相似结构的多孔介质特性。作为探索不规则结构和形态的工具, 分形理论在土壤学中取得了长足的发展。不仅为土壤维值的合理表达提出了一种新的概念, 还可推动土壤形态、过程等复杂问题的解决, 并可在一定程度上使其定量化<sup>[3]</sup>, 广泛应用于土壤的团聚体结构、粒径分布、土壤水分、土壤土力学、水力学、土壤孔隙等方面<sup>[4~7]</sup>。借助分形理论的应用, 进一步通过对事物内部的自相似性质的了解来洞察隐藏于混乱现象中的精细结构, 为实现从局部到整体的认知, 从有限到无限的认知提供新的途径; 并为可能的新理论、新规律的发现提供契机<sup>[8]</sup>。然而, 分形理论应用于土壤

仍显不足, 如土壤的分形特性与土壤肥力的关系<sup>[8]</sup>, 以及无机颗粒与有机无机复合体颗粒维度间的关系等问题尚待进一步研究。东北黑土区是我国的重要粮食产区, 近些年来, 黑土区的土壤肥力退化问题引起人们重视<sup>[9]</sup>。无机颗粒和有机无机复合体颗粒与土壤肥力退化密切相关。研究黑土区无机颗粒及其与有机无机复合体间的关系, 探讨无机矿物有机无机复合体机制, 以及黑土无机颗粒和有机无机复合体与黑土肥力的关系, 可为土壤结构与土壤肥力的定量关系提供理论支撑。

## 1 材料与方法

### 1.1 样品采集

2008 年, 在东北黑土区内, 沿黑龙江省和吉林省中部的京哈铁路东西两侧, 从南到北跨越 5 个纬度, 通过对样点区域调研和进行 GPS 定位, 确定取土点 6 个。按土壤发生层次分别采集各层土壤, 混合均匀后, 采用四分法留取 1.0 kg 土样, 装入标记的自封塑料袋。采样地地形与气候特征见表 1。土壤均为在黄土母质的台地上发育形成的均腐状黑土。

收稿日期: 2012-04-02

基金项目: 国家公益性行业(农业)科研专项(200903001)、内蒙古教育厅高校科研基金(NJZY11015)、内蒙古民族大学博士启动资金(BS262)和内蒙古民族大学科研创新团队建设计划项目(NMD10-03)

郑庆福, 博士。研究方向: 土壤肥力与生态。E-mail: zhengqf2006@126.com

通讯作者: 赵兰坡, 博士, 教授。研究方向: 土壤养分调控。E-mail: zhaolanpo12@163.com

表1 供试土壤的地形和气候特征

Table 1 Landform and climate conditions of the sampling sites

样号 Number	采样地点 Sampling sites	经度 Longitude	纬度 Latitude	地形 Terrain	平均温度/℃ Average temperature	年平均降水/mm Average annual rainfall	种植作物 Crops
1	吉林公主岭永发乡 Yongfa Town in Gongzhuling in Jilin	124°54'48"	43°49'56"	平原 Plain	5.6	594.8	玉米 Corn
2	吉林德惠市郊区 The suburb of Dehui City in Jilin	125°42'3"	44°26'58"	低洼波状平原 Wavy low-lying plains	5.4	521.0	玉米 Corn
3	黑龙江哈尔滨市中科院生态所 Harbin Academy of Chinese Sciences Ecology in Heilongjiang	126°37'56"	45°43'44"	平原 Plain	3.5	402.0	玉米 Corn
4	黑龙江海伦县共和镇胜利村 Shenli Village in Gonghe Town in Helen in Heilongjiang	126°47'29"	47°25'46"	平原 Plain	1.0	550.0	大豆 Soybean
5	黑龙江北安市郊区 The suburb of Beian in Heilongjiang	126°41'33"	48°14'17"	波状平原 Wavy plain	0.2	553.0	大豆 Soybean
6	黑龙江嫩江市海江镇 Haijiang Town in Nenjiang City in Heilongjiang	125°40'44"	49°27'51"	平原 Plain	0.4	575.0	大豆 Soybean

## 1.2 样品测试

1) 不同粒径有机无机复合体样品的提取和定量。采用 Edwards 等<sup>[10]</sup> 提出的超声波分散法, 按颗粒大小分组法进行。风干土样经稀盐酸脱钙后, 用超声波(吉林省通化产 JC-3 型探头式超声处理机, 24 kHz, 150 W) 分散处理 15 min。将土壤悬液通过粒径 0.2 mm 筛分离大于 0.2 mm 的粗砂有机无机复合体, 悬液根据司笃克斯定律用虹吸法在规定时间内分别吸取小于 0.002 mm 黏粒有机无机复合体、0.002~0.020 mm 粉粒有机无机复合体和 0.020~0.200 mm 细砂有机无机复合体, 经聚沉、洗涤、低温干燥后定量, 过筛备用<sup>[11-12]</sup>。

2) 土壤无机颗粒组样品的提取和定量。将耕层剔去粗的有机质残体, 用 30% H<sub>2</sub>O<sub>2</sub> 分解有机质后离心, 加入少量 0.5 mol/L NaOH 溶液, 调节悬液 pH 至胶体悬浮后, 经超声波(21.5 kHz, 300 mA) 分散 30 min 后, 根据 Stoke 原理所确定的沉淀时间提取小于 2 μm 的黏粒, 重复提取直至悬液中不含小于 2 μm 的黏粒为止<sup>[13]</sup>, 其他粒级继续用沉降法和筛分法提取, 并分别定量求出各粒级的百分含量。

3) 测定方法。重铬酸钾—硫酸容量法(外加热)测定有机碳; 凯氏定氮法测定全氮; 扩散皿法测定碱解氮, 碱熔—钼锑抗比色法测全磷; NaOH 熔融—火焰光度法测定全钾; 乙酸铵交换法测定交换性钾; 热 1 mol/L HNO<sub>3</sub> 测定缓效钾; 冷 2 mol/L HNO<sub>3</sub> 测定有效钾。

## 1.3 研究方法

为了研究土壤颗粒的分形现象, Arya 等<sup>[14]</sup> 和 Turcotte 等<sup>[15]</sup> 提出了多孔介质材料的粒径分布公式:  $N(r>R) \propto R^{-D}$ ,  $N(r>R)$  为颗粒尺寸大于或等于  $R$  的颗粒数目;  $D$  为 PSD 分形维数。由于数出每个粒级颗粒的数量在实际操作中难以实现, 且土壤颗粒直径的连续变化, 颗粒形状各不相同, 使 Turcotte 等<sup>[15]</sup> 提出的公式运用难度较大。为此, Tyler 等<sup>[16]</sup> 导出了描述土壤颗粒累积质量与尺寸标度间的关系, 经杨培岭等<sup>[17]</sup> 提出的用土壤颗粒质量分布代替土壤颗粒数量分布来改进计算粒径分布的分形维数的方法: 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  $V(\delta > d_i)$  可由下列公式表示:

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

式中,  $\delta$  为尺码;  $A$ 、 $k$  是描述形状、尺度的常数;  $D$  为分形维数。

通常粒径分析资料由一定粒径间隔的粒径质量分布来表示。以  $d_i$  表示两筛分粒径  $d_i$  与  $d_{i+1}$  间的粒径平均值, 忽略各粒径间土粒密度  $\rho$  与  $\rho_i$  ( $i = 1, 2, \dots$ ) 间的差异, 则有:

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

式中,  $W(\delta > d_i)$  表示粒径大于  $d_i$  的累计土粒质量。

以  $W_0$  表示土壤各粒级质量的总和, 同时由定义有  $\lim_{i \rightarrow x} d_i = 0$

则由式(2)得:

$$W_0 = \lim_{i \rightarrow \infty} W(\delta > d_i) = \rho A \quad (3)$$

由式(2)、(3)导出

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

设  $d_{\max}$  为最大粒级土粒的平均直径, 则  $W(\delta > d_{\max}) = 0$  代入式(4)有  $k = d_{\max}$ , 由此得出土壤颗粒的质量分布与平均粒径间的分形关系式:

$$W(\delta > d_i)/W_0 = (1 - d_i/d_{\max})^{3-D} \quad (5)$$

$$(d_i/d_{\max})^{3-D} = W(\delta < d_i)/W_0 \quad (6)$$

对上式两边取对数, 即得:

$$(3-D) \lg(d_i/d_{\max}) = \lg[W(\delta < d_i)/W_0] \quad (7)$$

分别以  $\lg(W_i/W_0)$  为纵坐标、 $\lg(d_i/d_{\max})$  为横坐标,  $(3-D)$  是  $\lg(d_i/d_{\max})$  和  $\lg(W_i/W_0)$  的实验直线斜率, 并用回归分析方法进行求解并列入表 2。

表 2 黑土土壤颗粒分形维数

Table 2 Fractal dimension of soil particles of black soil

样号 No.	剖面发生层 Layers of profile	无机颗粒/% Inorganic particles			分形维数 Fractal dimension	有机无机复合体/% Complexes					分形维数 Fractal dimension
		<0.002 mm	0.002~0.200 mm	0.200~2.000 mm		<0.002 mm	0.002~0.020 mm	0.020~0.250 mm	0.250~2.000 mm	>2.000 mm	
1	A	32	19	43	2.85	15	30	51	1	0	2.78
	AB	23	20	46	2.82	26	22	45	1	2	2.87
	B	26	23	45	2.82	32	19	42	1	0	2.91
	BC	27	21	47	2.83	22	22	45	1	1	2.86
	C	25	20	48	2.82	27	21	41	1	1	2.89
	A	34	16	40	2.87	33	17	37	0	1	2.93
2	AB	28	18	43	2.84	23	14	44	5	1	2.88
	B	24	19	49	2.81	27	19	39	0	1	2.90
	BC	22	19	50	2.80	26	16	41	0	1	2.90
	C	21	16	55	2.80	26	10	46	0	0	2.92
	A	28	16	46	2.84	16	23	40	1	1	2.82
	AB	32	16	46	2.85	16	23	39	0	0	2.82
3	B	26	18	45	2.83	18	23	37	0	0	2.84
	C	31	18	44	2.85	23	17	35	0	0	2.89
	A	28	22	34	2.85	12	25	31	6	3	2.78
	AB	32	23	35	2.85	24	23	25	2	1	2.89
	B	32	25	35	2.85	24	24	25	0	1	2.89
	BC	22	22	36	2.82	22	24	25	1	1	2.88
4	C	32	28	33	2.85	17	27	25	0	0	2.84
	A	36	24	32	2.87	5	34	27	3	0	2.66
	AB	30	25	32	2.85	8	28	29	2	2	2.74
	B	31	27	33	2.85	12	30	23	2	0	2.80
	C	36	29	26	2.87	19	27	19	1	0	2.87
	A	39	27	26	2.88	19	26	18	2	0	2.87
5	AB	45	23	23	2.90	12	19	17	13	4	2.82
	B	44	28	21	2.89	23	23	16	2	0	2.90
	BC	39	27	23	2.88	20	28	14	1	1	2.88
	C	39	27	23	2.88	24	23	14	1	0	2.91

## 2 结果与分析

### 2.1 黑土无机颗粒的分形维数

土壤无机颗粒的分形维数是反映土壤结构几何形状的参数。根据上述土壤颗粒分形维数的求解方法求得, 并列入表 2。由表 2 可知, 东北黑土区无机颗粒的分形维数, 主要分布在 2.80~2.90, 说明发育于第四纪黄土母质的东北黑土质地仍保持较为均

一状态。通过图 1 的回归分析可知, 土壤无机颗粒分形维数与黏粒、粉粒和砂粒均呈极显著相关性, 其相关系数分别为  $r_{<0.002} = 0.98^{**}$ 、 $r_{0.002~0.020} = 0.55^{**}$  和  $r_{0.020~0.200} = -0.87^{**}$ , 表明随着土壤风化, 无机矿物颗粒粒径变小, 无机颗粒维数增大。从空间上的分布特征(图 2)看, 东北黑土区无机颗粒分形维数在区域上由南向北呈增加趋势, 且其南部剖面上无机颗粒的分形维数差异增大, 而在北部则

差异较小;从土壤剖面看,随着土壤剖面发生层次向下呈现降低的趋势,各样点的差异也由小变大,表明随着东北黑土的土壤发育,无机颗粒的分形维数呈增加趋势,但降水、温度以及土壤利用强度的增加也会降低黑土无机颗粒的分形维数。

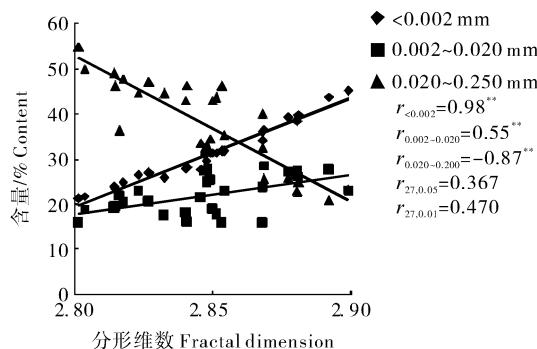


图 1 东北黑土无机颗粒含量及其与分形维数的关系

Fig. 1 Correlation analysis of the fractal dimension of inorganic particles and its content of northeastern black soils

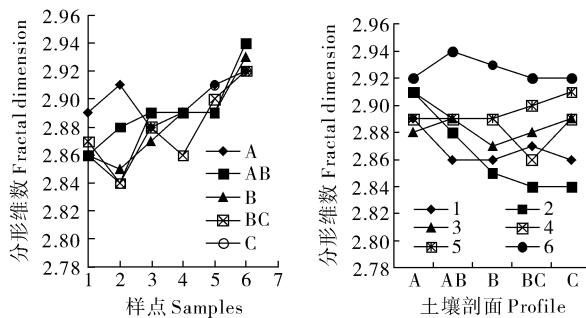


图 2 东北黑土无机颗粒分形维数的分布特征

Fig. 2 Fractal dimension distribution of inorganic particles in northeastern black soils

## 2.2 黑土有机无机复合体分形维数

土壤有机无机复合体是土壤形成过程中的重要产物,对土壤具有显著的影响,尤其是对土壤肥力的影响尤为显著。因此,土壤无机颗粒如何形成有机无机复合体的机制对培肥土壤尤为重要。为此,通过黑土有机无机复合体的分形维数进行分析,由表2可知,东北黑土有机无机复合体分形维数主要分布在2.66~2.93。从有机无机复合体分形维数与有机无机复合体颗粒的含量的相关分析(图3)可知,土壤有机无机复合体分形维数与黏粒级复合体呈极显著正相关( $r_{<0.002} = 0.92^{**}$ ),而与粉粒级复合体呈极显著负相关( $r_{0.002~0.020} = -0.69^{**}$ ),表明黏粒经复合有机质后,粒径变大,团聚成较大粒径的粉粒级复合体,因此黏粒是主导和构成黑土有机无

复合体分形维数的主体。从空间分布特征看(图4),有机无机复合体的分形维数南北区域差异较小,但其在剖面上的分形维数变化趋势,则与无机颗粒分形维数相反,在南部样点剖面有机无机复合体分形维数差异较小,在北部样点剖面有机无机复合体具有差异较大的分布特征;具体表现在区域上各样点黑土A层的有机无机复合体分形维数差异较大,随着土壤剖面发生层次向下的差异减小。以上情况表明土壤无机颗粒经复合有机质后,其土壤颗粒分形维数增加并趋于一致。其中,AB层最为典型,分形维数主要分布在2.74~2.89,平均在2.84。在剖面上,表层因区域环境差异使得土壤颗粒复合后分形维数差异加大,而在C层,尽管无机颗粒分形维数差异较大,但由于人为扰动和区域气候环境影响较小,土壤无机颗粒复合有机质后的分形维数趋于一致,主要分布在2.84~2.92,平均为2.89,说明土壤发育过程是土壤无机颗粒风化和复合有机质的过程,也是土壤分形维数增加的过程。

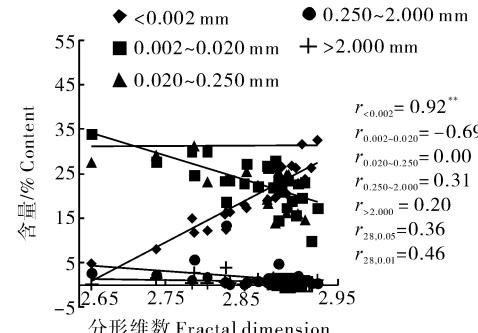


图 3 东北黑土有机无机复合体的分形维数与含量的相关分析

Fig. 3 Correlation analysis between the fractal dimension and its content of complex in northeast black soil

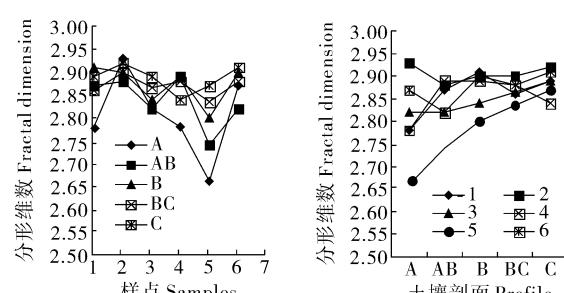


图 4 东北黑土有机无机复合体的分形维数分布特征

Fig. 4 Distribution of fractal dimension of complex in northeastern black soils

### 2.3 黑土无机颗粒分形维数与有机无机复合体分形维数间的关系

通过CurveExpert 1.3 对黑土无机颗粒与有机无机复合体分形维数的关系进行回归方程最优拟合(图5),得到3次多项拟合方程: $y = 88.18x - 60.73x^2 + 10.57x^3$ ,其拟合度 $r = 0.9949^{**}$ ,方差为0.0558,拟合方程中有机无机复合体分形维数最低值为2.84时,无机颗粒分形维数为2.85,表明东北黑土随无机颗粒维数增加,表现出有机无机复合体分形维数先减少后增加的趋势,说明黏粒经复合后粒径增大,无机颗粒分形维数减小,使有机无机复合体分形维数增加。但从图5中可知,无机颗粒分形维数增大,有机无机复合体分形维数增大,如S5,S6均处于寒冷低温的地带,表明低温时对有机质的复合度较小,使无机颗粒仍然保持较小的粒径范围,加之有机颗粒的加入,从而使有机无机复合体的分形维数也保持较大的值。

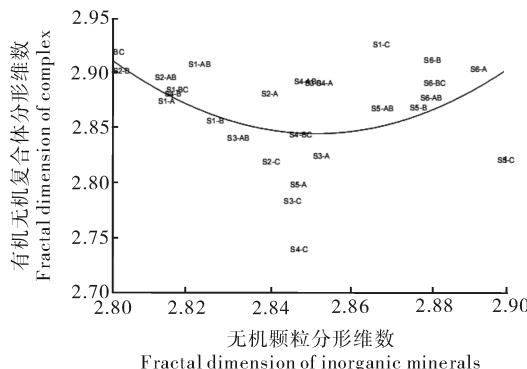


图5 东北黑土颗粒分形维数的拟合曲线

Fig. 5 Fitting curve of fractal dimension of northeasteren black soil particles

### 2.4 黑土颗粒分形维数与土壤肥力的关系

无机颗粒和有机无机复合体是形成土壤的物质基础,也是形成肥力的重要物质媒介。若能找出两者对土壤肥力的差别,进而可探讨无机矿物经有机质复合后对土壤肥力影响的变化。通过对颗粒分形维数与肥力的相关分析(表3),可见无机颗粒分形维数与碱解氮和有效钾分别呈显著和极显著性相关,相关系数分别为 $0.38^*$ 、 $0.60^{**}$ ,由此可推测无机颗粒分形维数的增加可提供较多的活性间层位,有利于有效钾的钾离子和碱解氮的铵离子释放。而从有机无机复合体维数与土壤肥力的相关性看,有机无机复合体维数与有机碳、全氮、碱解氮、全磷、交换性钾均呈极显著负相关,相关系数分别为

$-0.58^{**}$ 、 $-0.72^{**}$ 、 $-0.60^{**}$ 、 $-0.51^{**}$ 、 $-0.51^{**}$ ,说明无机颗粒经与有机质复合后,使土壤颗粒分形维数降低,起到保蓄养分的作用,进而可提供更多的有机质、全氮、碱解氮、全磷和交换性钾,但对有效钾的释放具有一定的抑制作用。因此,土壤有机无机复合体分形维数值的高低能够反映土壤物理性质的优劣。

表3 东北黑土无机颗粒和有机无机复合体分形维数与肥力的相关性<sup>1)</sup>

Table 3 Correlation between fractal dimension of inorganic particles and complex and the fertility in northeast black soil in northeastern China

相关系数 Correlation	无机颗粒分形维数 Fractal dimension of inorganic particle	有机无机复合体分形维数 Fractal dimension of complex
有机碳/(g/kg) Organic carbon	0.15	$-0.58^{**}$
全氮/(g/kg) Total N	0.16	$-0.72^{**}$
碱解氮/(mg/kg) Alkali-hydrolyzable N	$0.38^*$	$-0.60^{**}$
全磷/(mg/g) Total P	0.30	$-0.51^{**}$
全钾/(mg/g) Total K	0.18	0.18
交换性钾/(mg/kg) Exchangeable K	0.30	$-0.51^{**}$
缓效钾/(mg/g) Slow-release K	0.26	0.03
有效钾/(mg/g) Available K	$0.60^{**}$	0.14

1)  $r_{27,0.05} = 0.367, r_{27,0.01} = 0.470$ .

### 3 讨论

土壤无机矿物颗粒是形成土壤的前体物质。土壤有机无机复合体则是土壤发育过程的最终产物,对土壤结构具有显著的影响,并最终影响土壤的肥力。从本研究对东北黑土的无机颗粒分形维数空间分布特征看,无机颗粒分形维数因降水、温度的增加而降低,并与土壤垦殖强度及有机物料的施入有关。从无机颗粒分形维数与无机颗粒组成的关系看,黏粒含量的增加是土壤无机颗粒分形维数增加的主要原因,这与近来的一些研究结果<sup>[18-19]</sup>是一致的。

有机无机复合体是形成土壤结构的主要组分,是无机颗粒与有机质复合的结果,使颗粒的分形维数有所降低,并且有机无机复合体的分形维数与无机颗粒分形维数的空间分布特征呈相反的趋势。这说明土壤无机颗粒对有机质的复合团聚是形成良好

土壤结构的重要条件,而有机无机复合体分形维数也就是在特定条件下形成良好土壤的一个重要的定量土壤结构的指标<sup>[20-21]</sup>。由无机颗粒分形维数与有机无机复合体分形维数的回归方程可知,如果能将有机无机复合体分形维数降低到2.84,土壤结构就会达到较适宜的团粒结构状态。从无机颗粒和有机无机复合体的分形维数与肥力的相关分析可知,无机颗粒复合有机质后,对土壤养分具有显著的保蓄能力,这意味着施更多的有机物料,可以降低土壤分形维数,可增加土壤的通气孔隙。孔隙数的增加则会保蓄更多的活性水,提高土壤的水容量和热容量,为土壤养分的释放和吸附提供更大空间,缓解了土壤的水肥矛盾。

土壤结构是土壤颗粒组成的一种状态,应与土壤养分有息相关的关系,但以往的研究从未将土壤结构与土壤养分建立量化关系,很难将土壤颗粒与养分联系起来分析。笔者通过颗粒分形维数理论将土壤结构进行量化,并利用相关分析,与土壤肥力建立了回归关系。结果表明,无机颗粒分形维数与碱解氮和有效钾分别呈显著和极显著相关,这是由于有效钾的钾离子和碱解氮的铵离子的离子半径接近,主要存在于无机矿物的活性层中,随着颗粒粒径的减小,其层间空间增大,释放离子的能力就会增大。而从有机无机复合体维数与肥力的关系看,有机无机复合体维数与有机碳、全氮、碱解氮、全磷、交换性钾均呈极显著负相关,说明无机颗粒经与有机质复合后,使土壤有机碳含量、全氮、碱解氮、全磷和交换性钾减少,进而起到保蓄养分的作用,但对有效钾的释放具有一定的抑制作用,有机质被分解后逐步释放养分,起到缓冲的作用。以上的研究也表明,分形理论应用于土壤不仅可量化土壤结构,也反映土壤颗粒对养分的保蓄性能。

土壤是具有自相似结构的多孔介质的颗粒组成。利用分形维数分析土壤颗粒,研究土壤结构,对土壤肥力具有重要的意义。东北黑土无机颗粒的维数主要分布在2.80~2.90,空间分布特征为由南向北表层呈增加趋势,剖面差异南大北小。有机无机复合体分形维数主要分布在2.66~2.93,在空间上分布特征以南北区域表层差异较小,剖面差异上南下北大。黑土无机颗粒的分形维数与有机无机复合体分形维数间的最优回归方程: $y = 88.18x - 60.73x^2 + 10.57x^3$ ( $r=0.994$ , $S=0.055$ ),说

明土壤颗粒分形维数值在2.84时,是土壤结构为良好状态的一个重要指标。

## 参 考 文 献

- [1] 梁士楚,董鸣,王伯荪,等.英罗港红树林土壤粒径分布的分形特征[J].应用生态学报,2003,14(1):11-14.
- [2] MANDELBROT B B. The fractal geometry of nature[M]. San Francisco: W. H. Freeman and Company Micromath Spring, 2002:21-27.
- [3] 李保国.分形理论及其在土壤科学中的应用[J].土壤学进展,1994,22(1):1-10.
- [4] 程先富,史学正.分形几何在土壤学中的应用及其展望[J].土壤,2003,35(6):461-464.
- [5] 蒋先军,李航,谢德体,等.分形理论在土壤肥力研究中的应用与前景[J].土壤,2007,39(5):677-683.
- [6] 周虎,吕贻忠,李保国.土壤结构定量化研究进展[J].土壤学报,2009,46(3):501-506.
- [7] 朱晓华.海岸线分维数计算方法及其比较研究[J].黄渤海海洋,2002,20(2):31-36.
- [8] XU X M, HE Y R. 2009 fractal characteristics of stagnic anthroposols and the relationship with soil micro-structure[J]. Agricultural Sciences in China, 2009, 8(5):605-612.
- [9] 赵兰坡,王鸿斌,刘会青,等.松辽平原玉米带黑土肥力退化机理研究[J].土壤学报,2006,43(1):79-84.
- [10] EDWARDS A P, BREMNER J M. Microaggregates in soils [J]. Journal of Soil Science, 1967, 18:65-73.
- [11] KYUMA K, HUSSAIN A, KAWAGUCHI K. The nature of organic matter in soil organo-mineral complexes[J]. Soil Sci Plant Nutr, 1969, 15(4):149-155.
- [12] 米林甲阳,久马一刚,川口桂三郎.土壤中の有机无机有机无机复合体とその有机物の特性[J].土肥志,1974,45(9):416-420.
- [13] HOLTZAPFFEL T. Les minéraux argileux: préparation, analyse diffractométrique et détermination [J]. Soc Géol Nord Publ, 1985, 12:11-36.
- [14] ARYA L M, PARIS J F. A physic empirical model top predict the soil moisture characteristic from particle-size distribution and bulk density data[J]. Soil Science Society of America Journal, 1981, 45:1023-1031.
- [15] TURCOTTE D L. Fractals and fragmentation [J]. Journal of Geophysical Research, 1986, 91(B2):1921-1926.
- [16] TYLER S W, WHEATCRAFT S W. Application of fractal mathematics to soil water retention estimation[J]. Soil Science Society of America Journal, 1989, 53: 987-996.
- [17] 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.
- [18] 缪驰远,汪亚峰,魏欣,等.黑土表层土壤颗粒的分形特征[J].应用生态学报,2007,18(9):1987-1993.

- [19] 吴尧,姚健,吴永波.岷江上游典型植被下土壤分形特征及对水分入渗的影响[J].水土保持通报,2012,32(2):12-16.
- [20] 刘金福,洪伟,吴承祯.中亚热带几种珍贵树种林分土壤团粒结构的分维特征[J].生态学报,2002,22(2):1998-2005.
- [21] 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.

## Fractal characteristics of inorganic particles and complex of northeastern China black soils

ZHENG Qing-fu<sup>1</sup> ZHAO Lan-po<sup>2</sup> QI Guang<sup>3</sup>

1. Analytical and Testing, Inner Mongolia University for Nationalities, Tongliao 028000, China;  
 2. College of Resources and Environment Science, Jilin Agricultural University /  
     Cultivating Base National Key Laboratory for Jilin Province Ecological  
     Restoration and Ecosystem Management, Changchun 130118, China;  
 3. Editing Department of Journal of Inner Mongolia University  
     for Nationalities, Tongliao 028000, China

**Abstract** Soil structure is the material base of soil fertility and has an important significance in soil fertility. In order to study the relationships between soil particles and the fertility of black soil in northeast China, fractal dimensions of soil inorganic particles and complex were calculated by the particles fractal theory. The distribution characteristics of black soils in northeast China and its relationships with soil fertility were analyzed as well. The results showed that the fractal dimensions of black soil inorganic particles in northeast China were 2.80-2.90, significantly correlated with the entire size fraction. The fractal dimensions of complex were 2.66-2.93, correlated positively with clay and negatively with silt complexes. The regression equation ( $y=88.18x-60.73x^2+10.57x^3$ ) between the fractal dimension of inorganic particles and complex showed that inorganic particles and complex organic could decrease the fractal dimension, and might decrease soil complex degree because of low temperature and increase the fractal dimension of soil. Association analysis between the fractal dimension of soil particles and the fertility confirmed that inorganic particles and complex organic could increase soil nutrients storage capability, and might release nutrients gradually in the process of mineralization. It can be concluded that the fractal theory could be taken as a quantitative indicator explaining the mechanisms of inorganic compound particles and soil structure and indicating fertility characteristics under the conditions of the fractal dimension of soil.

**Key words** black soil; inorganic particle; organic-inorganic complex; fractal dimension; soil fertility

(责任编辑:陆文昌)