

## 土壤薄片中山石英颗粒分布的分形特征<sup>①</sup>

周 虎<sup>1</sup>, 李保国<sup>1</sup>, 吕贻忠<sup>1\*</sup>, 郑金玉<sup>2</sup>, 刘武仁<sup>2</sup>

(1 中国农业大学土壤与水科学系, 北京 100193; 2 吉林省农业科学院, 长春 130124)

**摘要:** 土壤中石英颗粒的粒度分布对揭示母质来源和模拟土壤结构等具有重要意义。本文根据石英的光学性质, 利用数字图像处理技术提取土壤薄片中的石英颗粒信息, 并应用分形维数来表征土壤薄片中山石英颗粒的分布特征。采集免耕和翻耕处理下土壤样品并制作成土壤薄片, 利用偏光显微镜和数字图像处理技术提取土壤薄片中山石英颗粒, 应用Sigma ScanPro5 软件统计了石英颗粒的数量、大小和形状等信息, 研究土壤薄片中山石英颗粒的数量分形特征; 并分析了其同石英颗粒数量、面积和平均半径等的关系。结果表明石英颗粒的数量分布具有明显的分形特征, 分形维数在 1.60~2.18 之间, 分形维数同薄片中山石英颗粒的总面积和平均半径呈负相关。免耕处理下表层土壤石英颗粒的数量分形维数高于底层, 而翻耕处理下则呈相反的趋势。免耕和翻耕措施下土壤薄片中山石英颗粒的数量分形维数在 0~5 和 10~15 cm 层次之间没有显著差异, 但是在 20~25 cm 层次, 翻耕处理分形维数高于免耕处理, 说明耕作措施会加速土壤矿物质的风化和破碎并改变石英颗粒在土壤剖面中的分布。

**关键词:** 石英; 土壤薄片; 颗粒分布; 分形维数

**中图分类号:** S152.2

石英 ( $\text{SiO}_2$ ) 性质稳定且抗风化能力强, 是土壤中最主要的原生矿物之一。土壤中石英颗粒的粒度分布对揭示母质来源、土壤发生过程和模拟土壤结构等具有重要意义。研究石英颗粒粒度分布的常用方法是利用各种氧化剂除去土壤颗粒中的有机物、黏土矿物和其他原生矿物, 再利用粒度仪测定<sup>[1-2]</sup>。在土壤薄片, 石英颗粒单偏光下无色透明, 正交偏光下干涉色为一级黄白, 且无解理, 易于与其他土壤中常见矿物区分, 因此可以利用数字图像处理的方法提取石英颗粒在土壤薄片中的原位信息, 避免了其他操作可能引起的误差, 之后可以应用数学形态学方法<sup>[3]</sup>或者有关图像分析软件自动统计石英颗粒的分布特征<sup>[4]</sup>。

石英的粒度分布常用粒度分布图来表示, 一般只是定性的描述<sup>[1]</sup>。近年来分形几何发展十分迅速, 基于数量和码尺的关系, 一些研究提出应用分形维数来定量表征土壤颗粒或团聚体的分布<sup>[5-6]</sup>。但是由于统计土壤颗粒的数量十分困难, Tyler等<sup>[5]</sup>和杨培岭等<sup>[7]</sup>推导出了基于颗粒质量分布的分形维数表达式。虽然现在国内很多研究均采用此模型<sup>[8-10]</sup>, 但是由于该模型是建立在土壤颗粒形状不变和密度相同的假设上的, 因此也引起了很多质疑<sup>[11-12]</sup>。为了避免上述假设带来

的问题, 王国梁等<sup>[12]</sup>利用激光粒度分析仪测定了土壤颗粒的数量分布, 并提出了基于体积分形维数的分形模型。随着数字图像处理技术的发展, 对土壤颗粒数量-大小的直接测定成为了可能, 张季如等<sup>[11]</sup>应用图像处理技术, 统计了显微镜下土壤悬液中土壤颗粒的分布, 并研究了其数量分形特征。上述研究的对象主要是所有的土壤颗粒, 而单独对土壤中砂粒、黏粒或某种物质的研究并不多。Barak等<sup>[2]</sup>曾利用化学手段分离出土壤砂粒, 将其置于白板上并在反射光下拍照, 利用数字图像处理方法研究了砂粒的数量分布, 发现分形维数并不能很好地描述土壤颗粒的分布; 而Bittelli等<sup>[13]</sup>却发现土壤的砂粒部分也具有分形特征。

因此, 本文在上述研究的基础上, 首先根据石英在土壤薄片中的光学性质原位提取石英颗粒的信息, 然后应用基于数量-大小分布的关系研究石英颗粒的分形特征。

### 1 材料与方法

#### 1.1 试验材料

采样点为吉林省公主岭市的农科院长期定位试验田 (43°31'N, 124°48'E), 土壤为黑土, 母质为第四纪

①基金项目: “十一五” 国家科技支撑计划-保护性土壤耕作关键与轮作模式研究项目 (2006BAD1501) 资助。

\* 通讯作者 (lyz@cau.edu.cn)

作者简介: 周虎 (1982—), 男, 山东金乡人, 博士研究生, 主要从事土壤微形态和土壤结构量化研究。E-mail: zhouhu\_1982@126.com

黄土状沉积物,质地为黏壤土。试验设置翻耕 (CT) 和免耕 (NT) 两个处理,用  $100\text{ cm}^3$  环刀采集  $0\sim 5\text{ cm}$ 、 $10\sim 15\text{ cm}$  和  $20\sim 25\text{ cm}$  3 个层次的原状土壤样品,每处理 3 个重复,共 18 个样品。将原状土样在实验室内风干,通过浸渍、固化、切片和磨片等过程制作成厚度为  $30\text{ }\mu\text{m}$  的  $4.5\text{ cm}\times 4.5\text{ cm}$  的土壤薄片<sup>[14]</sup>。在 Olympus 偏光显微镜下观察薄片,并用 Olympus DP70 数码相机在正交偏光下拍摄  $0^\circ$ 、 $15^\circ$ 、 $30^\circ$ 、 $45^\circ$  和  $90^\circ$  等不同角度的照片,照片为 RGB 模式,分辨率为  $4.5\text{ }\mu\text{m}$ ,大小为 2040 像素 $\times$ 1536 像素,存储为 JPEG 格式。

## 1.2 图像处理和石英颗粒信息提取

通过微形态观察,土壤薄片中原生矿物主要为石英和长石,且石英含量大于 95%,所以本文将薄片透明矿物均认为是石英,利用正交偏光下土壤薄片照片提取石英信息。首先利用 Matlab 软件将 RGB 图像转

换为灰度图像,然后利用目视法选择阈值,将图像转化为二值图像,其中白色区域为石英。由于石英的消光现象,在不同角度下对土壤薄片的同一区域拍摄的照片中石英颗粒的分布和数量有明显不同(图 1)。将  $0^\circ$ 、 $15^\circ$ 、 $30^\circ$ 、 $45^\circ$  和  $90^\circ$  下的照片二值化后进行叠加,石英的含量明显提高。因为石英 4 次消光,所以将  $0^\circ$  和  $45^\circ$  的二值照片叠加后,石英含量达到总量的 90%,为了降低工作量,采用  $0^\circ$  和  $45^\circ$  的照片叠加生成的新的图像用来提取石英信息。由于薄片定向的黏粒矿物以及拍照过程可能会带来一些噪声,应用数学形态学方法去除了二值图像中粒径小于 2 个像素的斑点。图 2 仅提供免耕处理和翻耕处理各一个采样点(免耕 1 和翻耕 1)处理后的 6 张图像。最后利用 Sigma scan Pro5 软件统计各级的石英颗粒大小、数量和形状信息。

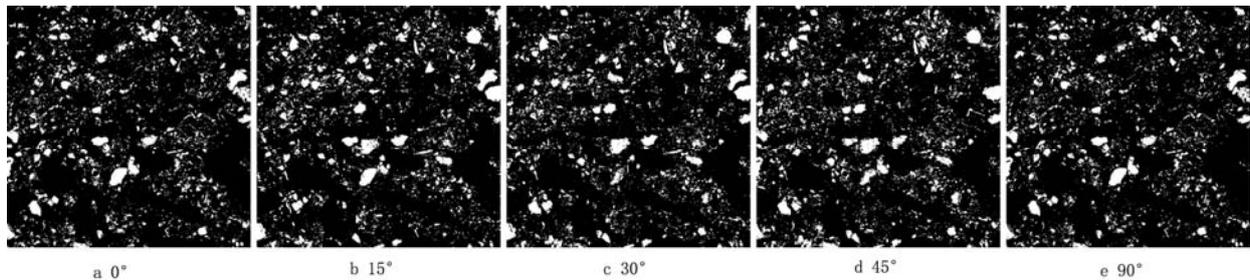


图 1 不同角度下土壤薄片正交偏光的二值化图像

Fig. 1 Binary images of soil thin sections under cross polarized light at five different angles

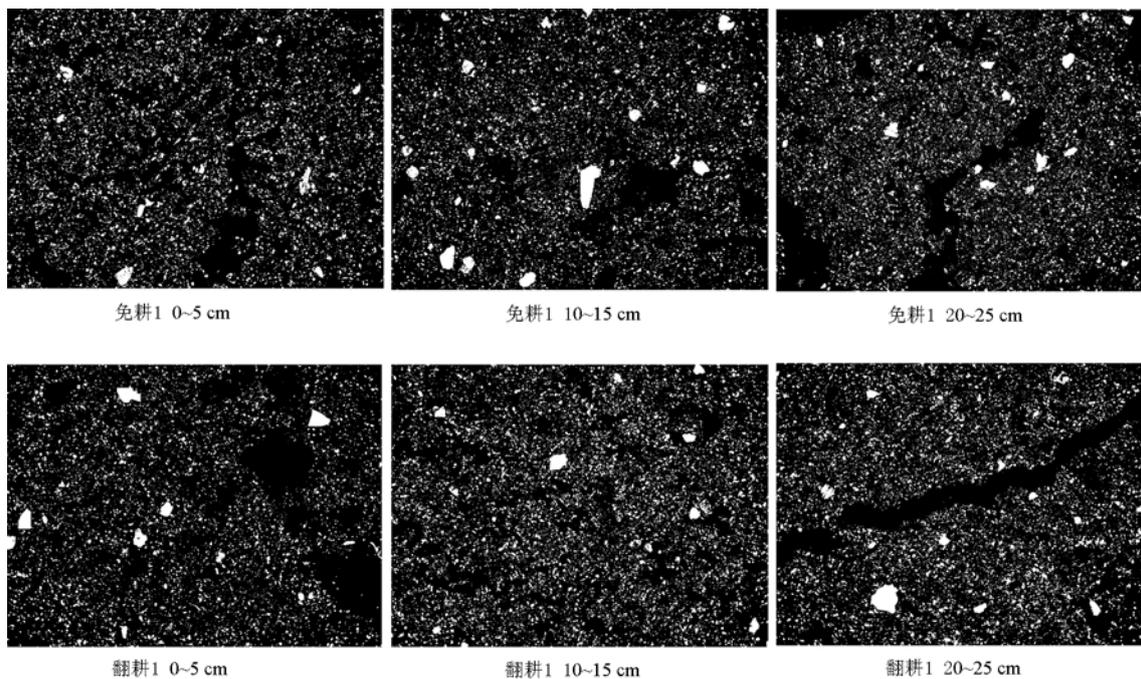


图 2  $0^\circ$  和  $45^\circ$  土壤薄片二值化后相加生成的图像

Fig. 2 Composite images of binary images under  $0^\circ$  and  $45^\circ$

### 1.3 分形模型

如果土壤薄片石英颗粒数量-大小分布具有分形特征，则在研究尺度范围内有<sup>[15-16]</sup>：

$$N(r \geq R) = cR^{-D} \tag{1}$$

式中， $N(r \geq R)$ 为粒径大于  $R$  的颗粒的数量， $c$  为一常数， $D$  为分形维数。

在研究尺度内的颗粒总数记为  $N_T$ ，最小粒径为  $R_{min}$ ，则根据 (1) 式，有：

$$N_T = N(r \geq R_{min}) = cR_{min}^{-D} \tag{2}$$

将 (2) 式代入 (1) 式，得到：

$$\frac{N(r \geq R)}{N_T} = \left(\frac{R}{R_{min}}\right)^{-D} \tag{3}$$

对 (3) 式两边取对数，可得：

$$D = -\frac{\log\left(\frac{N(r \geq R)}{N_T}\right)}{\log\left(\frac{R}{R_{min}}\right)} \tag{4}$$

根据 (4) 式，将测得的数量-粒径分布数据取对数后利用最小二乘法拟合，即可获得  $D$  值。

## 2 结果与讨论

### 2.1 薄片石英颗粒信息提取和石英颗粒的基本特征

由于应用数学形态学方法去除了二值图像中粒径小于 2 个像素的斑点，故所统计的石英颗粒最小粒径约为 13.5  $\mu\text{m}$ ，大致相当于土壤质地中的砂粒部分。在照片区域 (约 0.9 cm  $\times$  0.7 cm) 内，石英颗粒数量在 7 541~13 814 之间，最大粒径在 300~500  $\mu\text{m}$  之间。石英颗粒的形状因子差别较大，大部分粒径颗粒形状因子在 0.7~1.0 之间，磨圆度较好；仅部分大粒径形状

因子  $< 0.5$ ，观察显示是由于大颗粒石英风化破碎而形成不规则形状。石英颗粒面积占薄片面积的比例在 8.67%~22.40% 之间。

### 2.2 石英颗粒数量-大小分布的分形特征

很多研究表明土壤颗粒分布具有分形特征<sup>[5, 7-10]</sup>，Bittelli<sup>[13]</sup>则发现土壤颗粒在砂粒、粉粒和黏粒部分服从不同的幂率。本文研究对象石英颗粒是砂粒的主要部分，通过图像观察可发现在研究尺度内其分布具有明显的自相似性，具有分形特征。

根据 (4) 式对石英颗粒的数量-大小分布应用最小二乘法进行拟合， $R^2$  均大于 0.92，拟和结果较好，说明在研究尺度内石英颗粒的分布具有分形特征。在 Tyler 等<sup>[5]</sup>研究中，土壤颗粒的质量分形维数在 2.0~3.0 之间，数量分形维数则大于 3。张季如等<sup>[11]</sup>应用计算机图像分析技术研究发现土壤悬液的数量分形维数在 2.28~3.07 之间。本研究中石英的数量分形维数在 1.59~2.19 之间，明显小于上述研究，但是同一些岩石破碎的分形维数<sup>[15]</sup>相接近，这可能是由于土壤颗粒组成十分复杂且跨越很多尺度，砂粒和黏粒部分在颗粒大小、物质组成和性质等方面具有很大差异，造成石英颗粒同土壤颗粒分形维数的差异。

### 2.3 石英颗粒数量分形维数与石英颗粒有关性质及耕作的关系

石英颗粒的数量分形维数同石英颗粒平均粒径和总面积均呈负相关 (图 3)。平均粒径越小说明颗粒破碎程度越高，这是由于该区域矿质颗粒遭受的风化和破坏更加严重，具有更高的分维。不同薄片石英颗粒 ( $> 13.5 \mu\text{m}$ ) 的总面积所占薄片比例最低为 8.67%，最高为 22.40%，具有强烈的空间变异。因为石英的抗风化能力很强，因此可以推断这种差异主要是来源于母质，分形维数的变化也反映了母质的风化特征。石英含量高的区域其来源母质抗风化能力强，其破碎分形维数小，也即数量分形维数值低。

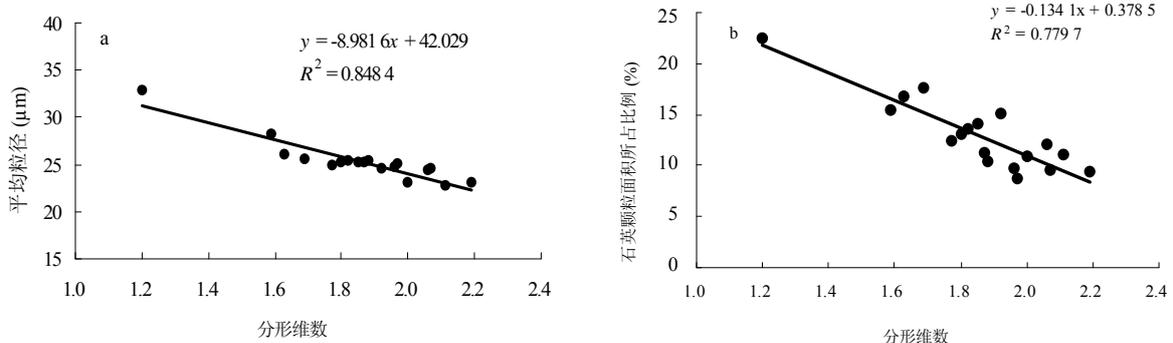


图 3 石英数量分形维数同平均粒径 (a) 和石英总面积所占比例 (b) 的相关性

Fig. 3 Correlation between fractal dimension and average diameter (a), total area percent of quartz grains (b)

在同一耕作处理不同层次之间, 石英颗粒的数量分形维数差异显著。免耕处理 0~5 cm 和 5~10 cm 层次分形维数显著高于 20~25 cm 层次, 说明免耕处理下表层土壤的风化程度高于底层; 而翻耕处理下则呈相反的趋势。免耕和翻耕措施下土壤薄片石英颗粒的数量分形维数在各层次都没有显著差异, 但是在 20~25 cm 层次, 翻耕处理分形维数高于免耕处理(图 4), 说明耕作措施对石英的分布有一定的影响, 会加速土壤矿物质的风化和破碎。

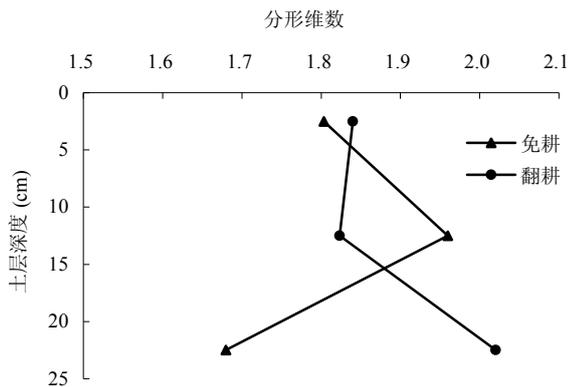


图 4 翻耕和免耕措施下石英颗粒的分形维数

Fig. 4 Fractal dimensions of quartz grains under mouldboard tillage and no tillage

### 3 结论

根据土壤薄片石英颗粒的光学性质, 利用数字图像处理可以提取土壤薄片石英颗粒的信息, 避免了其他分离提取的方法在提取和测定过程中可能引起的误差。而且可以记录石英颗粒在薄片中的位置, 有利于对薄片石英颗粒空间特征的进一步研究。

土壤薄片石英颗粒的数量-大小分布具有明显的分形特征, 可以应用数量分形维数来表征。本研究中分形维数在 1.60~2.18 之间, 分形维数同薄片石英颗粒的总面积和平均半径呈负相关。免耕处理下表层土壤石英颗粒的分布的分形维数高于底层, 而翻耕处理下则呈相反的趋势。免耕和翻耕措施下土壤薄片石英颗粒的数量分形维数 0~5 和 10~15 cm 层次之间没有显著差异, 但是在 20~25 cm 层次, 翻耕处理分形维数高于免耕处理, 说明耕作措施对石英的分布有一定的影响, 会加速土壤矿物质的风化和破碎。

### 参考文献:

- [1] 孙有斌, 鹿化煜, 安芷生. 黄土-古土壤中石英颗粒的粒度分布. 科学通报, 2000(19): 2094-2097
- [2] Barak P, Mcsweeney K, Seybold CA. Self-similitude and fractal dimension of sand grains. Soil Science Society of American Journal, 1996, 60(1): 72-76
- [3] Organ H. Mathematical morphology for analysing soil structure from images. European Journal of Soil Science, 1998, 49(2): 161-173
- [4] Maragos P, Sofou A, Stamou GB, Tzouvaras V, Papatheodorou E, Stamou GP. Image analysis of soil micromorphology: Feature extraction, segmentation, and quality inference. EURASIP Journal on Applied Signal Processing, 2004, 6: 902-912
- [5] Tyler SW, Wheatcraft SW. Fractal scaling of soil particle-size distributions: Analysis and limitations. Soil Science Society of American Journal, 1992, 56(2): 362-369
- [6] Mill H, Gonz PM, Aguilar M, Dominguez J, Cespedes L. On the fractal scaling of soil data. Particle-size distributions. Geoderma, 2003, 117(1/2): 117-128
- [7] 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. 科学通报, 1993, 38(20): 1896-1899
- [8] 黄冠华, 詹卫华. 土壤颗粒的分形特征及其应用. 土壤学报, 2002, 39(4): 490-497
- [9] 李德成, 张桃林. 中国土壤颗粒组成的分形特征研究. 土壤与环境, 2000, 9(4): 263-265
- [10] 程先富, 赵明松, 史学正, 王洪杰. 兴国县红壤颗粒分形及其与环境因子的关系. 农业工程学报, 2007, 23(12): 76-79
- [11] 张季如, 朱瑞赓, 祝文化. 用粒径的数量分布表征的土壤分形特征. 水利学报, 2004, 35(4): 67-72
- [12] 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. 土壤学报, 2005, 42(4): 545-550
- [13] Bittelli M, Campbell GS, Flury M. Characterization of particle-size distribution in soils with a fragmentation mode. Soil Science Society of American Journal, 1999, 63(4): 782-788
- [14] 曹升赓, 金光. 土壤和非固结物质薄片的系统制备方法. 土壤专报, 1988(43): 83-90
- [15] Turcotte DL. Fractals in geology and geophysics. Pure and Applied Geophysics, 1989, 131(1): 171-196
- [16] Mandelbrot BB. The Fractal Geometry of Nature. New York: W.H. Freeman and Co., 1983: 488

## Fractal Features of Quartz Size Distribution in Soil Thin Sections

ZHOU Hu<sup>1</sup>, LI Bao-guo<sup>1</sup>, LV Yi-zhong<sup>1</sup>, ZHENG Jin-yu<sup>2</sup>, LIU Wu-ren<sup>2</sup>

(<sup>1</sup>*Department of Soil and Water Sciences, China Agricultural University, Beijing 100193, China;*

<sup>2</sup>*Jilin Academy of Agricultural Sciences, Changchun 130124, China*)

**Abstract:** The size distribution of quartz grains in soil is important in revealing the source of parent material and in simulating soil structure. In this study digital image processing method was used to extract the information of quartz grains based on their optical characteristics, and fractal dimension was used to characterize the number-size distribution of quartz grains. Soil samples under no tillage and mouldboard tillage were collected and then soil thin sections were made. Quartz grains in soil thin sections were segmented from cross plain light photographs by image analysis, the number, size and shape of quartz grains were measured with Sigma Scan Pro 5 software. The fractal dimension was calculated and its relations with the total number, total area, and average grain size were analyzed. The number-size distribution of quartz grains showed fractal characteristics with fractal dimensions between 1.60 and 2.18. The fractal dimension was negatively correlated with the total area and the average grain size. No significant difference was found between no tillage and mouldboard tillage treatments.

**Key words:** Quartz, Soil thin section, Size distribution, Fractal dimension