

# 渭北旱塬区典型农业耕作土壤微形态分形研究

庞奖励<sup>1,2</sup>, 冯亮亮<sup>1</sup>, 冯振武<sup>3</sup>, 张彩云<sup>1</sup>

(1. 陕西师范大学 旅游与环境学院, 陕西 西安 710062; 2. 中国科学院 地球环境研究所

黄土与第四纪地质国家重点实验室, 陕西 西安 710075; 3. 陕西国际商贸学院, 陕西 咸阳 712000)

**摘要:** 利用分形几何的方法, 对渭北旱塬典型旱作农业土壤微形态的分形特征进行了研究。在对土壤薄片详细观察的基础上, 以土壤微形态数字图像为基础, 利用 SISC IAS V8.0 软件提取了土壤孔隙与粗颗粒的有关参数, 并用计盒维数法计算了其分形维数。结果表明, 土壤孔隙分形维数与孔隙率、孔隙面积和周长呈现较好的相关性(依次为 0.778 74, 0.685 58, 0.814 87), 粗颗粒分形维数与粗颗粒的含量、面积和周长也呈现较好的相关性(相关系数依次为 0.984 18, 0.984 06, 0.930 10)。说明了利用土壤微形态获得的土壤分形维数能够反映土壤结构的分布和变异规律, 也反映了农业耕作活动对土壤的影响。

**关键词:** 分维; 土壤微形态; 孔隙; 粗颗粒; 耕作土壤

文献标识码: A

文章编号: 1000-288X(2009)06-0001-05

中图分类号: S153.61

## Micromorphological Fractal Features of Cultivated Soil in the Northern Weihe Area

PANG Jiang-li<sup>1,2</sup>, FENG Liang-liang<sup>1</sup>, FENG Zhen-Wu<sup>3</sup>, ZHANG Cai-yun<sup>1</sup>

(1. College of Tourism and Environment Science, Shaanxi Normal University, Xi'an, Shaanxi 710062, China;

2. State Key Laboratory of Loess and Quaternary Geology, Institute of Earth Environment, CAS, Xi'an, Shaanxi 710075, China; 3. Shaanxi Institute of International Trade & Commerce, Xianyang, Shaanxi 712000, China)

**Abstract:** The micromorphological fractal features of cultivated soil in the Northern Weihe area are studied using fractal geometry method. With the aid of polarizing microscope and SISC IAS V8.0 software, micromorphological features of the cultivated soils are observed. Void and coarse grain features and the fractal dimension of the cultivated soils are analyzed and calculated using the box-counting method. Results show that void fractal dimension has a good relativity with porosity, void area, and void perimeter, with the correlation coefficients being 0.778 74, 0.685 58, and 0.814 87, respectively. Coarse grain fractal dimension takes on a good relativity with area ratio, coarse grain area, and coarse grain perimeter, with the correlation coefficients being 0.984 18, 0.984 06, and 0.930 10, respectively. The fractal dimensions of soil micromorphology are able to indicate the distribution characteristics of soil structure and the influences of human cultivation.

**Keywords:** fractal; micromorphology; void; coarse grain; cultivated soil

分形理论是 Benoit 在 1975 年提出的一种探索不规则物质复杂性的科学方法和理论, 尽管它从自然几何学入手, 但近十几年来已推广应用到物理、化学、地学、工程、计算机等领域。自分形理论被应用于土壤(一种在组成、形态和性质上均十分复杂的自然体)学研究以来亦取得了长足发展。例如, Tyler 等<sup>[1,2]</sup>通过研究发现, 土壤粒径分布表现出明显的分形特征。王国梁等<sup>[3]</sup>等不仅提出土壤中颗粒体积分形维数的数学模型, 并用其探讨了不同土地利用土壤中颗粒体积分形维数的时空变化规律。但是, 这些研究主

要以激光粒度仪或沉降法获得的土壤粒度数据(如粒径、体积等)为基础, 运用有关数学模型来推算孔隙维数, 对于粒度维数的土壤学意义缺少十分清晰的解释或阐述的深度有限, 也较为抽象, 影响了其推广。

随着分形理论的发展及其计算模型的不断完善, 和以计算机为基础的数字图像技术的发展, 一些学者试图将计盒维数模型运用于土壤结构及其空间变异的研究并对其物理意义进行了较深入的解读, 使得这方面的研究取得很大进展。例如, 李德成等<sup>[4-8]</sup>将 CT 扫描图像技术运用于土壤孔隙研究当中, 在此基

基础上探究了基于图像像素点覆盖的计算图像维数的方法,并提出计盒维数的具体算法。杨书申等<sup>[9-10]</sup>利用 Matlab, Visual Basic 等语言设计了实现计盒维数的方法,这使二值图像维数的计算大为简化。目前,利用土壤微形态影像提取的有关数据(如孔隙的大小、面积、周长、孔隙率等),探讨土壤分形维数及其在空间变异特征以及物理意义的研究成果鲜见报道。本文通过对关中东部典型耕作土壤微形态(主要是土壤孔隙和粗颗粒)分形的研究,试图将分形理论引入土壤微形态研究,继而探讨利用分形理论来研究土地利用的相关问题。

## 1 研究材料与方法

### 1.1 研究区域

关中地区东部的渭北旱塬区(34°13′—35°52′N, 108°58′—110°35′E),黄土台塬地貌十分发育,塬面一般比较平坦。区内属暖温带大陆性季风气候,四季分明,年总降水量的60%以上集中在6—9月,年均降雨量550 mm。年均气温11.5℃,≥10℃的积温为2700℃~4000℃,年无霜期170~228 d,光热可满足农作物一年两熟的需要<sup>[11]</sup>。区内较平坦的地形条件和适宜的气候条件均适合于旱作农业发展,因此该区域是中国重要的旱作农业发源地和现代重要的旱作农业区。长期以来,区内栽种的农作物主要为小麦和玉米,农业耕作活动主要是小麦和玉米种收前后的施肥、翻耕等活动,区内缺少灌溉条件,农业用水主要来源于天然降水。由于长期的农业生产活动,区内发育典型的土垫旱耕人为土<sup>[12]</sup>(发生学分类中称“瘠土”<sup>[11,13]</sup>)。

### 1.2 研究材料和实验方法

在渭北的黄土塬面地区,地形平坦,因此塬面地区的自然和气候环境变化不大(可视为基本相同)。从前人研究资料<sup>[11,13]</sup>和本文实地调研可知,在塬面地区,旱作农业的耕作和管理方式以及主要农作物种类长期基本保持稳定,变化十分有限,即土地利用类型和强度是相同的。本研究选择合阳县白眉村(BMC)土壤剖面为研究对象,该剖面位于塬面地区(35°19′51.4″N, 110°18′40.7″E,海拔590 m),其土地利用方式属于典型长期旱作农耕地,因而认为其可以作为研究区内农业耕地的典型代表,具有典型意义。

采样时间在春季,在农田内挖100 cm×100 cm×110 cm样坑,去掉地表5 cm松散层,从上向下连续采集用于微形态分析的块样(其中65 cm以上以5 cm间隔采样,65 cm以下以10 cm的间距连续采样)。由于农业耕作活动对土壤的直接影响深度很难超过50 cm,故此次采样深度设计为100 cm。土壤样

品自然风干后,采用真空换气法进行固化<sup>[14,15]</sup>,薄片在西安地质矿产研究所磨制。土壤薄片在偏光显微镜(Leica-DMRX)下观察,在详细观察土壤孔隙及粗颗粒特征基础上,采集土壤微形态数字图像(图像采集过程中,利用数字图像无缝拼接技术将相邻多张图像进行拼接,形成较大视域的影像)。土壤微形态有关数据(主要是孔隙的面积、周长、孔隙率、计盒维数,粗颗粒的面积、周长、计盒维数等)在SISC IAS V8.0软件下计算获得。用SISC IAS V8.0软件对(正交偏光下采集的)土壤微形态数字图像进行二值分割,因为土壤孔隙呈完全黑色(阈值下限明确),而粗颗粒有多种矿物构成(不同矿物干涉色不同),其颜色变化颇大,而阈值与色度等有关,故其阈值有一定变化。为了确保孔隙和粗颗粒被精确选取,对孔隙和粗颗粒单元分别进行选取,以便计盒维数求取。

### 1.3 维数实现方法

自然界中多数物体可用直线、圆、球等规则的形状来描述,但也存在着许多极其复杂的形状是不能用经典的欧氏几何所能描述的(如土壤孔隙不是圆,其边缘也不是圆、土壤粗颗粒接近圆,仍不是圆等等)。分形几何学就可以用来描述诸如上述的一些复杂的无规律物体的特征,并用相似维数、容量维数、信息维数、关联维数、广义维数等来表述。但实践中发现,在应用分形理论解决和描述一些实际问题时,对于维数的计算仍很困难。因此,有人提出了数据获取相对简单的计盒维数概念。计盒维数的定义是:取边长为 $r$ 的小盒子,覆盖分形体,由于分形体存在裂缝或裂隙,有的盒子是空的,而有的盒子是非空的,于是我们将非空盒子的数目记作 $N(r)$ ,在 $r \rightarrow 0$ 的过程当中,将得到的一系列的 $r-N(r)$ 值,作双对数图 $\lg N(r) - \lg r$ 后,若满足关系式(1),即具有分形特征。

$$-D = \lim_{r \rightarrow 0} \frac{\lg N(r)}{\lg r} \quad (1)$$

式中: $D$ ——分形体的计盒维数。其计算过程是:以尺寸维 $L$ 的网格覆盖在分形图上,计数图形占据的网格数 $N$ ,在缩小网格尺寸 $L$ 的情况下,统计不同尺寸的网格数目 $N(L)$ ,然后将一系列 $N(L)$ , $L$ 数据做双对数 $\ln N - \ln L$ 曲线图;其中直线部分,反映 $N$ , $L$ 之间存在幂率关系: $\exp(-D)$ , $-D$ 即斜率, $D$ 就是图形的维数,由于分形多在特定的标度范围存在,而双对数图中,直线部分 $L$ 的取值范围就是分形特征所对应的标度区间。

相对其它种类的维数而言,计盒维数算法较容易,易于实现,因此在这方面得到广泛应用。数字图像的发展为计盒维数的实现提供了有利条件,因为数

字图像的最小像元就是像素,因此使用的网格的最小尺寸就是一个像素,最大尺寸就是整幅图像。在特定图幅中,大尺寸的网格所包含的实际信息较小,常常通过适当减小最大网格尺寸,增加信息量。这就使利用土壤微形态数值图像提取土壤粗颗粒及孔隙的计盒维数数据变为可能。利用 SISC IAS V8.0 软件获得的土壤孔隙计盒维数数据是否合理,需要验证。本研究利用该软件对直线、矩形、科赫曲线(5 级)、谢尔宾斯基线、康托迷宫等规整几何图形的分维值进行了提取,并将提取的结果与这些规整几何图形的理论分维值数据进行对比(表 1),结果发现,实际值和理论的误差很小( $-1.7878\% \sim 1.21\%$ ),可满足要求。这说明本研究用 SISC IAS V8.0 软件获得土壤孔隙维数数据是可信的。

表 1 实际测量的分形维数与理论值的比较

有规分形图形	分维计算值	理论值	相对误差/%
直线	1.012 1	1.000 0	1.21
矩形	1.984 3	2.000 0	- 0.785
科赫曲线(5 级)	1.259 7	1.261 9	- 0.174 34
谢尔宾斯基线	1.576 7	1.585 0	- 0.523 66
康托迷宫	1.598 7	1.627 8	- 1.787 69

## 2 实验结果

野外实地观察和室内实验数据显示,耕作土壤(BMC 剖面)中不同诊断层在颜色、结构构造及理化性质上有明显差异(表 2)。

表 2 BMC 土壤剖面理化特征

土层代码	颜色和结构	CaCO <sub>3</sub> / (g · kg <sup>-1</sup> )	TOC/ (g · kg <sup>-1</sup> )	pH	磁化率/ 10 <sup>-8</sup> SI	粒度/(g · kg <sup>-1</sup> )		
						2 000~ 50 μm	50~ 2 μm	< 2 μm
Ap1	浊橙色, 10YR5 /3, 粉黏土质地, 团粒状结构, 疏松多孔。	92.3	8.0	8.4	122.0	88	745	167
Ap2	浊棕色, 7.5YR6 /4, 粉黏土质地, 块状结构, 中等数量孔隙。	83.9	6.0	8.5	117.7	73	738	189
Bt	棕褐色, 10YR7/4, 壤黏土, 棱柱状结构, 紧实, 团粒数量较少。	63.3	6.8	8.4	134.3	81	723	196

注:表中数据为平均值;TOC 为总有机碳。

农耕土壤孔隙分形维数  $D_{p1}$  变化范围为 1.621 17 ~ 1.783 54, 平均分形维数为 1.697 79。Ap1 层(5—20 cm)平均分形维数为 1.744 73, 高于 Ap2 层(20—40 cm)的平均维数 1.710 04。

从图 1 看,农耕土壤剖面中,土壤孔隙率、孔隙面积、孔隙周长与土壤孔隙维数的变化趋势几乎一致。相关分析显示,孔隙维数与孔隙率、孔隙面积的相关系数分别为 0.778 74 和 0.685 58, 与周长的相关系数为 0.814 87( $P < 0.001$  或 0.05)。

土壤粗颗粒(粒径指大于 10 μm)分形维数是:  $D_c$  变化范围为 1.731 87~ 1.785 80, 平均分形维数为 1.753 188, Ap1 层(0—20 cm)平均分形维数为 1.746 50, Ap2 层(20—40 cm)的平均维数 1.766 04(图 2)。此外,土壤粗颗粒维数与粗颗粒含量、总面积、总周长的变化趋势几乎一致(图 2),而相关分析也表明,粗颗粒维数与土壤粗颗粒百分含量、总面积、总周长等的相关性较强,相关系数依次为 0.984 18 和 0.984 06, 与周长的相关系数为 0.930 1( $P < 0.001$ )。

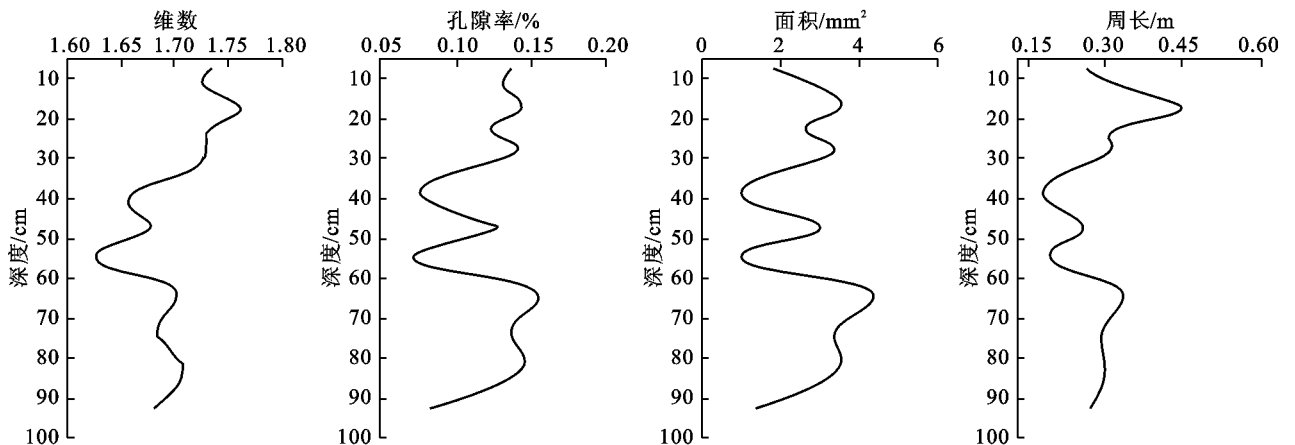


图 1 BMC 旱作农业土壤孔隙分形特征

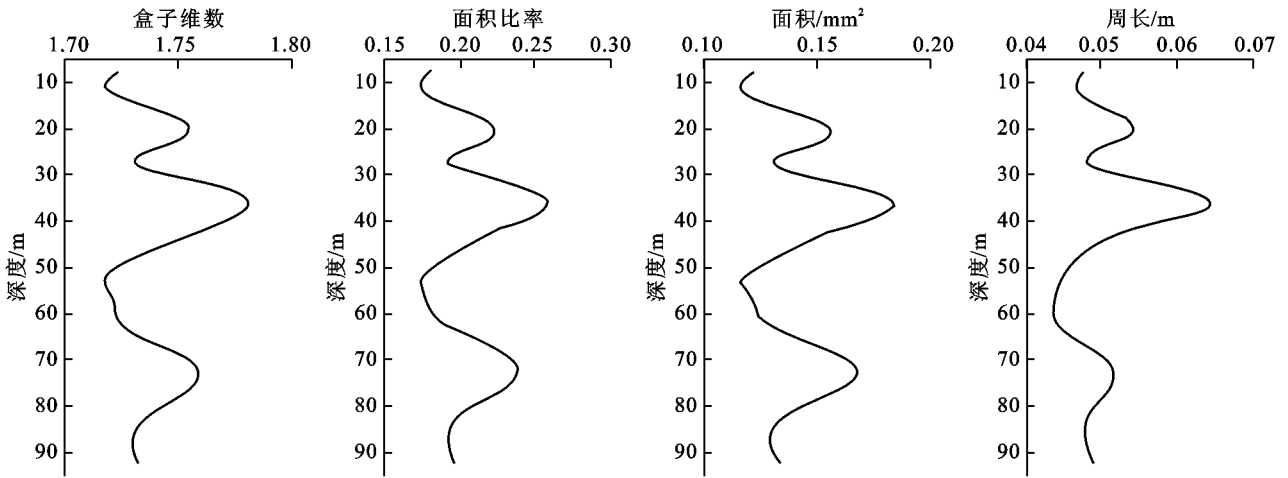


图 2 BMC 旱作农业土壤粗颗粒分形特征

### 3 讨论

从分形几何的原理知道, 计盒维数数值的大小与标度区间内不同尺度盒子数  $N(r)$  与  $r$  比值大小有关。耕作土壤的孔隙计盒维数与孔隙率、空隙的面积和周长有较好的相关性( 相关系数分别为 0. 778 74, 0. 685 58 和 0. 814 87), 这表明土壤孔隙面积、周长、孔隙率是影响和制约孔隙维数分布的重要因素。当土壤孔隙空间分布比较均匀、孔隙率大、大面积孔隙数量较多的时, 在  $r$  趋向变为较小尺度的过程中, 相应的标度区间内的盒子数目  $N(r)$  也就增多, 相应的比值就高, 结果就使得孔隙维数较高。也就是说, 孔隙维数愈高, 它反映了土壤孔隙率大、空间分布较均匀的属性特征。面积相同而形状不同的图形一般可以通过周长差异体现出来, 其分形维数往往不同。土壤作为自然作用( 或与人类共同作用) 的产物, 其永远处于动态平衡中, 其重要特征之一就是孔隙形态极其复杂、变化几乎无规律、时空分异十分的显著。土壤孔隙分形维数与孔隙周长明显正相关, 相关系数( 0. 814 87) 高于孔隙面积和孔隙率( 其相关系数分别为 0. 778 74 和 0. 685 58), 这说明孔隙维数的高低变化也指示了孔隙形状的变化, 直接反映在孔隙周长的大小上。显然, 土壤孔隙维数的大小反映了孔隙形态变化的复杂程度, 是土壤孔隙空间分异程度高低的标志, 它也客观地反映了土壤孔隙的分布特性, 因而也为研究土壤孔隙提供了一个新的途径。

对实验数据分析表明, 耕作土壤粗颗粒的分形维数与粗颗粒面积百分率、面积、周长也出现很高的相关性( 相关系数分别为 0. 984 18, 0. 984 06 和 0. 930 10), 这说明粗颗粒大小、形态和总体分布对粗颗粒分形维数分布有极其重要的影响。不难看出, 粗颗粒计盒维数是反映土壤粗颗粒物质空间分布均匀程度、颗粒大小和物理形态的复杂程度等的一个综合衡量指标, 土

壤粗颗粒的分形间接而客观地反映了土壤中粗颗粒的空间分布与形态特征, 可作为十分复杂的土壤粗颗粒分布的描述提供一种较好的表述参数, 也可以从侧面反映人类耕作等管理方式对土壤结构的影响情况。

土壤粗颗粒和孔隙的分维一定程度上反映了土壤这一结构十分复杂自然体的特征。耕作土壤的  $A_{p1}$  层, 孔隙分形维数( 1. 744 73) 远远大于  $A_{p2}$  层( 1. 710 04), 这反映  $A_{p1}$  层孔隙形状比较复杂, 其空间分布较均匀和面积较大, 这种特征可以在土地利用方式得到印证。长期以来, 旱作农业生产活动直接发生在  $A_{p1}$  层位置, 耕作活动( 主要有小麦和玉米收割前后对土壤进行的犁、耨、耙、施肥、收获农作物等) 频繁且年复一年地周期性发生, 这些活动造成土壤孔隙空间分布、数量、形状等处于变化状态, 变化程度受到上述活动的强度和发生时土壤状况( 主要是水分含量) 的制约。 $A_{p2}$  层作为犁底层, 没有受到有关耕作活动的直接影响, 但在上部发生的各种活动过程中长期受到一定的挤压, 使其孔隙空间大小被压缩和数量明显减少, 其结果使土壤孔隙分形维数相应减小。

与土壤孔隙分形维数相比, 土壤粗颗粒的分形维数分布有所不同,  $A_{p1}$  层分形平均维数( 1. 746 50) 低于  $A_{p2}$  层( 1. 766 04), 说明在空间分布上  $A_{p2}$  层粗颗粒分布均匀程度、致密、形态均匀程度高于  $A_{p1}$  层, 这仍然与农业管理方式有关, 因为  $A_{p2}$  层直接的耕作活动影响相对较小, 具有一个长期的较稳定的环境, 也是黏粒相对聚集、水分含量较高和容重较大的层位, 这种环境有利于矿物的风化, 有利于提高颗粒形态趋于均一化和圆化的程度。

65—100 cm, 相当于  $B_t$  层( 也称古土壤  $S_0$ )。该层形成于全新世大暖期, 大量资料证实, 黄河中游地区在全新世大暖期具有北亚热带的气候特征, 生物茂盛和森林植被占据优势<sup>[16-17]</sup>。木本植物往往具有粗大的根系, 生物活动频繁, 加之较高降雨量产生较强

的淋溶作用, Bt 层基本保持当时的土壤环境特征, 即可在土层(Bt)中形成并留下数量较多的、孔隙大、孔壁较光滑和空间分布较均匀的孔隙, 这些特征可能是土壤孔隙维数增大的根本原因, 也是剖面 65 cm 和 85 cm 附近分形维数较高的原因。

## 4 结论

(1) 以土壤微型态数字图像提取的计盒维数数据为基础, 计算获得的土壤孔隙和粗颗粒分形维数数据是可信的, 其反映了土壤这一复杂性的多孔介质体系的特征, 维数越大, 反映孔隙和粗颗粒分布较为均匀、面积较大、形状更复杂等结构属性。

(2) 渭北旱塬旱作农耕地土壤的分形特征(特别是 Ap1 和 Ap2 层), 是长期以来农业耕作影响的结果, 间接地反映了农业耕作活动的强度、方式和持续时间。

(3) 从土壤微形态中提取的土壤孔隙和粗颗粒分形维数, 可以用来表述和评价土壤微观结构特征。

### [ 参 考 文 献 ]

- [ 1 ] Tyler S W, Wheatcraft S W. Fractal scaling of soil particle-size distributions: analysis and limitations[ J ]. Soil Science Society of America, 1992, 56: 362-369.
- [ 2 ] 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.
- [ 3 ] 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.
- [ 4 ] 李德成, 张桃林, Velde B. CT 分析技术在土壤科学研究中的应用[ J ]. 土壤, 2002( 6 ): 328-332.
- [ 5 ] 冯杰, 郝振纯. CT 在土壤大孔隙研究中的应用评述[ J ]. 灌溉排水, 2000, 19 ( 3 ): 71-76.
- [ 6 ] 冯杰, 于纪玉. 利用 CT 扫描技术确定土壤大孔隙分形维数[ J ]. 灌溉排水学报, 2005, 24( 4 ): 26-28.
- [ 7 ] 冯志刚, 周宏伟. 图像的分形维数计算方法及其应用[ J ]. 江苏理工大学学报: 自然科学版, 2001, 22( 6 ): 92-95.
- [ 8 ] 彭瑞东, 谢和平, 鞠杨. 二维数字图像分形维数的计算方法[ J ]. 中国矿业大学学报, 2004, 33 ( 1 ): 19-24.
- [ 9 ] 杨书申, 邵龙义. MATLAB 环境下图像分形维数的计算[ J ]. 中国矿业大学学报, 2006, 35( 4 ): 478-482.
- [ 10 ] 黄小葳. 分形维数计算程序的设计及其应用[ J ]. 北京联合大学学报, 2004, 18( 04 ): 33-36.
- [ 11 ] 郭兆元, 黄自立, 冯立孝. 陕西土壤[ M ]. 北京: 科学出版社, 1992: 68-110.
- [ 12 ] 龚子同, 陈志城. 中国土壤系统分类[ M ]. 北京: 科学出版社, 1999.
- [ 13 ] 朱显谟. 塿土[ M ]. 北京: 中国农业出版社, 1964.
- [ 14 ] 庞奖励, 黄春长, 查小春, 等. 关中地区两种不同农业管理方式下土壤微形态特征[ J ]. 中国农业科学, 2007, 40 ( 11 ): 2518-2526.
- [ 15 ] 曹升庚, 金光. 土壤和非固结物质薄片的系统制备方法[ J ]. 土壤( 专报), 1989( 43 ): 83-90.
- [ 16 ] 刘东生. 黄土与环境[ M ]. 北京: 科学出版社, 1985.
- [ 17 ] 施雅风. 中国全新世大暖期的气候与环境[ M ]. 北京: 海洋出版社, 1992.