

高玉寒,姚云峰,李 龙,等. 赤峰市敖汉旗 4 种类型土壤机械组成及分形维数的垂直分布特征[J]. 江苏农业科学,2017,45(11):236-239.  
doi:10.15889/j.issn.1002-1302.2017.11.062

# 赤峰市敖汉旗 4 种类型土壤机械组成及分形维数的垂直分布特征

高玉寒,姚云峰,李 龙,郭月峰,汤 军,张美丽

(内蒙古农业大学,内蒙古呼和浩特 010018)

**摘要:**为内蒙古赤峰市敖汉旗土壤的综合评价提供定量化标准和理论依据,以该地区 4 种类型土壤为研究对象分析土壤机械组成的垂直分布特征,并运用分形模型对土壤结构进行分析。结果表明:敖汉旗 4 种不同类型土壤的机械组成在不同土壤类型、不同土层中均表现为沙粒 > 粉粒 > 黏粒,其中黏粒和粉粒的含量随土层深度的增加而增加,沙粒的含量随土层深度的增加而减少。4 种类型土壤分形维数由高到低依次为栗钙土 > 褐土 > 棕壤 > 风沙土,经皮尔逊相关分析得到 4 种类型土壤中黏粒、粉粒、沙粒对土壤分形维数均具有显著性影响。因此,仅凭某一粒级土壤的含量不能说明土壤结构状况。

**关键词:**机械组成;分形维数;土壤类型;垂直分布;土壤综合评价;量化指标

**中图分类号:** S152      **文献标志码:** A      **文章编号:** 1002-1302(2017)11-0236-04

土壤机械组成是构成土壤结构体的基本单元<sup>[1]</sup>,土壤机械组成决定土壤保肥蓄水性能,而且直接关系土壤松紧程度、孔隙数量,进而影响土壤通气、透水等性能,是评价土壤基本性质和形成环境的一个重要指标<sup>[2]</sup>。土壤是一种由不同颗粒组成、具有不规则形状和自相似结构的多孔介质,具有一定的分形特征<sup>[3]</sup>。运用各种分形模型计算土壤颗粒、团聚体和孔隙度的分形维数来表征土壤质地和结构组成及其均匀程度,成为定量描述土壤结构特征的新方法<sup>[4-9]</sup>。研究表明,土壤粒径分布分形维数不仅能够表征土壤粒径大小,还能反映质地的均匀程度以及土壤的通透性<sup>[5]</sup>;分形维数与土壤水稳性团聚体含量有明显的对应关系,可以表征土壤的肥力状况<sup>[6]</sup>;土壤分形维数还可以用来模拟和预测土壤水分特征<sup>[7]</sup>;胡云锋等探讨了风蚀区土壤的分形维数对土地利用变化的影响,提出分形维数可作为土壤退化的指标<sup>[8]</sup>。本研究对赤峰市敖汉旗主要的 4 种类型土壤进行分层研究,分析土壤机械组成的垂直分布特征,并运用分形理论及计算土壤粒径分布分形维数的质量分布模型,定量化描述该地区 4 种类型土壤分形维数的差异及垂直分布特征,以期为该地区土壤综合评价提供一个量化的指标,为水土保持型植被建设提供一定的理论依据。

## 1 材料与方法

### 1.1 研究区概况

收稿日期:2016-03-11

基金项目:国家自然科学基金(编号:31500584);内蒙古应用研究与开发计划(编号:20110732)。

作者简介:高玉寒(1993—),女,蒙古族,内蒙古鄂尔多斯人,硕士研究生,主要从事水土保持与荒漠化防治方向。

通信作者:姚云峰,教授,博士生导师,主要从事水土保持与荒漠化防治教学与研究。E-mail:1414157525@qq.com。

研究区位于内蒙古自治区赤峰市东南部的敖汉旗,地处燕山山脉东段,科尔沁沙地南缘向松辽平原过渡的地段,其地理坐标位于北纬 41°42′~42°02′、东经 119°30′~120°54′。全境南北长 176 km,东西宽 122 km,总面积约为 8 300 km<sup>2</sup>。研究区总体属于温带半干旱大陆性气候,年均降水量在 310~460 mm,集中在 7—8 月,极端最大降水量可达 740 mm,降水自南向北递减,年蒸发量 2 000~2 600 mm,年均气温为 6℃,最高气温 39.7℃,最低气温为 -30.9℃。

研究区内土壤类型主要为栗钙土、褐土、风沙土、棕壤。棕壤分布在敖汉旗的山地垂直带上,一般在海拔 800 m 以上出现。全旗棕壤面积 87 658 hm<sup>2</sup>,占总面积的 10.56%。敖汉旗褐土是华北褐土的延伸,分布在靠南的地上丘陵区,一般在海拔 600~800 m 之间,敖汉旗褐土面积 238 503 hm<sup>2</sup>,占全旗面积的 28.73%。敖汉旗栗钙土分布在中北部黄土丘陵区 and 漫岗丘陵地带,栗钙土面积为 262 823 hm<sup>2</sup>,总面积占全旗的 31.66%。风沙土是干旱半干旱区风积沙母质上发育的土壤,敖汉旗主要分布在中北部老哈河、教来河沿岸阶地或者漫岗坡面上,风沙土面积为 172 835 hm<sup>2</sup>,占全旗面积的 20.82%。4 种类型土壤面积从大到小依次表现为栗钙土 > 褐土 > 风沙土 > 棕壤。

### 1.2 土壤样品的采集与处理

选择研究区 4 种主要土壤类型即栗钙土、褐土、风沙土和棕壤作为研究对象,样地基本情况见表 1。

确定样地后,结合流域 1:5 万地形图、土地利用现状图,在样地内按“S”形布设 4 个样点,每个样点间隔 5 m,确定土壤剖面位置。去除土壤表层的植被与枯落物,挖掘深 1 m,长 1.5 m、宽 1.5 m 的土壤剖面,按照 0~20、20~40、40~60、60~80、80~100 cm 划分 5 层,由下至上分层取样,每层取 3 个重复,以降低采样中系统误差及异常样点的干扰,整个样区共取 64 个土壤剖面 303 个土壤样品。将每个土壤剖面同一层次的土样混合均匀,按四分法去除多余土样装入无菌袋带

回实验室,经晾晒、去除植物根系等杂质后采用英国 Malvern 公司生产的 Mastersizer3000 激光衍射粒度分析仪测定土壤粒度,该粒度分析仪测量范围为 0.01 ~ 3 500 μm,重复测量误

差小于 1%。最后的测试结果以美国制粒径分级标准输出 2 ~ 1、1 ~ 0.5、0.5 ~ 0.25、0.25 ~ 0.1、0.1 ~ 0.05、0.05 ~ 0.002、<0.002 mm。

表 1 敖汉旗 4 种不同类型土壤基本情况

土壤类型	立地因子		年均气温 (℃)	年降水量 (mm)	干燥指数	总面积 (hm <sup>2</sup> )	占全旗面积 (%)
	坡度(°)	海拔(m)					
栗钙土	2.73	549	6.3 ~ 7.5	<400	1.36 ~ 7.50	262 823	31.66
褐土	7.92	695	5.8 ~ 7.2	400 ~ 500	1.36 ~ 1.13	238 503	28.73
风沙土	1.40	472				172 835	20.82
棕壤	2.49	610	4.9 左右	>450	1.04	87 658	10.56

1.3 分形模型

泰勒等提出的用土壤粒径、土壤颗粒质量分布为因子的关系式(1)<sup>[10-11]</sup>,可以更为直观地反映土壤粒径分布分形维数,着种方法用土壤颗粒的质量分布直接计算粒径分布的分形维数来表征土粒直径和质地组成的均匀程度。与传统的用土壤粒径的数量分布来描述土壤的分形特征的方法相比,该方法只须通过土壤颗粒的机械组成分析,便可方便地确定相应的分形维数。

$$D = 3 - \frac{\lg(m_i/m_0)}{\lg(\bar{d}_i/\bar{d}_{\max})} \tag{1}$$

式中:D 代表土壤颗粒分形维数; $m_i$  代表粒径小于  $\bar{d}_i$  的颗粒累积质量; $m_0$  代表土壤各粒径颗粒质量之和; $\bar{d}_i$  代表两筛分粒径  $d_i$  与  $d_{i+1}$  间的粒径平均值; $\bar{d}_{\max}$  代表最大粒径土粒的平均直径。

2 结果与分析

为了分析土壤种类、垂直分布与土壤质地的关系,对照美国土壤质地分类三角表<sup>[12]</sup>,对土壤样品进行质地划分,结果见表 2。

表 2 4 种类型土壤颗粒累积含量

土壤类型 质地		土层颗粒累积含量(%)				
		0 ~ 20 cm	20 ~ 40 cm	40 ~ 60 cm	60 ~ 80 cm	80 ~ 100 cm
栗钙土	沙粒	64.34	63.25	60.31	55.64	54.13
	粉粒	33.74	35.10	37.93	42.40	43.85
	黏粒	1.91	1.64	1.76	1.96	2.02
褐土	沙粒	67.13	64.85	63.04	62.25	59.92
	粉粒	31.58	33.77	35.42	36.20	38.46
	黏粒	1.29	1.38	1.47	1.56	1.63
风沙土	沙粒	82.12	82.11	79.74	77.60	77.19
	粉粒	17.32	17.30	19.55	21.60	21.96
	黏粒	0.57	0.59	0.70	0.80	0.87
棕壤土	沙粒	71.25	72.26	64.60	64.66	63.47
	粉粒	27.73	26.75	34.24	34.16	35.28
	黏粒	1.01	0.97	1.15	1.19	1.27

2.1 不同类型土壤机械组成的垂直分布差异分析

由图 1 可知,栗钙土、褐土、风沙土、棕壤土 4 种类型土壤随土层深度增加土壤机械组成产生变化。栗钙土中的黏粒含量与棕壤中的黏粒含量和粉粒含量在 0 ~ 20 cm 土层中较高,在 20 ~ 40 cm 土层中最低,之后随土壤深度增加,黏粒和粉粒

的含量分别对应增加,在 80 ~ 100 cm 土层都达到最大值。风沙土和褐土中黏粒和粉粒的含量在 0 ~ 20 cm 土层中最低,土壤深度每增加 20 cm,黏粒和粉粒的含量分别对应增加,在 80 ~ 100 cm 土层中含量最高。栗钙土、褐土、风沙土中沙粒的含量在 0 ~ 20 cm 土层最高,只有棕壤中沙粒的含量在 20 ~ 40 cm 土层最高,除此之外,这 4 种类型土壤中沙粒的含量随土层深度的增加均减少,且都在 80 ~ 100 cm 土层中沙粒含量最低。

由图 1 还可得知,栗钙土、褐土、风沙土、棕壤土 4 种类型土壤的机械组成在不同土壤类型、不同土层均为沙粒(67.49%) > 粉粒(31.22%) > 黏粒(1.29%)。但是,相同土层中机械组成的相对比例不同,其中黏粒的含量在 0 ~ 20、20 ~ 40、40 ~ 60、80 ~ 100 cm 土层中均为栗钙土 > 褐土 > 棕壤土 > 风沙土;在 60 ~ 80 cm 土层中为栗钙土 > 棕壤土 > 褐土 > 风沙土。粉粒含量在 0 ~ 20、20 ~ 40、60 ~ 80、80 ~ 100 cm 土层中均为栗钙土 > 褐土 > 棕壤土 > 风沙土;在 40 ~ 60 cm 土层中为栗钙土 > 棕壤土 > 褐土 > 风沙土。沙粒的含量在所有土层中均为风沙土 > 棕壤土 > 褐土 > 栗钙土。在 0 ~ 100 cm 土层中,栗钙土、褐土、风沙土、棕壤土 4 种类型土壤中黏粒的含量表现为栗钙土(1.86%) > 褐土(1.46%) > 棕壤土(1.12%) > 风沙土(0.71%),粉粒的含量为栗钙土(38.60%) > 褐土(35.08%) > 棕壤土(31.63%) > 风沙土(19.54%),沙粒的含量为风沙土(79.75%) > 棕壤土(67.25%) > 褐土(63.44%) > 栗钙土(59.53%)。

综合分析可知,4 种类型土壤机械组成大体相似,但其各粒级间的含量在不同土壤类型及不同土层中有一定的变化范围。在栗钙土、褐土、风沙土、棕壤土 4 种土壤类型中,栗钙土中黏粒和粉粒的含量最高,其次分别为褐土和棕壤土,风沙土中黏粒和粉粒的含量最少;而沙粒的含量则相反,风沙土中沙粒的含量最多,其次分别为棕壤土、褐土及栗钙土。与此同时,4 种类型土壤中黏粒和粉粒的含量随土层加深均呈增大的趋势;沙粒的含量随土层加深均呈减小的趋势。

2.2 分形维数分析

分别以  $\lg(m_i/m_0)$ 、 $\lg(\bar{d}_i/\bar{d}_{\max})$  为纵、横坐标,根据表 2 中的粒径数据得到 4 种不同类型土壤土样  $\lg(m_i/m_0)$  与  $\lg(\bar{d}_i/\bar{d}_{\max})$  的线性回归分析结果(图 2),可以看出土壤作为一种多孔介质,其结构性质具有统计意义上的自相似性,表现出明显的分形特征。

应用土壤分形维数计算公式得到 4 种不同类型土壤不同层的分形维数,4 种类型土壤分形维数平均值在 2.593 ~ 2.696 之间,结果如表 3 所示。

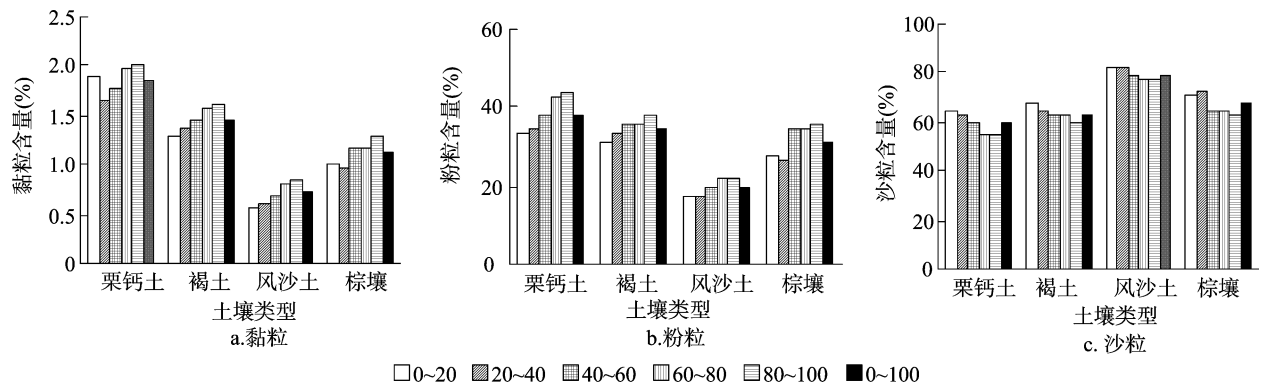


图1 4 种类型土壤机械组成的垂直分布特征

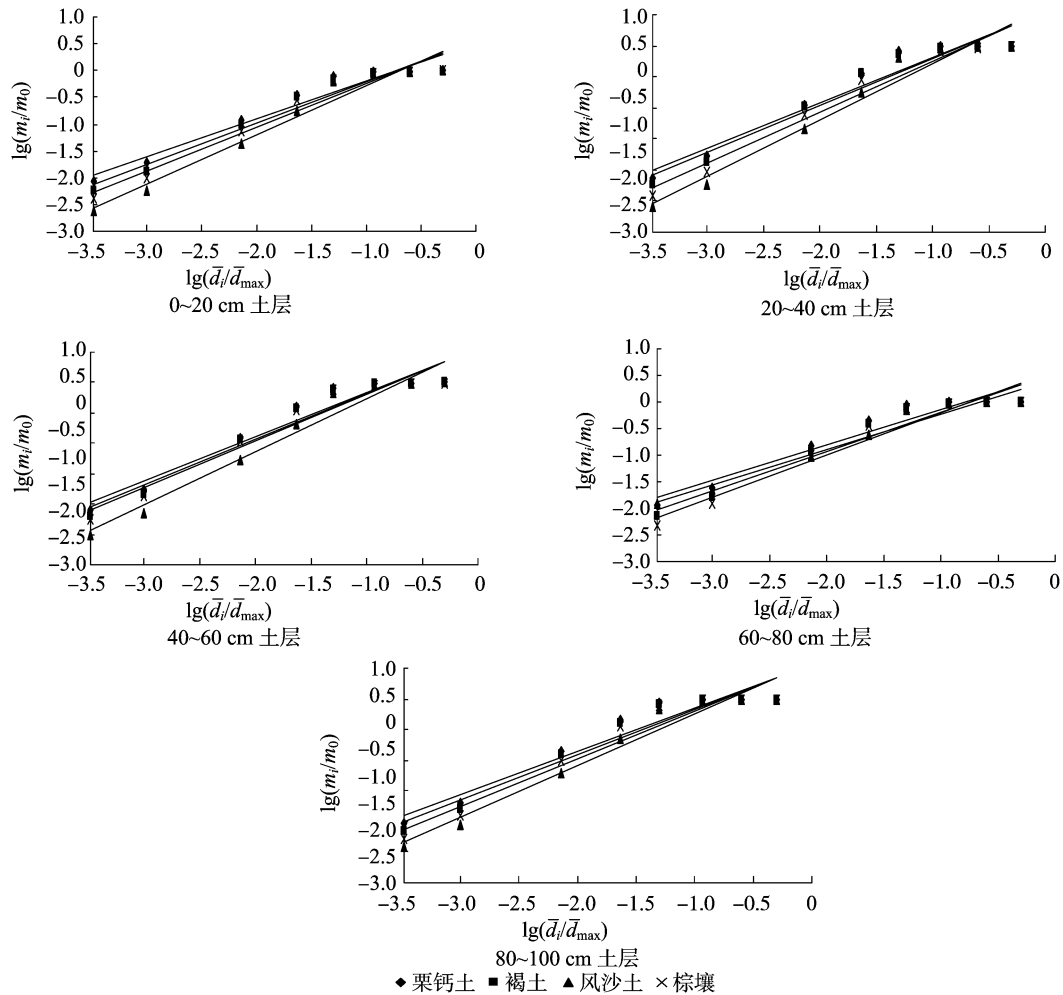


图2 4种类型土壤  $\lg(m_i/m_0)$  和  $\lg(\bar{d}_i/\bar{d}_{\max})$  的关系

表3 4 种类型土壤粒径分形维数

土层深度 (cm)	分形维数			
	栗钙土	褐土	风沙土	棕壤
0 ~ 20	2.671	2.607	2.552	2.599
20 ~ 40	2.678	2.646	2.560	2.569
40 ~ 60	2.693	2.668	2.583	2.650
60 ~ 80	2.725	2.675	2.665	2.650
80 ~ 100	2.715	2.684	2.603	2.657
0 ~ 100	2.696	2.656	2.593	2.625

以土层深度为因素 A、土壤类型为因素 B 进行双因素方差分析,其结果(表 4)表明,敖汉旗 4 种不同类型土壤分形维数因土层深度变化和土壤类型不同而差异显著。

土壤作为一种多孔介质,表现出明显的分形特征。其粒径分布分形维数反映土粒对空间的充能力<sup>[13]</sup>。理论上,没有任何固相填充的孔隙空间的分形维数为 2,没有任何孔隙岩石的分形维数等于 3<sup>[14]</sup>。刘云鹏等研究得到,结构良好的土壤粒径分布分形维数应在 2.750 左右,土壤粒径分布分形维数可以作为土壤结构评价的一个指标,土壤质地越粗,越不易

形成良好的结构,分形维数也较小,土壤质地越细,因包含的小土粒越多,形成的微小孔隙也越多,结构也更复杂,分形维数就越高<sup>[15]</sup>。

表 4 双因素方差分析结果

变异来源	离差平方和	自由度	均方误差	F 值	F <sub>0.05</sub> 值
A	0.015 773	5	0.003 155	10.716 16	2.90
B	0.035 219	3	0.011 740	39.879 97	3.29
误差	0.004 416	15	0.000 294		
总和	0.055 408	23			

由分析结果可知,4 种类型土壤随土层深度增加分形维数均表现出增加的趋势,这与敖汉旗当地的气候条件和人为干预有着密切的联系,由于表层土壤受风蚀、水蚀和人为影响最为频繁,导致表层土壤分形维数较小,而较深层土壤分形维数较大。

而土壤类型对于土壤粒径分形维数的影响也较大,从表 4 可以看出,土壤粒径分形维数随土壤类型不同表现出显著的差异性。从总体上看,敖汉旗 4 种不同土壤粒径分形维数变化由高到低依次为栗钙土(2.696) > 褐土(2.656) > 棕壤(2.625) > 风沙土(2.593),栗钙土的土壤粒径分形维数更接近于 2.750,其次依次为褐土、棕壤、风沙土。土壤粒径分形维数越接近 2.750,表明土壤结构状况越好,既能保证良好的通气透水性,具有一定的保水保肥性能,土壤粒径分形维数越低,表明土壤结构状况最差,表现出的保水保肥能力也较差。

由表 5 可见,经皮尔逊相关分析得到,土壤粒径分形维数与黏粒、粉粒、沙粒含量的相关性依次为沙粒(-0.947) > 粉粒(0.944) > 黏粒(0.707),沙粒、粉粒含量在 0.01 水平上显著相关,相关系数分别达 -0.947、0.944,黏粒含量在 0.05 水平上显著正相关,相关系数达 0.707。表明沙粒、粉粒和黏粒对土壤分形维数均具有显著影响。

表 5 皮尔逊相关分析结果

土壤质地	相关系数			
	黏粒含量	粉粒含量	沙粒含量	分形维数
黏粒含量	1.000			
粉粒含量	0.917 **	1.000		
沙粒含量	-0.926 **	-0.990 **	1.000	
分形维数	0.707 *	0.944 **	-0.947 **	1.000

注:\*\*、\* 表示在 0.01、0.05 水平显著相关。

### 3 讨论与结论

栗钙土、褐土、风沙土、棕壤土 4 种类型土壤在不同土层其机械组成大体相似,但各粒级间的含量随深度的变化有一定的变化。在 0~100 cm 土层中,4 种类型土壤的机械组成中各成分的含量为沙粒 > 粉粒 > 黏粒,其中黏粒和粉粒的含量随土层深度的增加均呈增加的趋势,沙粒的含量随土层深度的增加呈减少的趋势。同一土层不同类型土壤中黏粒、粉粒和沙粒的含量不同。在 0~100 cm 土层中,黏粒和粉粒的含量均为栗钙土 > 褐土 > 棕壤土 > 风沙土,沙粒的含量为风沙土 > 棕壤土 > 褐土 > 栗钙土。

赤峰市敖汉旗 4 种不同类型土壤分布分形维数随土层加深均有增加的趋势,这 4 种类型土壤分形维数由高到低依次

为栗钙土(2.696) > 褐土(2.656) > 棕壤(2.625) > 风沙土(2.593),在该地区栗钙土土壤结构状况较褐土和棕壤较好,风沙土土壤结构状况最差。土壤中黏粒、粉粒、沙粒的含量对土壤分形维数都有显著影响,黏粒和粉粒表现为显著正相关,沙粒为极显著负相关。随着沙粒含量的升高,其土壤粒径分形维数呈现减小的趋势,但沙粒含量太高会导致土壤保水能力下降;随着黏粒含量的升高,土壤粒径分形维数也呈现增大的趋势,但黏粒含量太高会导致土壤通气能力的下降<sup>[16]</sup>。因此,仅凭某一粒级土壤的含量不能说明土壤结构状况。

土壤作为一种多孔介质,其粒径分布分形维数反映土粒对空间的充能力<sup>[13]</sup>,体现了土壤的结构特征,对土壤的通气透水性、保水保肥能力<sup>[17]</sup>及抗蚀能力<sup>[4-9]</sup>等均具有重要的参考意义,对于水土保持林的营造具有重要的指导意义。

### 参考文献:

- [1] 刘玉,李林立,赵柯,等. 岩溶山地石漠化地区不同土地利用方式下的土壤物理性状分析[J]. 水土保持学报,2004,18(5): 142-145.
- [2] 贾三春,徐延文. 土壤环境机械组成特征及其分布规律[J]. 中国环境监测,1997,13(3):26-28.
- [3] Mandelbort B B. Fractal: from chance and dimension[M]. San Francisco: Freeman, 1977.
- [4] 李保国. 分形理论在土壤科学中的应用及其展望[J]. 土壤学进展,1994,22(1):1-10.
- [5] 吴承祯,洪伟. 不同经营模式土壤团粒结构的分形特征研究[J]. 土壤学报,1999,36(2):162-167.
- [6] 赵文智,刘志民,程国栋. 土地沙质荒漠化过程的土壤分形特征[J]. 土壤学报,2002,39(6):877-881.
- [7] Turcotte D L. Fractals and fragmentation[J]. Journal of Geophysical Research,1986,91(2):1921-1926.
- [8] 胡云锋,刘纪远,庄大方,等. 不同土地利用/土地覆盖下土壤粒径分布的分维特征[J]. 土壤学报,2005,42(2):336-339.
- [9] 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):197-205.
- [10] Tyler S W, Wheat - Craft S W. Fractal scaling of soil particle - size distributions; analysis and limitations[J]. Soil Science Society of America Journal,1992,56:362-369.
- [11] 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.
- [12] 李天杰,郑应顺,王云. 土壤地理学[M]. 北京:高等教育出版社,1983.
- [13] 葛东媛,张洪江,郑国强,等. 重庆四面山 4 种人工林地土壤粒径分形特征[J]. 水土保持研究,2011,18(2):148-151.
- [14] Arya L M, Paris J F. A physic empirical model to 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] 刘云鹏,王国栋,张社奇,等. 陕西 4 种土壤粒径分布的分形特征研究[J]. 西北农林科技大学学报(自然科学版),2003,31(2):92-94.
- [16] 曾宪勤,刘和平,路炳军,等. 北京山区土壤粒径分布分形维数特征[J]. 山地学报,2008,26(1):65-70.
- [17] 顾祝军,罗昊. 植被三维结构对水蚀红壤粒径分布及养分含量的作用[J]. 江苏农业科学,2015,43(3):383-387.