

# 北京地区表层土壤分形特征研究

郭中领, 符素华, 王向亮, 张学会

(北京师范大学 地表过程与资源生态国家重点实验室 地理学与遥感科学学院, 北京 100875)

**摘要:** 土壤是一种具有分形特征的复杂系统。分形维数可以反映很多土壤特性。本研究考虑了7种土壤类型、4种土地利用类型,在北京地区选取了30个典型样点,对复杂地理环境表层土壤的分形特征进行了分析,探讨了分形维数与土壤质地、土壤理化性质等方面的关系。研究结果表明,在复杂地理环境条件下,土壤颗粒分形维数总体变异性较弱,分形维数与黏粒含量呈显著正相关,与(砂粒含量+粉粒含量)和黏粒含量的比值呈显著负相关。分形维数可以反映土壤质地,但仅可指示部分重要土壤的理化性质。

**关键词:** 分形维数; 土壤粒径分布; 土壤理化性质

文献标识码: A

文章编号: 1000-288X(2010)02-0154-05

中图分类号: S152.32

## Fractal Dimension Characteristic of Soil Particle-size Distribution in Beijing Region

GUO Zhong-ling, FU Su-hua, WANG Xiang-liang, ZHANG Xue-hui

(State Key Laboratory of Earth Surface Processes and Resource Ecology,

School of Geography, Beijing Normal University, Beijing 100875, China)

**Abstract:** Soil has the fractal characteristic. Soil fractal dimension (SFD) can be used as an important index of soil. In this study, 30 soil samples from 7 soil types and 4 landuses were collected. Soil particle-size distribution, soil bulk density, saturated water content, saturated hydraulic conductivity, and soil organic matter were measured. The SFD was then calculated according to soil particle-size distribution. Results showed that the fractal dimension in Beijing region had a low variation coefficient. Significantly positive correlative relationships between the SFD and clay content and between the SFD and saturated hydraulic conductivity were found. The fractal dimension was negatively correlated with the ratio of (sand content + silt content)/clay content. The SFD can be a potential parameter to reflect soil texture, but is not a rational indicator to reflect soil physical properties under complex geographical environment.

**Keywords:** fractal dimension; particle-size distribution; soil physical-chemical property

分形理论是描述自然界中复杂和不规则几何形体的一种有效工具<sup>[1]</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。研究发现土壤具有一定的分形特性<sup>[2-5]</sup>。Arya<sup>[6]</sup>和Turtotte<sup>[7]</sup>等研究了土壤颗粒的分形现象及其分形维数的计算方法,提出用土壤粒径分布的体积和数量计算分形维数,由于常规实验得到的往往是土壤粒径的重量分布数据,实际应用表明这一方法难以直接利用。鉴于此,杨培岭<sup>[8]</sup>和Tyler<sup>[9]</sup>分别对粒径分布的计算方法进行了改进,提出用土壤颗粒的重量分布直接计算粒径分布的分形维数,来表征土粒直径的大小和质地组成的均匀程度。此后诸多学者采用该方法对土

壤质地和理化性质等与分形维数的关系进行了研究。张世熔<sup>[10]</sup>、廖尔华<sup>[11]</sup>、邓良基<sup>[12]</sup>针对某一土壤类型,对土壤颗粒分形特征进行研究并指出分形维数与土壤质地、理化性质等关系密切;部分学者<sup>[13-16]</sup>则对不同土地利用条件下土壤颗粒的分形特征展开研究,发现土地利用方式对土壤结构等特性影响显著,进而会影响土壤颗粒分形维数的大小;刘建立<sup>[17]</sup>、黄冠华<sup>[18]</sup>对土壤导水性与分形维数的关系做了些探讨,认为分形模型可以预测土壤水力特性。亦有学者<sup>[19-20]</sup>从沙漠化、农田退化等角度对土壤颗粒分形维数的作用进行了讨论,发现分形维数对土地沙漠化具有一定的指示作用。上述研究表明,在实验区土壤类型单一或土

收稿日期: 2009-09-19

修回日期: 2009-11-22

资助项目: 国家重点基础研究发展(973)计划项目“中国主要水蚀区土壤侵蚀过程与调控研究”(2007CB407204); 北京市自然科学基金(8072016)

作者简介: 郭中领(1983—),男(汉族),河北省巨鹿县人,博士研究生,主要从事土壤与环境方面的研究工作。E-mail: gzlzhr@163.com。

通信作者: 符素华(1973—),女(汉族),四川省岳池县人,博士,副教授,主要从事土壤侵蚀与水土保持研究。E-mail: suhua@bnu.edu.cn。

地利用类型较少的条件下, 土壤颗粒的分形维数与土壤质地、水力特性、肥力等土壤特性关系密切。

土壤特性不仅受岩石风化、沉积过程等地质作用的影响, 还受土壤类型、土地利用类型以及人类活动等地理环境因素的影响。然而, 已有的研究所考虑的地理环境变化有限, 且研究区域尺度往往较小。在大区域尺度、复杂地理环境条件下, 土壤各种基本特性与土壤颗粒分形维数的关系如何是一个尚待解决的问题。鉴于此, 本研究考虑了 7 个土壤类型(17 个土壤亚类)、4 种一级土地利用类型(6 种二级土地利用类型), 在北京地区选取了 30 个典型样点, 对大区域尺度表层土壤的分形特征进行分析, 探讨北京地区表层土壤颗粒分形维数与土壤质地、土壤理化性质等方面的关系。

## 1 研究区概况与研究方法

### 1.1 研究区概况

北京地区地处华北大平原的北部, 经纬度范围为  $39^{\circ} 28' - 41^{\circ} 05' N$ ,  $115^{\circ} 25' - 117^{\circ} 30' E$ 。总面积  $16\ 807.8\ km^2$ , 山地占总面积的 62%, 平原占 38%。属暖温带半湿润气候区, 四季分明, 春秋短促, 冬夏较长。年平均气温  $13^{\circ} C$ , 年平均降雨量  $507.7\ mm^{[21]}$ 。依据发生学、自然土壤与农业土壤相统一的分类原则。其中褐土占该区土壤总面积的 64.65%, 潮土占 13.82%, 为该区最主要的两类土壤<sup>[21]</sup>。北部和西部山地分布着大面积林地和灌草地, 面积较大的河谷盆地和山前平原为农地。土地利用类型主要有耕地、林地、园地、草地及城市建设用地等。土壤划分为 8 个土类, 19 个亚类。

### 1.2 研究方法

如前所述, 北京地区土壤分布有 8 个土类, 19 个亚类, 但实地调查发现, 由于人类活动的影响, 草甸沼泽土和潜育水稻土已经不复存在或难以辨认。因此, 本研究实际覆盖 7 个土类, 17 个亚类, 占北京地区土壤总面积的 99% 以上<sup>[21]</sup>。以土壤亚类的地理分布为基础, 并综合考虑土地利用、耕作方式等因素, 于 2007 年 7—8 月间在北京地区选取了 30 个典型样点, 每个样点取表层 10 cm 范围内土样 1 kg 左右。

测定每个样点土样的理化性质, 包括土壤的粒径分布、容重、毛管孔隙度、有机质、饱和持水量以及土壤饱和导水率。土壤的粒径分布采用吸管法; 土壤饱和持水量、毛管孔隙度、容重用  $100\ cm^3$  环刀测定, 每个样点 3 个重复; 土壤有机质含量用重铬酸钾容量

法—外加热法<sup>[22]</sup>测定; 土壤饱和导水率用定水头法<sup>[23]</sup>测定, 水头高为 3 cm, 被测土柱为直径 10 cm, 高度 5 cm 的原状表层土<sup>[23]</sup>, 每个样点 6 个重复。

土壤的分形维数计算采用杨培岭<sup>[8]</sup>的方法, 即用土壤粒径的重量分布表征的土壤分形模型来计算土壤颗粒的分形维数。杨氏算法的核心为土壤颗粒的重量分布与平均粒径间的分形关系式:

$$(\overline{R_i/R_{max}})^{3-D} = M(r < \overline{R_i})/M_0 \quad (1)$$

式中:  $\overline{R_i}$ ——表示两筛分粒级  $R_i$  与  $R_{i+1}$  间粒径的平均值;  $\overline{R_{max}}$ ——最大粒级土粒的平均直径;  $r$ ——筛分粒级直径;  $M(r < \overline{R_i})$ ——小于  $\overline{R_i}$  的累积土粒质量;  $M_0$ ——土壤各粒级质量的总和, 令  $M_i = M(r < \overline{R_i})$ 。由公式(1)可知, 各土壤颗粒的粒径及小于某一粒径土壤重量可通过土壤的粒径分析确定, 然后分别以  $\lg(M_i/M_0)$ ,  $\lg(\overline{R_i}/\overline{R_{max}})$  为纵坐标和横坐标。那么,  $3-D$  就是拟合线性方程的斜率,  $D$  为土壤颗粒分形维数。

## 2 结果与分析

### 2.1 表层土壤颗粒的分形维数

从计算分形维数回归方程的决定系数  $R^2$  来看, 30 个土壤样点中,  $R^2$  最小值为 0.866 9(表 1), 这说明根据杨氏算法得出 30 个实验样点的分形维数具有统计意义。据美国土壤质地分类三角表, 对土壤进行质地划分(表 1)。研究区土壤质地主要为壤土、粉壤土、砂壤土、壤砂土和砂土共 5 种, 其分形维数的均值分别为 2.449 4, 2.467, 2.546 3, 2.436 9, 2.341 9。将 5 种土壤质地归并, 则土壤质地分为壤土和砂土两大类, 壤土分形维数均值为 2.487 7, 砂土分形维数均值小于壤土, 为 2.389 4。这说明土壤质地变细, 土壤分形维数有增大的趋势<sup>[20, 24]</sup>。对于不同土壤亚类, 生草棕壤分形维数最大, 达 2.572 9, 风沙土最小, 仅 2.341 9。统计分析结果(表 2)发现, 北京地区土壤的分形维数介于 2.275 3 与 2.577 8 之间, 极差仅为 0.302 5。30 样点分形维数的标准差  $SD = 0.076 6$ , 变异系数  $C_v = 0.031 1$ 。一般认为  $C_v$  小于 0.1 即为弱变异性<sup>[24]</sup>, 这说明研究区域表层土壤的分形维数变异性很弱。

### 2.2 土壤颗粒的分形维数与粒径分布的关系

土壤粒径分布是指不同粒级的土粒混合在一起表现出的土壤粗细状况。它是土壤最重要的物理性质之一, 直接影响着土壤的肥力状况, 也是土壤分类的重要指标。按美国制土壤粒级划分标准, 计算出土

壤砂粒(0.05~2 mm)、粉粒(0.002~0.05 mm)及黏粒(<0.002 mm)含量,分别对表层土壤各粒级的颗粒含量与分形维数进行相关性分析(图 1),分析结果表明分形维数  $D$  与砂粒含量和粉粒含量都不存在相关性(相关性系数分别为-0.174 5 和 0.045 4,相关性检验概率临界值  $P>0.1$ )。很多研究<sup>[10-14,20]</sup>发现土壤颗粒的分形维数随砂粒含量的增大而减小,本研究中并未发现类似规律。这可能与研究区复杂的地理环境有关。本研究中 30 个样点包含 7 种土壤类型、4 种土地利用类型,土壤粒径分布变化幅度很大,且取样为表层土壤,受人为影响也很大。与黏粒含量相比,砂粒含量更易受外界侵入体以及砾石碎屑等的

影响,从而使表征土壤细粒物质特征的分形维数难以捕捉到砂粒含量的复杂变化规律。分形维数  $D$  与黏粒含量呈显著正相关( $R=0.676\ 2, P<0.001$ );与(砂粒含量+粉粒含量)/黏粒含量呈显著性负相关( $R=-0.805\ 2, P<0.001$ )。这说明分形维数受土壤黏粒含量影响最大,黏粒含量对颗粒分形维数增加的贡献最大<sup>[23]</sup>,且粒级的集中程度对分形维数的数值也会产生重要的影响<sup>[26]</sup>。研究样本中有砂土和壤土两大类,土壤颗粒的分形维数随着土壤质地的粗细程度发生相应的变化,土壤质地越细,分形维数越大;土壤质地越粗,分形维数越小;分形维数可以在一定程度上反映土壤质地。

表 1 实验土样土粒分形维数计算结果

土壤亚类	编号	质地	粒径分布/ %							分形维数 $D$	决定系数 $R^2$
			2~ 0.1 mm	0.1~ 0.05 mm	0.05~ 0.02 mm	0.02~ 0.01 mm	0.01~ 0.005 mm	0.005~ 0.002 mm	< 0.002 mm		
山地草甸土	1	粉壤土	1.67	16.43	12.74	31.14	9.94	9.84	18.25	2.551 3	0.963 0
山地棕壤	2	粉壤土	0.29	19.30	28.88	15.41	13.21	7.30	15.61	2.507 4	0.992 9
生草棕壤	3	粉壤土	0.58	16.60	31.39	8.79	15.29	7.62	19.73	2.572 9	0.990 6
粗骨棕壤	4	壤土	27.01	11.81	17.51	11.59	11.23	10.58	10.27	2.507 8	0.960 8
淋溶褐土	5	砂壤土	46.36	9.51	15.59	9.16	5.01	5.41	8.96	2.532 0	0.994 7
普通褐土	6	粉壤土	3.86	28.85	24.37	14.16	11.48	8.59	8.70	2.392 6	0.990 0
普通褐土	7	粉壤土	2.84	23.33	25.46	12.93	15.62	7.81	12.02	2.459 1	0.985 9
普通褐土	8	粉壤土	3.81	32.50	25.15	15.05	6.72	6.52	10.25	2.422 7	0.998 1
粗骨褐土	9	壤土	29.87	13.24	18.46	9.18	9.94	6.69	12.63	2.555 0	0.992 0
粗骨褐土	10	砂壤土	40.72	18.84	14.76	7.33	4.30	4.25	9.81	2.539 9	0.995 0
粗骨褐土	11	砂壤土	51.06	13.03	13.63	6.59	2.79	3.14	9.78	2.577 8	0.985 1
碳酸盐褐土	12	壤土	27.02	22.22	21.29	6.91	9.49	1.87	11.20	2.496 9	0.980 2
碳酸盐褐土	13	壤土	39.86	10.04	15.45	6.82	10.40	6.72	10.71	2.557 3	0.978 6
碳酸盐褐土	14	壤土	14.90	33.18	12.93	10.76	10.10	10.45	7.68	2.428 4	0.966 3
褐土性土	15	砂壤土	49.19	20.03	7.09	5.78	7.14	2.77	8.00	2.535 4	0.983 5
褐土性土	16	粉壤土	17.58	20.12	20.41	11.90	12.65	7.86	9.48	2.448 3	0.982 2
潮褐土	17	壤土	13.18	29.85	20.71	8.54	12.98	7.02	7.73	2.395 6	0.985 0
褐潮土	18	壤土	29.56	19.13	22.35	8.07	6.96	1.56	12.36	2.524 8	0.972 6
潮土	19	粉壤土	6.44	25.63	36.92	8.43	6.92	2.56	13.10	2.464 5	0.963 2
潮土	20	粉壤土	6.74	26.24	30.71	7.58	10.40	7.83	10.51	2.445 2	0.995 6
潮土	21	粉壤土	9.32	24.30	33.62	7.21	10.23	0.50	14.82	2.496 8	0.954 1
潮土	22	粉壤土	7.25	27.60	24.09	9.55	15.15	4.44	11.92	2.461 4	0.986 4
潮土	23	粉壤土	8.53	24.05	30.20	13.18	7.88	6.36	9.80	2.414 8	0.998 1
潮土	24	粉壤土	8.47	20.95	28.76	4.04	22.05	5.85	9.89	2.421 4	0.959 0
砂姜潮土	25	壤土	13.75	26.24	21.54	11.63	9.45	11.22	6.17	2.362 1	0.963 4
湿潮土	26	粉壤土	1.60	24.92	23.68	4.93	23.98	11.48	9.40	2.424 0	0.934 4
盐潮土	27	壤砂土	49.16	30.68	11.43	0.70	1.91	1.15	4.96	2.436 9	0.873 6
潜育水稻土	28	壤土	14.32	27.54	7.09	34.26	8.05	2.46	6.29	2.275 3	0.939 4
风沙土	29	砂土	41.65	46.08	2.39	3.02	2.43	1.32	3.11	2.339 0	0.871 5
风沙土	30	砂土	41.97	45.79	2.26	3.46	2.06	1.25	3.21	2.344 8	0.866 9

表 2 实验土样土粒分形维数值的统计学特征

平均值	中位数	最大值	最小值	极差	标准差 SD	变异系数 $C_v$
2.463 0	2.460 3	2.577 8	2.275 3	0.302 5	0.076 6	0.031 1

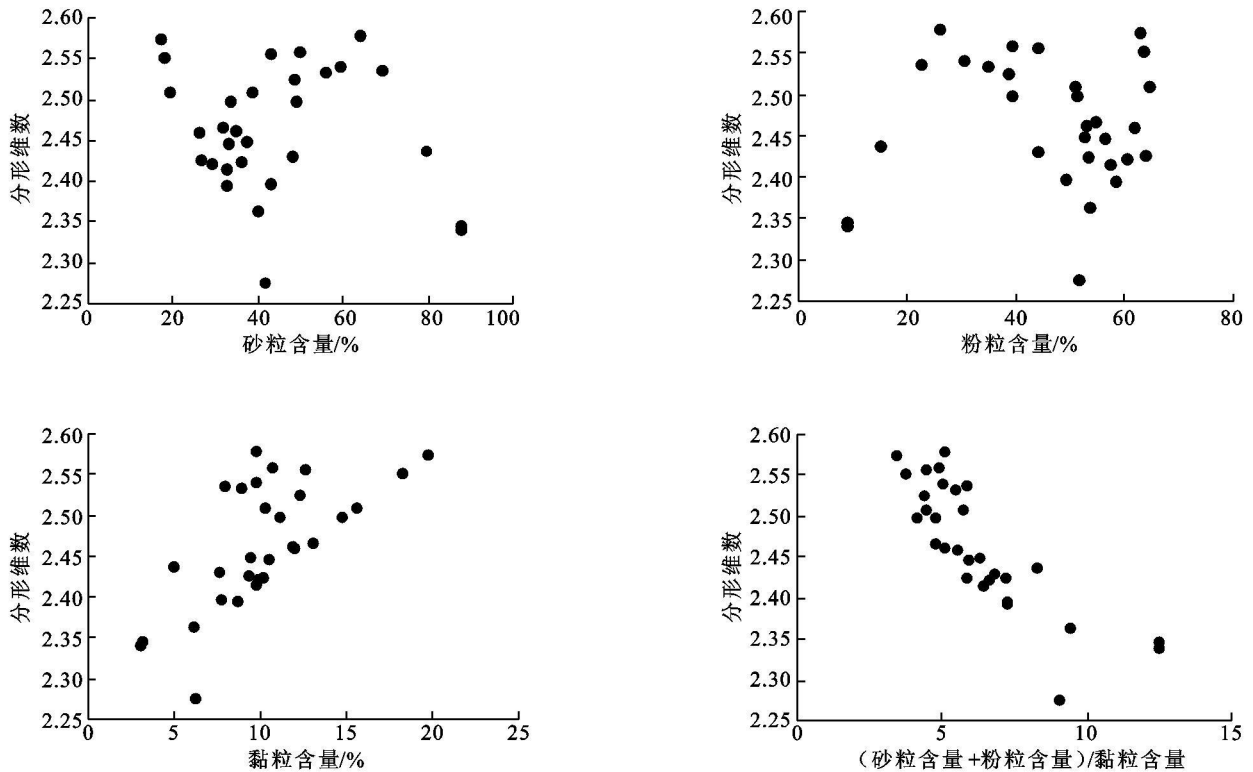


图 1 分形维数与土壤各粒径分布相关的分析

### 2.3 土壤颗粒的分形维数与土壤理化性质的关系

土壤容重是衡量土壤松紧状况的指标;毛管孔隙度是指具有明显毛管作用的孔隙,孔隙直径一般小于 0.1 mm。土壤饱和持水量指土壤全部孔隙充满水时所保持的水量,即土壤所能容纳的最大持水量。它们都是表征土壤物理特性的重要参数。

表 3 描述了分形维数与土壤容重、毛管空隙度、饱和持水量、土壤有机质以及饱和导水率这几个主要土壤理化性质的相关关系,其中,分形维数  $D$  与土壤容重和毛管孔隙度无相关关系,但与有饱和持水量则存在一定的相关性。由于研究中样点布设包括 17 种土壤亚类,涉及到林地、草地、耕地、园地等不同的土地利用方式,即便是耕地和园地,其耕作方式亦不尽相同,且取样为表层 10 cm 左右的土壤,难免受人为干扰很大。从而土壤的松紧状况、土粒的微观排列以及持水性能的变化异常复杂<sup>[24]</sup>。因此,分形维数  $D$  与容重、毛管孔隙度、饱和含水量等土壤物理性质无相关关系或相关性水平很低(表 3)。

计算表明分形维数  $D$  与有机质含量正相关( $R=0.4687, P<0.01$ )。研究区地理环境变化复杂,表层土壤有机质含量极易受枯枝落叶或人工施肥等因素的影响,使得某些样点土壤有机质的累积并不完全遵循自然状态下的累积规律,有机质含量的变化更趋复杂。因此,有机质含量与分形维数的相关性较弱。

表 3 分形维数与土壤理化性质的关系

土壤理化性质	分形维数 $D$		
	相关系数	双尾检验	样本数
容重	-0.175 8	0.352 6	30
毛管孔隙度	0.299 0	0.108 4	30
饱和持水量	0.325 8	0.079 0	30
有机质含量	0.468 7	0.009 0	30
饱和导水率	0.627 9	0.000 2	30

饱和导水率则是指土壤被水饱和时,单位水势梯度下,单位时间内通过单位面积的水量,其对研究土壤水分平衡和水土保持有十分重要的意义<sup>[27]</sup>。经计算分形维数  $D$  与土壤饱和导水率的相关性显著( $R=0.6279, P<0.001$ )。土壤有机质的积累是影响土壤结构的重要因素,土壤有机质含量低,土壤结构不良,土壤导水率就会降低<sup>[28]</sup>。分析发现本研究饱和导水率较高的样点集中分布在林地和草地,这两种土地利用类型表土的腐殖质含量很高,土壤结构良好。而测定饱和导水率的土样为表层 5 cm 的原状土柱,这些样点的表层土壤在自然状态下,经过长期的风化和淋溶作用,土壤质地往往很细,土壤分形维数相对较大。经计算 11 个林地、草地样点土壤饱和导水率与分形维数的相关系数达 0.767 6( $P<0.001$ ),明显高于总体的相关性。耕地、园地样点表层土壤由于强烈地受到人类活动的影响,土壤质地、有机质含量等结构性

质变化规律复杂,土壤饱和导水率与分形维数的相关系数仅 0.126 8 ( $P > 0.1$ )。上述分析表明,分形维数与土壤饱和导水率的良好相关性主要来源于自然状态下样点的贡献,在强烈的人为活动影响下,分形维数应难以反映土壤饱和导水率的变化。

### 3 结论

对北京地区土壤分形特征的研究表明,土壤的分形维数介于 2.275 3~2.577 8 之间且总体变异性很小;土壤分形维数与黏粒含量呈显著正相关,与(砂粒含量+粉粒含量)/黏粒含量的值呈显著负相关。分形维数能够作为反映复杂环境条件下土壤质地的指标;土壤分形维数与饱和导水率相关性显著,可以一定程度反映自然状态下土壤的入渗能力;土壤分形维数与有机质含量呈现正相关关系,可以一定程度反映有机质含量的高低;分形维数与容重、毛管孔隙度和饱和持水量的相关性则较差。综上所述,在北京地区 7 个土壤类型、4 种一级土地利用类型条件下,土壤颗粒分形维数可以反映土壤质地,但仅可指示部分土壤理化性质。

#### [ 参 考 文 献 ]

- [ 1 ] 曼德尔布罗特. 大自然的分形几何学[ M ] 陈守吉, 凌复华译. 上海: 上海远东出版社, 1998: 19-25.
- [ 2 ] Bartoli F, Philippp R, Doirisse M, et al. Structure and self-similarity in silty and sandy soils: The fractal approach[ J ]. *Soil Science*, 1991, 42: 167-185.
- [ 3 ] Rieu M, Sposito G. Fractal, fragmentation, soil porosity and soil water properties application[ J ]. *Soil Science Society of America Journal*, 1991, 55: 1231-1238.
- [ 4 ] 李保国. 分形理论在土壤科学中的应用及其模型[ J ]. *土壤学进展*, 1994, 22 ( 1 ) : 1-10.
- [ 5 ] Nusser S M, Goebel J J. The national resources inventory: A long-term multi-resource monitoring programmer [ J ]. *Environmental and Ecological Statistics*, 1997, ( 4 ) : 181-204.
- [ 6 ] 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.
- [ 7 ] Turcotte D L. Fractal fragmentation[ J ]. *Geography Res.*, 1986, 91 ( 12 ) : 1921-1926.
- [ 8 ] 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.
- [ 9 ] Tyler S W, Wheatcraft S W. Fractal scaling of soil particle-size distribution: Analysis and limitations[ J ]. *Soil Science Society of America Journal*, 1992, 56: 362-369.
- [ 10 ] 张世熔, 邓良基, 周倩, 等. 耕层土壤颗粒表面积的分形维数及其与主要土壤特性的关系[ J ]. *土壤学报*, 2002, 39 ( 2 ) : 221-226.
- [ 11 ] 廖尔华, 张世熔, 邓良基, 等. 丘陵区土壤颗粒的分形维数及其应用[ J ]. *四川农业大学学报*, 2002, 20 ( 3 ) : 242-245.
- [ 12 ] 邓良基, 林正雨, 高雪松, 等. 成都平原土壤颗粒分形特征及应用[ J ]. *土壤通报*, 2008, 39 ( 1 ) : 99-105.
- [ 13 ] 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, 36 ( 2 ) : 3081-3089.
- [ 14 ] 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 ) : 162-166.
- [ 15 ] 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形特征[ J ]. *生态学报*, 2002, 22 ( 2 ) : 197-201.
- [ 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 ] 刘建国, 聂永丰. 非饱和土壤水力参数预测的分形模型[ J ]. *水科学进展*, 2001, 12 ( 1 ) : 99-105.
- [ 18 ] 黄冠华, 詹卫华. 土壤水力特性分形特征的研究进展[ J ]. *水科学进展*, 2000, 11 ( 4 ) : 457-462.
- [ 19 ] 宫阿都, 何毓蓉. 金沙江干热河谷退化土壤结构的分形特征研究[ J ]. *水土保持学报*, 2001, 15 ( 3 ) : 112-115.
- [ 20 ] 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.
- [ 21 ] 霍亚贞, 杨作民. 北京市自然地理[ M ]. 北京: 北京师范大学出版社, 1989, 202-210.
- [ 22 ] 霍亚贞, 李天杰. 土壤地理实验实习[ M ]. 北京: 高等教育出版社, 1986: 6-14.
- [ 23 ] James S, Bas V, Zhang G H, et al. Land-use induced spatial heterogeneity of soil hydraulic properties on the Loess Plateau in China[ J ]. *Catena*, 2003, 54: 59-75.
- [ 24 ] 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.
- [ 25 ] 程先富, 史学正, 王洪杰. 红壤丘陵区耕层土壤颗粒的分形特征[ J ]. *地理学报*, 2003, 23 ( 5 ) : 617-621.
- [ 26 ] 贾晓红, 李新荣, 李元寿. 干旱沙区植被恢复过程中土壤颗粒分形特征[ J ]. *地理研究*, 2007, 26 ( 3 ) : 518-525.
- [ 27 ] 周明耀, 余长洪, 钱晓晴. 基于孔隙分形维数的土壤大孔隙水力特征参数研究[ J ]. *水科学进展*, 2006, 17 ( 4 ) : 466-470.
- [ 28 ] 陈效民, 刘兆普, 徐中祥, 等. 大丰王港实验站滨海盐渍土土壤入渗率的初步研究[ J ]. *南京农业大学学报*, 1994, 17 ( 4 ) : 134-137.