

陕北黄土丘陵沟壑区土壤粒径分布分形特征^①

董莉丽^{1,2}, 郑粉莉³

(1 陕西师范大学旅游与环境学院, 西安 710062; 2 咸阳师范学院资源环境与城市科学系, 陕西咸阳 712000;

3 西北农林科技大学资源与环境学院, 陕西杨凌 712100)

摘要: 将激光衍射技术和分形分析结合, 多重分形分析应用多重分形参数 Rényi 维数谱, 研究土壤粒径分布 (PSD) 分形特征。结果表明: 土壤 PSD 分形维数 D 在 2.28~2.47 之间, D 与土壤黏粒含量线性相关。计算黏粒、粉粒和砂粒分形维数 $D_{黏粒}$ 、 $D_{粉粒}$ 和 $D_{砂粒}$, 三者之间存在 $D_{黏粒} < D_{粉粒} < D_{砂粒}$ 的关系, 分别用 $D_{黏粒}$ 、 $D_{粉粒}$ 和 $D_{砂粒}$ 计算分裂概率, 发现小团粒具有较小的分裂概率。因此, 分裂概率具有尺度依赖性, 并随着土壤粒径的减小而降低。多重分形分析表明, 由 PSD 获取的 Rényi 维数谱为反 S 型递减函数, 与理论的多重分形 Rényi 维数谱相似, 说明土壤 PSD 具有多重分形特征。

关键词: 土壤粒径分布; 分形维数; 分裂概率; Rényi 维数谱; 黄土丘陵沟壑区

中图分类号: S152.3

土壤粒径分布 (PSD) 是表征土壤的主要属性之一, 其影响土壤水力特性、肥力状况, 并与土壤侵蚀和退化直接相关。以往主要应用某几个粒径区间上的粒径质量百分含量研究 PSD, 但这种评价土壤 PSD 的方法包含的信息有限^[1]。美籍法国数学家曼德尔布罗特 (B.B.Mandelbrot)^[2]于 1982 年出版了《自然界的分形几何》。从此, 许多学者应用分形几何学的方法定量研究土壤 PSD 特征^[3-8]。这些研究表明分形模型在描述、量化和模拟土壤属性方面非常有用。以往多数研究集中于计算土壤 PSD 的质量分形维数, 随着激光衍射技术的发展和运用, 可以相对容易并精确地获取土壤颗粒体积分布特征, 王德等^[9]和杨金玲等^[10]利用激光衍射法测定了土壤颗粒体积百分含量, 并计算了体积分形维数, 其中, 杨金玲等^[10]分别计算了颗粒分布的质量分形维数 D_m 和体积分形维数 D_v , 并认为 D_v 也能够像 D_m 一样在一定程度上表征土壤特性。Millán 等^[4]以 0.2 mm 为界, 分别计算了 0~0.2 mm 和 0.2~2 mm D 值; Bittelli 等^[5]分别计算了黏土, 粉砂和砂粒 D 值; 这些研究都表明, 在不同的粒径范围内, 土壤 PSD 具有不同的 D 值。

土壤由于受到不同尺度上若干个形成因子和过程的影响, 因此多重分形分析更适合于描述土壤 PSD 特征^[11-12]。激光衍射技术可获取大量精确的土壤粒径分布数据, 将激光衍射技术和多重分形分析结合研究土

壤 PSD 的例子相对较少^[9,11-12]。其中王德等^[9]利用 D_1 、 D_0 和 D_1/D_0 3 个多重分形参数研究不同土地利用类型下的土壤 PSD 特征, 并认为分形和多重分形参数可作为反映土壤物理性质和土壤质量的潜在性指标。Montero^[12]利用多重分形参数 Rényi 维数谱分析了 20 个土壤样品的 PSD 特征。

本文在参照前人计算模型基础上, 应用 MS2000 激光粒度仪, 测定陕北丘陵沟壑区纸坊沟流域不同土地利用类型下 31 个土壤样品粒径体积百分含量, 利用分形几何学方法分析土壤 PSD 体积分形特征; 研究土壤 D 值和各粒径体积百分含量之间的关系; 分别计算黏粒、粉粒和砂粒分形维数 $D_{黏粒}$ 、 $D_{粉粒}$ 和 $D_{砂粒}$; 根据分裂模型, 计算 $D_{黏粒}$ 、 $D_{粉粒}$ 和 $D_{砂粒}$ 对应的分裂概率 P ; 最后, 将激光衍射技术和多重分形分析相结合, 通过 Rényi 维数谱, 研究土壤 PSD 多重分形特征, 研究结果将有利于土壤物理特性定量化的研究。

1 研究区概况

土壤样品采集于陕西安塞纸坊沟流域, 该区地形破碎, 沟壑纵横, 属黄土高原丘陵沟壑地貌, 暖温带半干旱季风气候, 海拔 1010~1400 m, 年均气温 8.8℃, 年均降水量 549.13 mm。土壤类型以黄土母质上发育的黄绵土为主, 植被类型属暖温带落叶阔叶林向干草原过渡的森林草原带。样点描述见表 1。

①基金项目: 中国科学院西部行动计划项目 (二期) (KZCX2-XB2-05-03)、西北农林科技大学创新团队建设计划项目 (01140202) 和拔尖人才计划项目 (01140102) 资助。

作者简介: 董莉丽 (1979—), 女, 陕西扶风人, 博士研究生, 主要从事植被恢复与土壤质量研究。E-mail: donglili@stu.snnu.edu.cn

表 1 样点描述

Table 1 Description of sample sites

土地利用类型	坡向	坡度	海拔 (m)	经度/纬度	优势种及平均总盖度	主要伴生种	退耕年份
刺槐	西偏南 10°	15°	1 249	109°15'36"E / 36°44'26"N	猪毛蒿和阿尔泰狗娃花, 12%	地锦草, 香青蓝, 苦苣菜	1990
柠条刺槐混交	西偏南 10°	18°	1 307	109°15'38"E / 36°44'30"N	铁杆蒿, 50%	长芒草, 菊叶委陵菜	1977
荒地	西偏东 5°	15°	1 265	109°15'37"E / 36°44'25"N	铁杆蒿, 10%	刺儿菜	2005
刺槐	东偏北 35°	27°	1 294	109°15'43"E / 36°44'26"N	铁杆蒿和芨蒿, 58%	长芒草, 达乌里胡枝子	1977
柠条	西偏南 20°	24°	1 293	109°15'42"E / 36°44'25"N	长芒草, 50%	达乌里胡枝子	1974
刺槐	北偏东 5°	32°	1 290	109°15'41"E / 36°44'29"N	长芒草和铁杆蒿, 38%	阿尔泰狗娃花, 白羊草	1988
油松	北偏东 20°	32°	1 160	109°16'03"E / 36°45'58"N	铁杆蒿, 40%	长芒草, 达乌里胡枝子	1978
农地	北偏东 10°	14°	1 192	109°15'18"E / 36°44'25"N			

注：表 1 中植被拉丁名分别为：油松 (*Pinus tabulaeformis*)；柠条 (*Caragana Korshinskii*)；刺槐 (*Robinia pseudoacacia*)；达乌里胡枝子 (*Lespedeza davurica*)；芨蒿 (*Artemisia giraldii*)；阿尔泰狗娃花 (*Heteropappus altaicus*)；苦苣菜 (*Lactuca indica*)；铁杆蒿 (*Artemisia gmelinii*)；猪毛蒿 (*Artemisia scoparia*)；菊叶委陵菜 (*Potentilla tanacetifolia*)；刺儿菜 (*Cepalanoplos segetum*)；长芒草 (*Stipa bungeana*)；白羊草 (*Bothriochloa ischcemum*)；地锦草 (*Euphorbia humifusa*)；香青蓝 (*Lagochilus ilicipoilius*)。

2 材料与方法

2.1 样品采集

采样地点设在陕西安塞纸坊沟流域试验区，通过对该地区土地利用方式的详细调查，选择不同年限刺槐地、柠条刺槐混交地、荒地、柠条地、油松地和农地为研究对象。2008 年 8 月中旬采集土壤样品。每个样地按 S 型布设 5 个样点，每个样点用土钻分别取 0 ~ 5、5 ~ 10、10 ~ 20 和 20 ~ 40 cm 土壤样品，将每层采集的 5 个样点土壤样品混合均匀，按四分法分 3 袋装，带回实验室进行分析。

2.2 土壤粒度的测定

样品在剔除了植物细根等杂质后风干，称 5 g 过 1 mm 筛的风干土样放入 50 ml 烧杯中，蒸馏水湿润，加入双氧水用玻璃棒搅拌，直至无气泡为止。再加入 5 ml 0.5 mol/L 六偏磷酸钠分散土样，之后在沙浴锅上将土样蒸干，用蒸馏水润湿。用 Malvern Mastersizer2000 激光粒度分析仪（英国 Malvern 公司生产）测定土壤 PSD，该仪器的测量范围为 0.02 ~ 2000 μm，重复测量误差 < 2%。在粒度分析仪中加入样品后，先用超声波分散 30 s，然后再进行土壤粒径体积分含量的测定。

土壤粒径分级以国际制为标准，即 0 ~ 0.002 mm 为黏粒，0.002 ~ 0.02 mm 为粉粒，0.02 ~ 2 mm 为砂粒；在 PSD 多重分形分析中，0.3 ~ 180 μm 范围内土壤粒径按对数间隔划分为 64 级。

2.3 模型描述

土壤是由各种母质风化而成，风化引起最初的固体岩石或沉积物分裂，可通过分形的概念描述自然界中这种分裂的产物。对于不同物体，其数量和尺寸之

间存在幂律关系^[2]。

$$N(r > R) = CR^{-D} \tag{1}$$

式中， D 为分形维数； $N(r > R)$ 是单位体积粒径 r 大于某一给定粒径 R 的总数量； C 为常数。

Tyler 等^[13]在此基础上建立了三维空间的体积分维模型：

$$V(r > R_i) = C_v [1 - (R_i / \lambda_v)^{3-D}] \tag{2}$$

式中， V 是尺寸 r 大于某一特征尺寸 R_i 的土壤颗粒累积体积分含量； C_v 和 λ_v 是描述形状和尺度的常量。

当 $R_i = 0$ 时，

$$V(r > R_i) = V_T = C_V \tag{3}$$

式中， V_T 为土壤颗粒总体积百分含量。

当 $R_i = R_{max}$ 时， $\lambda_v = R_{max}$ ，

$$V(r > R_i) / V_T = 1 - R_i / R_{max}^{3-D} \tag{4}$$

对上式两边取以 10 为底的对数：

$$\lg V(r < R_i) / V_T = (3 - D) \lg R_i / R_{max} \tag{5}$$

$V(r < R_i) / V_T$ 和 R_i / R_{max} 的对数线性回归拟合方程的斜率，即为 $3-D$ ，由此可计算出分形维数 D 。

2.4 多重分形原理

对土壤 PSD 进行多重分形分析，就是用尺度为 r 的相等的“盒子”对整个土壤 PSD 跨度进行划分，由每个盒子的概率测度即体积百分比 P_i 、尺度 r 和给定的参数 q ，可以计算出 Rényi 信息维 D_q ，计算公式为^[9,14]：

$$D_q \approx \frac{1}{q-1} \times \frac{\log \sum_i p_i^q}{\log r} \quad q \neq 1 \tag{6}$$

$$D_q \approx \frac{\sum_i p_i \log p_i^q}{\log r} \quad q = 1 \tag{7}$$

式中, q 是从不同层次上提取系统信息的参量。根据上式, 理论上可以给出无限多个 D_q 定义, 从而得到广义分形维数谱。广义分形维数可以更精确地反映数据集的分布情况, 从而为数据集的描述提供更加有力的工具^[14]。当 $q \gg 1$ 时, 大浓度或高聚集度的信息被放大, 当 $q \ll -1$ 时, 小浓度或低聚集度的信息被放大^[9,12]。当 $q = 0$ 时, D_q 为豪斯道夫维数 D_0 , 即经典分形维数, 提供 PSD 的最基本信息, $D_0 = 1$ 说明各子区域体积百分比都不为零, $D_0 = 0$ 说明各子区域的体积百分比都为零, D_0 值越大代表 PSD 范围越宽, D_0 值越小代表 PSD 越集中^[9]; 当 $q = 1$ 时, D_1 为信息维, 与系统熵相关, D_1 越接近 1, 表明在整个研究尺度上分布越均匀^[12]; 当 $q = 2$ 时, D_q 为关联维数 D_2 。这 3 种维数同时也是在实际中经常用到的几种分形维数^[14]。

在多重分形分析中, 粒径分布范围 (μm) $r = [0.3, 180]$, 划分为 64 个小区域 $r_i = [\varphi_i, \varphi_{i+1}]$, $i = 1, 2, \dots, 64$, 划分时取样间隔为对数等差递增, $\lg(\varphi_{i+1}/\varphi_i)$ 为 1.105, 划分完 64 个小区域粒径范围之后, 需要做一个转换, $\varphi_j = \lg(\varphi_j/\varphi_1)$, $j = 1, 2, \dots, 65$, 粒径分布

范围被重新转换成算数递增分布。经过转换之后的无量纲分布范围 $J = [0.00, 2.78]$, J 被 2, 4, 8, 16, 32, 64 等分后, 格子大小 $r = 2.78 \times 2^{-k}$ ($k = 1, 2, 3, \dots, 6$)。

3 结果与讨论

3.1 土壤粒径体积分布的分形特征及其分裂概率

应用回归分析法, 由公式 (5) 计算出土壤 PSD 体积分形维数 D 值 (表 2), 回归分析所得相关系数在 0.95 ~ 0.98 之间, 线性相关显著。 D 在 2.28 ~ 2.47 之间, 平均值为 2.41, 标准偏差为 0.05。有研究^[15]认为西北黄土区土壤 PSD 的 D 值为 2.55 ~ 2.73, 平均值为 2.66, 高于本文得出的 D 平均值。这主要与激光衍射方法低估土壤中的黏粒含量有关^[10]。本文分别计算黏粒、粉粒和砂粒分形维数, 表示为 $D_{\text{黏粒}}$, $D_{\text{粉粒}}$ 和 $D_{\text{砂粒}}$ (表 2)。 $D_{\text{黏粒}}$ 在 0.19 ~ 1.94 之间, 平均值为 1.31, $D_{\text{粉粒}}$ 在 2.22 ~ 2.37 之间, 平均为 2.32, $D_{\text{砂粒}}$ 在 2.40 ~ 2.65 之间, 平均为 2.50, $V(r < R_i)/V_T$ 和 R_i/R_{max} 的对数线性回归拟合方程的相关系数分别在 0.85 ~ 0.96, 0.99 ~ 1.00 和 0.94 ~ 0.95 之间, 在统计学上达显著水平。

表 2 土壤黏粒、粉粒和砂粒体积百分含量及其分形维数

Table 2 Volume percentages of soil clay, silt and sand and fractal dimensions

样地	层位(cm)	黏粒(%)	粉粒(%)	砂粒(%)	D	R	$D_{\text{黏粒}}$	$R_{\text{黏粒}}$	$D_{\text{粉粒}}$	$R_{\text{粉粒}}$	$D_{\text{砂粒}}$	$R_{\text{砂粒}}$
1990 年刺槐地	0~5	6.24(0.32)	24.50(1.08)	68.31(2.72)	2.38	0.98	1.83	0.95	2.32	1.00	2.42	0.95
	5~10	6.80(0.16)	24.70(0.62)	68.50(0.72)	2.40	0.98	1.69	0.88	2.35	1.00	2.42	0.95
	10~20	6.66(0.03)	24.11(0.14)	69.23(0.16)	2.39	0.98	1.74	0.88	2.35	1.00	2.40	0.95
	20~40	6.60(0.05)	25.08(0.40)	68.32(0.44)	2.39	0.98	1.70	0.88	2.33	1.00	2.43	0.95
1977 年柠条 刺槐混交林地	0~5	7.53(0.05)	26.21(0.17)	66.16(0.30)	2.43	0.98	1.48	0.87	2.37	1.00	2.46	0.95
	5~10	6.68(0.03)	24.26(0.45)	68.79(0.39)	2.39	0.98	1.72	0.88	2.35	1.00	2.42	0.95
	10~20	6.92(0.11)	24.45(0.52)	68.17(0.70)	2.40	0.98	1.69	0.87	2.36	1.00	2.42	0.95
荒地	20~40	6.76(0.05)	24.05(0.16)	69.18(0.14)	2.40	0.98	1.71	0.88	2.36	1.00	2.41	0.95
	0~5	6.28(0.25)	24.01(0.27)	69.72(0.52)	2.38	0.98	1.94	0.96	2.33	1.00	2.41	0.95
	5~10	6.57(0.13)	24.96(0.89)	68.21(0.70)	2.39	0.98	1.69	0.88	2.33	1.00	2.43	0.95
	10~20	6.74(0.09)	24.84(0.17)	68.42(0.22)	2.40	0.98	1.65	0.88	2.34	1.00	2.43	0.95
1977 年刺槐地	20~40	6.52(0.14)	24.94(0.21)	68.54(0.32)	2.39	0.98	1.70	0.88	2.33	1.00	2.43	0.95
	0~5	7.49(0.12)	29.83(0.18)	62.56(0.22)	2.43	0.98	1.39	0.86	2.31	1.00	2.52	0.94
	5~10	7.75(0.19)	29.61(0.27)	62.10(0.26)	2.44	0.98	1.40	0.90	2.32	1.00	2.52	0.95
	10~20	7.65(0.49)	29.50(0.15)	62.86(0.64)	2.43	0.98	1.39	0.85	2.32	1.00	2.52	0.94
1974 年柠条地	20~40	7.23(0.17)	29.14(0.20)	63.63(0.36)	2.42	0.98	1.38	0.86	2.31	1.00	2.51	0.94
	0~5	8.18(0.01)	33.15(0.19)	58.68(0.18)	2.45	0.98	1.01	0.92	2.31	1.00	2.59	0.94
	5~10	8.54(0.20)	31.39(1.27)	55.15(5.34)	2.47	0.98	1.07	0.92	2.34	1.00	2.59	0.94
	10~20	8.98(0.73)	32.74(0.55)	57.13(2.60)	2.47	0.98	1.38	0.91	2.34	1.00	2.59	0.94
1988 年刺槐地	20~40	8.74(0.66)	32.86(0.53)	58.22(1.47)	2.46	0.98	1.41	0.92	2.33	1.00	2.59	0.94
	0~5	7.38(0.17)	30.13(0.12)	62.49(0.28)	2.42	0.98	1.38	0.86	2.30	1.00	2.52	0.94
	5~10	7.81(0.18)	31.29(1.77)	60.90(1.92)	2.44	0.98	0.73	0.92	2.31	1.00	2.54	0.95
	10~20	7.84(0.21)	30.68(0.32)	61.36(0.45)	2.44	0.98	0.79	0.90	2.32	1.00	2.54	0.94
	20~40	7.79(0.32)	31.28(0.91)	60.93(1.21)	2.44	0.98	1.01	0.90	2.31	1.00	2.54	0.94

续表2

1978 年油松地	0~5	7.22(0.18)	28.86(0.30)	63.42(0.67)	2.42	0.98	1.35	0.85	2.32	1.00	2.51	0.95
	5~10	7.65(0.06)	29.69(0.22)	62.60(0.38)	2.43	0.98	1.41	0.86	2.31	1.00	2.51	0.95
	10~20	7.57(0.13)	29.57(0.12)	62.85(0.15)	2.43	0.98	1.37	0.86	2.32	1.00	2.52	0.94
	20~40	8.17(0.27)	32.14(0.16)	59.69(0.39)	2.45	0.98	0.79	0.91	2.31	1.00	2.56	0.94
农地	0~5	5.24(0.13)	33.00(0.15)	49.09(0.73)	2.28	0.95	0.19	0.90	2.22	0.99	2.64	0.94
	5~10	5.54(0.20)	34.01(0.97)	47.04(1.09)	2.29	0.95	0.27	0.91	2.23	0.99	2.65	0.94
	10~20	5.09(0.11)	31.26(1.54)	50.23(0.78)	2.29	0.96	0.26	0.90	2.23	0.99	2.61	0.94

各样地 0~5、5~10、10~20 和 20~40 cm 土壤 PSD 的 D 值分别在 2.28~2.45、2.29~2.47、2.29~2.47 和 2.39~2.46 之间 (表 2)，表层土壤 PSD 的 D 值大小顺序为：1974 年柠条地>1977 年柠条刺槐混交地=1977 年刺槐地>1988 年刺槐地=1978 年油松地>1990 年刺槐地=荒地>农地。1974 年柠条地表层土壤 D 值最高，这主要由于该样地恢复年限最长，柠条长势好，有效地减少了表层土壤细颗粒物质的流失，引起 D 值增加。赵护兵等^[16]小区实验结果也认为灌木地的侵蚀量最小。1990 年刺槐地和荒地表层土壤黏粒含量较低，对应的 D 值也较小，主要由于这两个样地草被稀疏，平均总盖度低，因此在减小细颗粒物质流失方面的作用较小。1990 年刺槐和荒地表层土壤 $D_{\text{砂粒}}$ 较低，分别为 2.42 和 2.41，说明这两个样地在砂粒域和整个粒径范围内细颗粒物质含量较少，侵蚀较严重。除 1977 年柠条刺槐混交地表层 D 值最高外，其余各样地表层 D 值较小。农地土壤 D 值最低，主要由于地面裸露，长期的土壤侵蚀使细颗粒物质大量流失；农地 $D_{\text{砂粒}}$ 最大，表明农地砂粒域中细颗粒含量较其他样地高，这在一定程度上说明了长期耕作对土壤粗颗粒具有细化的作用^[9]。

为揭示 D 值与各粒径含量的关系，绘制 D 值与各粒径含量之间的散点图 (图 1)，由图 1 可知，土壤砂粒含量越高， D 值越小，而黏粒和粉粒含量越高， D 值越大。表明随着黏粒含量的增多， D 值增加，反之， D 值减小，这与王国梁等^[17]研究结论一致。将 3 个粒径体积百分含量与 D 值进行多元逐步回归分析，则 D 值与黏粒 (x_1)、粉粒 (x_2) 和砂粒 (x_3) 回归方程为 $D = 2.285 + 0.027x_1 - 0.001x_3$ ，模型检验达到极显著水平， $R^2 = 0.993$ 。偏回归系数显著性检验结果表明， D 与常数、 x_1 和 x_3 的偏相关关系显著，黏粒含量对 D 值的影响大于砂粒的影响。

土壤是由各种母质风化而成，风化引起最初的固体岩石或沉积物分裂，式 (1) 基于一个立方体的土块逐级分裂为更小土块的自相似性。其假定最初立方体土块边长为 h ，分裂 8 块后，边长为 $h/2$ ，边长为 $h/2$ 的立方体土块进

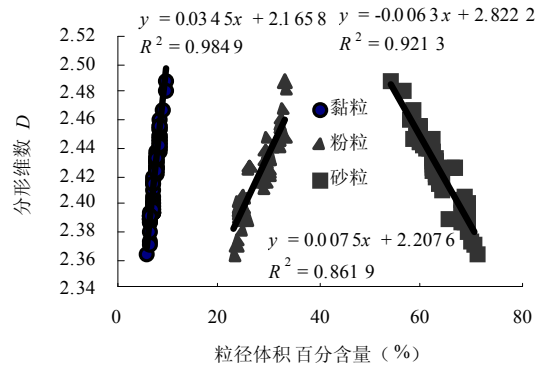


图 1 粒径体积百分含量与分形维数散点图

Fig. 1 Scatter figure of cumulative volume percentages and fractal dimensions

一步分裂，得到边长为 $h/4$ 土块，如此类推^[18]。在这一分裂模型中，存在分裂概率 P ，Prosperini 等^[18]认为分裂概率 P 与 D 之间的关系式为：

$$D = \frac{\log(8P)}{\log(2)} \quad 0 < D < 3 \quad (8)$$

利用 $D_{\text{黏粒}}$ 、 $D_{\text{粉粒}}$ 和 $D_{\text{砂粒}}$ 分别计算分裂概率 P (图 2)，对于所有土壤样品，不同粒径区间具有不同的分裂概率，且存在 $P_{\text{黏粒}} < P_{\text{粉粒}} < P_{\text{砂粒}}$ 的关系。由图 2 可知，分裂概率 P 具有尺度依赖性，并随土壤粒径的减小而降低。Perfect^[19]在土壤和沉积团聚体分裂实验中，也认为其是一种尺度依赖性的过程。

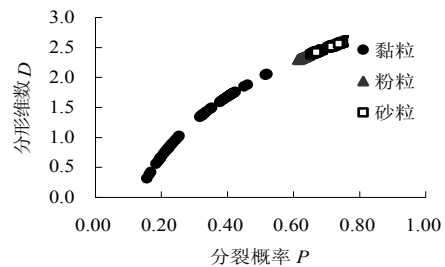


图 2 分形维数 D 和分裂概率 P

Fig. 2 Fractal dimensions D and probabilities P of fragmentations

3.2 土壤颗粒体积分布的多重分形特征

利用式 (6) 和 (7) 计算 Rényi 维数谱 ($-10 \leq q \leq 10$, 增量为 1), 如图 3 所示, Rényi 维数谱为典型的反 S 型递减函数, 所有样品多重分形维数的决定系数 $R^2 > 0.84$ ($-10 \leq q \leq 10$)。 D_0 在 0.93 ~ 1 之间 ($R^2 > 0.999$), D_1 在 0.92 ~ 0.94 之间 ($R^2 > 0.999$)。王德等^[9]研究认为 D_0 在 0.91 ~ 0.97 之间 ($R^2 > 0.995$), D_1 在 0.77 ~ 0.91 之间 ($R^2 > 0.97$), 与本文结果接近, 但 D_1 略低且变化范围大, 这与前者研究区面积大, 土壤样品分布在两个不同的流域, 导致样品 PSD 内部结构差异性较大有关。

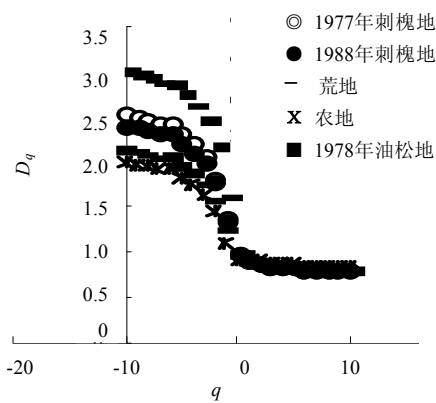


图 3 5 种样地表层土壤 Rényi 维数谱

Fig.3 Rényi dimension spectra for surface soil in five land-uses

除农地外, 其余各样地信息维数 D_1 和关系维数 D_2 与黏粒体积百分含量呈显著正相关, 决定系数分别为 0.78 和 0.83 (图 4), 王德等^[9]得出 D_1 与黏粒含量的相关系数为 0.88, 与本文结论相符。

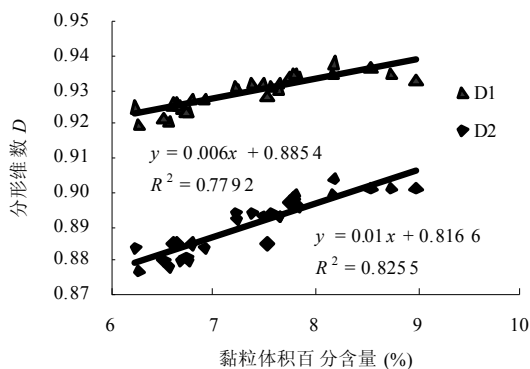


图 4 D_1 和 D_2 与土壤黏粒含量关系

Fig.4 Relationship between D_1 , D_2 and soil clay content

表 3 列举了 1977 年刺槐地、1988 年刺槐地、荒地、农地和 1978 年油松地 5 种样地表层土壤 D_q

($-10 \leq q \leq 10$) 值及其决定系数 R^2 。由表 3 可以看出, 农地土壤 D_0 值最小, 土壤粒径分布范围也最窄, 其余样地土壤 D_0 值相近, D_1 在 0.92 ~ 0.93 之间。如果仅使用 D_0 和 D_1 作为多重分形的参数, 很难区分不同样地土壤 PSD 内部结构的差异。因此, 将激光衍射技术和多重分形分析相结合, 通过 Rényi 维数谱 D_q 说明各样地土壤 PSD 特征。由表 3 和图 3 可以看出, 不同样地 PSD 具有不同的尺度属性。农地土壤波谱最窄, D_q ($q < 0$) 与其余样地之间的差异大, 这主要由于农地地表有大量的灰绿色片状石渣, 并在整个土壤剖面有大量的灰绿色硬块, 可认为农地与其余样地气候条件相同, 但成土母质和生物条件不同, 因此土壤 PSD 特征不同。1977 年刺槐地和 1988 年刺槐地表层土壤 Rényi 维数谱接近, 且 1977 年刺槐地 D_q ($q < 0$) 略高, 1978 年油松地 D_q ($q < 0$) 最高, 荒地 D_q ($q < 0$) 高于农地, 低于 3 种林地, 表明多重分形模型较好地拟合了土壤 PSD 的内部结构, 但 Rényi 维数谱的实用性有待进一步研究。当 D_q 随 q 变化的谱线为直线时, 即 $D_0 = D_1 = D_2 = D_3$, 系统分布遵循单一维数, 并且该分布是一个均匀分布^[20]。由表 3 可知, $D_0 > D_1 > D_2 > D_3$, 另外, 图 3 表示的 Rényi 维数谱与理论的多重分形 Rényi 维数谱^[12]相似, 说明土壤 PSD 具有多重分形特征。

4 结论

(1) 土壤颗粒体积分形维数 D 值介于 2.28 ~ 2.47 之间, 平均为 2.41, 标准偏差为 0.05。 D 值在不同土地利用类型之间变化不大。在土壤剖面的 4 个层次, 表层 D 值较小, D 值最大的土层对应的黏粒含量最高。

(2) 分别计算了黏粒、粉粒和砂粒的分形维数 $D_{黏粒}$ 、 $D_{粉粒}$ 和 $D_{砂粒}$, 且 $D_{黏粒} < D_{粉粒} < D_{砂粒}$ 。 $D_{黏粒}$ 、 $D_{粉粒}$ 和 $D_{砂粒}$ 对应的分裂概率 P 具有尺度依赖性, 并随着粒径的减小而降低。

(3) 土壤粒径分布具有多重分形特征。应用多重分形参数 Rényi 维数谱可分析由激光衍射技术测定的土壤 PSD 特征, 该方法可为以后的数学建模建立基础。 D 、 D_1 和 D_2 与土壤黏粒含量具有显著的线性相关关系, 表明这些分形和多重分形参数可以作为反映土壤物理性质的指标。

表 3 5 个样地 $-10 \leq q \leq 10$ 对应的 D_q 及决定系数Table 3 Values of D_q and determination coefficients (R^2) corresponding to $-10 \leq q \leq 10$ in selected 5 samples

q	1977 年刺槐地		1988 年刺槐地		荒地		农地		1978 年油松地	
	D_q	R^2	D_q	R^2	D_q	R^2	D_q	R^2	D_q	R^2
-10	2.515	0.943	2.404	0.933	2.142	0.938	1.993	0.907	2.985	0.898
-9	2.489	0.943	2.380	0.933	2.120	0.938	1.974	0.907	2.954	0.898
-8	2.459	0.943	2.351	0.933	2.094	0.938	1.949	0.907	2.918	0.898
-7	2.420	0.943	2.315	0.934	2.061	0.939	1.918	0.907	2.872	0.899
-6	2.423	0.945	2.321	0.937	2.075	0.938	1.937	0.92	2.865	0.903
-5	2.304	0.945	2.207	0.935	1.964	0.94	1.826	0.907	2.735	0.9
-4	2.210	0.946	2.121	0.937	1.886	0.941	1.752	0.908	2.625	0.902
-3	2.069	0.95	1.992	0.942	1.770	0.945	1.64	0.911	2.457	0.905
-2	1.833	0.959	1.776	0.952	1.581	0.955	1.45	0.919	2.179	0.913
-1	1.383	0.985	1.367	0.983	1.257	0.983	1.109	0.963	1.625	0.95
0	0.993	1	0.997	1	0.993	1	0.925	0.999	0.993	1
1	0.932	0.999	0.932	0.999	0.920	0.999	0.923	0.999	0.931	0.999
2	0.893	0.996	0.894	0.996	0.877	0.995	0.914	0.998	0.894	0.997
3	0.867	0.994	0.868	0.994	0.852	0.992	0.901	0.997	0.870	0.994
4	0.850	0.991	0.851	0.991	0.838	0.989	0.888	0.996	0.853	0.992
5	0.837	0.99	0.839	0.99	0.828	0.987	0.878	0.995	0.842	0.99
6	0.829	0.988	0.829	0.988	0.821	0.986	0.869	0.994	0.833	0.989
7	0.822	0.987	0.823	0.987	0.815	0.985	0.862	0.993	0.827	0.987
8	0.817	0.986	0.817	0.986	0.810	0.984	0.855	0.993	0.821	0.987
9	0.813	0.985	0.813	0.986	0.806	0.983	0.851	0.912	0.818	0.986
10	0.809	0.985	0.810	0.985	0.803	0.983	0.847	0.992	0.814	0.986

参考文献:

- [1] Martín MA, Rey JM. On the role of Shannon's entropy as a measure of heterogeneity. *Geoderma*, 2000, 98: 1-3
- [2] Mandelbrot BB. *The fractal geometry of nature*. San Francisco: Freeman, 1982: 45-256
- [3] Filgueira RR, Fournier LL, Cerisola CI, Gelati P, García MG. Particle-size distribution in soils: A critical study of the fractal model validation. *Geoderma*, 2006, 134: 327-334
- [4] Millán H, González-Posada M, Aguilar M, Domínguez J, Céspedes L. On the fractal scaling of soil data. Particle-size distributions. *Geoderma*, 2003, 117: 117-128
- [5] Bittelli M, Campbell GS, Flury M. Characterization of particle-size distribution in soils with a fragmentation model. *Soil Sci. Soc. Am. J.*, 1999, 63: 782-788
- [6] 淮态, 庞奖励, 文青, 宋艳. 不同土地利用方式下土壤粒径分布的分维特征. *生态与农村环境学报*, 2008, 24(2): 41-44
- [7] 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. *地理研究*, 2007, 26(3): 518-525
- [8] Wang XD, Li MH, Liu SZ, Liu GC. Fractal characteristics of soils under different land-use patterns in the arid and semiarid regions of the Tibetan Plateau, China. *Geoderma*, 2006, 134: 56-61
- [9] 王德, 傅伯杰, 陈利顶, 赵文武, 汪亚峰. 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. *生态学报*, 2007, 27(7): 3081-3089
- [10] 杨金玲, 李德成, 张甘霖, 赵玉国, 赵文君, 唐先干. 土壤颗粒粒径分布质量分形维数和体积分形维数的对比. *土壤学报*, 2008, 45(3): 413-419
- [11] Miranda JGV, Montero E, Alves MC, González AP, Vázquez EV. Multifractional characterization of saprolite particle-size distributions after topsoil removal. *Geoderma*, 2006, 134: 373-385
- [12] Montero E. Rényi dimensions analysis of soil particle-size distributions. *Ecological Modelling*, 2005, 182: 305-315
- [13] Tyler SW, Wheatcraft SW. Fractal scaling of soil particle-size distributions: analysis and limitations. *Soil Science Society of America Journal*, 1992, 56(2): 362-369
- [14] 闫光辉, 李站怀, 党建武. 基于多重分形的聚类层次优化算法. *软件学报*, 2008, 19(6): 1283-1300

- [15] 陈秉聪, 佟金. 土壤分形与土壤粘附. 世界科技研究与发展, 1999(2):34-36
- [16] 赵护兵, 刘国彬, 曹清玉, 吴瑞俊. 黄土丘陵区不同土地利用方式水土流失及养分保蓄效应研究. 水土保持学报, 2006, 20(1): 20-24
- [17] 王国梁, 周生路, 赵其国. 土壤颗粒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
- [18] Prosperini N, Perugini D. Particle size distribution of some soils from the Umbria Region(Italy):Fractal analysis and numerical modeling. Geoderma, 2008, 145: 185-195
- [19] Perfect E. Fractal models for the fragmentation of rocks and soils: A review. Engineering Geology, 1997, 48: 185-198
- [20] Posadas AND, Giménez D, Bittelli M, Vaz CMP, Flury M. Multifractal characterization of soil particle-size distributions. Soil Sci. Soc. Am., 2001, 65: 1361-1367

Fractal Characteristics of Soil Particle Size Distributions in Gully-Hilly Regions of the Loess Plateau, North of Shaanxi, China

DONG Li-li^{1,2}, ZHENG Fen-li³

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

2 Department of Tourism, Resources and Environment, Xianyang Normal College, Xianyang, Shaanxi 712000, China;

3 College of Resources and Environment, Northwest Sci-Tech University of Agriculture and Forestry, Yangling, Shaanxi 712100, China)

Abstract: Fractal analysis and laser diffractometry were combined to characterize the fractal of soil particle size distribution (PSD) through Rényi dimension spectra in the multifractal system. The results indicated that the monofractal dimension of soil PSD in various land-uses ranged from 2.28 to 2.47 and had a significant linear regression with the content of soil clay. D_{clay} , D_{silt} and D_{sand} were calculated and they were in an order of $D_{\text{clay}} < D_{\text{silt}} < D_{\text{sand}}$. Probability of fragmentation were calculated using D_{clay} , D_{silt} and D_{sand} , and smaller particles always had a lower probability of fragmentation with respect to larger particles. Therefore, it appears clearly that the probability of fragmentation is scale dependent and it decreases with the decrease of particle sizes. Multifractal analyses showed Rényi dimensions spectra generated by PSDs were similar to those obtained for theoretical multifractal properties and PSDs had multifractal properties.

Key words: Particle size distribution, Fractal dimension, Fragmentation probability, Rényi dimensions spectra, Gully-hilly regions of the Loess Plateau