

# 沂源石灰岩山地不同植被类型土壤颗粒分形特征研究<sup>\*</sup>

罗明达<sup>1</sup>, 杨吉华<sup>1</sup>, 房用<sup>2</sup>, 王月海<sup>2</sup>, 王卫东<sup>2</sup>

(1. 山东农业大学 林学院 水土保持系, 山东 泰安 271018; 2. 山东省林业科学研究院, 济南 250014)

**摘 要:** 运用分形学理论与方法对沂源石灰岩山地营造的 3 种不同植被类型和封禁条件下灌草丛的土壤颗粒分形特征进行研究, 结果表明: (1) 不同植被类型土壤颗粒粒径质量百分含量差异显著, 有林地粉黏粒含量明显高于灌草地。 (2) 有林地的分形维数明显大于灌草地, 其中, 侧柏扶芳藤混交林最大, 灌草丛最小。 (3) 不同植被类型土壤颗粒分形维数与土壤粉黏粒含量和细砂粒含量之间呈明显的正相关(线性)关系, 与极粗砂粒呈明显的负相关(线性)关系。 (4) 不同植被类型土壤颗粒分形维数与土壤不均匀系数呈较好负相关(线性)关系。除灌草丛外, 其它 3 种植被类型土壤均为级配连续、不均匀性良好的土壤。采用土壤颗粒分形维数评价不同植被类型土壤结构和质地是一个重要的量化指标。

**关键词:** 石灰岩山地; 植被类型; 土壤颗粒; 分形维数

中图分类号: S714.5

文献标识码: A

文章编号: 1005-3409(2010)03-0017-05

## Characteristics of Soil Particles Fractal Dimension under Different Vegetation Types in Yiyuan Limestone Mountain

LUO Ming-da<sup>1</sup>, YANG Ji-hua<sup>1</sup>, FANG Yong<sup>2</sup>, WANG Yue-hai<sup>2</sup>, WANG Wei-dong<sup>2</sup>

(1. Soil and Water Conservation Department of Forestry College, Shandong Agricultural University, Tai'an, Shandong 271018, China; 2. Shandong Academy of Forest Sciences, Jinan 250014, China)

**Abstract:** For evaluating the effect of different forest stands on soil structure and function, characteristics of soil particles fractal under four typical vegetations types in Yiyuan limestone mountain were studied according the quality principle of soil particle size distribution and theories of soil fractal. Results indicate that: (1) The soil particle size distribution of different vegetation types varied greatly. The clay and silt content of woodland is significantly higher than that of shrub-grassland. (2) Soil particles fractal dimension of woodland is significantly higher than that of shrub-grassland, and to the greatest is *Platycladus orientalis* + *Euonymus fortunei* mixed, the lowest is shrub-grassland. (3) The soil particles fractal dimension of the different vegetation types has a significant positive linear correlation between the clay and silt and fine gravel content of soil, a negative linear correlativity obviously to the coarse gravel content of soil. (4) The soil particles fractal dimension of the different vegetation types has a significant negative linear correlation with the uneven coefficient. In addition to shrub-grassland, the other three typical forest stands are good structural soil in gradation and uneven coefficient. Soil particles fractal dimension is an important quantitative index in appraising soil structure and texture among different vegetation types.

**Key words:** limestone mountains; vegetation type; soil particle; fractal dimension

土壤是由大小、形状不同的固体颗粒和孔隙以一定形式连结, 所形成的多孔介质, 固体颗粒的大小、数量、形状及其结合方式决定着土壤的质地与结构, 进而影响土壤水分与理化性质<sup>[1-2]</sup>。土壤粒径、

\* 收稿日期: 2009-12-09

基金项目: 山东省科技厅生态省建设重点科技攻关项目(SDSP2005-0410-06)

作者简介: 罗明达(1983-), 男, 硕士研究生, 主要从事林业生态工程研究。E-mail: luomingda1212@163.com

通信作者: 杨吉华(1957-), 男, 教授, 主要从事林业生态工程的教学和研究工作。E-mail: jhyang@sdau.edu.cn

颗粒体积、孔隙大小等土壤结构参数具有一定的自相似特征<sup>[2-5]</sup>。把分形理论及其方法应用到土壤学领域可促进土壤形态、过程等复杂问题的解决,并可在一定程度上使其量化<sup>[6]</sup>。自 S. W. Tyler<sup>[2]</sup> 等提出土壤颗粒粒径分布的质量分形维数计算公式后,分形维数便在土壤科学研究中得到广泛的应用,但主要应用于农业土壤方面<sup>[3,7-8]</sup>,涉及林业土壤方面的较少。因此,利用分形理论和方法探讨沂源石灰岩山地营造的 3 种不同植被类型和封禁条件下灌草丛的土壤分形特征,分析土壤颗粒的分形维数与地表植被类型和不均匀系数的相关关系,评价不同植被类型对土壤颗粒、不均匀系数的影响,以期对石灰岩山地营造不同植被类型提供参考和借鉴。

## 1 研究区概况

研究区位于沂源县东北部的悦庄镇,属暖温带大陆性季风气候,四季分明,春季回暖晚而迅速,风大、雨少;夏季湿热多雨间有干旱;秋季凉爽,干燥少雨;冬季寒冷,雨雪稀少。年平均气温 11.9℃,年日照时数 2 660.6 h,年平均降水量 718.1 mm,年最大降水量 1 616.7 mm,年最小降水量为 442.5 mm,7-8 月降雨最为集中,占全年的 51.7%。基岩为石灰岩,土壤类型为褐土,土层浅薄,质地粗,生物多样性单一,水土流失严重。

表 1 研究区 4 种不同植被类型植物群落特征

植被类型	代码	坡位	坡向	坡度/(°)	林分郁闭度/%	主要灌草种类	管理类型
侧柏纯林	CC	山坡上部	东坡	20	82	黄荆、胡枝子、荇草、白羊草	封禁
侧柏扶芳藤混交林	CFH	山坡上部	东南坡	22	92	黄荆、胡枝子、荇草、白羊草	封禁
侧柏爬地柏混交林	CPH	山坡上部	东南坡	21	86	黄荆、胡枝子、荇草、白羊草	封禁
灌草丛	GC	山坡上部	东坡	20	75	黄荆、胡枝子、荇草、白羊草	封禁

## 2.2 试验方法

2.2.1 土壤颗粒的测定 采用机械筛分法测定土壤粒径。均匀挖取 0-20 cm 土层内土壤样品,将同一标准地(3 个样点)的土壤样品混合均匀后,进行风干处理。先将土壤样品中大于 2 mm 的石砾筛出,然后应用南京土壤研究所生产的 ZBSX-92A 型震击式标准振筛机,使初次分筛后的土壤样品依次通过孔径为 1.00 mm、0.5 mm、0.25 mm、0.1 mm 和 0.05 mm 的套筛,以测定不同粒径范围土壤颗粒的相对含量。

2.2.2 土壤颗粒分形维数的测定 采用杨培岭<sup>[3]</sup> 等提出的公式计算土壤分形维数,计算公式为

$$D=3-\lg(w_i/w_0)/\lg(d_i/d_{\max}) \quad (1)$$

式中:  $D$  ——土壤粒径分形维数;  $d_i$  ——两相邻粒级

该处石灰岩山地灌草丛以黄荆(*Vitex negundo* Linn)、酸枣(*Ziziphus jujube*)、胡枝子(*Lespedeza bicolor*)、荇草(*Arthraxon hispidus*)、白羊草(*Bothriochloa ischaemum*)、结缕草(*Zoysia japonica*) 为建群种,造林常见树种主要是侧柏(*Platycladus orientalis*)、君迁子(*Diospyros lotus* Linn)、刺槐(*Robinia pseudoacacia*)、黄连木(*Pistacia chinensis* Bunge)、黄栌(*Cotinus coggygria* Scop)、构树(*Broussonetia papyrifera*) 鼠李(*Rhamnus davuri*) 等,生长表现良好。

## 2 材料及方法

### 2.1 试验材料

本研究区设在具有典型石灰岩山地的沂源县悦庄镇,以 2000 年雨季营造的 3 种不同植被类型和封禁条件下的灌草丛为研究对象,其造林密度为 2 m×2 m、整地方式为穴状整地(规格 0.4 m×0.4 m×0.3 m)、混交方式为行间混交。4 种植被类型分别是,侧柏+扶芳藤(*Euonymus fortunei*) 混交林(CFH)、侧柏+爬地柏(*Sabina procumbens*) 混交林(CPH)、侧柏纯林(CC)、灌草丛(GC) 4 种植被类型(灌草地为封禁条件下天然生长的灌草植被),其植物群落特征如表 1。

$d_i$  与  $d_{i+1}$  间土粒平均直径(mm);  $d_{\max}$  ——最大粒级土粒平均直径(mm);  $w_i$  ——直径小于  $d_i$  的累积质量(g);  $w_0$  ——土壤样品总质量(g)。

计算方法为:首先求出土壤样品不同粒径( $d_i$ ) 的  $\lg(d_i/d_{\max})$  和  $\lg(w_i/w_0)$  值,然后以前者为横坐标,后者为纵坐标做散点图,直线回归后求得斜率( $K$ ),最终用公式  $D=3-K$  求出 4 种植被类型的土壤粒径分形维数。

2.2.3 土壤颗粒级配指标 以称量出的土壤各级土粒质量为依据,利用 excel 绘制出土壤颗粒累积曲线图,读出土壤颗粒累计百分含量为 10%、30%、60% 所对应的土壤粒径,表示为  $d_{10}$ 、 $d_{30}$ 、 $d_{60}$ 。计算出土壤颗粒的级配标准,即不均匀系数(uniformity coefficient,  $C_u$ ) 和曲率系数(coefficient of curvature,  $C_s$ )。计算公式为

$$Cu= d_{60}/d_{10} \tag{2}$$

$$Cs= d_{30}^2/d_{60} \times d_{10} \tag{3}$$

式中:  $Cu$ ——不均匀系数;  $Cs$ ——曲率系数;  $d_{10}$ 、 $d_{30}$ 、 $d_{60}$ ——土壤颗粒累计百分含量为 10%、30%、60% 所对应的土壤粒径百分数。当  $Cu > 5$ , 表示土粒大小分布范围大, 土壤不均匀性较好;  $Cu$  越大, 表明土壤中土粒的分布范围越广, 但如果  $Cu$  过大, 则表示可能缺失中间粒径, 属于不连续级配, 因此需要用曲率系数来同时评价, 级配连续时  $Cs$  的范围约为 1~ 3; 当  $Cu$ 、 $Cs$  同时满足  $Cu > 5$ 、 $Cs$  为 1~ 3 时, 这表明土壤为不均匀性良好的土壤。

2.2.4 数据处理 对所测得数据运用 SPSS 11.5 软件和 Excel 软件进行统计分析。

3 结果与分析

3.1 不同植被类型土壤颗粒粒级分布及分析

按照科研常用土壤颗粒粒级分类标准, 对试验区 4 种植被类型的土壤颗粒粒级组成进行划分(表 2)。从表 2 可以看出: 4 种植被类型的土壤以粗砂粒含量最高, 为 39.38%~ 45.39%(平均 42.47%); 其次是细砂粒含量, 为 22.35%~ 32.32%(平均

27.68%); 而极粗砂粒含量和粉黏粒含量相对较低, 分别为 20.78%~ 29.58%(平均 25.23%) 和 2.68%~ 7.52%(平均 4.62%)。不同粒级土壤颗粒含量之间的差异极显著(方差分析  $F_{0.05} = 76.9$ ,  $Sig. = 0.000$ )。表明土壤中粗砂粒含量显著高于细砂粒和粉黏粒等细粒物质的含量, 具有北方石质山地典型粗骨土的颗粒组成性特征。

由图 1 可以看出, 土壤的粉黏粒和细砂粒含量, 有林地比灌草地平均高 96.39% 和 31.81%, 且侧柏扶芳藤混交林> 侧柏爬地柏混交林> 侧柏纯林> 灌草丛; 土壤的极粗砂粒和粗砂粒含量, 有林地比灌草地平均降低 19.6% 和 8.58%, 且灌草地> 侧柏纯林> 侧柏爬地柏混交林> 侧柏扶芳藤混交林。结果表明: 在相同的封禁条件下人工造林可以有效地增加土壤中的细粒物质含量, 改善土壤物理结构, 提高土壤蓄水保土性能; 其次由于灌草丛植被盖度较低, 在降水径流的冲刷下, 造成土壤中粉黏粒、细砂粒等大量细粒物质流失造成的。从土壤颗粒粒级分布的分析可以看出 4 种植被类型对土壤的改良效果为: 侧柏扶芳藤混交林> 侧柏爬地柏混交林> 侧柏纯林> 灌草丛。

代码	土壤粒级/ mm						%
	极粗砂粒	粗砂粒		细砂粒		粉黏粒	
	2~ 1	1~ 0.5	0.5~ 0.25	0.25~ 0.1	0.1~ 0.05	< 0.05	
CC	26.71	26.94	17.82	21.76	3.36	3.41	
CFH	20.78	23.12	16.26	24.24	8.08	7.52	
CPH	23.85	28.16	12.19	25.01	5.93	4.86	
GC	29.58	28.22	17.17	18.72	3.63	2.68	

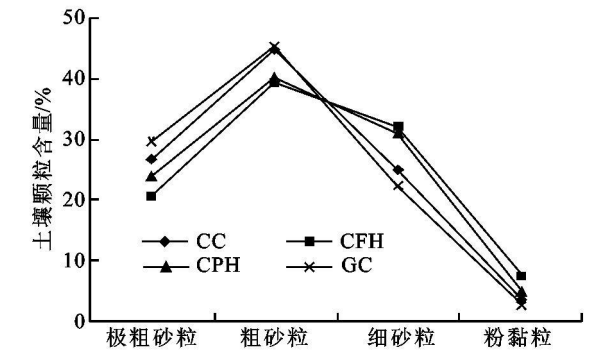


图 1 不同粒径范围内土壤颗粒含量

3.2 不同植被类型土壤颗粒分形维数评价分析

3.2.1 不同植被类型土壤颗粒分形维数计算 由图 2 及表 3 表明不同植被类型土壤颗粒组成的分形维数存在明显差别, 其变动范围为 1.976 4~ 2.297 3(平均 2.15)。且 4 种不同植被类型之间差异显著(方差分析  $F_{0.05} = 5.119$ ,  $Sig. = 0.016$ ); 4 种

植被类型土壤颗粒分形维数的大小顺序为侧柏扶芳藤混交林> 侧柏爬地柏混交林> 侧柏纯林> 灌草丛, 且 3 种有林地的土壤颗粒分形维数与灌草地相比差异显著(方差分析  $F_{0.05} = 7.903$ ,  $Sig. = 0.031$ ;  $F_{0.05} = 7.012$ ,  $Sig. = 0.038$ ;  $F_{0.05} = 7.679$ ,  $Sig. = 0.032$ ), 平均分形维数比灌草地大 8.62%。

有林地的分形维数明显大于灌草地, 且混交林的分形维数最大。

3.2.2 不同植被类型土壤颗粒分形维数与土壤粒级分布的关系 土壤颗粒分形维数与土壤中各粒级百分含量的回归关系见图 3。可以看出, 分形维数与不同粒级土壤颗粒百分含量的相关性有所不同。土壤粉黏粒及细砂粒与土壤分形维数呈明显的(线性)正相关(图 3a, b)。土壤粉黏粒百分含量与土壤分形维数回归方程的相关系数( $R^2$ ) 和显著性概率

(Sig.) 分别为 0.511 6 和 0.004 ( $< 0.05$ )。土壤细砂粒含量与土壤分形维数回归方程的  $R^2$  和 Sig. 分别为 0.647 9 和 0.001 ( $< 0.05$ )。由此看出土壤粉黏粒百分含量与土壤分形维数的相关性高于细砂粒, 都达到显著水平。土壤极粗砂粒百分含量与土壤分形维数呈明显的(线性)负相关(图 3d), 回归方程的  $R^2$  与 Sig. 分别为 0.879 3 和 0.000 ( $< 0.05$ ), 达到显著水平。但土壤粗砂粒百分含量与土壤分形维数的相关关系不明显(图 3c), 两者的回归方程  $R^2$  和 Sig. 分别为 0.121 和 0.134 ( $> 0.05$ ), 这表明土壤分形维数对各个粒级土壤颗粒的百分含量反映程度的大小不同, 其中, 对土壤分形维数影响比较明显的是土壤极粗砂百分含量和土壤粉黏粒百分含量, 其次是土壤细砂粒百分含量, 即分形维数越大, 表明土壤中粉黏粒及细砂粒含量越高, 极粗砂粒含量越低; 但难以反应粗砂粒的百分含量的高低, 这可能与土壤中粗砂粒百分含量较高(在 39.38%~45.39%

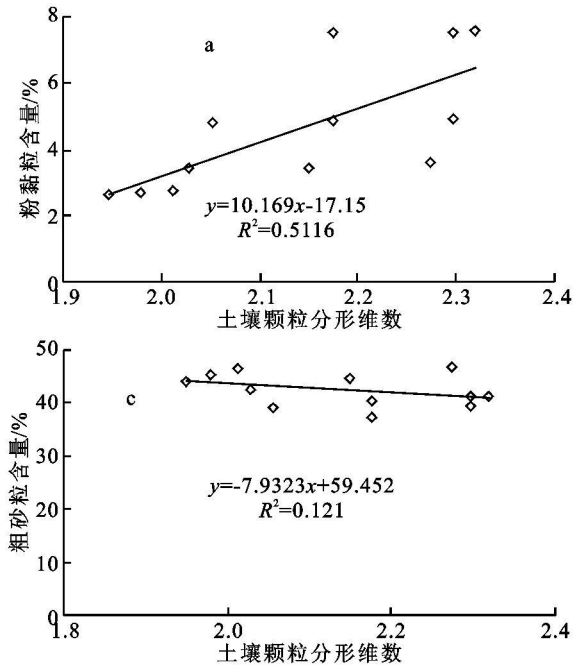


图 3 不同粒径土壤颗粒百分含量与土壤颗粒分形维数之间的关系

3.3 不同植被类型土壤颗粒分形维数与土壤不均匀系数的关系

3.3.1 不同植被类型土壤不均匀系数和曲率系数  
根据不均匀系数和曲率系数的计算方法得出不同植被类型土壤颗粒分布的不均匀系数与曲率系数(表 4)可以看出, 4 种植被类型的曲率系数分布范围 0.80~1.44, 且差异显著 ( $F_{0.05} = 125.538$ , Sig. = 0.000), 除灌草丛的曲率系数 $< 1$ 外, 其它 3 种均在 1~3 范围内, 因此这 3 种植被类型的土壤粒径均为连续级配。4 种植被类型的不均匀系数分布范围 7.89~11.20,

之间), 相对于其它粒级土壤分形维数对其百分含量变化不敏感有关。

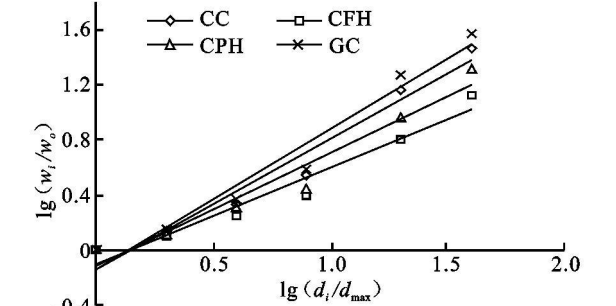
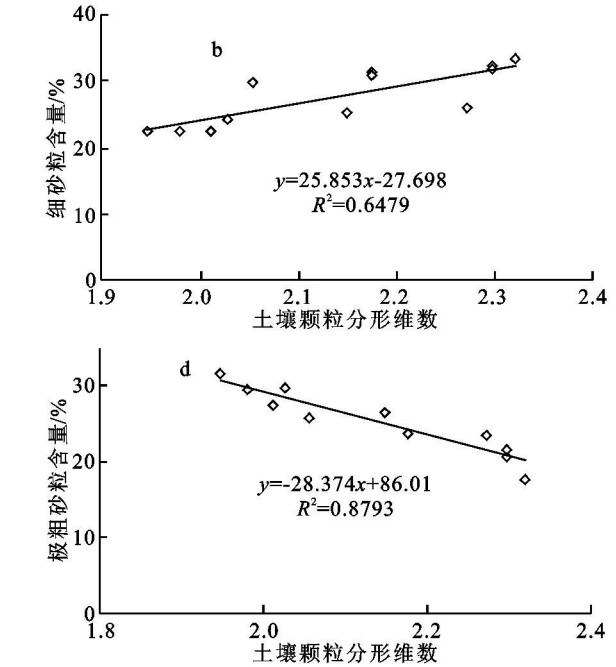


图 2 不同植被类型  $\lg(w_i/w_0)$  与  $\lg(d_i/d_{\max})$  的关系  
表 3 4 种植被类型土壤颗粒分形维数

群落代码	回归方程	相关系数 $R^2$	方差	分形维数
CC	$y = 0.8503x - 0.1375$	0.9583	0.8503	2.1497
CFH	$y = 0.7027x - 0.1045$	0.9546	0.7027	2.2973
CPH	$y = 0.8241x - 0.1196$	0.9522	0.8246	2.1754
GC	$y = 1.0206x - 0.1413$	0.9587	1.0206	1.9794



均满足  $Cu > 5$  的条件, 且 4 种植被类型土壤的  $Cu$  差异显著 ( $F_{0.05} = 839.205$ , Sig. = 0.000); 可以得出, 除去灌草丛外, 其它 3 种植被类型均为均匀性良好的土壤, 其中侧柏扶芳藤混交林最好, 侧柏爬地柏混交林、侧柏纯林次之, 灌草丛最差。

3.3.2 不同植被类型土壤颗粒分形维数与不均匀系数的关系  
利用 Excel 对表 3 中不同植被类型土壤颗粒的分形维数和表 4 中相对应的不均匀系数进行(线性)回归分析(图 4), 可以看出不同植被类型的土壤颗粒分形维数与不均匀系数呈直线函数关系, 且回

归方程的相关系数( $R^2$ )为 0.262。由此可以看出,土壤分形维数随着土壤不均匀系数的减小而减小,两者呈现负相关性。可见,土壤质地复杂性不仅受土壤颗粒大小的影响,而且还受土壤质地均一程度及土壤颗粒级配的影响。

表 4 沂源石灰岩山地 4 种植被类型土壤颗粒不均匀系数和曲率系数

配置模式	$d_{10}$	$d_{30}$	$d_{60}$	$Cu$	$Cs$
CC	0.09	0.29	0.71	7.89	1.32
CFH	0.06	0.22	0.56	9.33	1.44
CPH	0.08	0.27	0.69	8.63	1.32
GC	0.10	0.30	1.12	11.20	0.80

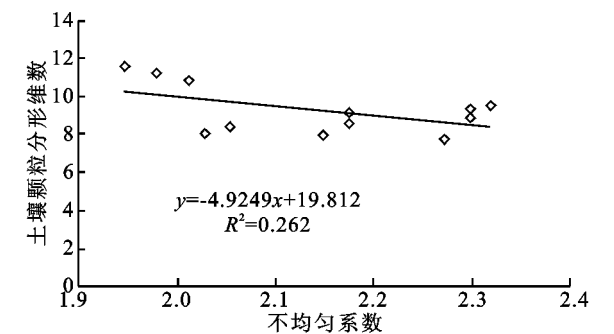


图 4 不同植被类型土壤颗粒分形维数与不均匀系数的关系

通过以上对不同植被类型的土壤不同粒径质量百分含量、土壤分形维数、不均匀系数以及土壤分形维数与土壤颗粒粒级分布和土壤不均匀系数的相关性的研究,结果表明,除灌草丛外,沂源石灰岩山地试验区其它 3 种植被类型的土壤均为不均性良好的土壤,按大小顺序排列为:侧柏扶芳藤混交林>侧柏爬地柏混交林>侧柏纯林>灌草丛。土壤分形维数与土壤粉黏粒及不均性系数有较好的线性关系,土壤分形维数随土壤质地由粗到细呈现由小到大的变化趋势。由此可以看出利用土壤分形维数对植被类型土壤结构及质地进行评价是一个较好的选择。

4 结论

(1) 不同植被类型土壤颗粒粒径质量百分含量差异显著(方差分析  $F_{0.05} = 76.9$ ,  $Sig. = 0.000$ ),土壤粉黏粒和细砂粒含量有林地比灌草地平均高 96.39% 和 31.81%,土壤的极粗砂和粗砂粒含量,

有林地比灌草地平均降低 19.6% 和 8.58%。

(2) 不同植被类型土壤颗粒分形维数按大小顺序排列是:侧柏扶芳藤混交林>侧柏爬地柏混交林>侧柏纯林>灌草丛。

(3) 不同植被类型土壤颗粒分形维数与土壤粉黏粒含量和细砂粒含量之间呈明显的正相关(线性)关系,与极粗砂呈明显的负相关关系,即土壤颗粒中极粗砂砾越少,细粒物质含量越高,分形维数越大。

(4) 不同植被类型土壤颗粒分形维数与土壤不均匀系数呈较好负相关(线性)关系,即随着不均匀系数的降低,土壤分形维数增大。

(5) 土壤颗粒分形维数与土壤细粒物质含量、不均匀系数有较好的线性相关关系,因此土壤颗粒分形维数可以作为评价不同植被类型土壤结构及质地的一个重要量化指标。

参考文献:

[1] Tyler S W, Wheatcrafu S W. Application of fractal mathematics to soil water retention estimation[J]. Soil Science Society of America Journal, 1989, 53: 987-996.

[2] Tyler S W, Wheatcrafu S W. Fractal scaling of soil particle size distributions: analysis and limitations[J]. Soil Science Society of America Journal, 1992, 56: 362-369.

[3] 杨培岭, 罗元培, 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.

[4] 王丽, 刘霞, 张光灿, 等. 鲁中山区采取不同生态修复措施时的土壤粒径分形与孔隙结构特征[J]. 中国水土保持科学, 2007, 5(2): 73-80.

[5] Congnard P, Anne L, Didon L, et al. The role of forest cover on stream flow down sulr Meciterranean mountain in watersheds: a modeling approach[J]. Journal of Hydrology, 2001, 254: 224-243.

[6] 王玉杰, 王云琦, 夏一平, 等. 重庆缙云山典型林分土壤结构分形特征[J]. 中国水土保持科学, 2006, 4(4): 39-46.

[7] 黄冠华, 詹卫华. 土壤颗粒的分形特征及其应用[J]. 土壤学报, 2002, 39(4): 490-497.

[8] 刘云鹏, 王国栋, 张社奇. 陕西 4 种土壤粒径分布的分形特征[J]. 西北农林科技大学学报: 自然科学版, 2003, 31(2): 92-94.