

# 黔中喀斯特地区土壤机械分维特征及其与土力学特性的关系

孙泉忠<sup>1</sup>, 高华端<sup>2</sup>, 宁茂岐<sup>1</sup>, 袁勇<sup>3</sup>, 牛明<sup>1</sup>

(1. 贵州省水土保持技术咨询研究中心, 贵州 贵阳 550002;

2. 贵州大学 林学院, 贵州 贵阳 550025; 3. 北京林业大学, 北京 100083)

**摘要:** 在黔中喀斯特地区通过野外调查及室内试验的方法研究了土壤机械分维特征及其与土壤黏聚力  $c$ 、内摩擦角  $\varphi$  及土壤紧实度的关系。结果表明, 研究区土壤分形维数  $D$  一般在 2.80~2.93 之间, 当直径小于 0.002 mm 的土壤颗粒含量超过 50% 时, 其分形维数则大于 2.90。相关性分析表明, 土壤机械分维与土壤黏聚力、土壤紧实度呈极显著正相关, 土壤黏聚力和紧实度随机械分维增大而增大; 土壤机械分维与内摩擦角呈极显著负相关, 土壤内摩擦角随机械分维增大而减小。

**关键词:** 土壤机械分维; 土壤黏聚力; 土壤内摩擦角; 土壤紧实度

文献标识码: A

文章编号: 1000-288X(2011)04-0053-04

中图分类号: S157.1, P642.116

## Characteristics of Soil Fractal Dimension and Its Correlation with Soil Mechanical Properties in Karst Area of Central Guizhou Province

SUN Quan-zhong<sup>1</sup>, GAO Hua-duan<sup>2</sup>, NING Mao-qi<sup>1</sup>, YUAN Yong<sup>3</sup>, NIU Ming<sup>1</sup>

(1. Soil and Water Conservation Technical Consulting and Research Center of

Guizhou Province, Guiyang, Guizhou 550002, China; 2. College of Forestry, Guizhou

University, Guiyang, Guizhou 550025, China; 3. Beijing Forestry University, Beijing 100083, China)

**Abstract:** The characteristics of soil fractal dimension and its correlation with soil mechanical properties such as soil cohesion  $c$ , soil internal friction angle  $\varphi$  and soil compaction in Karst area of central Guizhou Province were studied by means of field investigation and indoor experiments. The results revealed that the fractal dimension of soil in the research area was usually between 2.80 and 2.93, while the fractal dimension would be greater than 2.90 if the content of soil particle with diameter less than 0.002 mm exceeded 50%. Correlation analysis results showed that soil fractal dimension was positively correlated to soil cohesion and soil compaction, and the latter two increased with the increase of soil fractal dimension. However the soil fractal dimension was negatively correlated to internal friction angle, which decreased with the increase of fractal dimension.

**Keywords:** fractal dimension; soil cohesion; soil internal friction angle; soil compaction

分形的特点是由分形维数(又称分维数或分维)来描述。传统数学对于自然界中连绵起伏的群山、奇形怪状的海岸线等大量自然构形的描述显得无能为力,而分形理论的产生则为研究这些复杂的对象找到了全新的方法和思路,分形维数也成为描述这些复杂事物特征的良好参数<sup>[1]</sup>。土壤是由固、液、气三相组成的,土壤作为一个多孔的介质,是一种具有较典型特征的分形材料,是具有分形的系统,具有一定的分

维特征<sup>[2]</sup>。分形理论应用于土壤研究,使定量描述土壤结构特征的复杂性质成为可能<sup>[3-5]</sup>。

土壤的固相物质包括无机矿物颗粒和有机质,是构成土的骨架最基本的物质,土壤颗粒是构成土壤空间结构最基本的组成单元,颗粒粗细、形状及表面形态等对土壤空间构型具有很大影响<sup>[6]</sup>,进而影响其力学特性。已有大量研究资料表明<sup>[7-10]</sup>,土壤的颗粒组成对土力学特性参数有着重要影响,但采用各粒级质

量百分数来表征的土壤颗粒组成用于计算土粒整体特征与土力学特性关系有所不便,不能有效反映各粒级土粒含量多寡的总体变化特征,因此,引入土壤颗粒组成分形维数来表征土粒从粗到细连续变化的特征,才能清楚的反映土壤颗粒的整体特征与土力学关系。

本研究在分析黔中喀斯特地区土壤颗粒组成特征的基础上,以基于重量分布确定土壤颗粒大小分布分形维数的办法,计算土壤颗粒组成分形维数值。同时分析土壤分形维数特征及其与土壤黏聚力、土壤内摩擦角及紧实度的关系,初步探讨土壤分形维数与土力学特性参数关系,以期能为土力学特性参数影响因子研究提供新的研究视角。

## 1 材料与方法

### 1.1 研究区概况

贵阳市位于贵州省中部偏北(106°07′00″—107°17′00″E, 26°11′00″—27°22′00″N),地处云贵高原的东斜坡,总面积 8 034 km<sup>2</sup>。喀斯特地貌发育,既有高原山地、丘陵、盆地、河谷、台地等地形,最高海拔为 1 762 m,最低 506 m。属亚热带季风湿润气候,降雨量充沛,多年平均降雨量为 1 200 mm,降雨量相对集中,夏秋降雨量占全年降雨量的 78%。年平均气温为 15.3 ℃,最冷月(1月)平均 4.9 ℃,最热月(7月)平均 23.2 ℃;多年平均日照时数 1 283.7 h,多年平均日照百分率为 29%,相对湿度 82%。研究区分布的土壤主要为碳酸盐岩发育而成,质地较黏重,土体与基岩面过渡清晰。

### 1.2 采样方法

2009 年 4 月至 8 月底在研究区选取 3 种典型的

土地利用类型:坡耕地、灌草地、林地作为研究对象。坡耕地选取未种植作物的裸坡地;灌草地主要为火棘、蕨类植物;林地主要为马尾松林,所选采样点,植被都保存较好。共采集样本 78 个,其中林地 20 个,灌草地 30 个,坡耕地 28 个。具体采用方法及步骤:(1) 采样选用典型样地取样法,在选定的剖面点阶梯状开挖剖面,量测土层厚度;(2) 坡耕地取样深度均为 20 cm,林地和灌草地按土层剖面采集土壤颗粒分析样品,测定土壤紧实度;(3) 用 20 mm × 61.8 mm 不锈钢环刀采集 4 个土样用于抗剪强度测定(用铝盒装好,胶带密封)。室内试验均在贵州大学水土保持工程实验室完成,主要测试项目包括土壤颗粒分析和土壤抗剪强度测定。

### 1.3 试验方法

1.3.1 土壤紧实度 土壤紧实度采用美国 DICK-KEY-john 6100 型土壤紧实度仪(锥头尺寸选用 3/4 英寸直径)。根据土壤剖面调查情况,确定待测土层厚度,均匀用力垂直插入待测土层中部,读取数值,每层实测 5 次,取平均值作为该点的土壤紧实度指标值。为防止土壤中石砾阻挠仪器探头导致测量读数偏大,在 5 次测定中,若出现异常值,则需对其进行重新测定。

1.3.2 土壤抗剪强度 土壤抗剪强度采用原状土剪切法。按照土工试验方法(GB/T 50123—1999)标准,采用 ZJ ④型等应变直剪仪进行快剪试验(15 r/min)测定。

1.3.3 土壤机械组成 样品风干处理后进行分析。土壤颗粒分析用(卡庆斯基制)简易比重计法<sup>[12]</sup>,所测土壤颗粒组成特征见表 1。

表 1 土壤颗粒组成

颗粒分级/mm	2~0.1	0.1~0.05	0.05~0.01	0.01~0.005	0.005~0.001	<0.001
百分比/%	8.62	5.91	20.35	10.96	23.66	30.51

### 1.4 分形维数求解模型

具有自相似结构的多孔介质土壤,由大于某一粒径( $d > d_i, i = 1, 2, \dots$ )的土粒构成的体积  $V(d > d_i)$ ,可由类似 Katz 等<sup>[13]</sup>的公式表示,即:

$$V(\delta > d_i) = A \left[ 1 - \left( \frac{d_i}{k} \right)^{3-D} \right] \quad (1)$$

式中:  $\delta$ ——码尺;  $d_i$ ——粒径大小;  $A, k$ ——描述形状、尺度的常数;  $D$ ——分形维数。

杨培岭等<sup>[14]</sup>在 Katz 法的基础上,提出了用粒径质量分布资料表征的土壤分形模型,即:

$$\frac{W(\delta < d_i)}{W_0} = \left( \frac{d_i}{k} \right)^{3-D} \quad (2)$$

式中:  $W(\delta < d_i)$ ——直径小于  $d_i$  的土粒的累积质量;  $W_0$ ——全部各粒级土粒的质量和;  $d_i$ ——两筛分粒级  $d_i$  与  $d_{i+1}$  间粒径的平均值。设  $d_{\max}$  为最大粒级土粒的平均直径,则得出  $W(\delta < d_{\max}) = 0$ ,代入公式(2),有  $k = d_{\max}$ 。由此得出土壤颗粒的重量分布与平均粒径间的分形关系式为:

$$\frac{W(\delta < d_i)}{W_0} = \left( \frac{d_i}{d_{\max}} \right)^{3-D} \quad (3)$$

$$\text{则有: } D = 3 - \frac{\lg(W_i/W_0)}{\lg(d_i/d_{\max})} \quad (4)$$

式中:  $W_i$ ——直径小于  $d_i$  的土粒的累积质量;  $(3-D)$ —— $\lg(d_i/d_{\max})$  和  $\lg(W_i/W_0)$  回归直线的斜率,

因此通过回归分析方法即可获得  $D$  值。

杨培岭模型计算土壤颗粒分形维数较为简便,本研究采用杨培岭模型进行计算。数据整理采用 Excel 2003, 统计分析采用 SPSS 13.0。

## 2 结果与分析

### 2.1 土壤机械分维特征

土壤分形维数是反映土壤结构几何形体的参数,在维数上表现出黏粒含量越高,质地越细,分形维数越高<sup>[8]</sup>。对土壤机械分维进行频率分析(图1),研究区土壤分形维数基本集中在 2.80~2.93,这说明土壤较为黏重,其土壤黏粒含量较多。土壤颗粒机械组成中,当小于 0.002 mm 的颗粒含量超过 50% 时,其分形维数则大于 2.90。

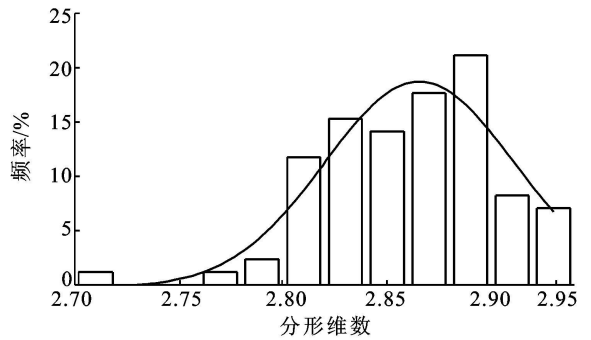


图1 土壤机械分维频率

### 2.2 土壤机械分维与土壤黏聚力 $c$ 关系

由图2可以看出,随着土壤机械分维的变大,其土壤黏聚力  $c$  不断增加,通过相关性分析(表2),两者呈极显著( $p < 0.01$ )正相关关系。

表2 土壤机械分维与土力学特性指标相关性分析

机械分维	土力学特性指标	样本数	相关性系数	伴随概率	显著性( $p < 0.01$ )
$D$	黏聚力/kPa	68	0.400	0.001	极显著
	内摩擦角/ $^{\circ}$	68	-0.455	0.000	极显著
	紧实度/kPa	68	0.358	0.003	极显著

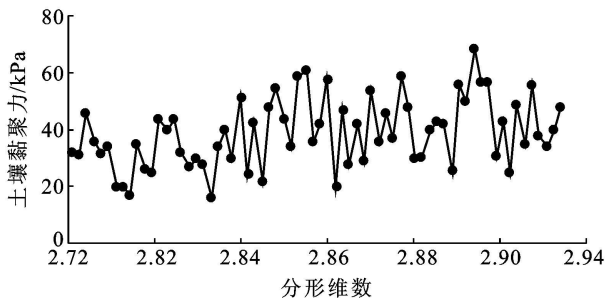


图2 机械分维与土壤黏聚力( $c$ )关系

直径小于 0.005 mm 的机械颗粒具有很大的黏结性和吸附能力,这种颗粒聚集在一起时,处于湿润状态下会膨胀而显得非常黏滞, < 0.001 mm 的机械颗粒具有胶体膨胀性,但其吸持水分能力更高<sup>[8]</sup>,对土壤黏聚力影响很大。强的黏结性和吸附能力,使得颗粒间分散程度低,最终表现在土壤黏聚力高。研究区土壤平均黏粒含量(< 0.001 mm)在 30% 左右,这一粒级颗粒在机械组成中所占的比例很大,导致该土壤比较黏重,土壤黏聚力高。

### 2.3 土壤机械分维与土壤内摩擦角 $\varphi$ 关系

如图3所示,随着土壤机械分维的增加,内摩擦角不断减小,这说明土壤中黏粒含量的增加,将会降低土壤内摩擦角。相关性分析表明(表2),分形维数与土壤内摩擦角呈极显著( $p < 0.01$ )负相关关系。

土壤机械分维越高,黏粒含量所占比例就越大,

土壤内摩擦角  $\varphi$  就越小,相反,机械分维越低,说明土壤中粗颗粒所占比例就越大,颗粒间的镶嵌和锁套作用增强,土壤内摩擦角  $\varphi$  就越大。直径小于 0.005 mm 和 < 0.001 mm 的机械颗粒具有很大的黏结性和吸附能力和胶体膨胀性,因此,这两类颗粒含量越高,越不利于土壤颗粒之间的滑动摩擦和咬合摩擦,内摩擦角  $\varphi$  就越小<sup>[8]</sup>。

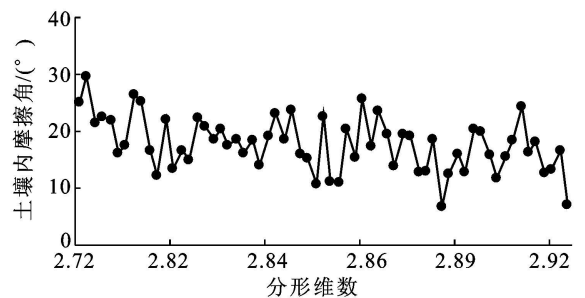


图3 机械分维与土壤内摩擦角( $\varphi$ )关系

### 2.4 土壤机械分维与土壤紧实度关系

图4表明,土壤机械分维越高,土壤越紧实,机械分维越低,土壤越疏松。

相关性分析表明(表2),土壤机械分维与土壤紧实度呈极显著( $p < 0.01$ )正相关关系。

随着土壤机械分维的增加,土壤紧实度呈现增大的趋势。特别是当土壤机械分维大于 2.90 时,土壤

紧实度增加较为明显,这说明当直径小于 0.002 mm 土壤颗粒含量超过 50% 时,对土壤紧实度影响最为显著,这也说明土壤质地粗细程度与土壤松紧程度呈对应关系。土壤机械分维越小,则土壤中粗颗粒所占比例即大,土壤颗粒之间接触所形成的孔隙即大,土壤呈松弛或疏松状态,再者,大颗粒间的接触面积较小,大部分形成了孔隙,小的接触面积必然导致颗粒间的黏结程度降低,遇到外力挤压时,容易断裂,其所形成的空间构架也容易破坏而变形。当土壤机械分维高时,黏粒含量所占比例大,细小的土壤颗粒接触面积增加,所形成的孔隙就小,再加上小颗粒自身具有较高的膨胀性,在土壤水分的作用下,导致颗粒间黏结在一起,形成一个串珠状的空间三维网络,稳定性强,不容易遭受外力的破坏。因此,高土壤机械分维,则表现为高土壤紧实度,低土壤机械分维,则表现为低土壤紧实度。

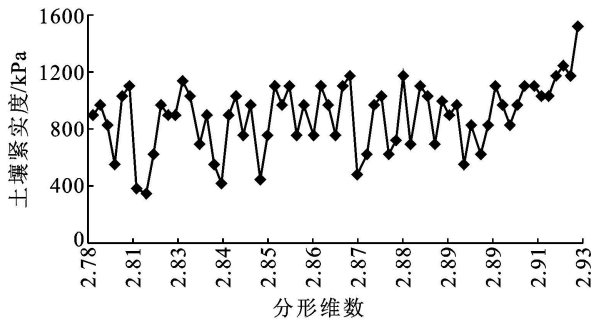


图 4 机械分维与土壤内紧实度关系

### 3 结论

(1) 研究区直径小于土壤颗粒 0.001 mm 黏粒含量一般在 30% 左右,土壤黏重,当直径小于 0.002 mm 的土壤颗粒含量超过 50% 时,其分形维数则大于 2.90。

(2) 研究区土壤分形维数一般在 2.80~2.93 之间,均高于党亚爱等<sup>[15]</sup>研究黄土高原典型土壤剖面表层(0—10 cm)土垫旱耕人为土(2.723±0.024)、黄土正常新成土(2.609±0.077)和干润砂质新成土(2.589±0.025)颗粒分形维数,稍高于张治伟等<sup>[16]</sup>研究石灰岩土壤分形维数(2.753~2.897),与张世熔等<sup>[17]</sup>研究四川省 16 个耕地表层的土壤颗粒表面分形维数(2.805~2.942)的结果基本一致。

(3) 通过相关性分析,结果表明土壤机械分维与土壤黏聚力、土壤紧实度呈极显著( $p < 0.01$ )正相关关系,土壤黏聚力和紧实度随土壤机械分维增大而

增大;土壤机械分维与内摩擦角呈极显著( $p < 0.01$ )负相关关系,土壤内摩擦角随土壤机械分维增大而减小。

#### [参 考 文 献]

- [1] Turcotte D L. Fractal fragmentation [J]. J. Geography Res., 1986, 91(12): 1921-19261.
- [2] 程先富, 史学正. 分形几何在土壤学中的应用及其展望 [J]. 土壤, 2003, 35(6): 464-464.
- [3] Rieu M, Sposito G. Fractal fragmentation, soil porosity and soil water properties [J]. Soil Sci. Am. J., 1991, 55: 1239-1244.
- [4] Falconer K J. Fractal Geometry [M]. John Wiley and Sons, 1989: 89-159.
- [5] Arya L M, Paris J F. A physical empirical model to predict the soil moisture characteristic from particle-size distribution and bulk density data [J]. Soil Soc. Am. J., 1981, 45: 1023-1031.
- [6] 高大钊, 袁聚云. 土质学与土力学 [M]. 北京: 人民交通出版社, 2001: 30-31.
- [7] 张爱国, 张仓平, 杨勤科. 区域水土流失土壤因子研究 [M]. 北京: 地质出版社, 2003: 44-43.
- [8] 王云琦, 王玉杰, 张洪江, 等. 重庆缙云山不同土地利用类型土壤结构对土壤抗剪性能的影响 [J]. 农业工程学报, 2006, 22(3): 40-45.
- [9] 逯海叶. 地表土壤抗剪强度影响因素的研究 [D]. 内蒙古呼和浩特: 内蒙古农业大学, 2005.
- [10] 赵红洋, 聂斌, 南志标. 黄土高原土壤紧实度对蚕豆生长的影响 [J]. 应用生态学报, 2002, 13(8): 935-938.
- [11] 高华端, 孙泉忠, 袁勇. 喀斯特地区不同土地利用类型土壤侵蚀特征研究 [J]. 水土保持通报, 2010, 30(2): 92-96.
- [12] 中国科学院南京土壤研究所. 土壤理化分析 [M]. 上海: 上海科技出版社, 1978: 500-507.
- [13] Katz A J, Thompson A H. Fractal sandstone pores: Implications for conductivity and pore formation [J]. Phys. Rev. Lett., 1985, 54(12): 1325-1328.
- [14] 杨培岭, 罗远培, 石元春. 用粒径的重量分布表征土壤分形特征 [J]. 科学通报, 1993, 38(20): 1896-1899.
- [15] 党亚爱, 李世清, 王国栋, 等. 黄土高原典型土壤剖面土壤颗粒组成分形特征 [J]. 农业工程学报, 2009, 25(9): 74-78.
- [16] 张治伟, 傅瓦利, 朱章雄, 等. 石灰岩区土壤分形特征及其与土壤性质的关系 [J]. 土壤, 2009, 41(1): 90-96.
- [17] 张世熔, 邓良基, 周倩, 等. 耕层土壤颗粒表面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.