

# 不同岩性风化物分形特征及其与渗透系数关系研究

谢贤健

(内江师范学院 地理与资源科学学院, 四川 内江 641000)

**摘 要:**为了探讨不同岩性风化物的结构组成和渗透性能,在野外采样和室内分析的基础上,选择小江流域 9 种岩性风化物作为研究对象,采用分形理论,分析了不同岩性风化物的分形特征及其与渗透系数之间的关系。结果表明:(1) 岩性风化物具有显著的分形特征,分形维数值为 2.567~2.833,其关系为白云岩>砂岩>第四纪沉积>玄武岩>千枚岩>泥质灰岩>粉砂岩>板岩>泥岩;(2) 分形维数与<0.005,0.005~0.05 mm 的粒径含量呈极显著正相关,与 10~20,20~40,40~60 mm 的粒径含量呈极显著负相关,与其他粒径含量相关性不显著;(3) 多元线性回归分析发现,<0.05 mm 的粒径是决定不同岩性风化物分形维数的决定粒径;(4) 分形维数与渗透系数呈显著的一次函数关系: $y = -276.84x + 810.66$ ,分形维数越大,细颗粒物越多,渗透系数越小,渗透能力越差。因此,分形维数可以作为表征不同岩性风化物粒级组成和渗透性能的参数,可以为泥石流起动发生的研究提供一定的理论依据。

**关键词:**泥石流;风化物;分形;渗透系数

中图分类号: TU411

文献标识码: A

文章编号: 1005-3409(2017)05-0204-05

## Study on Fractal Feature and Relationship Between Fractal Dimension and Permeability Coefficient of Weathered Materials of Different Lithologies

XIE Xianjian

(School of Geography and Resources Science, Neijiang Normal University, Neijiang, Sichuan 641000, China)

**Abstract:** Based on the field sampling and laboratory analysis, the fractal feature and relationship between fractal dimension and permeability coefficient of 9 types of weathered materials of lithology were studied by using the fractal theory. The results showed that different weathered materials of lithology had significant fractal characteristics, the dimension values were between 2.567 to 2.833, and the order followed the sequence: dolomite>sandstone>quaternary sedimentary>basalt>phyllite>limestone>powder sandstone>slate>mudstone. With the fractal dimension values for the dependent variable, the content of particle size for the independent variable, the equation was built up, the results showed that the fractal dimension had a significant linear positive correlation to the content of <0.005 mm particle size and 0.005~0.05 mm particle sizes, and a significant negative correlation to the contents of 10~20 mm, 20~40 mm and 40~60 mm particle sizes. There was no significant correlation with other particles. Furthermore, by the multiple linear regression analysis, the fractal dimensions of different weathered materials of lithology were controlled by <0.05 mm size particle. A linear equation between fractal dimension and permeability coefficient was fitted by regression analysis, the function was expressed as  $y = -276.84x + 810.66$  with 0.919 of  $R^2$  value, it was suggested that there was a good correlation between fractal dimension and permeability coefficient. In the other word, this showed that the bigger the fractal dimension, the more fine particulate matter, the smaller the coefficient of permeability, and the worse the infiltration capacity. As a result, the fractal dimension can be used as the parameter to characterize the graded composition and permeability of different weathered materials of lithology, and it can provide certain theoretical basis for the research on debris flow starting.

**Keywords:** debris flow; weathering; fractal; coefficient of permeability

泥石流是由能量子系统、水资源子系统和松散碎屑物质子系统构成的一个复杂系统。其中松散碎屑物质系统为泥石流的形成提供了固体物质条件,而松散碎屑固体物质来源于基岩,基岩在不同的地质、气温、植被和人类活动影响因素下发生破碎风化、搬运、堆积,从而在结构上具有不确定性及组成上的非均质性。因此,在结构组成上难以用传统、线性的方法来定量描述不同岩性的风化物。虽然风化土体形成的原因复杂,但其粒径分布仍存在统计意义上的自相似性,因而风化土体具有分形特征。自20世纪80年代以来,国内外学者在研究土体结构时,经常运用分形的方法<sup>[1-5]</sup>。然而,目前将分形理论运用到泥石流固体物质系统,主要集中在较单一的某一岩性土体上;如贺拿等<sup>[5]</sup>认为泥石流源区砾石土具有显著的分形特征,分形维数值可以客观地反映砾石土的渗透系数变化;黄祺等<sup>[6]</sup>应用分形理论研究了泥石流沟源区砾石土粒度组成特征,结果表明分形维数值与细颗粒的对数值呈显著的正相关关系;杨伟等<sup>[7]</sup>分析了泥石流堆积物粒度分形特征及影响因素,认为泥石流堆积物的分形特征体现了泥石流危险度的大小。总体来说,分形理论运用到泥石流固体物质系统中的研究均取得了良好的结果,分形维数可以准确地反映岩石的粒径构成。云南省小江流域作为我国、甚至全球山地灾害活动最强烈、暴发频率最高和危害最严重的地区之一,区内地质构造运动强烈、岩性多样且破碎,目前已有的研究中关于不同岩性风化物分形特征及其与渗透系数之间的关系未见报道;因此,本研究基于前人的研究成果,利用分形理论,以小江流域中9种不同岩性的风化物为研究对象,建立分形维数值与渗透系数数值之间的回归模型,探讨不同岩性风化物的分形特征及其与粒径组成和渗透系数之间的关系,通过分形维数值对不同岩性风化物的渗透系数数值的定量表达,以为泥石流的起动预测预报提供一定的理论依据。

## 1 小江流域及岩性分布概况

小江为金沙江下游右岸的一级支流,发源于滇东高原的车湖(俗称清水海),流经云南的寻甸县、东川区 and 会泽县,介于东经 $102^{\circ}52'$ — $103^{\circ}22'$ 和北纬 $25^{\circ}32'$ — $26^{\circ}35'$ ,全长141.9 km,流域面积 $3\,044.3\text{ km}^2$ ;小江河谷两岸地形陡峻,岭谷相对高度最大差达3 649 m;流域干湿季节明显,降水主要集中在雨季(5—10月),降水量占全年降水量的88%;干季(11月至次年4月)晴朗少雨,降水量仅占全年降水量的

12%左右<sup>[8-9]</sup>。流域岩性主要分布有板岩、千枚岩、砂岩、泥质灰岩,砂岩与页岩互层、玄武岩、砂岩与砂质页岩互层;在河谷山坡、山麓和沟口分布第四纪残积、坡积、洪冲积。这些岩层长期受构造运动作用和气候因素的影响,岩石破碎、变质加深、节理发育、风化强烈,造成岩层孔隙度和裂隙较大,强度和稳定性差,为本区泥石流的发育提供了丰富的固体物质条件。

## 2 研究方法

### 2.1 野外采样原则及方案

(1) 采样原则。综合考虑风化类型及影响因素,采样时,保证原岩风化;受相同外部环境影响的同岩性的风化物,采样控制在同一流域;在小江流域选择典型子流域,即沙湾、大白泥沟、大桥河、蒋家沟及大沟5个流域。每种岩性选取3个重复,共采集27组岩性风化物。

(2) 野外采样方案。根据岩石风化工程地质分类及常见岩石类型风化习性设计采样方案,将采样地分为3类:I为地势相对较高的平坦地区;II为坡段非剥蚀堆积区;III为地势较低的河谷及阶地区。采样方式:对I类和III类采样地进行坑探采样;对II类采样地采用剥槽采样<sup>[8-9]</sup>。

### 2.2 颗分试验

因流域内风化产物均为粗细颗粒混杂的宽级配砾石土,故而联合使用筛析及激光粒度分析法,对2 mm以上粗颗粒按照土工规程采用60,40,20,10,5,2 mm圆孔筛,选取2 kg样品进行筛析;对0.5~2 mm粒径颗粒采用1,0.5 mm孔径筛,选取100 g样品进行分析;0.5 mm以下采用激光粒度仪(Mastersizer 2000,英国马尔文仪器有限公司)进行颗粒分析。

### 2.3 渗透试验

使用TST70型渗透仪测定渗透特性。具体试验方法参见参考相关文献<sup>[8-9]</sup>。

### 2.4 分形维数计算

分形维数值是物质自组织能力和组成复杂程度的表征,用 $D$ 表示<sup>[10]</sup>。分形维数值的计算具体推导已有较多研究,本文参考文献[10]的研究方法计算不同岩性风化物的分形维数值。设 $P(r<x)$ 表示粒径小于 $x$ 的颗粒质量累计百分比; $r$ 表示粒径小于 $x$ 的粒径,应用最小二乘法拟合计算,绘制出 $\lg(P(r<x))$ 和 $\lg x$ 相互关系的直线,得到直线斜率 $b$ ,即分形维数值 $D$ 为:

$$D=3-b \quad (1)$$

### 2.5 数据统计分析

试验数据统计处理采用Excel和SPSS 11.0。



3.2 不同岩性风化物的分形特征

土体在自然形成过程中,作为一种特殊体系,其粒径组成没有特定的尺度。对风化土体而言,粗颗粒形成岩土的基本骨架结构,中颗粒充斥在粗颗粒内,而细颗粒往往形成网状结构包裹粗颗粒,因此风化土体在结构组成上是非均质性的,用线性的方法难以定量描述。20 世纪 80 年代末,开始运用分形方法来研究土体结构,用分形维数值表征土体的结构特征从而来反映土体内部各粒组含量的变化。根据分形理论,从统计分布的角度出发,计算得到不同岩性风化物的分形维数值,见表 1。根据表 1,采用 Duncan 法<sup>[14]</sup>,对不同的岩性风化物的分形维数值进行多重比较,结果见图 1。

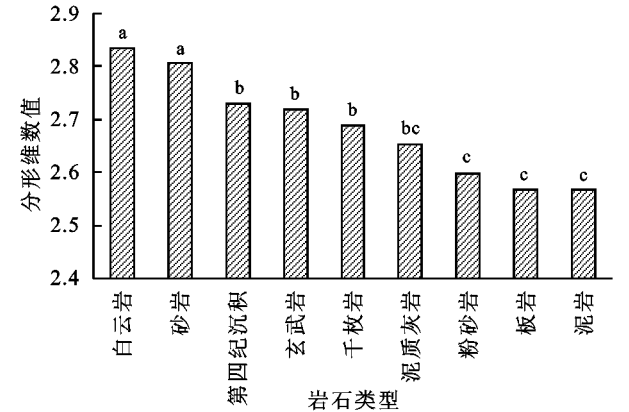


图 1 不同岩性风化物分形维数值

从表 1 不同岩性风化物的计算结果来看,不同岩性风化物的粒度分布线性关系较为明显,相关系数在 0.91 以上,表明不同岩性风化物具有显著的分形特征。结合图 1,不同岩性风化物分形维数值为 2.567~2.833。分形维数大小依次为白云岩>砂岩>第四纪沉积>玄武岩>千枚岩>泥质灰岩>粉砂岩>板岩>泥岩。其中,白云岩与砂岩,第四纪沉积、玄武岩、千枚岩、泥质灰岩,泥质灰岩、粉砂岩、板岩、泥岩风化物之间分形维数差异不显著;其他岩性风化物之间差异显著。根据表 1,不同岩性风化物中不同粒径含量所占的比重有所差异,粗细颗粒之间的比值也不尽相同,但本研究中 9 种不同岩性风化物的分形维数值与不同岩性风化物的粒径含量表现基本一致,即细颗粒含量越多分形维数值越大,反之,则越小;如白云岩、砂岩的细颗粒物较多(40%以上),而粗颗粒物相对较少,分形维数值则较大;泥岩、板岩、粉砂岩、泥质灰岩细颗粒物较少(15%以下),粗颗粒物较多,分形维数值则较小。以上分析说明分形维数值在一定程度上反映了不同岩性风化物的粒度组成。

3.3 分形维数与粒径含量之间的关系

从表 1 可以看出分形维数值随细颗粒含量的增

加而增大,这与倪化勇等的研究一致<sup>[13]</sup>。以分形维数值为因变量,各粒径含量为自变量,进行方程拟合,进一步探讨分形维数值与粒径含量之间的关系,计算结果见表 2。

表 2 分形维数 D 与风化物粒径分布的线性关系

粒径分布/mm	回归方程	R <sup>2</sup>	Sig.
<0.005	$D=0.01d+2.633$	0.558	0.000
0.005~0.05	$D=0.015d+2.578$	0.497	0.000
0.05~0.1	$D=0.005d+2.653$	0.110	0.091
0.1~0.5	$D=0.001d+2.696$	0.003	0.776
0.5~1	$D=-0.002d+2.718$	0.006	0.704
1~2	$D=-0.002d+2.715$	0.001	0.856
2~5	$D=0.002d+2.703$	0.011	0.598
5~10	$D=0.002d+2.696$	0.015	0.547
10~20	$D=-0.005d+2.848$	0.337	0.001
20~40	$D=-0.011d+2.823$	0.398	0.000
40~60	$D=-0.015d+2.786$	0.249	0.008

由表 2 可知,分形维数与<0.005,0.005~0.05 mm 的粒径含量呈极显著正相关,与 10~20,20~40,40~60 mm 的粒径含量呈极显著负相关,与其他粒径含量相关性不显著。这表明分形维数对各个风化物粒径分布含量的反映程度不同,其中反映程度最大的是<0.005 mm 的粒径含量,其次是 0.005~0.05,20~40,10~20,40~60 mm 粒径的含量,即土壤颗粒分形维数越大,细颗粒物含量越高,反之,则越低。这一结论进一步说明了分形维数值可以用来表征不同岩性风化物的粒级组成。对 11 个粒径含量和分形维数进行多元线性回归分析,得到回归方程  $D=0.007d_1+0.009d_2+2.575$ , ( $R=0.834^{**}$ , 经  $t$  检验,回归系数  $d_1$  (<0.005 粒径含量)和  $d_2$  (0.005~0.05 粒径含量)的  $p$  值分别为 0.001,0.003,在  $\alpha=0.01$  的水平下有显著意义)。由回归方程检验可知,分形维数与<0.005,0.005~0.05 mm 粒径含量的偏相关系数呈极显著的正相关关系,与其他粒径含量的偏相关系数关系不显著。因此,<0.05 mm 的粒径是决定不同岩性风化物分形维数的决定粒径,岩石风化得越彻底,细颗粒物物质越多,分形维数则越大。细颗粒含量显著影响土体渗透性及土体强度,与泥石流的启动发生有密切关系<sup>[11-13]</sup>;本研究中,细颗粒含量与分形维数呈显著的正相关关系,因此,分形维数可以作为泥石流启动发生的间接指示指标。

3.4 分形维数与渗透系数之间的关系

渗透系数的变化反映了降水、地形、土体之间的组合关系,与泥石流的启动发生有密切关系,经常被用作泥石流的预测预报指标。樊贵盛等<sup>[15]</sup>研究表明岩石的级配特征对渗透系数影响很大,尤其是细颗粒

物质含量对其影响较大。本研究 $<0.05\text{ mm}$ 的细颗粒物是影响分形维数的决定粒径,因此通过建立分形维数与渗透系数之间的回归方程,分析二者间的关系,可以为泥石流的预测预报提供一定的理论依据。以分形维数为自变量,渗透系数为因变量得到回归方程见图2。

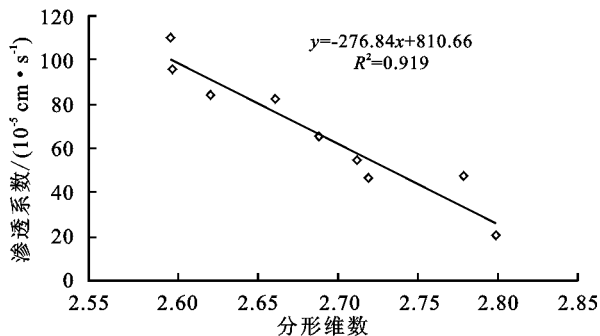


图2 渗透系数与分形维数关系

由图2可以看出,渗透系数与分形维数之间有较好的一次函数关系,随着分形维数的增大,土体的渗透系数减小。相关研究<sup>[16-18]</sup>表明渗透系数总体上随细颗粒物含量的增加而减小;换言之,分形维数越大,细颗粒物含量越多,土体结构越板结,土体小孔隙增加,从而导致土体的渗透性能变差。因此,分形维数可以用来表征渗透系数的变化。

## 4 结论

(1) 不同岩性风化物具有显著的分形特征,分形维数值依次为白云岩>砂岩>第四纪沉积>玄武岩>千枚岩>泥质灰岩>粉砂岩>板岩>泥岩;分形维数与 $<0.005\text{ mm}$ 的粒径含量呈极显著正相关, $<0.05\text{ mm}$ 细颗粒物质的粒径是决定不同岩性风化物分形维数的决定粒径。

(2) 分形维数与渗透系数呈显著的一次函数负相关关系: $y = -276.84x + 810.66$ 。细颗粒物越多,分形维数越大,渗透系数变小,土体渗透能力变差;细颗粒含量显著影响土体渗透性,与泥石流的启动发生有密切关系,分形维数可以作为泥石流启动发生的间接指示指标。

### 参考文献:

[1] Ranjith P U, Stephen H A. CT-measured pore characteristics of surface and subsurface soils influenced by agroforestry and grass buffers[J]. Geoderma, 2008,

145:381-389.

- [2] 梁维,李克钢,侯克鹏,等. 散体云母片岩粒度分形特征及其与抗剪强度参数的关系[J]. 岩土力学, 2012, 33(3):767-772.
- [3] 左昌群,刘代国,丁少林,等. 基于颗粒分形滑坡土体土水特征曲线评价及预测[J]. 科学技术与工程, 2014, 14(32):276-281.
- [4] 张德成,徐宗恒,徐则民,等. 基于分形维数的斜坡非饱和带土体大孔隙分布研究[J]. 地球与环境, 2015, 43(2):210-216.
- [5] 贺拿,陈宁生,朱云华,等. 泥石流源区砾石土分形特征及其与渗透系数关系试验研究[J]. 岩土力学, 2014, 35(9):2543-2548.
- [6] 黄祺,陈宁生,朱云华,等. 泥石流源区砾石土的粒度分形特征[J]. 山地学报, 2012, 30(5):578-584.
- [7] 杨伟,崔鹏,庄建琦,等. 泥石流堆积物粒度分形特征及影响因素分析[J]. 水土保持通报, 2012, 32(2):80-83.
- [8] 张继,韦方强,于苏俊,等. 小江流域风化物的水理特征差异规律的试验研究[J]. 水土保持通报, 2008, 28(6):20-27.
- [9] 张继,韦方强,于苏俊,等. 基于风化物水理特征的泥石流对岩性敏感性研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2008, 27(11):2227-2233.
- [10] 唐建华,何青,刘玮,等. 长江口南槽沉积物粒度的分形特性分析[J]. 泥沙研究, 2007(3):50-56.
- [11] 陈宁生,崔鹏,王晓颖,等. 地震作用下泥石流源区砾石土体强度衰减试验[J]. 岩石力学与工程学报, 2004, 23(16):2743-2747.
- [12] 魏厚振,汪稔,胡明鉴,等. 蒋家沟砾石土不同粗粒含量直剪强度特征[J]. 岩土力学, 2008, 29(1):48-52.
- [13] 倪化勇,刘希林. 泥石流粒度分形维数值的初步研究[J]. 水土保持研究, 2006, 13(1):89-92.
- [14] 谢贤健,韩光中. 不同巨桉人工林土壤分形特征及抗蚀性分析[J]. 土壤, 2014, 46(4):725-731.
- [15] 樊贵盛,邢日县,张明斌. 不同级配砂砾石介质渗透系数的试验研究[J]. 太原理工大学学报, 2012, 43(3):373-378.
- [16] 孔令伟,李新明,田湖南. 砂土渗透系数的细粒效应与其状态参数关联性[J]. 岩土力学, 2011, 32(2):21-26.
- [17] 杨靖,汪吉林. 砂性土渗流的分形特征研究[J]. 煤田地质与勘探, 2010, 38(2):42-45.
- [18] 魏进兵,邓建辉,谭国焕,等. 泄滩滑坡碎块石土饱和与非饱和和水力学参数的现场试验研究[J]. 岩土力学, 2007, 28(6):327-330.