

# 不同坡长扰动土壤微团聚体及颗粒组成的分形特征

郭晓朦<sup>1,2</sup> 姚云<sup>1,3</sup> 何丙辉<sup>1\*</sup> 秦伟<sup>4</sup>

(1. 西南大学 资源环境学院/三峡库区生态环境教育部重点实验室,重庆 400715;

2. 四川沃尔宜环保科技有限公司,成都 610000;

3. 贵州省贵阳市息烽县水务管理局,贵州 551100;

4. 中国水利水电科学研究院 泥沙研究所,北京 100038)

**摘要** 为研究径流小区紫色土在不同坡长下人为扰动地表后土壤微团聚体及颗粒组成的分形特征,通过野外采样与室内分析相结合的方法,研究了在 20、40 和 60 m 坡长下扰动地表与自然坡长下土壤微团聚体及颗粒组成的分形特征及其与土壤理化性质的关系。结果表明:土壤颗粒组成中的优势粒级是 0.250~0.050 mm,含量在 33.21%~22.55%。土壤微团聚体中的优势粒级是 0.250~0.050 mm,次级优势粒级是 0.050~0.010 mm。扰动地表下的土壤分形维数小于自然坡长下的分形维数,坡长越长分形维数越高。坡长越长土壤养分含量越高,即:60>40>20 m,3 种坡长扰动地表处理下的土壤养分均小于自然坡长下的土壤养分。土壤分形维数同土壤容重呈极显著正相关( $P<0.01$ ),同土壤全量养分呈极显著相关( $P<0.01$ ),扰动地表下的土壤分形维数同土壤孔隙度呈显著或极显著相关( $P<0.01$  或  $P<0.05$ )。土壤微团聚体及颗粒组成的分形维数能较好地反映紫色土区土壤的理化性状,更加直观的体现人为扰动地表后土壤理化性质及土壤性状的变化,为紫色土区土壤质量评价和农业评价提供科学依据。

**关键词** 坡长;扰动地表;土壤微团聚体;土壤理化性质;分形维数

中图分类号 S152.3+2

文章编号 1007-4333(2017)07-0090-09

文献标志码 A

## Fractal features of soil micro-aggregate and particle-size distribution under different slope length and disturbance surface

GUO Xiaomeng<sup>1,2</sup>, YAO Yun<sup>1,3</sup>, HE Binghui<sup>1\*</sup>, QIN Wei<sup>4</sup>

(1. College of Resources and Environment, Southwest University/Key Laboratory of Eco-Environments in

Three Gorges Reservoir Region, Ministry of Education, Chongqing 400715, China;

2. Sichuan Allvery Environmental Protection Co., Ltd, Chengdu 610000, China;

3. Water Authority of Xifeng County in Guiyang, Guizhou 551100, China;

4. Department of Sediment Research China Institute of Water Resources and Hydropower Research, Beijing 100038, China)

**Abstract** To provide a scientific basis for the rational development and utilization of land resources micro-aggregate and particle-size distribution under different slope lengths and disturbance surface were studied. Through field sampling and laboratory analysis, fractal features of rhizosphere soil micro-aggregate and particle-size and its relationship with soil physicochemical properties in the natural slope and disturbance surface in 20, 40 and 60 m were investigated. The results showed that: Soil particle-size distribution in the dominant aggregates was 0.250 – 0.050 mm, and the content was 33.21% – 22.55%; Soil micro-aggregates in the dominant aggregates were 0.250 – 0.050 mm and secondary advantage was 0.050 – 0.010 mm; The fractal dimension under disturbance surface was less than the fractal dimension under natural slope length. The length of slope was longer and the fractal dimension was higher; Soil nutrient content of

收稿日期: 2016-06-18

基金项目: 水利部公益性行业科研专项经费项目(201301048); 国家自然科学基金(41271291)

第一作者: 郭晓朦, 硕士, E-mail: zhiyin631127@sina.cn

通讯作者: 何丙辉, 教授, 主要从事土壤侵蚀与水土保持研究, E-mail: hebinghui@swu.edu.cn

the longer slope length was higher in the order of  $60 > 40 > 20$  m; Soil nutrients under disturbance surface were less than those under natural slope length in three slope lengths; Positive correlation between soil fractal dimension with the soil bulk density was significant ( $P < 0.01$ ) while soil total nutrient was significantly associated ( $P < 0.01$ ) and the dimension of soil fractal under disturbance surface with soil porosity were significant or very significantly correlated ( $P < 0.01$  or  $P < 0.05$ ). In conclusion, the fractal dimension of soil micro-aggregate and particle-size distribution better reflected physical and chemical structure of soil in the purple soil area and more intuitively reflected the changing of soil structure and physical and chemical properties after the disturbance, which providing a scientific basis for soil quality evaluation and agricultural assessment in purple soil area.

**Keywords** slope length; disturbance surface; soil micro-aggregate; soil physicochemical properties; fractal features

我国各类生产建设项目等人为活动所造成的水土流失问题十分突出,“十五”期间开发建设项目水土流失量高达 9.46 亿  $t^{[1]}$ ,对水土流失的治理已经迫在眉睫。农林开发等项目在建设过程中势必会破坏土壤表面原有植被和土壤自身结构,并在一定程度上改变地形、地貌,造成大量的人为扰动地面,这样的已经被扰动的地表几乎没有植被覆盖,在侵蚀外营力作用下极易发生水土流失<sup>[2]</sup>。紫色土母岩疏松,易于崩解,侵蚀严重,侵蚀模数高达  $3\ 798 \sim 9\ 831\ t/(km^2 \cdot 年)$ ,是长江上游的主要侵蚀产沙区之一<sup>[3]</sup>。所以研究人为扰动等活动对紫色土区的土壤性质的变化影响尤为重要。坡长是研究水土流失中的一个重要因子,它的变化会引起汇水量的改变,从而使水流形式发生改变,导致下坡径流深度的增加,坡长不同对土壤侵蚀的影响也就不同,最终也会使土壤结构产生差异。因此,将人为扰动与坡长 2 个因素相结合,研究不同坡长条件下扰动地表对土壤结构及养分的影响对今后开荒、农林开发等人为活动扰动地表防治水土流失具有重要指导意义并提供科学依据。

土壤作为一种由不同颗粒组成,具有不规则形状自相似结构的多孔介质,具有一定的分形特征<sup>[4]</sup>。土壤微团聚体作为土壤结构的颗粒单元,不仅是良好土壤结构体的物质基础,也是有机碳、氮磷等养分的主要载体<sup>[5]</sup>。此外,土壤团聚体是土壤结构的基本单元,其稳定性是影响土壤侵蚀的重要因素之一<sup>[6]</sup>。许多学者通过土壤微团聚体或颗粒组成来研究不同施肥措施和不同土地利用方式下土壤结构特征来对土壤进行农业评价<sup>[7-9]</sup>,但是对于人为扰动地表和不同坡长将二者相结合的研究较少,对这 2 种因素共同作用下的土壤指标即土壤微团聚体或颗粒组成的影响研究更是少见。本研究旨在以西南紫色土区不同坡长下扰动地表的土壤为研究对象,重点

研究在扰动地表及自然状态下土壤微团聚体及颗粒组成的分形特征,探讨其与土壤理化性质之间的关系,旨在为西南紫色土区土壤质量评价和合理开发利用提供科学依据。

## 1 材料与方法

### 1.1 试验区概况

本试验的研究区位于重庆市北碚区歇马镇西南大学试验农场 ( $106^{\circ}18'2.46'' \sim 106^{\circ}25'0.5''$  E、 $29^{\circ}43'50.51'' \sim 29^{\circ}48'59.12''$  N),研究区距重庆市主城区约为 30 km,属亚热带温暖湿润季风气候区,地貌类型为浅丘地貌,海拔高度为 175~1 312 m,年平均气温  $18.6^{\circ}C$ ,全年日照时效 1 006.2 h,无霜期 359 d,年降雨量 1 173.6 mm,气候温和,光雨热同季,热量丰富,雨量充沛。土壤类型主要是中性紫色水稻土和灰棕紫泥土。

### 1.2 试验材料及设计

在试验点选择一个土壤质地、具有代表性,坡度为  $15^{\circ}$  的地块,根据试验目的,设置了 9 个径流小区,共 6 个处理(20 m 坡长人工扰动小区,20 m 坡长自然坡面小区,40 m 坡长人工扰动小区,40 m 坡长自然坡面小区,60 m 坡长人工扰动小区,60 m 坡长自然坡面小区),其中人工扰动小区设有 2 次重复。径流小区设计为长方形,径流小区宽度均为 1 m。为了防止各小区间发生土壤颗粒和养分的交换,小区之间用水泥墙体隔开,各小区基本情况见表 1。9 个径流小区样地作处理前,其土壤条件、土壤养分情况基本一致。试验开始前,扰动小区由人工翻松表土约 30 cm,并拔去荒草植被,表面耙平。自然恢复小区不作松土及拔草处理,保持自然坡面,其上长有杂草,覆盖度约为 60%(表 1)。

试验观测时间为 2013—2015 年,对各处理下径流小区每月进行管理,自然坡面作为对照组每月进

表1 各径流小区基本情况

Table 1 Basic situation of every runoff plot

小区编号 Number	土壤类型 Soil type	小区处理方式 Measure	小区规格 Norm	坡度/(°) Slope degree	植被覆盖度/% Vegetation coverage
20 m 扰动地表	紫色土	扰动地表 30 cm	1 m×20 m	15	0
20 m 自然坡面	紫色土	保持自然坡面	1 m×20 m	15	55
40 m 扰动地表	紫色土	扰动地表 30 cm	1 m×40 m	15	0
40 m 自然坡面	紫色土	保持自然坡面	1 m×40 m	15	60
60 m 扰动地表	紫色土	扰动地表 30 cm	1 m×60 m	15	0
60 m 自然坡长	紫色土	保持自然坡面	1 m×60 m	15	60

行人工适当处理使其覆盖度保持在 60% 左右。扰动地表处理的坡面在每月进行适当人工除草扰动措施,雨季时因坡面植被增长较快,故雨季时每月进行 3~4 次除草,使其保持疏松裸露地表,人为扰动时长为 1 d。

### 1.3 采样方法

试验开始后分小区,在 2013 年的雨季前(5 月上旬)时依据坡位,分上坡,中坡,下坡布设采样点,每个坡位平均布设 3 个采样点(每个小区布设 9 个采样点)利用对角线混合法分别采集一次 0~20 cm 表层土样。采样时先将每个小区土壤表面杂草小心铲除,露出土壤,采集表层土(0~20 cm),混合均匀后用四分法分取 1 kg 左右组成 1 个土壤样品,用以测试土壤养分,机械组成,微团聚体等指标,每个小区重复测定 3 次,取其平均值。同时利用 100 cm<sup>3</sup> 普通环刀在小区的 3 个坡位采取环刀样,用以测定土壤容重、土壤孔隙度以及土壤的渗透与贮水性能,每个坡位采集 3 个环刀样,取其平均值。

### 1.4 指标测定

将土壤样品风干过 1.000 和 0.250 mm 筛后测定土壤基本理化性质以及微团聚体组成。采用吸管法测定土壤微团聚体和颗粒组成,采用重铬酸钾外加热法测定土壤有机质,采用半微量凯氏定氮法测定土壤全氮,采用酸溶-钼锑抗比色法测定土壤全磷,采用 NaOH 熔融-火焰光度法测定土壤全钾,碱解氮采用碱解扩散法测定,速效磷采用 Olsen 法测定,速效钾则采用 NH<sub>4</sub>OAc 浸提-火焰光度法测

定<sup>[10]</sup>,容重和孔隙度均采用环刀法测定<sup>[11]</sup>。

### 1.5 土壤分形维数的计算方法

土壤具有自相似结构的多孔介质,由大于某一粒径  $d_i$  ( $d_i > d_{i+1}$ ,  $i = 1, 2, \dots$ ) 的土粒构成的体积  $V(\delta > d_i)$  可表示为:

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

式中: $\delta$  是码尺, $A$ 、 $k$  是描述形状、尺度的常数, $D$  是分形维数。

通常粒径分析资料是由一定粒径间隔的颗粒重量分布表示的,以表示两筛分粒级  $d_i$  与  $d_{i+1}$  间粒径的平均值,忽略各粒级间土粒比重  $\rho$  的差异,即  $\rho_i = \rho$  ( $i = 1, 2, \dots$ ),则:

$$W(\delta > \bar{d}_i) = V(\delta > \bar{d}_i)\rho = \rho A[1 - (\bar{d}_i/k)^{3-D}] \quad (2)$$

式中: $W(\delta > \bar{d}_i)$  为大于  $d_i$  的累积土粒重量。以  $W_0$  表示土壤各粒级重量的总和,由定义有  $\lim_{i \rightarrow \infty} \bar{d}_i = 0$ ,则由式(2)得:

$$W_0 = \lim_{i \rightarrow \infty} W(\delta > \bar{d}_i) = \rho A \quad (3)$$

由式(2)和(3)导出:

$$W(\delta > \bar{d}_i)/W_0 = 1 - (\bar{d}_i/k)^{3-D} \quad (4)$$

设  $\bar{d}_{\max}$  为最大粒级土粒的平均直径, $W(\delta > \bar{d}_{\max}) = 0$ ,代入(4)式有  $k = \bar{d}_{\max}$ 。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:

$$W(\delta > \bar{d}_i)/W_0 = 1 - (\bar{d}_i/\bar{d}_{\max})^{3-D} \quad \text{或} \\ (\bar{d}_i/\bar{d}_{\max})^{3-D} = W(\delta < \bar{d}_i)/W_0 \quad (5)$$

式中: $W(\delta < \bar{d}_i)$  为粒径小于  $d_i$  的土粒累积重量。

以  $\lg(W_i/W_0)$  为纵坐标,  $\lg(\bar{d}_i/\bar{d}_{\max})$  为横坐标, 3-D 为其斜率, 因此, 要测定  $D$  即可用回归分析方法<sup>[12]</sup>。

### 1.6 土壤质地分级标准

根据吸管法的测定结果确定土壤质地类型, 土壤颗粒组成按照我国质地分类标准进行划分, 砂粒: 1.000~0.050 mm; 粗粉粒: 0.050~0.010 mm; 粘粒: <0.001 mm<sup>[10]</sup>。

### 1.7 统计分析

采用 EXCEL 2010 软件及 SPSS 19.0 分析软件进行数据的处理和统计对比分析。在统计分析过程中, 差异显著性采用 Duncan 检验法, 各指标中相关性分析采用 Pearson 法, 土壤分形维数的计算和拟合度的计算采用回归分析法。

## 2 结果与分析

### 2.1 扰动地表下不同坡长土壤颗粒组成及分形维数

土壤颗粒分布影响土壤的水力特性和土壤肥力状况, 并与土壤侵蚀和退化直接相关, 是重要的土壤物理特性之一<sup>[13]</sup>。通过表 2 可以看出, 在不同坡长下 1.000~0.250 mm 粒径土粒含量扰动地表措施大于自然坡面, 0.005~0.001 mm 粒径土粒含量为自然坡面大于扰动地表措施, 其他范围的粒径土粒含量均有不同程度的变化规律。不同坡长下土壤颗粒组成中 0.250~0.050 mm, 0.050~0.010 mm 粒径土粒含量较大, 为优势粒级及次优势粒级, 分别占 22.55%~31.21%, 20.96%~26.84%, <0.001 mm 粒径土粒含量次之为 16.73%~22.66%。在扰动地表条件下, 40m 坡长下 1.000~0.250 mm 及 0.250~0.050 mm 粒径土粒含量最大, 20m 坡长下 0.010~0.005 mm 及 <0.001 mm 粒径土粒含量最大, 60 m 坡长下 0.050~0.010 及 0.005~0.001 mm 粒径土粒含量最大。在自然坡长下 60 m 坡长土壤粘粒含量最大, 说明自然状态下坡长越长, 可能更有利于改善土壤结构, 在扰动地表下, 20 m 坡长的土壤粘粒含量相对较大, 说明人为扰动地表对于较短坡长而言可能有利于改善土壤结构。不同坡长下扰动地表土壤颗粒分形维数变化为 2.74~2.79, 3 种处理下扰动地表下的分形维数均小于自然坡面下的分形维数。拟合相关系数 >0.94, 40 m 扰动地表下的土壤分形维数同其他措施差异性显著 ( $P<0.05$ )。

### 2.2 扰动地表下不同坡长土壤微团聚体及分形维数

土壤微团聚体是有机无机复合体经过多次聚合而成, 以不同粒级微团体的形式组合在土体内<sup>[14]</sup>。此外它也是团粒结构的初级阶段, 具有抵抗机械破坏和调节土壤水肥气热以及生物活动多种功能, 其组成影响着土壤养分的吸收和释放, 是土壤肥力的一个重要特征<sup>[15]</sup>。由表 3 可知, 各措施下 0.250~0.050 mm 粒径土粒含量最大, 为 40.65%~45.39%, 优势粒级; 0.050~0.010 mm 粒径含量次之为 18.53%~27.82%, 而 0.010~0.005, 0.005~0.001 mm 及 <0.001 mm 粒径含量均偏低, 1.85%~11.87% 间变化。1.000~0.250, 0.250~0.050 mm, <0.001 mm 粒径范围下各措施差异性不显著。60 m 坡长下自然坡长的各粒径含量大于扰动地表下的各粒径含量。20 和 40 m 坡长下自然坡长同扰动地表的各粒径含量变化规律不明显。在扰动地表下, 对于 1.000~0.250, 0.250~0.050 mm 粒径含量是 40 m 坡长最大, 粒径越小, 坡长越长的土壤粒径含量大。

### 2.3 不同坡长下扰动地表土壤理化性质变化规律

由表 4 可以看出, 对于全量养分, 坡长越长全量养分含量越高即 60>40>20 m, 3 种坡长扰动地表处理下的土壤全量养分均小于自然坡长下的全量养分。土壤全氮含量在 0.60~0.98 g/kg 变化, 最高的是 60 m 自然坡长, 比最小的 20 m 扰动地表高出 63.33%。土壤全磷含量变化为 0.40~0.46 g/kg, 相互之间差异性不显著。土壤全钾含量变化范围为 12.79~17.78 g/kg, 20 m 扰动地表土壤全钾同其他措施差异性显著 ( $P<0.05$ )。团聚体和有机质是保持土壤结构和肥力的基础, 二者相互作用, 不可分割, 前者是后者存在的场所, 后者是前者存在的胶结物质<sup>[16]</sup>, 不同坡长下有机质含量在 11.15~16.12 g/kg, 相互之间差异性不显著。扰动地表下的土壤有机质小于自然坡面下的土壤有机质, 而且坡长越长土壤有机质含量越高, 可能是在自然坡面下枯枝落叶的堆积, 逐渐转化为有机质, 从而增加了有机质的含量。土壤碱解氮含量最高的是 40 m 自然坡面, 含量最低的是 20 m 扰动地表处理。土壤有效养分的变化规律同全量养分的变化规律一致, 并且各处理差异性不显著。土壤非毛管孔隙相互之间差异性不显著。土壤坡长越小, 土壤容重及孔隙度越趋于偏大。

表2 不同坡长条件下土壤颗粒组成及分形维数

Table 2 Particle distribution and fractal dimension of soil under different slope length

措施类型 Measure type	颗粒组成/% Particle distribution				分形维数 $D$	$R^2$		
	1.000~ 0.250 mm	0.250~ 0.050 mm	0.050~ 0.010 mm	0.010~ 0.005 mm			<0.001 mm	
20 m 扰动地表	6.70±1.21 ab	25.57±3.39 ab	23.25±2.16 ab	9.74±0.40 a	12.68±0.80 c	22.07±1.97 a	2.78±0.01 a	0.97±0.01 a
20 m 自然坡面	6.43±1.40 ab	25.54±5.36 ab	25.27±4.67 ab	9.29±0.67 ab	13.27±0.66 bc	20.20±0.67 a	2.76±0.01 a	0.96±0.01 a
40 m 扰动地表	8.42±2.10 a	31.21±3.18 a	23.19±2.68 ab	7.80±1.78 b	12.65±2.00 c	16.73±2.92 b	2.74±0.03 b	0.97±0.01 a
40 m 自然坡面	5.37±0.72 ab	26.87±0.83 ab	24.79±1.74 ab	8.30±0.21 ab	13.14±0.46 bc	21.52±0.95 a	2.77±0.01 a	0.97±0.01 a
60 m 扰动地表	6.74±3.14 ab	22.55±2.27 b	26.84±2.30 a	7.94±0.44 b	15.37±0.87 b	20.55±2.32 a	2.77±0.02 a	0.95±0.01 ab
60 m 自然坡长	3.95±0.16 b	23.76±2.58 b	20.96±0.94 b	9.12±0.47 ab	19.56±1.94 a	22.66±1.61 a	2.79±0.01 a	0.94±0.01 b

注:不同小写字母表示在  $P<0.05$  水平上差异性显著,下同。表中小数点后位数一致。

Note: Different small letters in the same column represent statistic significance at 0.05 level, the next tables are the same.

表3 不同坡长条件下土壤微团聚体组成及分形维数

Table 3 Micro-aggregated distribution and fractal dimension of soil under different slope length

措施类型 Measure type	微团聚体组成 Micro-aggregate distribution				分形维数 $D$	$R^2$		
	1.000~ 0.250 mm	0.250~ 0.050 mm	0.050~ 0.010 mm	0.010~ 0.005 mm			<0.001 mm	
20 m 扰动地表	13.05±1.01 a	40.65±3.40 a	27.82±3.12 a	6.46±0.47 ab	9.87±0.44 ab	1.85±0.77 b	2.44±0.05 b	0.92±0.02 b
20 m 自然坡面	15.43±0.54 a	42.92±1.22 a	22.95±1.16 ab	4.79±0.96 b	11.87±1.32 a	2.05±0.90 b	2.46±0.06 b	0.91±0.04 b
40 m 扰动地表	15.98±3.26 a	45.39±2.82 a	22.54±0.57 ab	7.19±0.99 a	6.72±2.47 c	2.19±0.57 b	2.45±0.03 b	0.95±0.02 ab
40 m 自然坡面	12.75±1.92 a	41.79±2.32 a	26.49±3.03 a	6.74±0.85 ab	10.03±0.26 ab	2.20±0.69 b	2.47±0.03 b	0.93±0.01 ab
60 m 扰动地表	12.73±2.53 a	43.12±1.68 a	24.65±1.96 ab	7.74±1.67 a	7.81±0.62 bc	3.00±1.87 b	2.48±0.09 b	0.94±0.03 ab
60 m 自然坡长	12.76±5.22 a	45.04±6.58 a	18.53±8.18 b	8.70±1.70 a	9.54±2.19 ab	5.44±0.96 a	2.58±0.03 a	0.97±0.01 a

表 4 不同坡长条件下土壤基本理化性质

Table 4 Soil physico-chemical properties under different slope length

措施类型 Measuretype	全氮/ (g/kg) Total N	全磷/ (g/kg) Total P	全钾/ (g/kg) Total K	有机质/ (g/kg) Organic matter	碱解氮/ (mg/kg) Available N	有效磷/ (mg/kg) Available P
20 m 扰动地表	0.60±0.26 b	0.40±0.02 a	12.79±0.54 c	11.15±2.54 a	67.79±15.22 b	12.83±7.66 a
20 m 自然坡面	0.62±0.05 b	0.44±0.05 a	16.2±0.51 b	13.45±2.76 a	85.93±12.37 ab	18.61±1.06 a
40 m 扰动地表	0.64±0.08 b	0.43±0.09 a	15.79±0.34 b	13.70±0.44 a	87.77±4.71 ab	13.45±5.54 a
40 m 自然坡面	0.74±0.06 ab	0.46±0.04 a	16.31±1.02 b	14.42±1.06 a	103.74±3.15a	20.33±2.22 a
60 m 扰动地表	0.78±0.19 ab	0.45±0.06 a	16.96±1.20 ab	14.61±4.69 a	71.76±16.66 b	15.64±8.64 a
60 m 自然坡长	0.98±0.21 a	0.46±0.08 a	17.78±0.58 a	16.12±7.54 a	102.90±10.11 a	20.90±7.00 a

  

措施类型 Measuretype	有效钾/ (mg/kg) Available K	容重/(g/cm <sup>3</sup> ) Bulk density	非毛管孔隙/% Non-capillary porosity	毛管孔隙/% Capillary porosity	总孔 隙度/% Total porosity
20 m 扰动地表	91.57±3.80 a	1.33±0.05 b	9.16±0.47 a	37.42±0.65 ab	46.58±0.84 ab
20 m 自然坡面	116.14±20.08 a	1.45±0.05 a	8.54±1.03 a	40.44±3.39 a	48.98±4.2 a
40 m 扰动地表	116.28±67.57 a	1.32±0.05 b	9.59±1.98 a	37.44±0.9 ab	47.03±2.23 ab
40 m 自然坡面	178.53±95.38 a	1.37±0.06 ab	9.20±0.52 a	37.30±1.48 ab	46.50±1.56 ab
60 m 扰动地表	140.84±61.20 a	1.32±0.06 b	8.44±1.80 a	37.36±0.72 ab	45.80±2.25 ab
60 m 自然坡长	199.28±125.54 a	1.28±0.09 b	8.48±1.23 a	34.88±1.44 b	43.36±2.09 b

2.4 不同处理下土壤分形维数与理化性质的相关性分析

对于扰动地表,自然坡面下的土壤分形维数与

相应的土壤理化性质进行相关性分析,结果见表 5。结果表明,土壤分形维数同土壤容重呈极显著正相关( $P<0.01$ ),同碱解氮,有效磷及速效钾相关性较

表 5 扰动地表及自然坡长下土壤分形维数与理化性质的相关性分析

Table 5 Correlation among fractal dimension and physico-chemical properties in different slope length and disturbed surface

因子 Indicator	扰动地表微团 聚体分形维数 Micro-aggregatefractal dimension in disturbed surface	扰动地表颗粒 组成分形维数 Particle distribution fractal dimension in disturbed surface	自然坡面微团 聚体分形维数 Micro-aggregatefractal dimension in different slope length	自然坡面颗粒 组成分形维数 Particledistributionfractal dimension in different slope length
容重	0.993**	0.998**	0.986**	0.992**
总孔隙度	0.437*	0.404*	0.180	0.231
毛管孔隙度	0.781**	0.788**	0.208	0.256
非毛管孔隙度	0.499**	0.457*	0.663**	0.687**
有机质	0.228	0.258	0.217	0.204
全氮	0.972**	0.977**	0.981**	0.978**
全磷	0.995**	0.996**	0.995**	0.998**
全钾	0.409*	0.398*	0.681**	0.665**
碱解氮	0.068	0.085	0.079	0.080
有效磷	0.192	0.175	0.238	0.226
速效钾	-0.047	-0.039	0.006	0.012

注: \* 表示差异达显著水平( $P<0.05$ ), \*\* 表示差异达极显著水平( $P<0.01$ )。

Note: \* represents significant at the  $P<0.05$  level; \*\* represents significant at the  $P<0.05$  level.

小,而且未达到显著性水平,同土壤有机质相关性不显著。扰动地表下土壤微团聚体分形维数和颗粒分析分形维数同土壤总孔隙度,全钾呈显著性正相关( $P < 0.05$ ),同土壤毛管孔隙度,全氮及全磷呈极显著正相关( $P < 0.01$ ),同土壤非毛管孔隙度呈显著或极显著性相关( $P < 0.05$  或  $P < 0.01$ )。自然坡长下土壤微团聚体分形维数和颗粒分形维数同土壤非毛管孔隙度及土壤全量养分呈极显著正相关( $P < 0.01$ )。与自然坡长下的土壤分形维数相比,扰动地表下土壤分形维数和土壤孔隙度的关系更加密切,说明人工扰动地表在一定程度上改变了土壤结构,通气程度等性质。

### 3 讨论

紫色土区土壤因不合理的开发利用以及长期不正确的耕作活动,水土流失情况日益严重,土壤结构也遭到破坏,土壤微团聚体结构较差。良好的微团聚体结构能够抵抗机械扰动的破坏<sup>[17]</sup>,而且土壤团聚体的充气,持水孔隙比例适当,能协调土壤水、气、热和养分的矛盾<sup>[18]</sup>,土壤微团聚体是农业评价的一个重要指标。在本研究中,重点探讨了在人为扰动及不同坡长条件下对于土壤微团聚体及颗粒组成的影响。刘梦云等<sup>[19]</sup>研究发现在农地,天然草地,人工草地等6种土地利用方式中,天然草地更加有助于土壤微团聚体的形成。闫建梅等<sup>[20]</sup>研究结果表明在川中丘陵区林地比裸地能更好的改变土壤理化结构,是植被恢复和水土流失治理的最优模式。在本研究中自然坡长条件下,不经过人工扰动在自然降雨下,径流小区内逐步形成天然草地,扰动地表下的土壤微团聚体小于自然坡长下的土壤微团聚体,不同坡长条件下土壤微团聚体和颗粒组成也有着显著差异。土壤微团聚体在表征土壤肥力方面具有不可忽视的作用,施肥和土地利用方式是影响土壤微团聚体组成的主要因素<sup>[21]</sup>。在自然坡长下,草地一般会有一年生植被演变为多年生植被,地表凋落物增加了地表土壤有机物的来源,使土壤颗粒间有机质胶结作用增强<sup>[22]</sup>,同时腐殖质增加,会提高了土壤中的养分含量,自然坡长的土壤养分含量均高于扰动地表下的,并且坡长越长,单位面积上的腐殖质含量越多,土壤养分含量也相对越高。地表凋落物也使得自然坡长下的土壤结构得以改变,相比于人工扰动的地表,土壤颗粒间的胶结作用更强。

宫阿都等<sup>[23]</sup>研究表明土壤团粒分形维数与其

结构及稳定性关系紧密,即团粒结构的分形维数愈小,土壤愈具有良好的结构与稳定性。本研究中无论是土壤微团聚体还是颗粒组成,不同坡长扰动地表下土壤的分形维数小于自然坡长下的土壤分形维数,坡长越长,土壤分形维数越大,说明了人为扰动地表在一定程度上改变了土壤的结构和稳定性,使得土壤分形维数变小,其原因可能是自然坡面上植被根系生长及穿插、扎伸,加上每年大量凋落物的归还土壤,使得土壤的微团聚体得到演化,同时植被根系分泌物及有机质对于土壤颗粒具有一定的胶结作用,从而提高了团聚体结构和稳定性<sup>[24]</sup>,而扰动地表土壤则是由于人为扰动造成了与自然坡面土壤的差异,其分形维数差异不明显。土壤理化性质同土壤微团聚体及颗粒组成有着密切的关系,土壤全量养分同土壤分形维数呈极显著相关,说明土壤中肥力在一定程度上影响着土壤的结构,而土壤孔隙度与扰动地表下土壤分形维数呈显著或极显著相关,说明人为扰动地表改变了土壤表层土壤的结构,土壤孔隙度相应改变,最终导致分形维数的改变。而在自然坡长下,土壤表层有草类植物的多重阻挡作用,减小了降雨对土层的冲刷,加强了坡面径流的入渗,所以土壤孔隙度同土壤分形维数的相关性未达到显著。

### 4 结论

土壤颗粒组成中各个范围的粒径土粒含量呈现出不同程度的变化规律,土壤颗粒组成中 0.250~0.050 mm 为优势粒级,0.050~0.010 mm 次优势粒级。土壤微团聚组成中 0.250~0.050 mm 粒径土粒含量最大,为优势粒级。扰动地表下的土壤分形维数小于自然坡长下的分形维数,坡长越长分形维数越高。坡长越长土壤养分含量越高,即:60 m > 40 m > 20 m,3种坡长扰动地表处理下的土壤养分均小于自然坡长下的土壤养分。土壤分形维数同土壤容重呈极显著正相关( $P < 0.01$ ),同土壤全量养分呈极显著相关( $P < 0.01$ ),扰动地表下的土壤分形维数同土壤孔隙度呈显著或极显著相关( $P < 0.01$  或  $P < 0.05$ )。

### 参考文献 References

- [1] 贺小容,何丙辉,秦伟,左长清,李天阳,姚云.不同坡长条件下扰动地表对土壤养分的影响[J].水土保持学报,2013,27(5):

- 154-158,163  
He X R, He B H, Qin W, Zuo C Q, Li T Y, Yao Y. Effect of disturbance surface on soil nutrient under different slope length [J]. *Journal of Soil and Water Conservation*, 2013, 27(5): 154-158,163 (in Chinese)
- [2] 罗婷,王文龙,李宏伟,白芸. 开发建设中扰动地面新增水土流失研究[J]. 水土保持研究, 2012(3):30-35  
Luo T, Wang W L, Li H W, Bai Y. Study on the newly occurred soil and water loss on the site the disturbed lands in of development and construction[J]. *Research of Soil and Water Conservation*, 2012(3):30-35 (in Chinese)
- [3] 赵岩洁,李阳兵,冯永丽. 三峡库区紫色岩小流域土壤侵蚀强度动态监测[J]. 资源科学, 2012(6):1125-1133  
Zhao Y J, Li Y B, Feng Y L. Dynamic monitoring of soil erosion intensity in purple rock small watershed of three gorges reservoir area [J]. *Resources Science*, 2012(6):1125-1133 (in Chinese)
- [4] 李德成,张桃林. 中国土壤颗粒组成的分形特征研究[J]. 土壤与环境, 2000(4):263-265  
Li D C, Zhang T L. Fractal features of particle size distribution of soils in China [J]. *Soil and Environmental Sciences*, 2000(4):263-265 (in Chinese)
- [5] 韩志卿,张电学,王秋兵,陈洪斌,常连生,于玉桥,刘东强. 不同施肥制度下褐土微团聚体有机碳活性变化[J]. 水土保持学报, 2008(4):138-142  
Han Z Q, Zhang D X, Wang Q B, Chen H B, Chang L S, Yu Y Q, Liu D Q. Changes of organic carbon activity in cinnamon soil micro-aggregates under different fertilization regimes [J]. *Journal of Soil and Water Conservation*, 2008(4):138-142 (in Chinese)
- [6] 张琪,方海兰,史志华,李朝霞,蔡崇法. 侵蚀条件下土壤性质对团聚体稳定性影响的研究进展[J]. 林业科学, 2007(S1):77-82  
Zhang Q, Fang H L, Shi Z H, Li Z X, Cai C F. Advances in influence factors of aggregate stability under erosion [J]. *Scientia Silvae Sinicae*, 2007(S1):77-82 (in Chinese)
- [7] 董莉丽. 不同土地利用类型下土壤水稳性团聚体的特征[J]. 林业科学, 2011(4):95-100  
Dong L L. Characteristics of soil water stable aggregates under different land-use types[J]. *Scientia Silvae Sinicae*, 2011(4):95-100 (in Chinese)
- [8] 蒲玉琳,林超文,谢德体,魏朝富,倪九派. 植物篱-农作坡地土壤团聚体组成和稳定性特征[J]. 应用生态学报, 2013(1):122-128  
Pu Y L, Lin C W, Xie D T, Wei C F, Ni J P. Composition and stability of soil aggregates in hedgerow-crop slope land [J]. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2013(1):122-128 (in Chinese)
- [9] 尹刚强,田大伦,方晰,洪瑜. 不同土地利用方式对湘中丘陵区土壤质量的影响[J]. 林业科学, 2008(8):9-15  
Yin G Q, Tian D L, Fang X, Hong Y. Effects of land use types on soil quality of the hilly area in central Hunan Province [J]. *Scientia Silvae Sinicae*, 2008(8):9-15 (in Chinese)
- [10] 杨剑虹,王成林,代亭林. 土壤农化分析与环境监测[M]. 北京: 中国大地出版社, 2008  
Yang J H, Wang C L, Dai H L. *Agrochemical Soil Analysis and Environmental Monitoring* [M]. Beijing: China Land Press, 2008 (in Chinese)
- [11] 中国科学院南京土壤研究所. 土壤理化分析[M]. 上海: 上海科学技术出版社, 1978  
Institute of Soil Science of Chinese Academy of Sciences in Nanjing. *Soil Physical and Chemical Property Analysis* [M]. Shanghai: The Science & Technology Press in Shanghai, 1978 (in Chinese)
- [12] 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):162-167  
Wu C Z, Hong W. Study on fractal features of soil aggregate structure under different management patterns [J]. *Acta Pedologica Sinica*, 1999, 36(2):162-167 (in Chinese)
- [13] 张超,刘国彬,薛莲,宋籽霖,张昌胜. 黄土丘陵区不同植被类型根际土壤微团聚体及颗粒分形特征[J]. 中国农业科学, 2011(3):507-515  
Zhang C, Liu G B, Xie S, Song Z L. Fractal features of rhizosphere soil micro-aggregate and particle-size distribution under different vegetation types in the hilly-gully region of loess plateau [J]. *Scientia Agricultura Sinica*, 2011(3):507-515 (in Chinese)
- [14] 龚伟,胡庭兴,王景燕,宫渊波,冉华,张世熔. 川南天然常绿阔叶林人工更新后土壤微团聚体分形特征研究[J]. 土壤学报, 2007(3):571-575  
Gong W, Hu T X, Wang J Y, Gong Y B, Ran H, Zhang S R. Fractal features of soil micro aggregates in soils under natural and regenerated evergreen broadleaved forests in south Sichuan Province [J]. *Acta Pedologica Sinica*, 2007(3):571-575 (in Chinese)
- [15] 沈慧,姜凤岐,杜晓军,郭洁,王世忠. 水土保持林土壤肥力及其评价指标[J]. 水土保持学报, 2000(2):60-65  
Shen H, Jiang F Q, Du X J, Guo J, Wang S Z. Study on soil fertility of water and soil conservation forest and its evaluation indexes [J]. *Journal of Soil and Water Conservation*, 2000(2):60-65 (in Chinese)
- [16] 窦森,李凯,关松. 土壤团聚体中有机质研究进展[J]. 土壤学报, 2011, 48(2):412-418  
Dou S, Li K, Guan S. A review on organic matter in soil aggregates [J]. *Acta Pedologica Sinica*, 2011, 48(2):412-418 (in Chinese)
- [17] 史奕,陈欣,沈善敏. 土壤团聚体的稳定机制及人类活动的影响[J]. 应用生态学报, 2002(11):1491-1494  
Shi Y, Chen X, Shen S M. Stable mechanisms of soil aggregate and effects of human activities [J]. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2002(11):1491-1494 (in Chinese)
- [18] Six J E E P K. Soil structure and soil organic matter II: A normalized stability index and the effect of mineralogy [J]. *Soil*



- Science Society of America Journal*, 2000, 64: 1042-1049
- [19] 刘梦云, 常庆瑞, 齐雁冰. 不同土地利用方式的土壤团粒及微团粒的分形特征[J]. 中国水土保持科学, 2006(4): 47-51  
Liu M Y, Chang Q R, Qi Y-B. Fractal features of soil aggregate and micro-aggregate under different land use[J]. *Science of Soil and Water Conservation*, 2006(4): 47-51 (in Chinese)
- [20] 闫建梅, 何联君, 何丙辉, 田太强. 川中丘陵区不同治理模式对土壤微团聚体分形特征的影响[J]. 中国生态农业学报, 2014(11): 1294-1300  
Yan J M, He L J, He B H, Tian T Q. Effects of different governance patterns of small watershed on fractal features of soil micro-aggregates in the hilly areas of central Sichuan Basin [J]. *Chinese Journal of Eco-Agriculture*, 2014(11): 1294-1300 (in Chinese)
- [21] 龚伟, 颜晓元, 蔡祖聪, 王景燕. 长期施肥对小麦-玉米轮作土壤微团聚体组成和分形特征的影响[J]. 土壤学报, 2011(6): 1141-1148  
Gong W, Yan X Y, Cai Z C, Wang J Y. Effects of long-term fertilization on composition and fractal feature of soil micro-aggregates under a wheat-maize cropping system [J]. *Acta Pedologica Sinica*, 2011(6): 1141-1148 (in Chinese)
- [22] 周萍, 刘国彬, 侯喜禄. 黄土丘陵区不同恢复年限草地土壤微团粒分形特征[J]. 草地学报, 2008(4): 396-402  
Zhou P, Liu G B, Hou X L. Study on fractal features of soil micro-aggregates during different restoration stages in the loess hilly region[J]. *Acta Agrestia Sinica*, 2008(4): 396-402 (in Chinese)
- [23] 宫阿都, 何毓蓉. 金沙江干热河谷区退化土壤结构的分形特征研究[J]. 水土保持学报, 2001(3): 112-115  
Gong A D, He Y R. Study on fractal features of soil structure of degraded soil in dry and hot valley region of Jinsha River [J]. *Journal of Soil and Water Conservation*, 2001(03): 112-115 (in Chinese)
- [24] 黄欢, 何丙辉, 鲍玉海, 韦杰, 郭晓朦. 不同模式地埂植物篱对土壤颗粒组成特征参数的影响[J]. 水土保持学报, 2014(6): 256-261  
Huang H, He B H, Bao Y H, Wei J, Guo X M. Effects of different terrace hedgerow patterns on the characteristic parameters of soil particle size distribution[J]. *Journal of Soil and Water Conservation*, 2014(6): 256-261 (in Chinese)

责任编辑: 王燕华