

# 石灰岩区土壤分形特征及其与土壤性质的关系<sup>①</sup>

张治伟<sup>1</sup>, 傅瓦利<sup>1</sup>, 朱章雄<sup>1,2</sup>, 张洪<sup>3</sup>, 文志林<sup>1</sup>, 李芹<sup>1</sup>

(1 西南大学地理科学学院, 重庆 400715; 2 重庆科技学院, 重庆 400700; 3 重庆南开中学, 重庆 400700)

**摘要:** 研究了岩溶坡地不同生态系统土壤颗粒组成和团粒结构的分形特征。结果表明, 土壤颗粒组成分形维数与黏粒及物理性黏粒含量显著正相关, 与砂砾含量显著负相关。团粒结构分形维数与水稳性团聚体含量显著负相关, 与团聚体湿筛后的破坏率显著正相关, 即分形维数愈高, >0.25 mm 水稳性团聚体和水稳性大团聚体含量愈低; 团粒结构的分形维数与土壤有机质有负相关趋势, 与土壤阳离子交换量显著负相关, 与土壤体积质量(容重)呈正相关趋势。次生灌丛岩溶生态系统退化后, 土壤黏粒减少, 体积质量上升, 土壤水稳性团聚体含量及其稳定性下降, 土壤颗粒组成分形维数降低, 土壤团粒结构分形维数则呈上升趋势。颗粒组成分形维数与团粒结构分形维数对土壤质量和岩溶生态环境状况的反映是一致的。

**关键词:** 岩溶区; 土壤结构; 分形维数; 土壤性质

**中图分类号:** P642.253

土壤结构性影响土壤热、水、气、肥的状况, 从而在很大水平上反映了土壤肥力。喀斯特石漠化是西南岩溶区主要的土壤和土地退化形式, 在石漠化发展过程中, 由于土壤腐殖质减少、侵蚀加剧等原因, 必然引起包括土壤结构等在内的土壤物理性质的退化。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<sup>[1]</sup>, 具有一定的分维特征。已有研究指出, 分形维数能客观表征团粒结构的水稳性团聚体及水稳性大团聚体的含量及土壤粒径大小组成<sup>[2]</sup>, 与土壤团聚体组成存在明显对应关系<sup>[3]</sup>。土壤团粒结构与颗粒组成分形维数在作为土壤肥力诊断指标等方面具有很好的应用潜力。迄今为止, 在西南岩溶生态脆弱地区对土壤性质与肥力演变的研究已有一些报道<sup>[4-5]</sup>, 而土壤颗粒组成和团粒结构的研究主要涉及与土壤质量的关系方面<sup>[6-7]</sup>, 土壤分形特征及其与土壤性质的关系所见报道较少, 相关研究主要集中在我国东部地区<sup>[2,8]</sup>。

本文在研究不同岩溶生态系统土壤颗粒和团粒结构组成特征的基础上, 以基于质量分布确定土壤颗粒大小分布分形维数的办法, 计算了土壤颗粒组成和团粒结构的分形维数值。同时分析了土壤分形维数与土壤颗粒和结构组成的关系, 研究了土壤分形维数与土壤性质及肥力演变的关系, 初步探讨了不同退化程度岩溶生态系统土壤分形维数值的特征, 为定量描述石漠化演变特征提供新的研究视角和研究手段。

## 1 研究区概况与实验方法

本研究以重庆南川区金佛山北坡及其北麓的岩溶丘陵为研究区, 这里属于云贵高原向四川盆地的过渡地带, 是我国西南岩溶区的重要组成部分。区内碳酸盐岩出露于寒武系、奥陶系、二叠系和三叠系地层, 本研究各剖面主要分布于奥陶系地层(有一个剖面在三叠系)。研究区地形以岩溶丘陵和低山为主, 岩溶生态系统类型多样, 主要包括次生灌丛夹马尾松林地、草坡、旱地、水田和退耕地, 次生灌丛林地退化后主要用于耕地或演变为草坡地, 近年部分耕地已退耕。研究区概况详见参考文献[9-10]及笔者硕士学位论文<sup>[11]</sup>。

野外按发生层次取样, 记录各剖面岩溶生态系统类型、植被覆盖状况、土层厚度、颜色、土体构型和结构等<sup>[9]</sup>。原状土体带回室内风干后用萨维诺夫法分析各级干筛及水稳性团聚体含量, 用风干研磨过筛的样品以比重计法测定土壤机械组成。同时分析土壤体积质量(容重)、有机质含量、全N以及阳离子交换量。土壤理化性质采用常规测试方法<sup>[12-13]</sup>。

## 2 实验结果

表 1 为各研究剖面的基本特征, 表 2 为各研究剖面土壤性质测试结果、土壤颗粒组成及其分形维数, 表 3 为各样品各级干湿筛团聚体含量及其分形维数。

①基金项目: 重庆市科委软科学项目“石漠化与重庆岩溶地区农村经济发展关系研究(40600206)”资助。

作者简介: 张治伟(1974—), 男, 湖南怀化人, 硕士, 主要从事岩溶环境学、土壤侵蚀与土壤地理学研究。E-mail: zflyzzw@swu.edu.cn

表 1 各研究剖面基本特征

Table 1 Basic features of the sampling profiles

| 岩溶生态系统类型 | 剖面编号       | 海拔 (m)               | 坡度 (°)              | 岩石裸露率 (%)  | 剖面生境                                                    |
|----------|------------|----------------------|---------------------|------------|---------------------------------------------------------|
| 马尾松灌丛    | 1, 9       | 1259, 764            | 15                  | 25 ~ 30    | 荚迷、铁仔、白茅和芒等灌丛杂草夹稀疏矮马尾松, 剖面 1 属于岩体之间的石缝土                 |
| 退耕地      | 2, 4       | 1255, 1105           | 分别为 3, 15           | 分别约 30, 50 | 剖面 2 退耕 3 ~ 4 年, 已种银杏, 高度 0.5 ~ 1 m; 剖面 4 坡度较大, 地面仅生长矮草 |
| 草坡       | 6          | 637                  | 25                  | 34         | 白茅为主, 夹杂荚迷、栀子花和葛根等                                      |
| 耕地(水田)   | 3, 5, 7, 8 | 1125, 1088, 601, 589 | 分别 1 ~ 2, 7, 25, 20 | 约 45 ~ 50  | 剖面 3 为水田, 取样时已落干; 其余为坡耕旱地, 种植玉米、黄豆和红薯为主                 |

注: 剖面 7 坡面坡度为 25°, 点上坡度为 5°。

表 2 各研究剖面土壤属性、土壤颗粒组成及其分形维数

Table 2 Soil properties, particle size distributions and its fractal dimensions of sampling profiles

| 剖面 | 层次              | 土层<br>(cm) | 体积质量<br>(g/cm <sup>3</sup> ) | 有机质<br>(g/kg) | 全 N<br>(g/kg) | CEC<br>(cmol/kg) | 不同粒径 (mm) 土粒的含量 (g/kg) |           |           |            |             |        | 分形<br>维数 |
|----|-----------------|------------|------------------------------|---------------|---------------|------------------|------------------------|-----------|-----------|------------|-------------|--------|----------|
|    |                 |            |                              |               |               |                  | 1~0.25                 | 0.25~0.05 | 0.05~0.01 | 0.01~0.005 | 0.005~0.001 | <0.001 |          |
| 1  | A <sub>0</sub>  | 0 ~ 2      | -                            | 78.74         | 3.78          | 29.70            | 66.8                   | 42.1      | 191.0     | 106.1      | 275.8       | 318.3  | 2.8178   |
|    | B <sub>1</sub>  | 2 ~ 16     | 1.49                         | 26.35         | 2.64          | 20.36            | 60.9                   | 74.8      | 147.6     | 147.6      | 221.3       | 347.8  | 2.8580   |
|    | B <sub>2</sub>  | 16 ~ 60    | 1.50                         | 9.99          | 1.72          | 21.91            | 32.6                   | 50.7      | 127.9     | 149.2      | 266.5       | 373.1  | 2.8710   |
| 2  | A               | 0 ~ 5      | 1.45                         | 74.86         | 4.27          | 27.51            | 85.9                   | 89.0      | 211.6     | 105.8      | 222.1       | 285.6  | 2.8299   |
|    | B               | 5 ~ 27     | 1.74                         | 25.92         | 2.41          | 19.40            | 64.5                   | 37.5      | 188.0     | 167.1      | 292.4       | 250.6  | 2.8206   |
|    | C               | 27 ~ 45    | 1.42                         | 35.81         | 2.41          | 23.73            | 72.0                   | 43.7      | 231.6     | 168.4      | 273.7       | 210.5  | 2.7906   |
| 3  | A               | 0 ~ 35     | 1.35                         | 24.07         | 2.38          | 15.59            | 36.7                   | 29.6      | 140.0     | 150.4      | 254.2       | 389.0  | 2.8446   |
|    | B <sub>Fe</sub> | 35 ~ 50    | 1.73                         | 11.08         | 1.51          | 14.45            | 28.8                   | 12.7      | 187.5     | 166.7      | 291.7       | 312.6  | 2.8758   |
|    | B <sub>Mn</sub> | 50 ~ 80    | 1.73                         | 13.75         | 1.72          | 13.82            | 53.8                   | 46.7      | 167.4     | 146.4      | 282.4       | 303.3  | 2.8481   |
| 4  | AB              | 0 ~ 32     | 1.43                         | 30.41         | 2.57          | 18.99            | 62.1                   | 82.4      | 158.4     | 147.9      | 253.5       | 295.7  | 2.8387   |
|    | C               | 32~36      | 1.81                         | 9.28          | 1.62          | 20.49            | 31.8                   | 61.1      | 168.8     | 147.7      | 316.4       | 274.2  | 2.8331   |
| 5  | A               | 0 ~ 17     | 1.38                         | 24.76         | 2.81          | 19.41            | 77.5                   | 65.7      | 188.1     | 125.4      | 292.6       | 250.8  | 2.8208   |
|    | B               | 17 ~ 44    | 1.63                         | 14.21         | 2.06          | 18.17            | 79.2                   | 61.7      | 146.7     | 125.7      | 261.9       | 324.8  | 2.8544   |
| 6  | A               | 0 ~ 7      | -                            | 18.77         | 1.78          | 18.44            | 234.0                  | 35.4      | 125.2     | 104.0      | 229.6       | 271.4  | 2.7853   |
|    | B               | 7 ~ 35     | -                            | 5.56          | 1.39          | 23.81            | 98.4                   | 43.0      | 137.8     | 127.2      | 318.0       | 275.6  | 2.7918   |
|    | C               | 35 ~ 123   | -                            | 7.53          | 1.40          | 27.73            | 53.1                   | 32.8      | 191.3     | 127.5      | 382.6       | 212.6  | 2.7529   |
| 7  | A               | 0 ~ 22     | 1.20                         | 40.57         | 3.40          | 49.05            | 85.2                   | 34.7      | 220.0     | 154.0      | 253.0       | 253.0  | 2.8178   |
|    | B               | 22 ~ 55    | 1.39                         | 17.58         | 1.74          | 46.24            | 28.3                   | 64.0      | 132.8     | 88.6       | 221.4       | 464.9  | 2.8971   |
| 8  | A               | 0 ~ 23     | 1.31                         | 25.56         | 1.93          | 19.23            | 47.6                   | 29.1      | 293.8     | 146.9      | 188.9       | 293.8  | 2.8265   |
|    | B               | 23 ~ 48    | 1.46                         | 9.67          | 1.70          | 21.87            | 16.9                   | 43.5      | 213.6     | 128.1      | 192.2       | 405.8  | 2.8728   |
| 9  | A               | 0 ~ 24     | 1.35                         | 38.75         | 2.32          | 27.29            | 41.1                   | 44.3      | 170.2     | 117.0      | 223.3       | 404.2  | 2.8775   |
|    | BC              | 24~68      | 1.58                         | 15.98         | 1.25          | 30.75            | 39.0                   | 40.7      | 181.9     | 139.1      | 310.3       | 288.9  | 2.8396   |

表 3 各研究剖面土壤团聚体组成及其稳定性

Table 3 Contents, stabilities and fractal dimensions of soil aggregates of sampling profiles

| 剖面 | 利用类型  | 土层              | 各粒径 (mm) 干湿筛团聚体含量 (g/kg) |       |       |       |       |          |       | 湿筛破<br>坏率 (%) | 分形<br>维数 |       |        |
|----|-------|-----------------|--------------------------|-------|-------|-------|-------|----------|-------|---------------|----------|-------|--------|
|    |       |                 | >5                       | 5~3   | 3~2   | 2~1   | 1~0.5 | 0.5~0.25 | >0.25 |               |          |       |        |
| 1  | 马尾松灌丛 | A <sub>0</sub>  | 778.0                    | 64.3  | 36.4  | 19.8  | 30.9  | 8.2      | 937.5 | 4.54          | 2.5677   |       |        |
|    |       |                 | 802.8                    | 68.0  | 38.0  | 25.6  | 31.6  | 16.1     | 982.1 |               |          |       |        |
|    |       | B <sub>1</sub>  | 628.1                    | 98.3  | 52.6  | 43.6  | 54.9  | 19.5     | 896.9 | 7.74          | 2.5603   |       |        |
|    |       |                 | 703.6                    | 110.8 | 52.9  | 37.2  | 44.4  | 23.3     | 972.2 |               |          |       |        |
|    |       | B <sub>2</sub>  | 170.8                    | 77.3  | 81.1  | 87.9  | 220.7 | 62.1     | 699.8 | 28.19         | 2.6305   |       |        |
|    |       |                 | 593.5                    | 155.7 | 77.8  | 57.7  | 57.4  | 32.3     | 974.6 |               |          |       |        |
| 2  | 退耕地   | A               | 508.2                    | 93.1  | 60.1  | 47.9  | 101.4 | 30.3     | 840.9 | 14.11         | 2.6071   |       |        |
|    |       |                 | 775.1                    | 80.4  | 42.1  | 30.5  | 32.3  | 18.6     | 979.1 |               |          |       |        |
|    |       | B               | 340.0                    | 107.3 | 79.7  | 96.7  | 162.1 | 40.9     | 826.8 | 14.62         | 2.5212   |       |        |
|    |       |                 | 777.0                    | 83.0  | 37.8  | 23.4  | 27.5  | 19.6     | 968.3 |               |          |       |        |
|    |       | C               | 654.2                    | 78.6  | 49.0  | 36.5  | 58.2  | 22.3     | 898.9 | 7.97          | 2.5784   |       |        |
|    |       |                 | 795.3                    | 74.8  | 30.5  | 25.3  | 31.8  | 18.1     | 976.7 |               |          |       |        |
| 3  | 水田    | A               | 160.1                    | 83.7  | 54.7  | 76.0  | 199.3 | 91.5     | 665.4 | 29.42         | 2.6818   |       |        |
|    |       |                 | 518.8                    | 139.4 | 93.9  | 70.8  | 75.4  | 44.4     | 942.7 |               |          |       |        |
|    |       | B <sub>Fe</sub> | 45.1                     | 48.2  | 87.9  | 92.1  | 366.2 | 93.3     | 732.8 | 24.87         | 2.5405   |       |        |
|    |       |                 | 765.6                    | 77.4  | 42.1  | 30.0  | 37.1  | 23.2     | 975.4 |               |          |       |        |
|    |       | B <sub>Mn</sub> | 136.8                    | 49.1  | 54.5  | 73.0  | 259.0 | 86.3     | 658.5 | 31.03         | 2.6693   |       |        |
|    |       |                 | 690.3                    | 95.9  | 56.0  | 36.8  | 42.5  | 33.3     | 954.9 |               |          |       |        |
| 4  | 退耕地   | AB              | 364.5                    | 121.2 | 80.1  | 96.6  | 144.6 | 31.0     | 838.1 | 13.49         | 2.5094   |       |        |
|    |       |                 | 724.3                    | 80.9  | 52.2  | 39.5  | 45.9  | 26.1     | 968.8 |               |          |       |        |
|    |       | C               | 29.2                     | 92.7  | 96.4  | 95.8  | 304.0 | 96.2     | 714.4 | 25.46         | 2.5673   |       |        |
|    |       |                 | 764.8                    | 72.7  | 33.9  | 23.8  | 33.3  | 30.0     | 958.4 |               |          |       |        |
|    |       | 5               | 玉米地                      | A     | 156.1 | 141.4 | 91.9  | 116.2    | 231.5 | 65.4          | 802.5    | 17.62 | 2.4869 |
|    |       |                 |                          |       | 740.0 | 87.6  | 51.7  | 35.6     | 37.9  | 21.2          | 974.1    |       |        |
| B  | 35.0  |                 |                          | 79.4  | 94.6  | 70.3  | 240.1 | 100.5    | 619.9 | 35.52         | 2.6748   |       |        |
|    | 712.9 |                 |                          | 98.6  | 49.5  | 33.5  | 38.1  | 28.1     | 960.7 |               |          |       |        |
| 6  | 草坡    |                 |                          | A     | 303.0 | 176.5 | 155.4 | 68.5     | 109.1 | 30.3          | 842.8    | 12.42 | 2.4801 |
|    |       |                 |                          |       | 375.2 | 228.5 | 140.7 | 94.2     | 88.3  | 35.5          | 962.4    |       |        |
|    |       | B               | 33.3                     | 186.1 | 220.8 | 97.5  | 251.2 | 56.8     | 841.2 | 13.96         | 2.3579   |       |        |
|    |       |                 | 588.2                    | 196.5 | 86.0  | 49.4  | 41.1  | 16.5     | 977.8 |               |          |       |        |
|    |       | C               | 12.0                     | 31.9  | 63.9  | 74.3  | 319.6 | 124.9    | 626.6 | 34.66         | 2.6563   |       |        |
|    |       |                 | 528.0                    | 188.7 | 101.0 | 57.9  | 52.6  | 30.8     | 959.0 |               |          |       |        |
| 7  | 旱地    | A               | 30.3                     | 159.6 | 219.7 | 152.5 | 240.7 | 46.5     | 849.3 | 13.68         | 2.3225   |       |        |
|    |       |                 | 450.4                    | 189.0 | 133.7 | 98.9  | 83.1  | 28.6     | 983.8 |               |          |       |        |
|    |       | B               | 6.9                      | 166.3 | 122.4 | 201.3 | 236.7 | 50.7     | 784.3 | 20.54         | 2.4434   |       |        |
|    |       |                 | 701.3                    | 121.5 | 67.7  | 42.0  | 40.5  | 13.9     | 987.0 |               |          |       |        |
|    |       | 8               | 旱地                       | A     | 239.4 | 94.8  | 78.8  | 92.5     | 186.3 | 64.4          | 756.1    | 19.62 | 2.5982 |
|    |       |                 |                          |       | 425.5 | 132.7 | 101.8 | 99.1     | 124.0 | 57.5          | 940.6    |       |        |
| B  | 6.7   |                 |                          | 88.7  | 176.3 | 96.2  | 238.8 | 86.2     | 692.9 | 27.58         | 2.5825   |       |        |
|    | 335.0 |                 |                          | 230.7 | 145.6 | 101.7 | 94.9  | 44.3     | 956.7 |               |          |       |        |
| 9  | 马尾松灌丛 |                 |                          | A     | 556.8 | 166.3 | 87.6  | 44.7     | 57.6  | 15.2          | 928.2    | 5.20  | 2.3778 |
|    |       |                 |                          |       | 700.3 | 124.6 | 64.2  | 37.0     | 35.7  | 17.2          | 979.1    |       |        |
|    |       | BC              | 431.6                    | 189.2 | 107.3 | 55.6  | 73.4  | 21.9     | 879.2 | 10.47         | 2.4722   |       |        |
|    |       |                 | 809.9                    | 88.4  | 35.7  | 19.3  | 18.2  | 10.5     | 982.0 |               |          |       |        |

注：表中分子为湿筛后的各级水稳性团聚体含量，分母为干筛团聚体含量。

### 3 结果分析

#### 3.1 分形维数的计算

由于土壤分析中粒径分析资料是通过筛分方法由一定粒径间隔的颗粒重量分布来表示的，因而本文采用杨培岭等<sup>[14]</sup>推导的土壤颗粒重量分布与平均粒径间的分形关系式计算土壤分形维数（式 1）：

$$\frac{W(\sigma \leq \bar{d}_i)}{W_o} = \left[ \frac{\bar{d}_i}{\bar{d}_{\max}} \right]^{3-D} \quad (1)$$

其中  $\bar{d}_i$  为级级  $d_i$  与  $d_{i+1}$  间粒径的平均值， $\bar{d}_{\max}$  为最大级级的平均直径； $W(\sigma \leq \bar{d}_i)$  为小于  $d_i$  的累积土粒重量； $W_o$  为土壤各粒级重量的总和； $D$  为分维系数，最后用  $\lg[W_i/W_o]$ 、 $\lg[\bar{d}_i/\bar{d}_{\max}]$  为纵、横坐标，用回归分析方法计算土壤团粒结构的分形维数  $D$ 。

#### 3.2 土壤颗粒组成及其分形维数特征

由表 2 可见，灌丛马尾松退化后，土壤砂粒含量比重呈上升趋势，黏粒含量比重呈降低趋势。马尾松灌丛、退耕地、草坡地和耕地 1~0.25 mm 粗砂砾含量分别为 40.0、64.3、73.7 和 50.7 g/kg，1~0.05 mm 砂砾含量分别为 89.0、140.0、109.0 和 96.4 g/kg；表层黏粒含量分别为 361.2、290.7、271.4 和 265.9 g/kg，黏粒含量（剖面加权平均值）分别为 347.5、265.9、230.3 和 342.7 g/kg（图 1）。表明灌丛林地的退化使土壤侵蚀加剧，黏粒流失，黏粒在表层减少最为明显，在前期的<sup>137</sup>Cs法示踪岩溶坡地土壤侵蚀的研究中已经得到很好的证实<sup>[15-16]</sup>。

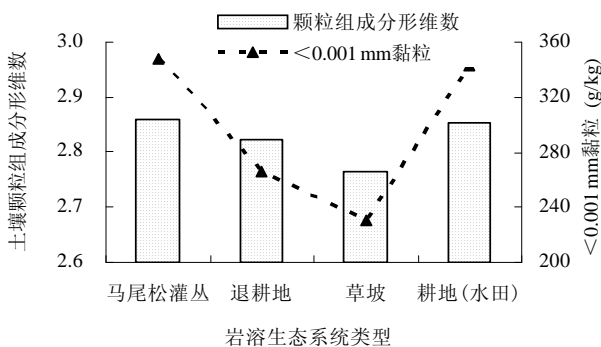


图 1 土壤黏粒含量及颗粒组成分形维数  
Fig. 1 Clay content and fractal dimension of soil particles in different karst ecosystems

土壤颗粒分形维数变化范围在 2.7529 ~ 2.8971 之间，最高值与黏粒含量最高值对应(表 2)，低值恰好与黏粒含量的低值对应。分形维数在不同岩溶生态系统

间的差异较明显，经SPSS差异性检验，4类生态系统9剖面加权平均值达到极显著差异 ( $p < 0.01$ )。分形维数与黏粒含量基本对应，最高值出现在黏粒含量最高的马尾松灌丛，其它退化岩溶生态系统土壤颗粒分形维数值降低，最低值在黏粒含量最少的草坡地。经相关性分析，颗粒组成分形维数与物理性黏粒显著正相关（相关系数为 0.560\*\*， $n = 22$ ）；与黏粒含量极显著正相关，与 1~0.25 mm 粗砂砾含量显著负相关(图 2)；与 1~0.05 mm 砂砾含量显著负相关（相关系数为 -0.434\*， $n = 22$ ）。表明黏粒含量愈高，分形维数值愈大，与已有的颗粒组成分形维数研究结果基本一致<sup>[8,17]</sup>。荒草坡地由于坡度较大，可能在灌丛退化后的前期遭受侵蚀，表层黏粒含量低（271.4 g/kg），粗砂砾含量高（234.0 g/kg），因而计算的分维值低。

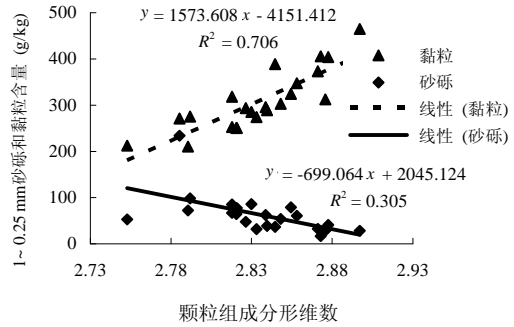


图 2 颗粒组成分形维数与土壤黏粒及砂砾关系  
Fig. 2 Correlative analysis between soil particle contents and its fractal dimension

#### 3.3 土壤团粒结构组成及其分形维数特征

由表 3 可见，各岩溶生态系统土壤干筛团聚体差异较小，但水稳性团聚体差异大。马尾松灌丛、退耕地、草坡地和耕地 >0.25 mm 水稳性团聚体含量分别为 868.3、823.8、770.2 和 729.0 g/kg；>2 mm 水稳性团聚体含量分别为 705.1、550.9、392.8 和 300.9 g/kg；>5 mm 水稳性团聚体含量分别为 513.1、379.2、116.1 和 90.7 g/kg（图 3）；各岩溶生态系统土壤湿筛后团聚体的破坏率分别为 11.23%、15.13%、20.35% 和 24.43%。由此可见，次生马尾松灌丛退化后，土壤结构明显恶化。与灌丛林地对比，退化生态系统土壤水稳性团聚体含量及团聚体稳定性降低，湿筛后团聚体破坏率也较大。

团粒结构分形维数的计算结果(表 3)表明，研究区土壤团粒结构分形维数变化范围在 2.3225 ~ 2.6818 之间。不同岩溶生态系统土壤团粒结构分形维数的分布是马尾松灌丛 < 退耕地 < 耕地 < 草坡，其均值分别

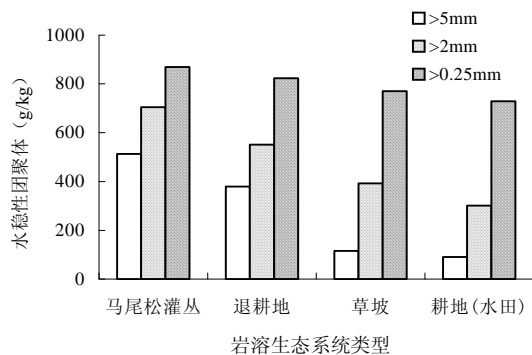


图 3 各岩溶生态系统土壤水稳性团聚体分布  
Fig. 3 Distribution of water-stable aggregates under different land use types

为 2.5255、2.5347、2.5595 和 2.5783，与各生态系统水稳性团聚体的分布特征有相反的趋势。最高值出现在水稳性团聚体含量较低、团聚体破坏率很高的水田 A 层，低值大都出现在水稳性团聚体含量高、团聚体破坏率较小的层次（主要在马尾松灌丛和退耕地）。

相关分析表明，团粒结构分形维数值与  $>0.25$  mm、 $>2$  mm 和  $>5$  mm 水稳性团聚体含量均呈负相关，其中与  $>0.25$  mm 水稳性团聚体含量呈极显著负相关，与团聚体破坏率呈极显著正相关（表 4）。表明土壤团粒结构粒径分布的分形维数越小，水稳性团聚体和水稳性大团聚体含量越高，土壤结构稳定性越好。与已有石灰岩土壤团粒结构粒径分布的分形维数研究结果相一致<sup>[18]</sup>。

表 4 团粒结构分形维数与土壤性质关系

Table 4 Correlative analysis between soil properties and fractal dimension of soil water-stable aggregates

|                | 分形维数 | $>0.25$ mm 团聚体 | $>2$ mm 团聚体 | $>5$ mm 团聚体 | 湿筛破坏率    | 有机质      | 全 N     | CEC      |
|----------------|------|----------------|-------------|-------------|----------|----------|---------|----------|
| 分形维数           | 1    | -0.642**       | -0.285      | -0.069      | 0.618**  | -0.066   | -0.054  | -0.570** |
| $>0.25$ mm 团聚体 |      | 1              | 0.867**     | 0.758**     | -0.996** | 0.595**  | 0.465*  | 0.344    |
| $>2$ mm 团聚体    |      |                | 1           | 0.931**     | -0.882** | 0.655**  | 0.482*  | 0.132    |
| $>5$ mm 团聚体    |      |                |             | 1           | -0.775** | 0.732**  | 0.549** | 0.110    |
| 团聚体破坏率         |      |                |             |             | 1        | -0.593** | -0.461* | -0.297   |
| 有机质            |      |                |             |             |          | 1        | 0.917** | 0.289    |
| 全 N            |      |                |             |             |          |          | 1       | 0.257    |
| CEC            |      |                |             |             |          |          |         | 1        |

注：\*\*：极显著水平  $p < 0.01$ ，\*：显著水平  $p < 0.05$ ， $n = 22$ 。

### 3.4 分形维数与土壤性质和环境

土壤结构常被称为土壤肥力的调节器，通过影响土壤热、水、气、肥的状况影响土壤肥力水平及其发挥，所以表 4 还分析了土壤结构分形维数与部分理化性质的关系。由表 4 可见，土壤团粒结构粒径分布的分形维数与土壤阳离子交换量、有机质含量以及全 N

有负相关趋势，其中与阳离子交换量呈极显著负相关。另外，各剖面土壤体积质量的平均值（缺草坡数据）以及有机质平均含量与团粒结构分形维数的相关系数也较高，分别为正相关和负相关（ $R^2$  分别为 0.375， $n = 8$ ；0.246， $n = 9$ ）（图 4）。

以上分析表明，团粒结构分形维数增大，则水稳

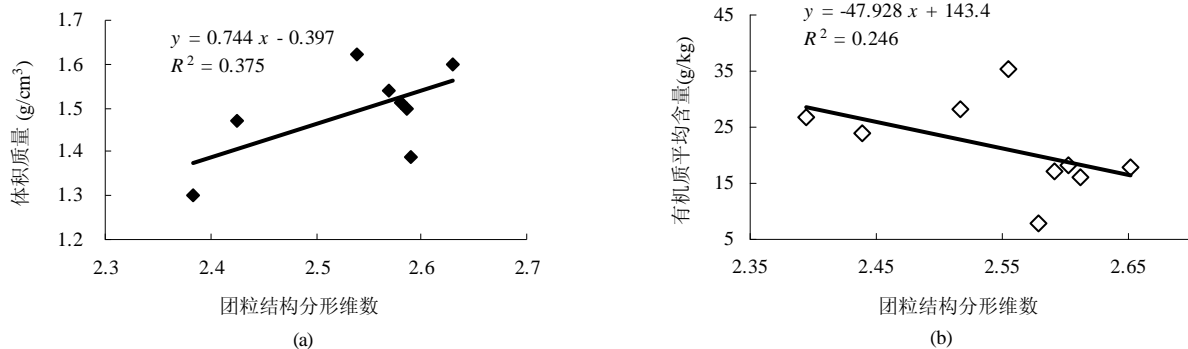


图 4 团粒结构分形维数与体积质量、有机质平均含量的关系

Fig. 4 Correlative analysis between aggregate's fractal dimension and soil bulk density, soil organic matter

性团聚体含量、土壤有机质、阳离子交换量和全 N 含量总体呈降低趋势, 土壤的体积质量则呈增大趋势。水稳性团聚体含量降低和体积质量的上升表征土壤物理性质的退化, 土壤有机质、全 N 含量和阳离子交换量的降低表征土壤肥力水平的降低。可见, 土壤团粒结构粒径分布的分形维数值在某种程度上反映了土壤肥力水平的变化。石灰岩土壤质量的变化与岩溶环境的演替极为密切, 通常在岩溶次生植被破坏后土壤侵蚀迅速加剧并导致土壤质量降低。另外, 马尾松灌丛、退耕地、草坡地和耕地团粒结构分形维数平均值来看 (图 5), 其分布与各研究剖面碳酸盐岩裸露率具有正相关性。从岩溶环境的角度出发, 则团粒结构的分形维数不仅可以反映石灰岩土壤团粒结构组成特征和土壤质量状况, 而且在一定程度上反映了岩溶环境的退化程度。

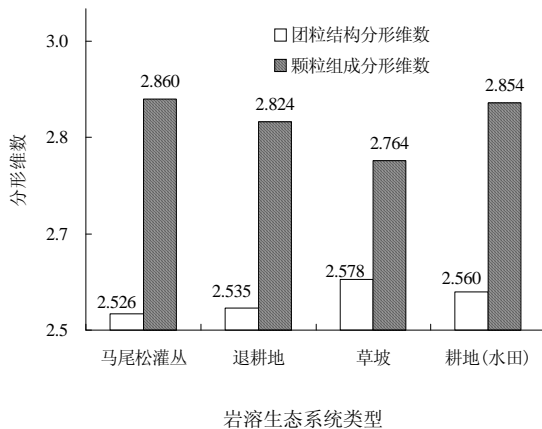


图 5 不同岩溶生态系统土壤分形值的分布

Fig. 5 Distribution of fractal dimensions of soil particles and aggregates

图 5 还表示了不同岩溶生态系统土壤颗粒组成分形维数的分布特征。由图 5 可见, 颗粒组成分形值的变化是灌丛马尾松 > 耕地 > 退耕地 > 草坡, 而团粒结构分形维数的变化是草坡 > 耕地 > 退耕地 > 灌丛马尾松, 颗粒组成分形维数与团粒结构分形值有相反的变化趋向。经相关性分析, 团粒结构分形值与颗粒组成分形值呈显著负相关趋势 (取四大利用类型平均值,  $Y = -1.33x + 6.22$ ,  $R^2 = 0.529$ )。可见, 颗粒组成分形值与团聚体分形值都能够反映土壤性质与岩溶生境的变化, 两者对环境的反映是一致的。

在岩溶坡地, 由于人地矛盾的加剧, 对次生灌丛林地的破坏使侵蚀加剧, 黏粒流失。同时由于有机质补充减少, 土壤体积质量上升, 与有机质关系密切的 CEC 也显著降低, 土壤结构稳定性下降, 遇水易于破

碎, 大颗粒水稳性团聚体含量减少, 细粒团聚体增加, 计算的分维值变大。由于侵蚀的作用使土壤退化, 岩石裸露面积不断增加, 土地生产力下降, 石漠化发生或加剧。以上分析可见, 石灰岩土壤退化这一过程可以通过土壤分形维数进行一定程度的量化研究。由于本研究还很有限, 继续加强这方面的研究具有重要的意义, 建立分形维数与土壤肥力水平的关系模型将是今后研究的重点。

## 4 结论

(1) 石灰岩土壤颗粒分形维数与黏粒含量及物理性黏粒含量显著正相关, 与砂砾含量显著负相关, 即土壤黏粒含量越高, 颗粒分形维数越大。

(2) 颗粒组成分形值与团聚体分形值都能反映土壤性质与岩溶生境的变化, 通过对土壤分形维数特征的研究可以定量揭示石灰岩土壤质量的状况和岩溶生态环境特点。

## 参考文献:

- [1] 程先富, 史学正. 分形几何在土壤学中的应用及其展望. 土壤, 2003, 35(6): 461-464
- [2] 吴承祯, 洪伟. 不同经营模式土壤团粒结构的分形特征研究. 土壤学报, 1999, 36(2): 162-167
- [3] 刘金福, 洪伟. 不同起源格氏栲林地的土壤分形特征. 山地学报, 2001, 19(6): 565-570
- [4] 李阳兵, 高明, 魏朝富, 谢德体. 土地利用对岩溶山地土壤质量性状的影响. 山地学报, 2003, 21(1): 41-49
- [5] 刘方, 王世杰, 刘元生, 何腾兵, 罗海波, 龙健. 喀斯特石漠化过程土壤质量变化及生态环境影响评价. 生态学报, 2005, 25(3): 639-644
- [6] 刘玉, 李林立, 赵柯, 王丽丽, 饶懿. 岩溶山地石漠化地区不同土地利用方式下的土壤物理性状分析. 水土保持学报, 2004, 18(5): 142-1457
- [7] 李阳兵, 谢德体, 魏朝富, 周宝同. 利用方式对岩溶山地土壤团粒结构的影响研究. 长江流域资源与环境, 2002, 11(5): 451-455
- [8] 赵来, 吕成文. 土壤分形特征与土壤肥力关系研究—以皖南地区水稻土为例. 土壤肥料, 2005(6): 7-11
- [9] 张治伟, 袁道先, 傅瓦利, 张洪, 夏凯生. 重庆金佛山地区土壤酸度分布特点及影响因素研究. 中国岩溶, 2006, 25(1): 67-72
- [10] 张文晖, 傅瓦利, 张洪, 张治伟, 王冬银. 岩溶山区不同土地利用方式对石灰土基本特性的影响. 生态与农村环境学报, 2007, 23(3): 16-21
- [11] 张治伟. 岩溶环境中土壤退化规律研究—以金佛山北坡及邻

- 近地区为例 (硕士学位论文). 重庆: 西南大学, 2007: 7-10
- [12] 南京农业大学主编. 土壤农化分析 (第二版). 北京: 农业出版社, 1990: 29-36, 41-57, 95-116
- [13] 中国科学院南京土壤研究所. 土壤理化分析. 上海: 上海科学技术出版社, 1978: 62-68, 132-135, 169-181, 466-517
- [14] 杨培岭, 罗远培, 石元春. 用粒径的重量分布表征的土壤分形特征. 科学通报, 1993, 38(20): 1896-1899
- [15] 张治伟, 傅瓦利, 张洪, 夏凯生, 朱章雄. 岩溶坡地土壤侵蚀强度的<sup>137</sup>Cs法研究. 山地学报, 2007, 25(3): 302-308
- [16] 傅瓦利, 张治伟, 张洪, 夏凯生, 谢德体, 倪九派. 岩溶区坡面土壤侵蚀特征研究. 水土保持学报, 2007, 21(5): 38-41
- [17] 龙健, 李娟, 邓启琼, 李阳兵, 熊康宁. 贵州喀斯特山区石漠化土壤理化性质及分形特征研究. 土壤通报, 2006, 37(4): 635-639
- [18] 李阳兵, 魏朝富, 谢德体, 高明. 岩溶山区植被破坏前后土壤团聚体分形特征研究. 土壤通报, 2006, 37(1): 51-55

## Characteristics of Fractal Dimension of Limestone Soil and Its Correlation with Soil Properties

ZHANG Zhi-wei<sup>1</sup>, FU Wa-li<sup>1</sup>, ZHU Zhang-xiong<sup>1,2</sup>, ZHANG Hong<sup>3</sup>, WEN Zhi-lin<sup>1</sup>, LI Qin<sup>1</sup>

(<sup>1</sup> School of Geographic Sciences, Southwest University, Chongqing 400715, China;

<sup>2</sup> Chongqing University of Science and Technology, Chongqing 400700, China; <sup>3</sup> Nankai Middle School, Chongqing 400700, China)

**Abstract:** This paper studied the distribution and feature of soil particles and water-stable aggregates, and the distribution of fractal dimension of particles and water-stable aggregates under different karst ecosystems. Results showed that the fractal dimension of particles appeared high significant positive correlation with the contents of clay and physical clay, but high significant negative correlation with sand content. The fractal dimension of water-stable aggregates exhibited significant negative correlation with contents of >0.25mm water-stable aggregates, soil organic matter and cation exchange capacity, but high significant positive correlation with the percentage of structural damage, soil bulk density and percentage of bare rock in karst ecosystem. Soil bulk density increased after the breakage or farming of secondary forestland, at the same time, contents of clay, soil organic matter and soil water-stable aggregates all exhibited decreasing trends. There existed significant quantitative correlation between soil fractal dimension and soil properties. Fractal dimensions of particles and aggregates exhibited identical function in disclosing soil properties, soil quality and soil degradation degree. So fractal dimension can be used as an effective method in evaluating soil quality and the degree of karst rock desertification.

**Key words:** Karst area, Soil structure, Fractal dimension, Soil property