

庐山 JL剖面红土粒度体积分形特征及其环境意义

姜永见, 朱丽东^{*}, 叶玮, 李凤全, 李建武
(浙江师范大学地理过程实验室, 浙江 金华 321004)

摘要: 分形理论在地貌学、土壤学、沉积学等领域得到了广泛应用,但在南方第四纪红土研究中的应用尚不多见。选取庐山北麓一个典型的第四纪红土剖面——JL剖面,根据三维空间内的体积分维模型和线性回归法,对红土颗粒粒径的体积分形特征进行研究,得出该剖面红土粒度体积分维值。研究结果表明:(1)剖面红土粒度的体积分形特征显著,其粒度特征和体积分维值与北方黄土具有较好的可比性,指示该剖面红土母质具有风成特性,并体现堆积与风化同时进行的加积特征。(2)网纹红土粒度体积分维值最大,第①~⑤均值介于2.0809~2.1411间;第⑥和第⑧棕黄色土层体积分维值最小,分别为1.9984和1.9723,第⑦古土壤层的体积分维值介于网纹红土层和棕黄色黄土层之间,为2.0653。体积分维值与粘粒含量及分选系数显著正相关,与粉砂含量呈负相关关系。(3)JL剖面红土粒度体积分维值的纵向变化表现为高低值相间的7个旋回,与传统粒度参数相比具有更显著的分段性,并与红化率和CIA值峰谷变化存在对应关系,可以作为指示沉积-风化环境变化的指标。初步认为庐山地区红土母质第四纪以来成壤环境存在强弱变化并逐渐减弱。

关键词: 庐山;更新世红土;粒度;体积分形特征

中图分类号: P534.63⁺1 P462.13⁺2

文献标识码: A

20世纪90年代以来,分形理论广泛应用于地理学研究。地貌学上,分形被用于海岸地貌、流水地貌、喀斯特地貌等地貌类型研究^[1]。沙漠化分形研究指出,沙粒粒径分布、沙丘分布、风沙流结构和荒漠绿洲景观镶嵌结构都体现典型的自相似性规律,沙漠化过程具有多重分形特征^[2]。土壤颗粒分形维数与土壤颗粒组分含量、土壤有机质含量、土体级配状况之间具有良好相关关系,可以用于土壤水分特征曲线预测和土质地、土壤通透性、土壤肥力状况判别^[3-9]。沉积学中,粒度分形特征在判定沉积相、沉积环境变化方面的指示意义也渐渐为人所知^[10-13]。特别是黄土粒度分维值可以揭示第四纪以来东亚季风在周期和强度上的变化及沉积区成壤环境的变化^[14,15]。然而,前人研究中多采用土壤或沉积物颗粒粒径的质量分布来表征其分形特征,分维值计算中要假设不同粒径颗粒具有同样的密度,

但这种假设的合理性已受到一些学者的质疑^[7]。南方更新世红土粒度分形方面的研究尚不多见,本文采用沉积物颗粒粒径体积分布表征分形特征的方法,根据庐山地区JL红土剖面的粒度测试结果,开展红土粒度分形研究,探讨红土体积分维值对该地区第四纪沉积环境变化的指示意义。

1 研究剖面

庐山位于中亚热带常绿阔叶林-红壤黄壤地带的北缘,季风气候典型,冬季干冷,夏季湿热,同时兼有山地气候特色。山麓低丘地带年均温16.7℃,年降水量在1300mm左右,发育红黄壤,向上演替为山地黄棕壤和棕壤。这里网纹红土分布广泛,是第四纪期间气候湿热的有力证据^[16],主要分布于海拔<400m的和缓丘陵及河流阶地,>1000m的保留

收稿日期(Received date): 2007-09-01; 改回日期(Accepted): 2007-11-05.

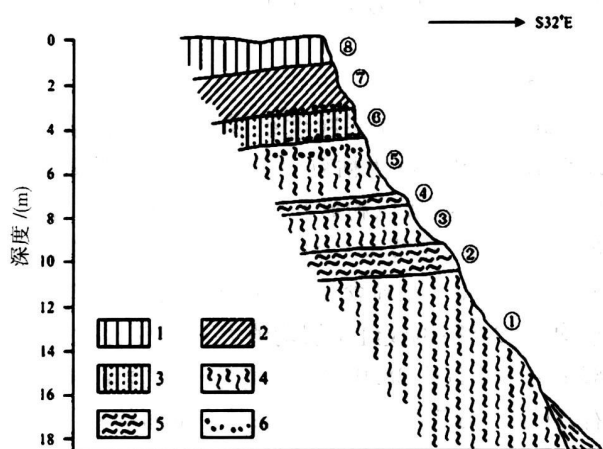
基金项目(Foundation item): 浙江省自然科学基金(X506313). [Supported by Natural Science Foundation of Zhejiang Province (X506313).]

作者简介(Biography): 姜永见(1985-), 硕士研究生, 从事环境变化研究. E-mail: kelvin_86@126.com. [Jiang Yongjian (1985-), master candidate major in research on environmental change. E-mail: kelvin_86@126.com]

^{*} 通讯作者: 朱丽东(1965-), zhulidong@zjnu.cn [Corresponding Author: Zhu Liliang (1965-), zhulilong@zjnu.cn]

的变位网纹红土,是第四纪期间庐山隆升的标志^[17]。网纹地层之上为下蜀组沉积。

JL红土剖面位于江西省九江市庐山北麓,因公路修建而出露,地理坐标 $29^{\circ}42'N$, $116^{\circ}02'E$,垂直厚度 18.46 m。剖面通体质地均一,未见流水作用痕迹,中下部为网纹红土,厚 14 m,上覆棕黄色土,厚 4.46 m。沿剖面存在 8 个肉眼可辨的地层单元(图 1),他们在土壤颜色、网纹形态结构、土壤发育程度等方面存在差异。



1淋溶黄土层, 2浅红色古土壤层, 3含胶膜棕黄色土层,
4棕红色网纹红土层, 5紫色网纹红土层, 6铁锰结核富集层

图 1 庐山地区 JL红土剖面图

Fig 1 JL red earth section in Lushan area

淋溶黄土层 ⑧ 厚 1.20 m, 棕黄色, 质地均一, 较疏松, 含大量现代植物根系, 有明显淋溶迹象。裂隙中充填浅黄色淀积物, 呈细条形、管状和斑点状, 斑点外侧和裂隙之间见少量黑色淀积胶膜。

浅红色古土壤层 ⑦ 厚 1.96 m, 土体棱块状, 弱网纹化。层内仍见植物根系, 并沿网纹通道穿插延伸, 网纹多竖直条状分布。有根系通过的网纹轮廓较清晰, 呈白色; 无根系穿过的网纹色调偏黄, 轮廓较为模糊。层内黑色胶膜较发育, 呈自下向上渐少趋势。底部 3.08~3.16 m 富集铁锰结核, 黑褐色, 球状, 粒径多 0.5~1.5 mm。

含胶膜棕黄色土层 ⑥ 厚 1.3 m, 土体弱网纹化, 含大量黑色胶膜。网纹多呈黄白色、条形、竖直状排列。底部 4.32~4.46 m 处铁锰结核富集, 黄褐色, 形状不规则, 颗粒长轴 2~4 mm 甚至 > 4 mm。

棕红色含胶膜网纹层 ⑤ 厚 2.52 m, 土层基色调棕红色, 发育大量黄白或浅黄色网纹, 斑点或细管状。仔细观察还可辨别出三个红褐色条带。土壤

裂隙中黑色胶膜呈片状、微层状甚至斑点状。层上部 4.58~4.7 m 处铁锰结核富集, 黑褐色, 球状, 粒径 1~4 mm。

紫红色网纹层 ④ 厚 0.50 m, 基质紫色, 粘重紧实, 网纹密集。裂隙发育, 其中充填大量黑色胶膜, 呈铁灰色并有光泽感。网纹颜色从下部的白色向上渐变为黄色, 排列无规律。

棕红色网纹层 ③ 厚 1.70 m, 基质棕红色, 粘重紧实, 网纹稍稀, 颜色偏黄, 外围包有黑色胶膜, 量较 ④ 层少。

紫褐色网纹层 ② 厚 1.22 m, 基质绛紫色, 粘重紧实, 网纹密集, 多为白色, 外围有黄色包裹体或黑色胶膜, 大小混杂、斜竖交织, 形似树枝状。

棕红色网纹层 ① (未见底), 厚 8.06 m, 基质棕红色, 网纹密集, 多呈白色或灰白色。按网纹形态, 层内细分出 3 段:

上段 (①-1, 厚 2.70 m), 网纹相对略稀, 白色条形为主, 夹杂黄色小斑点, 条形网纹延伸方向多变, 长者可达 12~21 cm, 裂隙中黑色胶膜量较 ①-2 段减少。

中段 (①-2 厚 2.04 m), 斑点网纹较 ①-3 段增大, 条形网纹增多, 多呈水平状延伸, 长者可水平延伸 12~15 cm。网纹颜色白或浅黄, 轮廓清晰, 裂隙间充填黑色胶膜, 表面黑灰光亮。

下段 (①-3 厚 3.32 m), 网纹呈斑点状, 大小混杂, 分布密集, 轮廓清晰, 白网纹外壁面上淀积亮红色铁质胶膜。

2 研究方法

2.1 样品采集和实验方法

沿 JL 红土剖面自下而上间隔 2 cm 采样, 共采集样品 920 个。粒度测试完成于浙江师范大学地理过程实验室, 测试仪器为英国 Malvern 仪器公司生产的 Mastersizer 2000 型激光粒度仪, 测量量程 0.02~2 000 μm 。样品前处理方法为: 称取混合均匀的待测红土样品 0.2~0.3 g 放入洗净烧杯, 加入 2:1 H_2O_2 10 mL 浸泡 12 h 去除样品中的有机质, 上电热板加热煮沸 20 min 分解多余 H_2O_2 之后加满去离子水静置 24 h 并抽去烧杯上部清液, 加入 0.5 mol/L 的 NaOH 溶液作分散剂, 并置于超声波振荡器上震荡 15 min 使样品有效分散, 最后上机测试。借助仪器附带软件中的用户分级功能, 可以得到所测样

品任意两粒径之间的体积百分含量。

2.2 体积分维值计算方法

三维空间内的体积分维模型可表示为^[18]

$$V(r>R)=C_V\left[1-\left(\frac{R}{\lambda_V}\right)^{3-D}\right]$$

式中 V 是颗粒的体积, r 是测定的尺度, R 是某一特定的粒级, C_V 和 λ_V 是描述形状和尺度的常量, D 是分维值。若 (1) 式中 $R=0$ 则土壤颗粒的总体积可以表示为

$$V_T=V(r>0)=C_V\left[1-\left(\frac{0}{\lambda_V}\right)^{3-D}\right]$$

由 (1) 和 (2) 可得

$$\frac{V(r>R)}{V_T}=1-\left(\frac{R}{\lambda_V}\right)^{3-D}$$

当 (3) 式中 R 等于土壤粒级中最大的粒级值 R_{max} 时, 有 $V(r>R)/\lambda_V=0$ 则 λ_V 在数值上等于最大的粒级值 R_{max} 。将 $r>R$ 的形式转化为 $r<R$, 则得到

$$\frac{V(r<R)}{V_T}=\left(\frac{R}{R_{max}}\right)^{3-D}$$

对 (4) 两边取对数得

$$\lg\left[\frac{V(r<R)}{V_T}\right]=(3-D)\lg\left(\frac{R}{R_{max}}\right)$$

以 $\lg\left[\frac{V(r<R)}{V_T}\right]$ 为纵坐标, $\lg\left[\frac{R}{R_{max}}\right]$ 为横坐标, 作出粒径体积分布的双对数曲线, 用线性回归法对曲线进行线性拟合, 求得拟合直线的斜率 b 而 b 则等于 $\frac{\lg\left[\frac{V(r<R)}{V_T}\right]}{\lg\left[\frac{R}{R_{max}}\right]}$, 通过公式 (5) 即可求得体积分维值 D_o 。

3 粒度及其分形特征

3.1 粒度特征

JL 剖面 ①~ ⑧ 层粒度组成基本一致 (表 1)。以 $5\text{ }\mu\text{m}$ 和 $50\text{ }\mu\text{m}$ 为粘粒、粉砂和粉砂、砂的划分界限, 红土粒度组成以粉砂粒级 ($5\sim 50\text{ }\mu\text{m}$) 占优势, 各层均值的变化范围为 $59.25\%\sim 65.98\%$, 全剖面平均 62.92% 。粘粒含量 ($<5\text{ }\mu\text{m}$) 也较高, 全剖面平均 34.24% ; 网纹红土层均值大于 33% , 网纹层底部 ①-1 段高达 38.05% ; 棕黄色土层含量 30% 左右, 其中以第 ⑦ 古土层略高; 整个剖面的砂 (>50

表 1 JL 剖面红土粒度组成和粒度图解参数 (平均值)
Table 1 Grain-size distribution and parameters of JL red earth

| 地点 | 层 样品号 | 颗粒组成 (%) | | | | 粒度参数 | | | |
|-------|---------|-------------------|---------------------|----------------------|--------------------|-------------------|----------|-----------|------|
| | | < 5 μm | 5- 10 μm | 10- 50 μm | > 50 μm | M Φ / Φ | σ | SK Φ | kg |
| JL 剖面 | ⑧ | 30.29 | 19.57 | 46.47 | 3.67 | 6.78 | 1.70 | 0.17 | 0.96 |
| | ⑦ | 31.41 | 17.92 | 46.77 | 3.89 | 6.80 | 1.80 | 0.20 | 0.94 |
| | ⑥ | 30.47 | 18.70 | 47.28 | 3.56 | 6.78 | 1.74 | 0.20 | 0.95 |
| | ⑤ | 33.41 | 18.46 | 45.28 | 2.85 | 6.95 | 1.79 | 0.22 | 0.95 |
| | ④ | 35.11 | 18.44 | 44.05 | 2.39 | 7.05 | 1.83 | 0.22 | 0.94 |
| | ③ | 35.72 | 17.76 | 44.17 | 2.35 | 7.10 | 1.90 | 0.24 | 0.94 |
| | ② | 35.23 | 17.87 | 44.84 | 2.05 | 7.08 | 1.88 | 0.25 | 0.95 |
| | ① | 35.78 | 17.89 | 43.72 | 2.61 | 7.10 | 1.88 | 0.22 | 0.93 |
| | ①- 1 | 34.28 | 17.92 | 45.30 | 2.50 | 7.02 | 1.85 | 0.24 | 0.94 |
| | ①- 2 | 34.08 | 17.91 | 45.41 | 2.60 | 7.00 | 1.83 | 0.23 | 0.94 |
| 洛川黄土 | ①- 3 | 38.05 | 17.85 | 41.40 | 2.70 | 7.22 | 1.94 | 0.21 | 0.91 |
| | 全剖面 | 34.24 | 18.13 | 44.79 | 2.84 | 7.00 | 1.84 | 0.22 | 0.94 |
| | LC- L1 | 20.70 | 14.71 | 57.87 | 6.72 | 6.28 | 1.69 | 0.32 | 1.06 |
| | LC- S1 | 22.07 | 15.01 | 57.35 | 5.57 | 6.35 | 1.68 | 0.32 | 1.02 |
| | LC- L3 | 19.62 | 12.29 | 53.86 | 14.23 | 6.00 | 1.78 | 0.35 | 0.98 |
| | LC- S3 | 21.33 | 13.37 | 52.44 | 12.86 | 6.10 | 1.78 | 0.31 | 0.92 |
| 西安黄土 | LC- Q1 | 27.82 | 19.05 | 48.27 | 4.85 | 6.61 | 1.66 | 0.15 | 0.91 |
| | TEP- S0 | 22.96 | 14.95 | 54.18 | 7.91 | 6.32 | 1.74 | 0.29 | 0.96 |
| | TEP- L1 | 22.83 | 16.61 | 55.97 | 4.59 | 6.41 | 1.62 | 0.28 | 0.97 |

μ_m)含量很小,各层均值变化于 2.05% ~ 3.89% 之间,多数样品不含 $> 250 \mu_m$ 的颗粒。与采自洛川和西安塔尔坡的 7 块黄土样品相比,粒度组成相似,7 块黄土样品的粉砂含量 66.15% ~ 72.58%,粘粒含量 19.62% ~ 27.82%,砂含量 4.85% ~ 14.23%。粒度三角图解中各层红土与黄土的投影区一致(图 2)。JL 剖面红土粒度频率分布呈双峰带细尾特征,第一众数粒径出现在 $5 \sim 6 \varphi$ ($10 \sim 30 \mu_m$),第二众数粒径出现在 8φ ($4 \mu_m$)附近,在 $10 \sim 11 \varphi$ ($0.5 \sim 1 \mu_m$)处带有细尾。7 块黄土样品的众数粒径出现在 $5 \sim 6 \varphi$ ($15 \sim 30 \mu_m$), 8φ ($4 \mu_m$)附近和 $10 \sim 11 \varphi$ ($0.5 \sim 1 \mu_m$)均有拐点,只是这两个分量没有红土明显,即红土的粘土众数峰较为明显。

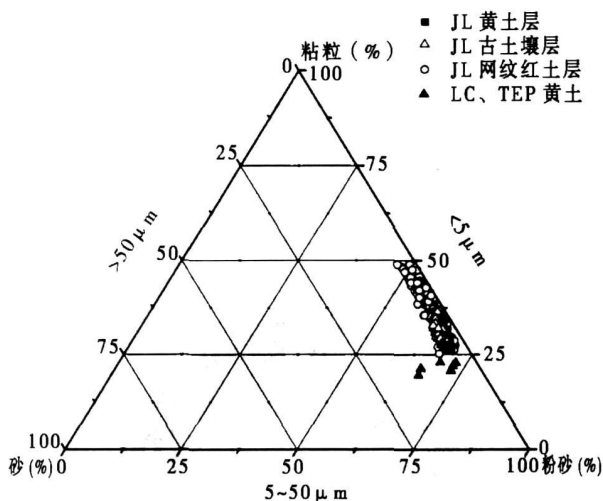


图 2 JL 剖面红土与北方黄土粒度组成三角图

Fig. 2 Clay-silt-sand triangular plot of JL red earth and north loess

上述分析表明, JL 剖面红土粒度特征与北方黄土相似,两者都表现为分选较差,频率曲线正偏、中等峰态等特征。因此,红土母质显示风成特性,只是更强的后期风化导致其粘粒含量增加、平均粒径减小、分选系数增大。这与前人的同类成果结论相符^[19-21]。

3.2 粒度体积分形特征

根据体积分维值的计算原理,用线性回归方法进行线性拟合(图 3),得到了 JL 剖面红土粒度的体积分维值(表 2)。所有样品体积分维值变化于 1.892 1~2.439 8 平均 2.096 8 体积分维值所对应的相关系数平均值为 0.863 2 最大为 0.929 2 相

关性显著,表明 JL 剖面红土粒度体积分布分形特征显著。①~⑤层网纹红土体积分维值偏大,均值均大于 2.0 第⑥和第⑧棕黄色土层体积分维值偏小,均值均低于 2.0 其中,浅红色古土壤层的体积分维值 2.065 3 高于两层棕色黄土层的 1.998 4 和 1.972 3。与北方黄土体积分维值相比也具有很好的可比性,尤其是⑤~⑧层段,分维值与北方黄土更接近。

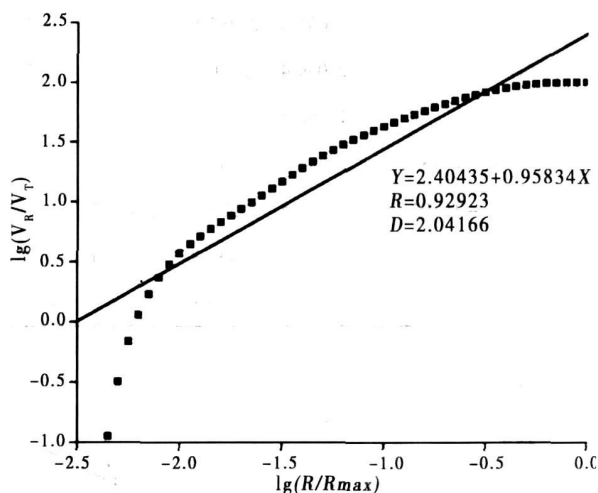


图 3 JL 剖面典型样品的粒度体积分形曲线

Fig. 3 Grain-size volume fractal curve from a typical sample of JL section

相关分析表明, JL 剖面红土粒度体积分维值与粘粒 ($< 4 \mu_m$) 体积百分含量、分选系数呈正线性相关关系,相关系数 R 分别为 0.752 5 和 0.784 95 与粉砂 ($4 \sim 63 \mu_m$) 含量呈负线性相关,相关系数 R 值为 -0.758 67 与砂 ($> 63 \mu_m$) 含量间相关性很差(图 4)。由此可见,红土中粘粒和粉砂的体积百分含量是影响其体积分维值大小的重要因素。粘粒含量越高,体积分维值越大;粉砂含量越高,体积分维值越小,而粘粒含量主要受控于红土经历的风化程度。分选系数越小,粒径相对越集中,分选性越好,体积分维值也越小;分选系数越大,不同粒级的混合度越高,其分选性越差,体积分维值也越大。某种意义上,红土体积分形特征可以指示红土所经历的化学风化的强弱。同时,在分维值-粘粒含量和分维值-分选系数组成的散点图上,棕黄色土-古土壤、网纹红土、北方黄土具有基本一致的投影区(图 5),再次表明它们在粒度组成和分形特征上是相似的。

表 2 JL剖面红土粒度体积分维值和相关系数计算结果

Table 2 Grain-size volume fractal dimension and correlation coefficients of JL red earth

| 层位 | 体积分维值 | | 相关系数 <i>R</i> | | 黄土 | 体积分维值 | 相关系数 <i>R</i> |
|-----------|------------------|---------|------------------|---------|--------|---------|---------------|
| (样品数) | 变化范围 | 均值 | 变化范围 | 均值 | 样品号 | | |
| ⑧(57) | 1.895 3~ 2.123 7 | 1.9723 | 0.797 5~ 0.929 2 | 0.846 7 | LC-L1 | 1.923 9 | 0.817 3 |
| ⑦(98) | 1.908 1~ 2.127 7 | 2.0653 | 0.802 3~ 0.892 7 | 0.873 7 | LC-S1 | 2.075 4 | 0.933 5 |
| ⑥(65) | 1.920 8~ 2.110 4 | 1.998 4 | 0.802 4~ 0.908 6 | 0.867 2 | LC-L3 | 2.107 3 | 0.935 8 |
| ⑤(126) | 1.960 6~ 2.128 0 | 2.080 9 | 0.838 3~ 0.888 7 | 0.868 3 | LC-S3 | 2.104 5 | 0.925 5 |
| ④(25) | 2.049 1~ 2.212 9 | 2.119 7 | 0.866 3~ 0.891 6 | 0.879 7 | LC-Q1 | 2.066 6 | 0.910 7 |
| ③(85) | 2.034 6~ 2.287 6 | 2.141 1 | 0.763 8~ 0.900 3 | 0.868 7 | TEP-S0 | 2.081 8 | 0.931 4 |
| ②(61) | 2.039 4~ 2.270 3 | 2.137 0 | 0.764 9~ 0.906 2 | 0.874 7 | TEP-L1 | 2.026 4 | 0.929 8 |
| ①(403) | 1.892 1~ 2.439 8 | 2.124 9 | 0.713 1~ 0.926 0 | 0.857 0 | | | |
| ①- 1(135) | 1.892 1~ 2.249 7 | 2.106 8 | 0.753 6~ 0.926 0 | 0.865 8 | | | |
| ①- 2(102) | 1.929 5~ 2.383 2 | 2.107 7 | 0.745 5~ 0.922 9 | 0.865 2 | | | |
| ①- 3(166) | 1.952 5~ 2.439 8 | 2.150 1 | 0.713 1~ 0.908 2 | 0.844 7 | | | |
| 全剖面(920) | 1.892 1~ 2.439 8 | 2.096 8 | 0.713 1~ 0.929 2 | 0.863 2 | | | |

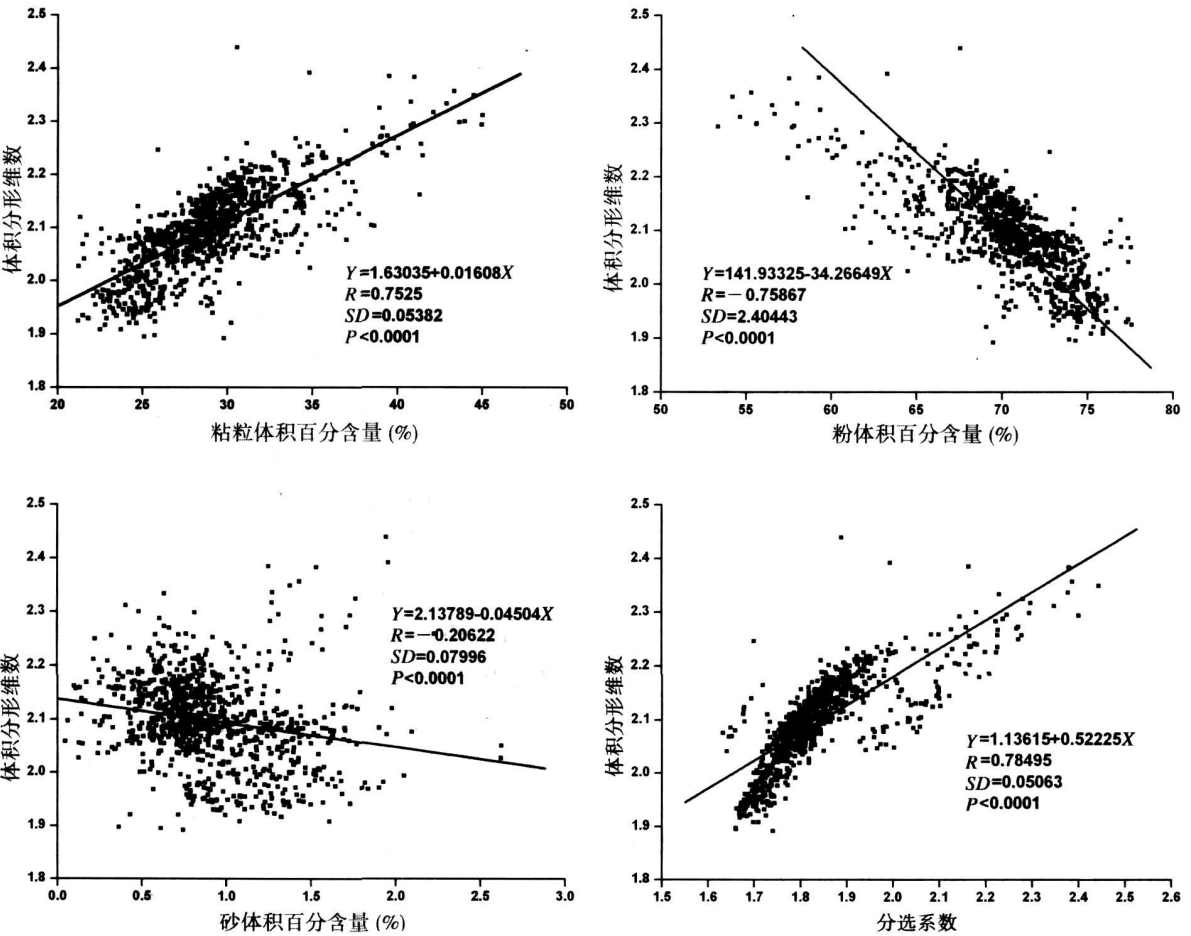


图 4 JL剖面红土粒度体积分维值与粒度组成、分选系数的相关关系

Fig. 4 The correlation between red earth grain-size volume fractal dimension and grain-size parameters

4 粒度分维特征的剖面变化及其意义

JL 红土粒度体积分维值沿剖面的变化大致可以分为三大段(图 6): 第一层段为网纹红土中下部①层, 以高分维值, 高频波动, 分维值自下而上波动减小为特征, 总体上由 3 个高值段和 2 个低值段相间, 高值段对应于①-3、①-2上部、①-1上部, 低值段对应于①-1下部和①-2下部。第二层段为网纹红土上部②~⑤层, 分维值略减小, 呈阶梯式波动下降趋势, ②上部、④、⑤充当阶梯“顶面”, ②下、③、④顶、⑤顶充当阶梯“陡坎”, 分维值在“陡坎”处

快速降低, “顶面”部位低频低幅波动。第三层段为棕色黄土⑥~⑧层, 分维值为全剖面最低, 呈“两谷一峰”特征, 峰值对应第⑦古土壤层, 谷值对应第⑥、第⑧两个黄土层。因而, 全剖面存在 7 个高低值相间的旋回, 自下而上红土粒度体积分维值呈波动减小趋势。视 $< 2 \mu\text{m}$ 组分为湿热风化产物, 则该组分含量越高, 风化越强。那么, JL 剖面自第四纪以来记录了 7 次成壤强弱旋回, 网纹红土成壤强度相对较强, 强中见弱; 棕黄色土风化成壤强度明显减弱, 随气候波动弱中见强。分维值曲线与化学蚀变指数 CIA 曲线和土壤红化率曲线之间较好的峰谷对应关系也支持这一结论。

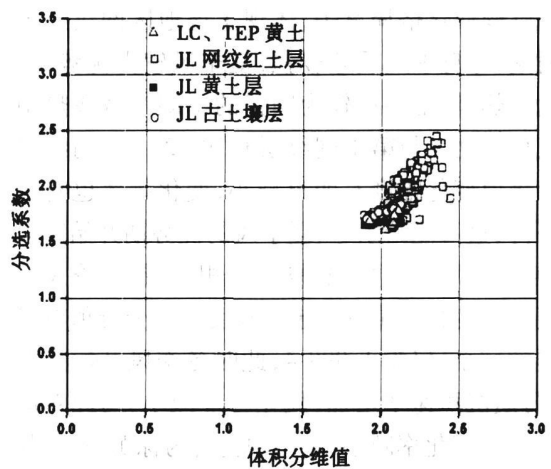
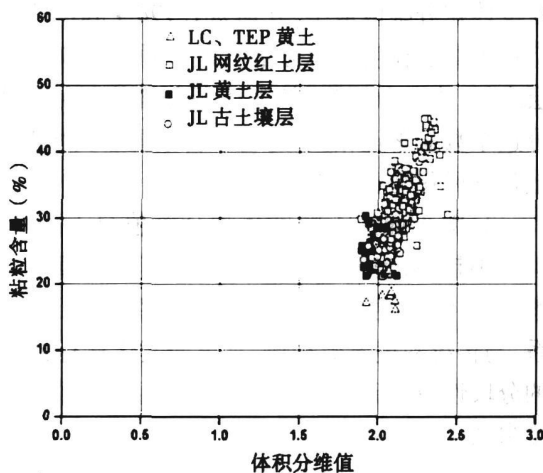


图 5 JL 剖面红土与北方黄土的粒度图解参数散点图

Fig. 5 Scatting plots of grain-size parameters of JL red earth and north loess

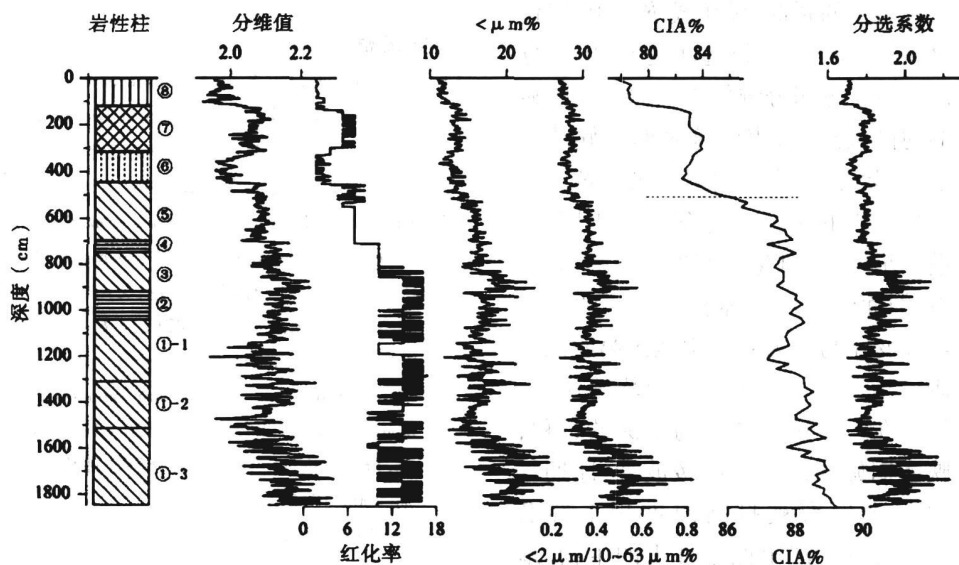


图 6 JL 剖面红土粒度体积分维值曲线与红化率、CIA、粒度变化曲线比较

Fig. 6 Comparison of grain-size volume fractal curve and other relative curves of JL red earth section

鉴于以上特征, JL剖面红土粒度体积分维值可以指示红土的风化强度和红化程度,可以在一定程度上指示该地区沉积环境的变化。由于体积分维值是在颗粒体积分布基础上得出的参数,无需对土壤颗粒的密度做假设性的统一,它包含了各种粒径大小在土体中的分布,其物理意义比传统粒度参数更为明确,纵向变化显示更好的分段性。

网纹红土的发育曾经历一个相当长的湿热气候环境^[17, 19],风化成壤强烈。然而,网纹红土层段内风化减弱事件也是显而易见的。第①网纹层内体积分维值高且波动频繁,其间所夹的有些低值甚至与棕黄色土层的体积分维值相近,这种变化与以冷干、暖湿为组合特征的冬季风、夏季风优势期相互交替的季风气候演化格局有关,体现了该地区网纹红土发育时期,冬夏季风反差较强,夏季风较占优势,气候较为湿热,但是存在较为频繁的干湿交替或热中见凉气候波动。与第①网纹层相比,②~⑤网纹层体积分维值变化幅度有明显减小,变化频率也有了明显下降,这可能暗示冬、夏季风的优势期开始阶段性交换,冬季风开始加强,夏季风相对减弱,季风变化周期开始变长。第⑥黄土层粒度体积分维值有了更明显的减小,仅为 1.998 4 此时冬季风开始显著加强,母质沉积速率增加,风化强度减小,与此对应的是沉积物红化率减小,土层颜色转为棕黄色,粘粒含量降低,粉砂含量增加,分选系数减小,沉积物的自组织程度和分选性变好,体积分维值也随之减小。第⑦古土壤层粒度体积分维值的增大,表明该时期又出现一个气候较适宜的暖期,风化成壤作用、红化程度有所加强,粘粒含量增加,分选性变差,体积分维值增大。但该层粒度体积分维值为 2.065 3,明显小于剖面中下部的网纹红土,表明该时期气候的湿热程度已经远不及网纹红土发育时期。第⑧黄土层粒度体积分维值进一步下降,且小于第⑥黄土层,气候的干冷程度进一步加强,风化强度进一步减弱。

庐山地区 JL剖面红土粒度体积分维值的纵向变化所指示的环境变化与前人对庐山地区第四纪沉积环境变化的研究结论基本一致。李吉均等认为,庐山第四纪气候存在一个由湿热变为干凉的过程,并存在数次反映冰期旋回的气候冷暖波动,冰期气候条件下,网纹红土发育被打断或堆积下蜀黄土^[16]。黄翡、熊尚发对九江第四纪红土的生物、地球化学研究也显示中更新世以来该地区存在的气候干冷趋势^[22]。朱诚认为庐山地区中更新世早期气

候湿热;晚更新世初中期气候干冷和湿热交替;晚更新世末和全新世初,庐山地区经历了规模中等的抬升运动,庐山气候至此明显转为干冷^[17]。该剖面土壤色度的研究也获得相似结论^[23]。

5 结论

1. JL剖面红土粒度组成显示风成特性,同时经历了较强的后期风化。其粒度分布、粒度参数和粒度体积分维值与北方黄土具有较好的可比性。该剖面红土粒度体积分布具有较为显著的分形特征。

2. 第①~⑤网纹红土粒度体积分维值较大,均值介于 2.080 9~2.141 1间;⑥、⑧两个棕黄色土层粒度体积分维值最小,分别为 1.998 4和 1.972 3;第⑦古土壤层粒度体积分维值介于网纹层和棕黄色土层之间,为 2.065 3。粒度体积分维值与粘粒含量、分选系数显著正相关,与粉砂含量显著负相关,对红土化学风化强弱具有指示意义。

3. JL剖面红土粒度体积分维值自下而上呈波动减小趋势,表现为高低值相间的 7个旋回,与红化率、CIA 值、粘粒含量的峰谷变化存在一致对应关系,与传统粒度参数相比,其纵向变化具有更为明显的分段性,在指示沉积环境变化方面可能比传统粒度参数更优。初步认为, JL剖面红土粒度体积分维值的高低旋回和整体变化特征,可以指示该地区红土母质第四纪以来成壤环境的强弱变化及演化趋势。

参考文献 (References)

- [1] Qin Yaochen, Liu Kai. Advancement of applied studies of fractal theory in geography[J]. *Progress in Geography*, 2003, 22(4): 426~429 [秦耀辰, 刘凯. 分形理论在地理学中的应用研究进展[J]. *地理科学进展*, 2003, 22(4): 426~429]
- [2] Xu Jianhua, Lu Yan, Ai Nanshan, et al. Study on fractal characters of desert and desertification[J]. *Journal of Desert Research*, 2002, 22(1): 6~10 [徐建华, 卢艳, 艾南山, 等. 沙漠化的分形特征研究[J]. *中国沙漠*, 2002, 22(1): 6~10]
- [3] Wei Yuhu, Hu Xiewen, Qi Guanghui. Application of fractal theory to evaluation of features of grain size composition of soil mass[J]. *Geology of Anhui*, 2006, 16(2): 120~122 [魏玉虎, 胡卸文, 齐光辉. 分形理论在土体粒度成分特征评价中的应用[J]. *安徽地质*, 2006, 16(2): 120~122]
- [4] Liao Ruhua, Zhang Shiong, Deng Liangji, et al. Fractal dimensions of particle in the hill area and their applications[J]. *Journal of Sichuan Agricultural University*, 2002, 20(3): 242~245 [廖尔华, 张世熔, 邓良基, 等. 丘陵区土壤颗粒的分形维数及其应用[J].

- 四川农业大学学报, 2002, 20(3): 242~ 245]
- [5] Huang Ying Fu Bihang, Fu Junqu *et al* The characteristics of variation of fractal dimension of grain size of laterite[J]. *Journal of Yunnan Polytechnic University*, 1998, 14(3): 54~ 60 [黄英, 符必昌, 付君策, 等. 红土颗粒粒度的分维变化特征 [J]. 云南工业大学学报, 1998, 14(3): 54~ 60]
- [6] Yang Peiling, Luo Yuanpei, Shi Yuanchun Soil fractal characteristics represented by particle size distribution of the weight[J]. *Chinese Science Bulletin*, 1993, 38(20): 1896~ 1899 [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 [J]. 科学通报, 1993, 38(20): 1896~ 1899]
- [7] Wang Guoliang, Zhou Shengli, Zhao Qigua Volume fractal dimension of soil particles and its applications to land use[J]. *Acta Pedologica Sinica*, 2005, 42(4): 545~ 550 [王国梁, 周生路, 赵其国. 土壤颗粒的体积分维值及其在土地利用中的应用 [J]. 土壤学报, 2005, 42(4): 545~ 550]
- [8] Huang Guanhua, Zhan Weihua Fractal property of soil particle size distribution and its application[J]. *Acta Pedologica Sinica*, 2005, 42(4): 545~ 550 [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]
- [9] Wu Chengzhen, Hong Wei Study on fractal features of soil aggregate structure under different management patterns[J]. *Acta Pedologica Sinica*, 1999, 36(2): 162~ 167 [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]
- [10] Bai Chunguang, Mu Guijin, Wang Jian Grain-size fractal dimensions characteristics of lacustrine sediments of Abo Lake and the environmental significance[J]. *Arid land geography*, 2002, 25(4): 336~ 341 [柏春广, 穆桂金, 王建. 艾比湖湖相沉积物粒度的分维特征与环境意义 [J]. 干旱区地理, 2002, 25(4): 336~ 341]
- [11] Yi Shumin, Sun Yunzhi The fractal features of debris flow and its significance[J]. *Scientia Geographica Sinica*, 1997, 17(1): 24~ 31 [易顺民, 孙云志. 泥石流的分形特征及其意义 [J]. 地理科学, 1997, 17(1): 24~ 31]
- [12] Yi Shumin, Sun Yunzhi Fractal Structure Features of Granulometric Composition in Frozen Soil and Its Significance[J]. *Journal of Glaciology and Geocryology*, 1994, 16(4): 314~ 319 [易顺民, 唐辉明. 冻土粒度成分的分形结构特征及其意义 [J]. 冰川冻土, 1994, 16(4): 314~ 319]
- [13] Tian Kanliang, Zhang Huili, Zhang Boping *et al* Fractional structure of granularity distribution of natural sedimentary sandy gravel [J]. *Jour. of Northwest Sci-Tech Univ. of Agri. and For. (Nat. Sci. Ed.)*, 2002, 30(5): 85~ 89 [田堪良, 张慧莉, 张伯平, 等. 天然沉积砂卵石粒度分布的分形结构研究 [J]. 西北农林科技大学学报 (自然科学版), 2002, 30(5): 85~ 89]
- [14] Liu Lianwen, Chen Jun, Ji Junfeng *et al* Grain-size fractal dimension of loess-paleosol and its significance[J]. *Geological Journal of China Universities*, 1999, 5(4): 412~ 417 [刘连文, 陈骏, 季峻峰, 等. 陕西洛川黄土的粒度分维值及其意义 [J]. 高校地质学报, 1999, 5(4): 412~ 417]
- [15] Mao Longjiang, Liu Xiaoyan, Xu Yehua Grain-size fractal distribution of Xiashu Loess and Holocene environmental change in north of Yangtze River Nanjing[J]. *Journal of Desert Research*, 2006, 26(2): 264~ 267 [毛龙江, 刘晓燕, 许叶华. 南京江北地区下蜀黄土粒度分形与全新世环境演变 [J]. 中国沙漠, 2006, 26(2): 264~ 267]
- [16] Li Jijun, Zhang Linyuan, Deng Yangxin *et al* Quaternary environmental changes and geomorphic developmental problems in Lushan Area[J]. *Science in China (Series B)*, 1983, (8): 734~ 742 [李吉均, 张林源, 邓养鑫, 等. 庐山第四纪环境演变和地貌发育问题 [J]. 中国科学 (B 辑), 1983, (8): 734~ 742]
- [17] Zhu Cheng The new recognitions to genesis Quaternary sediments and Neotectonics in the east Piedmont of the Lushan Mountain [J]. *Acta Geographica Sinica*, 1995, 50(1): 41~ 50 [朱诚. 对庐山东麓第四纪沉积物物源及新构造运动的新认识 [J]. 地理学报, 1995, 50(1): 41~ 50]
- [18] Tyler S W, Wheatcraft S W. Fractal scaling of soil particle-size distributions: Analysis and limitations[J]. *Soil Sci Soc Am J*, 1992, 56: 362~ 369
- [19] Zhu Lidong, Ye Wei, Li Fengquan *et al* Grain-size Features of Red Earth in Mid-subtropics[J]. *Scientia Geographica Sinica*, 2006, 26(5): 586~ 591 [朱丽东, 叶玮, 李凤全, 等. 中亚热带第四纪红粘土的粒度特征 [J]. 地理科学, 2006, 26(5): 586~ 591]
- [20] Xiong Shangfa, Ding Zhongli, Liu Dongsheng *et al* Comparison of granularity Features from North Jiangxi red earth and Beijing adjacent areas Loess and desert sand[J]. *Chinese Science Bulletin*, 1999, 44(11): 1216~ 1219 [熊尚发, 丁仲礼, 刘东生, 等. 赣北红土与北京邻区黄土及沙漠砂的粒度特征对比 [J]. 科学通报, 1999, 44(11): 1216~ 1219]
- [21] Hu Xuefeng, Gong Zitong Comparative study on the origin of Quaternary Red Earth in Jiangxi and Taihe Jiangxi Province[J]. *Acta Palaeontologica Sinica*, 2001, 38(1): 1~ 9 [胡雪峰, 龚子同. 江西九江泰和第四纪红土成因的比较研究 [J]. 土壤学报, 2001, 38(1): 1~ 9]
- [22] Huang Fei, Xiong Shangfa Phytolith and pollen records of Quaternary red earth in Jiujiang City, Jiangxi Province[J]. *Acta Micropalaeontologica Sinica*, 2001, 18(2): 203~ 210 [黄翡, 熊尚发. 江西九江第四纪红土中的植物硅酸体及孢粉 [J]. 微体古生物学报, 2001, 18(2): 203~ 210]
- [23] Zhu Lidong, Li Fengquan, Ye Wei *et al* Climatic Implication of the Chroma of JL Red Earth Section in the Lushan mountain[J]. *Tropical Geography*, 2007, 27(3): 193~ 197 [朱丽东, 李凤全, 叶玮, 等. 庐山 JL 红土剖面的色度气候意义 [J]. 热带地理, 2007, 27(3): 193~ 197]

Grain-size Volume Fractal Features and Its Paleoenvironmental Significance for JL Red Earth Section, Lushan Area

JIANG Yongjian ZHU Lidong YE Wei LI Fengquan LI Jianwu

(Geography Process Lab, Zhejiang Normal University, Jinhua 321004, Zhejiang, China)

Abstract Fractal theory has been applied widely in geomorphology, pedology and sedimentology, but application in the South Quaternary red earth is still rare. A typical section of Quaternary red earth —— JL section in the northem foot of Lushan is chosen. According to the dimensional model of integration in the three-dimensional space and linear regression method, study the volume fractal feature of red earth grain-size, calculate red earth grain-size volume fractal dimensions. The results show that: (1) The grain-size volume fractal feature of JL red earth is notable, its grain-size features and volume fractal dimensions have comparability with north loess, which probably indicates its aeolian characteristics from its parent materials and weathering process. (2) The volume fractal dimensions of five plinthitic red earth layers are highest, whose mean volume fractal dimensions vary from 2.080 9 to 2.141 1; The sixth and eighth brown-yellow layer have the lowest volume fractal dimensions, with the value of 1.998 4 and 1.972 3 respectively; The volume fractal dimension of the seventh paleosol is 2.065 3, whose value is between the plinthitic red earth layers and the brown-yellow layers. Volume fractal dimensions have a notable positive correlation with both the content of clay and standard deviation, but have a negative correlation with the content of silt fraction. (3) The grain-size volume fractal dimensions have seven fluctuations along JL red earth section, which are more notable than traditional grain-size parameters, they are also in accord with the trend of redness rating (RR) curve and CIA curve. Grain-size volume fractal dimensions could indicate the evolution of the deposition-weathering environment. It could be inferred that the pedogenesis of JL red earth parent materials in Lushan area had fluctuated and tended to weaken gradually since Quaternary.

Key words Lushan, Pleistocene red earth, grain-size, volume fractal feature