

分形方法在庐山第四纪沉积 环境研究中的应用*

朱 诚 于世永 刘晓宁

(南京大学大地海洋科学系, 南京 210093)

摘 要 沉积物中 $\text{Fe}^{3+}/\text{Fe}^{2+}$ 的值与形成时的古温度有幂指数关系。假定 $\text{Fe}^{3+}/\text{Fe}^{2+}$ 的值沿剖面的变化具有自相关性, 那么它所反映的古温度变化是一条分形曲线。本文以庐山大校场剖面为例, 根据孢粉和 $\text{Fe}^{3+}/\text{Fe}^{2+}$ 的测试数据, 建立了一个推算古温度的非线性公式。据此推算的古温度表明, 本区中更新世以来共有 3 次明显的冷暖波动, 最高年均温在 22°C 左右, 最低达 3°C 左右, 出现在末次冰期。未发现有低于 0°C 者。由粒度分数维的概念, 推导出的计算公式可作为混杂堆积物粒度分布特征的度量指标。根据计算, 该剖面主要接近于泥石流和石冰川的粒度分数维, 而与冰碛物的粒度分数维有较大差别。综上所述, 本区沉积物成因主要是间冰期季风气候下的山地泥石流和沟谷流水的洪-冲积及冰期干冷的冰缘环境下的冻融堆积。

关键词 分形 庐山地区 古沉积环境

分 类 (中图法) P931, P534.63, S159 (科图法) 56.681

观测和数值模拟的结果表明, 现代气候系统具有明显的随机性和不确定性, 这是系统内部因子间非线性关系的表现^[1]。近年来, 有关古环境演变中的非线性事件也不断地被发现^[2]。越来越多的证据表明, 第四纪环境演变中也存在着大量的非线性现象和突变事件^[3]。因而, 过去的环境演变过程可以用非线性数学方法来定量地重建和恢复。作为尝试, 作者选择多年来有关庐山第四纪沉积环境问题的争论焦点处——大校场剖面, 做了较细致的采样和分析工作。根据古地磁、地球化学、粒度和孢粉等方面的测试数据, 用分形方法进行了研究。

1 剖面概况

大校场剖面位于江西庐山大校场谷地右岸出口处, 海拔 1 088m。谷地为大月山背斜西北翼上沿横张节理发育的次成谷, 宽 12—15m, 两壁陡立。剖面出露厚度约 8m, 其中第四系厚 6.4m, 下伏震旦系南沱组 Z_1n_2^2 女儿城长石石英砂岩, 倾向 295°NW , 风化程度较高。第四纪沉积物中砾石大小悬殊, 多与泥砂混杂堆积。根据古地磁测定, 剖面磁性地层划分属于布容正向时^[4], 为中更新世以来的沉积。在 Q_1 , 构造抬升较为强烈, 本区长期处于剥蚀环境, 因而缺失 Q_1 地层。地层及采样点位置作者已有介绍^[5,6]。

* 国家博士后科学基金与南京大学现代分析中心测试基金资助项目成果。

收稿日期: 1995-01-04, 收到修改稿日期: 1996-05-09

2 古温度变化

2.1 古温度推算公式的建立

目前,分形方法已经开始应用于古气候指标的时间序列分析中^[7,8]。研究发现,沉积物中赤铁矿的矿化程度与当时的沉积环境,特别是地表温度有关^[6]。周延兴最早把这种关系线性化,并提出了一个 $\text{Fe}^{3+}/\text{Fe}^{2+}$ 与年平均温度关系的公式,用来推算古温度^[9]。事实上,环境演变中的突变事件表明沉积物中的各项古气候指标与古气候因子间的关系是非线性的。分析剖面中孢粉和 $\text{Fe}^{3+}/\text{Fe}^{2+}$ 的测试^[5],作者发现,沉积物中 $\text{Fe}^{3+}/\text{Fe}^{2+}$ 的值越高,孢粉组合中喜暖的植物种属及其所占的比例也越多。因而可以推知,沉积物中 $\text{Fe}^{3+}/\text{Fe}^{2+}$ 的含量与形成时的古温度呈正相关。近似满足幂指数关系,即:

$$T = a + bx^D \tag{1}$$

式中 T 为年平均气温, x 为 $\text{Fe}^{3+}/\text{Fe}^{2+}$ 的值, a 、 b 为常数。如果 $\text{Fe}^{3+}/\text{Fe}^{2+}$ 在剖面中的变化具有自相似性,那么它所反映的古温度变化是一条分形曲线, D 就是该曲线的分数维。可通过下式求得^[10]:

$$\begin{cases} R(\tau)/S(\tau) = c\left(\frac{\pi}{2}\right)^H \\ H = 2 - D \end{cases} \tag{2}$$

式中 $R(\tau)$ 、 $S(\tau)$ 分别为时间序列的极差和标准差, τ 为时间序列的采样间隔时段, c 为常数, H 为 Hurst 指数。据 $\text{Fe}^{3+}/\text{Fe}^{2+}$ 的测试数据^[5],从式 (1)、(2) 可求得 $\text{Fe}^{3+}/\text{Fe}^{2+}$ 时间序列的 Hurst 指数 $H=0.69$,则 $D=2-H=1.31$ 。根据孢粉分析^[5],在距地表 5.6m 和 6.0m 两处,孢粉较多,孢粉组合指示的古气候较为准确。如在 5.6m 处, $\text{Fe}^{3+}/\text{Fe}^{2+}$ 的值 $x_1=17.33$,孢粉组合中木本植物以喜温凉的松为主,草本植物主要是禾本科、蔷薇。反映了

表 1 庐山大校场剖面用非线性方法推算的古温度及其与线性方法的比较

Tab. 1 Paleotemperature values got from a nonlinear formula and its comparison to that from linear methods

样品编号	采样深度	Fe^{3+}	Fe^{2+}	$\text{Fe}^{3+}/\text{Fe}^{2+}$	线性方法 推算的古温度	非线性方法 推算的古温度
	(m)	(%)	(%)	(Xn)	(℃)	(℃)
L10	1.0	4.75	0.54	8.80	2.82	3.85
L9	2.3	4.19	0.09	46.56	14.90	16.08
L8	2.8	6.08	0.12	50.67	16.22	17.7
L7	3.5	2.45	0.09	27.22	8.71	9.12
L6	3.8	5.51	0.09	61.22	19.60	22.03
L5	4.1	3.89	0.07	55.57	17.79	19.68
L4	5.2	3.03	0.13	23.31	7.46	7.87
L3	5.6	2.60	0.15	17.33	5.55	6.08
L2	6.0	2.22	0.05	44.40	14.21	15.25
L1	6.2	2.39	0.06	39.83	12.75	13.53

温凉略干的针叶林-草原景观。当时的年平均气温在 6°C 左右；在 6.0m 处， $\text{Fe}^{3+}/\text{Fe}^{2+}$ 的值 $x_2=44.4$ ，孢粉组合中以喜暖的水青冈、枫香、胡桃等阔叶树种为主，水生的草本植物也占有较大比例，反映了较暖较湿的常绿-落叶阔叶混交林景观。当时的气候与本区现在气候基本相当，年均温度在 15°C 左右。将 $x_1=17.33$ ， $T_1=6$ 及 $x_2=44.4$ ， $T_2=15$ 分别代入式 (1)，解得 $a=2.3$ ， $b=0.09$ 。则可得到用 $\text{Fe}^{3+}/\text{Fe}^{2+}$ 推算古温度的公式为：

$$T = 2.3 + 0.09x^{1.31} \quad (3)$$

2.2 古温度的推算

利用 $\text{Fe}^{3+}/\text{Fe}^{2+}$ 的测试数据^[5]，作者推算了剖面中古温度的变化 (表 1)。可以看出，用本公式推算的古温度值与用线性方法推算的结果有所差异 (平均相对偏差 0.47%)，它所反映的古气候波动比线性方法更明显。本地区 Q_2 以来至少有过三次较为明显的冷暖波动，最高年均温达 22°C 左右。最低约在 3°C 左右，出现在末次冰期，但未发现有低于 0°C 者。

3 粒度分析

沉积物的粒度差异反映了不同的成因类型。为了辨别沉积物的成因与环境，引入粒度分数维的概念。首先假定沉积物形成时的风化过程具有标度不变性，则粒度分布可写成：

$$N(r) = c/r^D \quad (4)$$

式中 N 为粒径小于 r 的颗粒数目， D 为分数维， c 为常数， r 为颗粒直径。假定沉积物组成均匀，密度记为 ρ ，颗粒近似为球形，直径为 r ，由式 (4)，样品中粒径为 r 的所有颗粒的总质量 M 与颗粒数目 N 的关系为：

$$M = \frac{2}{3}\pi r^3 \rho N = \frac{2}{3}\pi \rho c r^{3-D} \quad (5)$$

为消去常数，将式 (5) 改写为：

$$\frac{m_1}{m_2} = \left(\frac{r_1}{r_2} \right)^{3-D} \quad (6)$$

式中 m_1 、 m_2 分别是样品中粒径为 r_1 、 r_2 的两组颗粒的质量。为便于使用粒度分析数据计算，将其化为质量百分数：

$$\frac{m_1/M_0}{m_2/M_0} = \left(\frac{r_1}{r_2} \right)^{3-D} \quad (7)$$

式中 M_0 为样品的总质量， $\frac{m_1}{M_0}$ 、 $\frac{m_2}{M_0}$ 分别是粒径为 r_1 、 r_2 的两组颗粒的质量百分比。两边取对数，得到粒度分数维的计算公式：

$$\begin{aligned} D &= 3 - \log_2 \left(\frac{m_1/M_0}{m_2/M_0} \right) / \log_2 \left(\frac{r_1}{r_2} \right) \\ &= 3 - \frac{\log_2 \left(\frac{m_1}{M_0} \right) - \log_2 \left(\frac{m_2}{M_0} \right)}{\log_2 r_1 - \log_2 r_2} = 3 - \frac{\log_2 \left(\frac{m_1}{M_0} \right) - \log_2 \left(\frac{m_2}{M_0} \right)}{\phi_2 - \phi_1} \end{aligned} \quad (8)$$

利用粒度分析数据，作者计算了各层每个样品的粒度分数维 D 的值，为了对比，作者又分别计算了甘肃武都泥石流、四川小相岭更新世冰碛物、新疆中天山石冰川等沉积物的粒度分数维 (表 2)。比较发现，剖面中各个层位的粒度分数维与典型冰碛物的分数维 ($D=2.96$) 有明显差别。表明它们都不具有冰川成因。其中，深 6.0—6.4m 处下部的粗大砾石

层的粒度分数维为 3.04，与泥石流的粒度分数维 ($D=3.03$) 较为接近，上部粗砂透镜体的粒度分数维为 2.84，较接近冲积物的分数维 (2.82)。反映了该层沉积物山地泥石流和沟谷流水作用下的洪-冲积成因。根据古温度推算，当时的年均温在 13—15℃左右，并且沉积物都经湿热化，这也是湿热气候条件下山地泥石流作用的证据。深 1.85—2.8m、3.8—4.3m 的两层沉积物的成因与之相同。深 5.2—5.7m 处的粒度分数维 (2.88—2.9) 较接近石冰川的分数维 (2.91)。据推算，当时的年均温度在 6—7℃左右，气候干冷，为季节性冻融作用下的冰缘堆积。中安第斯山地海拔 3 200m 处的现代冰缘区类似的地貌与动力过程便可为证^[12]。深 1.0—1.85m、2.8—3.8m 的两层沉积物的成因与之相同。

表 2 庐山大校场剖面平均沉积物粒度分数维及其与泥石流、石冰川、冰碛物、冲积物的比较

Tab. 2 Comparison of mean grain-size fractal dimensions among Dajiaochang sediments, debris flow, rock glacier, moraine and alluvium

采样地点	样品 编号	采样深度 (m)	分数维 D	采样地点	分数维 D
庐山大校场	L9	1.0	2.89	新疆中天山石冰川	2.91
	L8	1.85	3.05	四川小相岭 更新世冰川终碛	2.96
	L7	2.8	3.03		
	L6	3.3	2.93		
	L5	4.3	3.08	甘肃武都泥石流	3.03
	L4	5.2	2.90	河流冲积物	2.82*
	L3	5.7	2.88		
	L2	5.95	2.84		
	L1	6.15	3.04		

* 资料来源据参考文献 [11]。

4 第四纪环境演变

根据上述古温度推算和粒度分析结果，结合前人的研究^[4-6]，本区第四纪环境演变大致经过以下几个阶段（图 1）。

I．早更新世。从风化程度较深的下伏基岩看，新构造运动以持续的抬升为主，本区为丘陵景观，长期处于剥蚀环境，因而 Q₁ 地层缺失。从当时较低的海拔高度看，没有冰川发育的可能。

II．中更新世。早期，根据网纹红土的最低分布高程推算^[13]，本区当时海拔在 440m 左右，年均温在 13—15℃之间，植被成分主要有喜暖的松、铁杉、水青冈、枫香等，水生的香蒲、黑三棱等草本植物占有较大比重，为湿热气候条件下的常绿-落叶阔叶混交林景观。季风气候下的山地泥石流和沟谷流水作用强盛。晚期，从变位网纹红土的分布高程看，本区经历过大幅度的抬升，海拔达到 1 000—1 100m，基本接近目前高度。年均温在 6—7℃之间，为准冰缘气候。地貌过程以季节性的冻融作用为主。季节性积雪有可能在谷地堆积的同时，侵蚀改造由 Z₁n₂² 长石石英砂岩组成的次成谷地，使之拓宽形成类似冰蚀地貌的宽谷地形。

III．晚更新世。气候波动较为频繁。早期气候湿热，年均温在 19—22℃左右，淋溶、湿

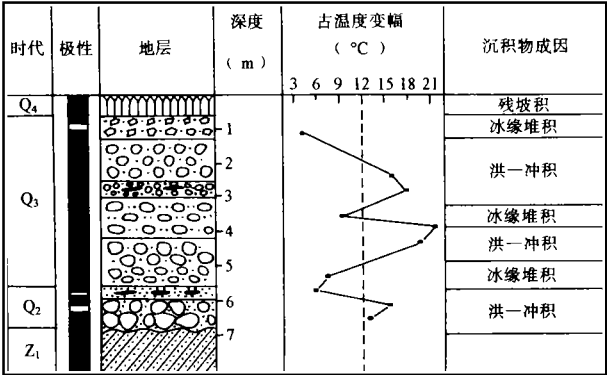


图 1 庐山大校场剖面综合柱状地层图

Fig. 1 Composite stratigraphy of Dajiaochang profile, Lushan Mt.

热化作用较为强烈。其后进入一个相对短暂的冷期，年均温降至 9℃左右，为准冰缘气候。中期气候回暖，年均温达 16—17℃，淋溶作用较强。晚期本区气候达到最冷，年均温在 3℃左右，为末次冰期干冷的冰缘环境。以冻融作用下的残坡积为主，上覆现代山地黄棕壤。

本文的研究表明，根据古气候指标，用分形方法重建古沉积环境是可行的。上述结论虽是针对庐山大校场的一个剖面而言，但已有的大量研究成果的佐证表明，此方法至少在庐山地区古环境研究中有很好的适用性。当然，整个庐山地区第四纪环境演变的最终揭示还有待于不同剖面高分辨率取样和多种手段的研究。

参 考 文 献

- 1 丑纪范. 长期数值大气预报. 北京: 气象出版社, 1986. 1—185.
- 2 Paulvaldes. Damping seasonal variations. *Nature*. 1994. (372): 221.
- 3 汪品先. 气候与环境演变中的非线性关系——以末次冰期为例. 第四纪研究. 1991 (2): 97—103.
- 4 朱诚. 对庐山东麓第四纪沉积物源及新构造运动的新认识. 地理学报. 1995. 50 (1): 41—50.
- 5 朱诚. 庐山、黄山与天目山地区第四纪沉积环境比较研究. 地理科学. 1996. 16 (1): 37—45.
- 6 朱诚. 对用 Fe^{3+}/Fe^{2+} 探讨庐山地区第四纪古温度的讨论. 地质论评. 1994. 40 (3): 216—220.
- 7 Flugeman RH. Snow RS. Fractal analysis of long-range paleoclimatic data: oxygen isotope record of Pacific core v28—313. *Pure and Application Geophys*. 1989. (131): 307—313.
- 8 吕厚远. 赵永良. 丁仲礼. 2.5Ma 以来古气候变化的混沌吸引子. 第四纪研究. 1993. (2): 121—128.
- 9 周延兴. 论沧州沿海地区第四纪沉积物的 Fe^{3+}/Fe^{2+} 垂直变化周期性及其应用. 海洋地质与第四纪地质. 1984. 4 (2): 103—110.
- 10 艾南山. 李后强. 第四纪研究的非线性科学方法. 第四纪研究. 1993. (2): 109—119.
- 11 Hartmann WK. Terrestrial, lunar and interplanetary rock fragmentation. *Icarus*. 1969. (10): 201—213.
- 12 朱诚. 柯特 AE. 中安第斯山地冰缘地貌特征. 地理科学. 1994. 14 (1): 56—63.
- 13 朱景郊. 网纹红土的成因及其研究意义. 地理研究. 1988. 7 (4): 12—19.

THE APPLICATION OF FRACTAL METHOD TO STUDYING QUATERNARY SEDIMENTAL ENVIRONMENT IN LUSHAN AREA

Zhu Cheng Yu Shiyong Liu Xiaonin

(Department of Geo & Ocean Sciences, Nanjing University, Nanjing 210093)

Abstract

The past study has revealed that there is a close relation between the value of $\text{Fe}^{3+}/\text{Fe}^{2+}$ and the climatic conditions for forming sediments. Viewing the phenomenon at a different angle, the authors found that the sediments with high value of $\text{Fe}^{3+}/\text{Fe}^{2+}$ also have more thermophilous sporopollen. Going a step further, we can find that there is a positive correlation between the value of $\text{Fe}^{3+}/\text{Fe}^{2+}$ and the paleo-temperature for forming the sediments. The positive correlation is similar to a power exponent relation. If the value of $\text{Fe}^{3+}/\text{Fe}^{2+}$ in vertical profile has an autocorrelation, then the value will show a fractal curve. The relation between the $\text{Fe}^{3+}/\text{Fe}^{2+}$ value and paleo-temperature can use a formula to express, that is, $T = a + bx^D$, where, T is paleo-temperature, x is the value of $\text{Fe}^{3+}/\text{Fe}^{2+}$, a and b are constants, and D is the fractal dimension of the $\text{Fe}^{3+}/\text{Fe}^{2+}$ series. Based on the results of sporopollen identification and the testing data of $\text{Fe}^{3+}/\text{Fe}^{2+}$, this paper establishes a nonlinear formula to infer the paleo-temperature in the area, i. e. $T = 2.3 + 0.09x^{1.31}$. Using the above formula to determine the paleo-temperature change in the area since Q_2 , we can find that the inferred result has a relative mean deviation of $<5\%$, and this method is more obvious to illustrate the paleo-temperature fluctuation. The inferred result shows that there are 3 times obvious (cold or warm) climate fluctuation in the area since Q_2 . During the period, the highest annual mean air-temperature was about 22°C , and the lowest value was 3°C or so. No minus annual mean air-temperature was not found.

In order to identify genesis of sediment formation, the authors suggest a concept about grain-size fractal dimension of sediments. On the assumption that the grain diameter (r) and number (N) of the sediments accord with a power exponent relation, that is, $N(r) = C/r^D$, here C is a constant, D is a fractal dimension, thus, the granule of the sediments can be considered as spherical, and they have homogeneous density, consequently, we can get a formula to calculate the grain-size fractal dimension: $D = 3 - (\log_2(M/m) - \log_2(M_2 - m)) / (\phi_2 - \phi_1)$. In the formula, M_1/m and M_2/m are the granule percentage contents for grain diameter r_1 and r_2 respectively, $\phi_1 = -\log_2 r_1$ and $\phi_2 = -\log_2 r_2$ are the logarithms of the grain diameter r_1 and r_2 , D is a measured index of the grain-size dimension distribution. According to the above formula, the authors calculate the different grain-size fractal dimensions of Dajiaochang sediments, moraine, debris flow, rock glacier and alluvium. By contrast, we can find that the Dajiaochang sediments are similar to debris flow and rock glacier according to their grain-size fractal dimensions, but they are different from moraine. Combining paleo-temperature to deduce, the authors think that the Dajiaochang sediments was mainly formed by mountain debris flow and alluvium under monsoon conditions during interglaciation period. Of course, it is impossible to form glacier in the Lushan area under the above climatic conditions.

Key words Fractal dimension, Lushan area, Paleo-sedimentary environment