

文章编号: 1000-0550 (2005) 04-0696-06

南海东部 69 柱粒度分维指标与气候代用指标的分形比较及其意义

章伟艳^{1,2} 张富元² 章伟德³ 卢冰² 杨克红² 赵国军⁴

1 (中国地质大学数学地质遥感地质研究所 武汉 430074)

2 (国家海洋局第二海洋研究所 国家海洋局海底科学重点实验室 杭州 310012)

3 (绍兴电力局 浙江绍兴 312000) 4 (浙江省水利水电勘测设计院 杭州 310002)

摘要 南海 69 柱粒度数据分析表明,晚更新世以来,粒度在 $0.2 \sim 11 \mu\text{m}$ 的标度范围内具有分形特征,粒度分维值 D_s 为 $1.72 \sim 2.02$, 平均 1.84 ; 不同时期粒度分维值明显不同,氧同位素 1 期 (冰后期) 为 1.88 , 氧同位素 2 期 (冰期) 为 1.81 , 温暖的冰后期粒度分维值高且变化幅度大,寒冷的冰期粒度分维值低且变化幅度小,表明粒度分维值 D_s 对沉积物的形成环境演化具有良好的指示意义。运用 R/S 分析法,对 69 柱沉积物的粒度分维值 D_s 、 U^{K37} 法估算的表层海水古温度、浮游有孔虫的 ^{18}O 、 ^{13}C 及其转换函数计算的冬季表层海水古温度、夏季表层海水古温度、季节性温差、沉积物 SiO_2 、 CaCO_3 含量 9 项指标进行尺度重整分析计算,得到其时间序列分维值 D_H 分别为 1.2855 、 1.1712 、 1.2659 、 1.4244 、 1.2719 、 1.2214 、 1.2979 、 1.1366 、 1.1609 。虽然这些气候指标是用不同物理单位测量的,但运用分形分析可以对它们进行数学比较,粒度分维值 D_s 与季节性温差二者的时间序列分维值 D_H 最接近,从分形理论方面进一步证实粒度分维值 D_s 的变化主要反映气候的冷暖变化。综合粒度分维值 D_s 及其他气候代用指标分析,识别出南海东部全新世以来的 4 次突发事件。

关键词 南海东部 粒度 R/S 分析 分形比较

第一作者简介 章伟艳 女 1972 年出生 副研究员 博士研究生 海洋地质

中图分类号 P736 文献标识码 A

1 前言

第四纪古环境研究进入高分辨率的阶段,成为地球科学发展中的一件大事。南海沉积速率高,保存了环境变迁的连续记录,具有大洋无法比拟的环境放大效应,成为当今沉积学与古海洋学研究关注的热点之一。然而,高分辨率的研究不仅需要完好的沉积记录,还需要高精度的测试方法。近年来,随着激光粒度分析仪的应用,分析精度高,粒度分布曲线显微变化敏感,有助于反映不同层位、不同年代的沉积环境特征,为进一步提高深海沉积环境的高分辨率研究提供了便利,也利于刻划短周期、超短周期气候突变事件。本文通过对南海东部柱样沉积物的粒度分维值变化特征研究,并与其他气候代用指标进行分形比较,对沉积物粒度分维值特征进行定量分析,对其代表的古环境意义和变迁进行探讨,为深海沉积环境的高分辨率研究提供一种替代性工具,以便更好地揭示

南海东部古环境的演化特征与规律,加深我们对南海及周边地区第四纪以来环境变迁的理解。

2 研究方法简介

近年来,分形理论在第四纪研究中得到较为广泛的应用。分形理论是 B B Mandelbrot 于 20 世纪 70 年代中期提出的,用来研究自然界中没有特征长度但又有自相似性的图形与现象。沉积物的粒度组成是一种没有特征长度的结构图形,其分形是基于一种统计自相似性的粒度分布。最常用的关系是 $D_s = 3 - b$, b 为颗粒累积百分含量同粒径的双对数坐标图上拟合直线的斜率值, D_s 为沉积物粒度分维值。具体确定方法见文献^[1,2]。

如果数十年到数十万年尺度内的气候变化可用一个一致的分维来描述的话,那么长期气候变化就变成了短期气候变化的模式,重整化之后可用来复原我们感兴趣的某一时间尺度内的不规则度及气候趋势

的持续情况,同时也可以消除尺度与标度间的差异,进行不同类型气候变化代用指标间对比。这就需要利用 R/S 分析来进行,即尺度重整分析(Rescaled Range R/S Analysis)。该方法最早是由 Hurst 在总结尼罗河的多年水文观测资料时提出的一种分析方法,后来经 Mandelbrot 与 Wallis 进一步补充和完善,把它发展成为研究时间序列的分形理论。R/S 分析最主要的是看是否存在如下关系:

$$R(s)/S(s) \propto s^H \quad (1)$$

式中: $S(s)$ 为方差; $R(s)$ 为极差; s 为时间长度; H 为 Hurst 指数。Hurst 指数 H 和分维数 D_H 之间存在如下关系: $D_H = 2 - H$ 。对该方法的详细描述参见文献^[31]。

如果关系式(1)成立,则说明所分析的时间序列中存在 Hurst 现象。根据 Hurst 指数的大小可以判断该时间序列是完全随机的($H = 1/2$),还是存在趋势性成分,趋势性成分是表现为持续性($H > 1/2$),还是反持续性($H < 1/2$)。R/S 分析的基本思想是通过改变所研究对象的时间尺度的大小,研究其统计特性变化规律,从而可以将小尺度的规律用于大的时间尺度范围,或者将大的时间尺度得到的规律用于小尺度。可以很好地揭示动态过程的内在规律性及其分形特征,从而有效地对其变化规律进行预报和控制。

3 粒度分析与分维值计算

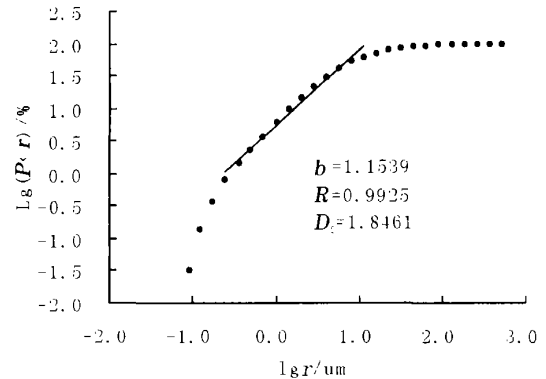
研究样品 69 柱(118° 81'67" E, 20° 11'83" N, 水深 2 971 m)取自南海东部陆坡区,采样间隔为 10 cm,共采集了 56 个样品。以上 56 个样品的粒度分析由国家海洋局第二海洋研究所激光粒度分析室测试完成,测量仪器为英国马尔文公司生产的 MAM5005 型长床激光粒度分析仪,测量范围 0.05 ~ 2000 μm 。

粒度分析表明,69 柱沉积物的粒度在 0 ~ 250 μm 之间,沉积物颗粒的质量累积百分含量与粒径关系见双对数坐标图(图 1)。可以看出,在 0.2 ~ 11 μm 之间南海沉积物质量累积百分含量与粒径在图中呈直线关系,而 < 0.2 μm 和 > 11 μm 的部分偏离直线。图中 b 为拟合直线的斜率,相关系数 $R > 0.99$,表明沉积物颗粒在该标度范围内具有分形特征。

4 粒度分维值及其他气候代用指标的 R/S 分析

南海东部 69 柱沉积物的粒度及气候替代指标等观测资料^[4]均是等间距深度获取的时间序列,因此

可以对这些指标进行 R/S 分析。根据 R/S 分析的计算方法^[31],分别对粒度分维值(D_S)、 U^{K37} 法估算的表层海水温度(SST_ U^{K37})、浮游有孔虫的 ^{18}O 、 ^{13}C 及转换函数法估算的冬季表层海水古温度(SST_W)、夏季表层海水古温度(SST_S)和季节性温差(SST_V)、沉积物的 CaCO_3 、 SiO_2 含量等指标系列进行 R/S 分析计算,结果见图 2、表 1。



b - 为拟合直线的斜率; R - 为相关系数; D_S - 粒度分维值

图 1 南海东部 69 柱沉积物质量累积百分含量

$p(<r)$ 与粒径 r 关系图

Fig 1 Relationship between cumulative mass percentage $P(<r)$ and grain size (r) of samples from Core 69 in the Eastern South China Sea

表 1 南海东部 69 柱粒度分维值 D_S 和气候代用指标的 R/S 分析

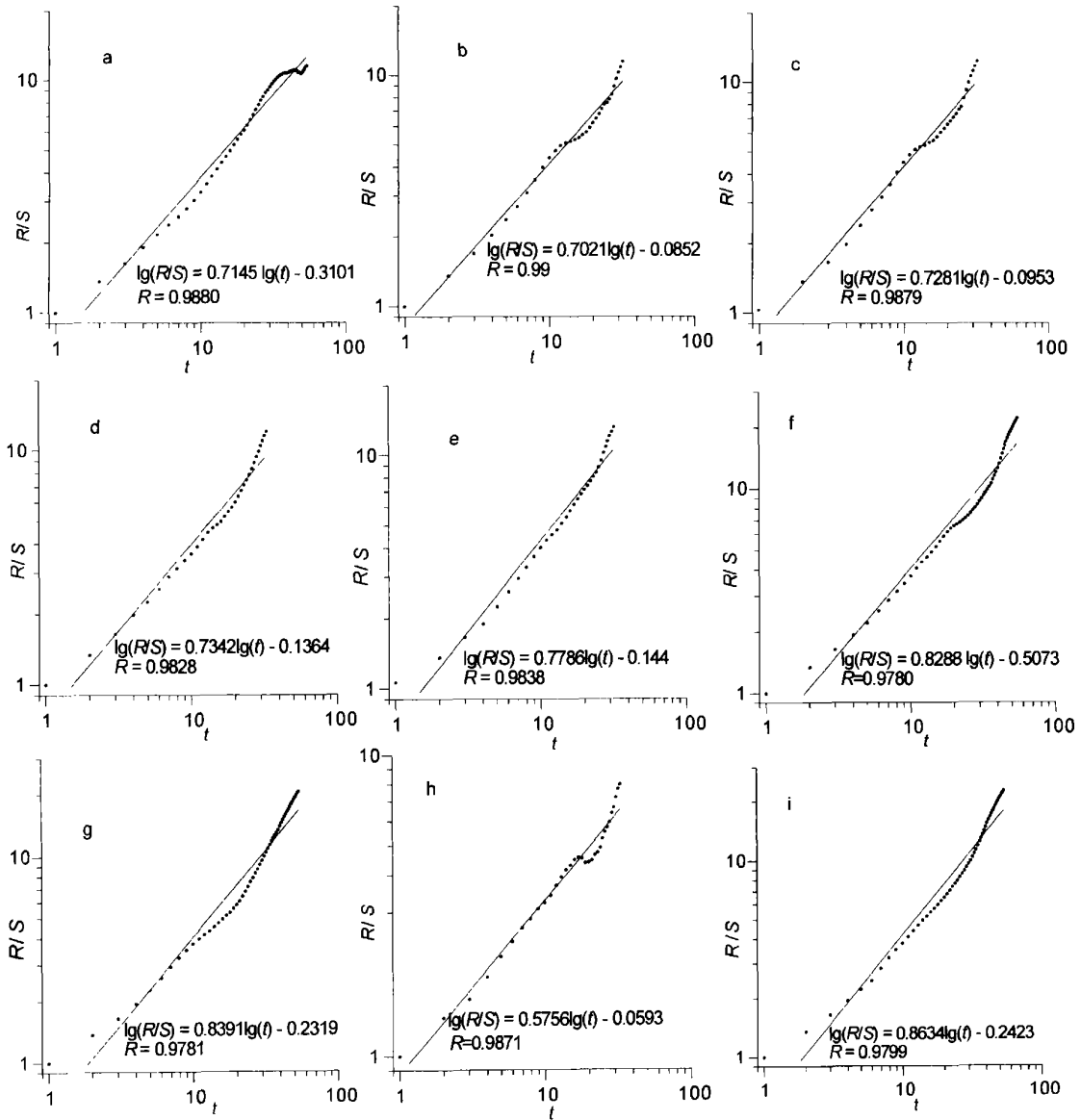
Table 1 R/S analysis on the fractal dimensions (D_S) of grain-size and climatic proxy of Core 69 in the Eastern South China Sea

粒度分维值或气候代用指标	时间范围	平均 H	平均分维 D_H
D_S	晚更新世以来	0.7145	1.2855
SST_V	晚更新世以来	0.7021	1.2979
SST_W	晚更新世以来	0.7281	1.2719
$^{18}\text{O}/\text{‰}$	晚更新世以来	0.7341	1.2659
SST_S	晚更新世以来	0.7786	1.2214
SST_ U^{K37}	晚更新世以来	0.8288	1.1712
CaCO_3	晚更新世以来	0.8391	1.1609
$^{13}\text{C}/\text{‰}$	晚更新世以来	0.5756	1.4244
SiO_2	晚更新世以来	0.8634	1.1366
美国东部 9 大城市降水量 ^[5]	1820 ~ 1923 (a)	0.74	1.26
祁连山黄土 CaCO_3 含量 ^[6]	约 22 ka	0.85	1.15

5 结果分析与讨论

5.1 结果分析

69 柱沉积物的粒度分维值 D_S 结果见表 2, 地层



a - D_s ; b - SST_V; c - SST_W; d - ^{18}O ; e - SST_S; f - SST_U^{K37}; g - CaCO₃; h - ^{13}C ; i - SO₂; R - 为相关系数

图 2 南海东部 69 柱粒度分维值 D_s 及气候代用资料的 $\lg(R/S) - \lg(t)$ 图

Fig 2 Diagram of $\lg(R/S) - \lg(t)$ for D_s values of sediments and climatic proxy of Core 69 in the Easter South China Sea

划分见文献。晚更新世以来,69 柱的粒度分维值为 1.72~2.02,平均为 1.84。不同时期的粒度分维值不同(图 3a),氧同位素 1 期(0~170 cm)粒度分维值高且变化幅度大,平均为 1.88,氧同位素 2 期(170~360 cm)粒度分维值低且变化幅度小,平均为 1.81,冰期粒度分维值小,冰后期粒度分维值大,粒度分维值 D_s 反映了古环境的变化。对 69 柱沉积物的 D_s 、SST_U^{K37}、 ^{18}O 、 ^{13}C 、SST_W、SST_S、SST_V、SO₂、CaCO₃ 等指标进行 R/S 分析,得到其时间序列分维值 D_H 分

别为 1.2855、1.1712、1.2659、1.4244、1.2719、1.2214、1.2979、1.1366、1.1609。其中, D_s 与 SST_V 二者的 D_H (1.2855 和 1.2979) 最接近,其次是 SST_W 和 ^{18}O 的 D_H (1.2719、1.2659),也与美国东部 9 大城市近百年降水量的 D_H (1.26) 相近,这种时间序列分维数(或 Hurst 指数)的一致性可能说明了它们所反映的气候环境动力系统的内在相似性,从分形理论方面进一步证实粒度分维值 D_s 的变化主要反映气候的冷暖变化。我们知道,大气降水以气相、液相或固

相形式出现时,其重同位素分子¹⁸O的多少除与水汽来源、运移距离、纬度、高度分布有关外,最主要的因素是受降水时温度影响及其温度场对水汽压的控制作用。当温度升高时,相对较轻的¹⁶O由于具有较高的活性,易于迁移,在同位素交换反应中将优先被吸收进生物壳体,致使¹⁸O含量相对减少,¹⁸O值随温度的上升而下降^[7]。粒度变化通常反映水动力条件,粒度减小一方面反映了水深加大的弱动力环境,另一方面也是浅水条件下,补给十分微弱的结果。对深海而言,粒度变小所指示的水深增加主要是温度升高导致较多的冰川融水造成的。因此,粒度分维值的 D_H 表现出与古温度、¹⁸O的 D_H 相近的特征。

从本次研究来看(表 2、图 3),氧同位素 1 期粒度

表 2 南海东部 69 柱沉积物粒度分维值 D_s

Table 2 The fractal dimension of the grain-size of samples from Core 69 in the Eastern South China Sea

时代		晚更新世	氧同位素 1 期	氧同位素 2 期
		范围	1.72 - 2.02	1.75 - 2.02
粒度分维值 (D_s)	平均值	1.84	1.88	1.81
	标准偏差	0.06	0.07	0.03
	范围	5.25 - 7.84	6.61 - 7.84	5.25 - 7.29
平均粒径 /	平均值	7.04	7.36	6.68
	标准偏差	0.46	0.33	0.59
	范围	22.50 - 26.90	23.00 - 26.90	22.50 - 23.80
SST_U ^{k37[4]}	平均值	24.22	25.50	23.19
	标准偏差	1.41	1.17	0.36

分维值 D_s 大,粒径相对较细;氧同位素 2 期粒度分维值 D_s 小、粒径相对较粗。这是由于在温暖冰后期(氧同位素 1 期),温度升高导致较多的冰川融水,海平面上升(¹⁸O 值变化 0.1% 相当于海平面变化 10m^[8]),据氧同位素分馏原理,69 柱海平面波动变化如图 3e),因此,水深加大的弱动力环境携带的陆源碎屑物质颗粒较细;并且冰后期夏季风较强、冬季风较弱,风力搬运力相对较弱,搬运和沉积过程中的风化作用强,细集合体含量多,造成分选性好,相应的级配好^[2],颗粒自组织程度高,粒度分维值表现为高值。寒冷冰期(氧同位素 2 期),温度降低,海平面下降,水深变浅,水动力加强的高能环境携带的陆源碎屑物质颗粒较粗;且冰期冬季风较强、夏季风较弱,风力搬运较强,粗集合体含量多,分选性差,颗粒自组织程度低;强劲的冬季风驱动洋流携带来大量陆源物质,丰富的营养盐供应使粗颗粒的生物含量增高^[9],粒度分维值 D_s 表现为低值。可见,沉积物粒度分维值 D_s 可以反映海洋沉积环境与形成过程,依据粒度分维值 D_s 的变化可以探讨沉积时的古环境变化。

5.2 南海沉积环境的演化特征

从表 2、图 3 看出,氧同位素 2 期粒度分维值 D_s 较低且稳定,与 SST_U^{k37} 反映盛冰期以来古环境温度低且稳定一致。氧同位素 1 期粒度分维值 D_s 相对较高且波动大,反映冰后期温度较暖,但温度变化幅度较大,且很频繁,与 SST_U^{k37} 估算结果相符。图

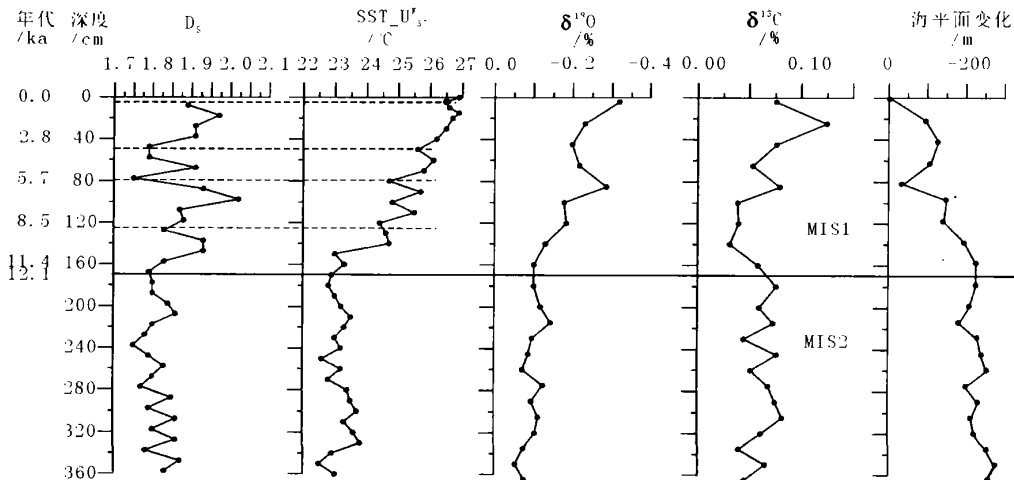


图 3 南海东部 69 柱粒度分维值 D_s 、SST_U^{k37[4]} 及海平面变化

Fig 3 The variation curve of D_s values and paleotemperature estimated with U_{37K} values and sea level against depth from Core 69 in the Eastern South China Sea

3a、3b 中虚线为粒度分维值 D_s 指示的全新世以来 4 次降温事件,与 SST_U^{k37} 的古温度变化吻合,反映全新世以来气候存在着不稳定性。这与全新世以来发生在全球各区域的多次短期气候事件和突然变化一致,如早全新世约 8 kaBP 的全球降温事件^[10],是全新世影响最大的突然降温事件,以寒冷、干旱和风的强度增大为特征,波及到从热带到北极的很多区域^[11]。它开始于 8.4 kaBP,与 69 柱 120 cm (相当于 8.5 kaBP) 处低粒度分维值 D_s 及 SST_U^{k37} 的温度降低极其吻合,这一事件清楚地记录在格陵兰冰芯中,并以一个快速的较现在温暖和潮湿的气候事件 (即中全新世“大暖期”^[13]) 结束^[11,12],这与 69 柱 90 cm 处粒度分维值 D_s 明显高于 0~80 cm 的粒度分维值 D_s 所指示的温暖事件一致。再如,晚全新世 4 kaBP 前后的海水降温事件 (普林虫低值事件)^[14],该事件在北美洞穴方解石的氧碳同位素记录^[15]、欧洲阿尔卑斯地区都有记录^[16],与 69 柱的 50~60 cm (相当于 3.6~4.3 ka) 处的低粒度分维值 D_s 及 SST_U^{k37} 的降温是一致的。

R/S 分析在时间序列中有着很强的记忆性,其赫斯特指数代表了序列中持续性成分的强度^[3],如表 1 所示,南海东部 69 柱深海沉积物的 D_s 、SST_U^{k37}、¹⁸O、¹³C、SST_W、SST_S、SST_V、SiO₂、CaCO₃ 含量曲线等气候代用指标均存在明显的赫斯特现象,其 H 值均大于 0.5,从而表明这 9 项指标比较一致地反映了南海东部晚更新世以来环境演变中的趋势成分——持续性。另外,上述 9 项指标的 Hurst 指数间存在着差异,这可能说明它们在反映气候环境演化中的持续性成分强度时存在差异,也表明它们反映气候系统温度和降水变化趋势的不同。如 ¹⁸O 与 CaCO₃ 的 H 值具有较大差异,这是由于 ¹⁸O 比值变化主要受降水时温度影响及其温度场对水汽压的控制作用,因此主要反映了温度的持续性;而 CaCO₃ 含量的变化取决于多种因素,其溶解度除与温度、pH 值、CO₂ 的分压有关外,也与边缘海区陆源物质的强烈稀释作用有关。

6 小结

南海东部 69 柱样粒度数据分析表明,晚更新世以来,粒度在 0.2~11 μm 的标度范围内具有分形特征,粒度分维值 D_s 为 1.72~2.20,平均 1.84。不同时期粒度分维值明显不同,氧同位素 1 期粒度分维值为 1.88,氧同位素 2 期为 1.81,温暖冰后期粒度分维

值高且变化幅度大,寒冷冰期粒度分维值低且变化幅度小,表明粒度分维值 D_s 对沉积物的形成环境具有良好的指示意义。通过对粒度分维值与不同气候代用指标的分形比较,发现粒度分维值与有孔虫转换函数的古温度季节性温差的 D_H 值十分相近,证明粒度分维值的变化主要反映了气候的冷暖的变化。综合粒度分维值及其他气候代用指标的分析,识别出南海东部全新世以来的 4 次突发事件。

参考文献 (References)

- 1 刘连文,陈骏,季骏峰,等. 陕西洛川黄土的粒度分维值及其意义. 高校地质学报, 1999, 5 (4): 412~417 [Liu Lianwen, Chen Jun, Ji Junfeng, *et al*. Grain-size fractal dimension of Loess-paleosol and its significance. Geological Journal of China Universities, 1999, 5 (4): 412~417]
- 2 黄英,何发祥,符必昌,等. 红土颗粒粒度的分维变化特征. 云南工业大学学报, 1998, 14 (3): 54~60 [Huang Ying, He Faxiang, Fu Bichang, *et al*. The characteristics of variation of fractal dimension of grain size of Laterite. Journal of Yunnan Polytechnic University, 1998, 14 (3): 54~60]
- 3 周厚云,余震华,朱照宇,等. 西昆仑山甜水海钻孔氧化铁指标的 R/S 分析及其意义. 冰川冻土, 1999, 21 (2): 136~140 [Zhou Houyun, Yu Suhua, Zhu Zhaoyu, *et al*. R/S analysis of indexes of ferric oxide from Tianshuihai Lake Core and their implication. Journal of Glaciology and Geocryology, 1999, 21 (2): 136~140]
- 4 卢冰,周怀阳,陆斗定,等. U^{k37}、¹⁸O 沉积地层记录:南海北部末次冰期以来 SST 和海面变化. 海洋学报, 2005, 27 (1): 70~77 [Lu Bing, Zhou Huaiyang, Lu Douding, *et al*. Stratigraphic record of U^{k37}, ¹⁸O: SST and sea level change in the northern part of South China Sea since the last glacial period. Acta Oceanologica Sinica, 2005, 27 (1): 70~77]
- 5 Fluegeman R H, Snow R S. Fractal analysis of long-range paleoclimatic data: oxygen isotope record of Pacific core V28~239. Pure and Applied Geophysics, 1989, 131: 307~313
- 6 王乃昂,赵晶,高顺尉. 东亚季风边缘区气候代用指标的分形比较及其意义. 海洋地质与第四纪地质, 1999, 19 (4): 59~65 [Wang Naiang, Zhao Jing, Gao Shunwei. Fractional comparison and its significance of climatic proxy from the border region of east Asian monsoon. Marine Geology & Quaternary Geology, 1999, 19 (4): 59~65]
- 7 Schopf T J M. Paleoclimatology. Harvard University Press, 1980. 1~341
- 8 Moore T C J, Pisias N G, Keigwin L D J. Cenozoic variability of oxygen isotopes in benthic foraminifera. In: Climate in Earth History. National Academy Press, 1982, 172~182
- 9 章伟艳,张富元,陈荣华,等. 南海深水晚更新世以来沉积速率、沉积通量与物质组成. 沉积学报, 2002, 20 (4): 668~674 [Zhang Weiyan, Zhang Fuyuan, Chen Ronghua, *et al*. Constituents of matter and sedimentation fluxes and sedimentation rates of abyssal sedimentation during the Late Pleistocene in the South China Sea. Acta Sedimen-

- ologica Sinica, 2002, 20(4): 668 ~ 674]
- 10 Stager J C, Mayewski P A. Abrupt early to mid-Holocene climatic transition registered at the equator and the poles. *Science*, 1997, 276: 1834 ~ 1836
- 11 Alley R B, Mayewski P A, Sowers T, *et al*. Holocene climatic instability: a prominent wide spread event 8200a ago. *Geology*, 1997, 25: 483 ~ 486
- 12 Mayewski P A, Meeker L D, Twickler M S, *et al*. Major features and forcing of high-latitude Northern Hemisphere atmospheric circulation using a 110000 year long glaciochemical series. *Journal of Geophysical Research*, 1997, 102: 26345 ~ 26365
- 13 施雅风主编. 中国全新世大暖期气候与环境. 北京: 海洋出版社, 1992. 1 ~ 213 [Shi Yafeng, ed. The Climate and Environment of the Holocene Megathemal in China. Beijing: China Ocean Press, 1992, 1 ~ 213]
- 14 翦知湆, 李保华, Pflaumann U, 等. 西太平洋晚全新世变冷事件. *中国科学 (D 辑)*, 1996, 26(5): 461 ~ 466 [Jian Zhimin, Li Baohua, Pflaumann U, *et al*. Late Holocene cooling event in the west Pacific. *Science in China (D)*, 1996, 26(5): 461 ~ 466]
- 15 Dorale J A, Gonzalez L A, Reagan M K, *et al*. A high-resolution record of Holocene climate change in speleothem calcite from Cold Water Cave, northeast Iowa. *Science*, 1992, 258: 1626 ~ 1630
- 16 Baroni C, Orbelli G. The Alpine 'iceman' and Holocene climatic change. *Quaternary Research*, 1996, 46(1): 78 ~ 83

Time Series Fractal Comparison and Its Significance of the Grain-Size Fractal Dimensions and Climatic Proxy from Core 69 in the Eastern South China Sea

ZHANG Wei-yan^{1,2} ZHANG Fu-yuan² ZHANG Wei-de³
 LU Bing² YANG Ke-hong² ZHAO Guo-jun⁴

1(Institute of Mathematic Geology and Remote Sensing Geology, China University of Geosciences, Wuhan 430074)

2(Second institute of Oceanography, SOA, Key Lab of Submarine Science, SOA, Hangzhou 310012)

3(Shaoxing Electric Power Bureau, Shaoxing Zhejiang 312000)

4(Water Conservancy and Hydropower Survey and Design Institute of Zhejiang Province, Hangzhou 310002)

Abstract The grain size of samples from sediment Core 69 in the Eastern South China Sea has been measured. Based on the fractal theory, the fractal dimension (D_s) of the grain-size has been calculated. Results show that the grain-size distribution has fractal characteristics. Since late Pleistocene, the D_s values of Core 69 in the Eastern South China Sea are 1.72-2.20, with an average of 1.84. Meanwhile, the D_s values are different from the same core in the glacial and post glacial stage. The D_s value is 1.88 and its variation is frequent during stage 1 of the oxygen isotope stratigraphy. The D_s value is 1.81 and its variation is infrequent during stage 2 of the oxygen isotope stratigraphy. That is, the high value of D_s is related to the high paleotemperature but the low value of D_s is related to the low paleotemperature. The fractal dimension (D_s) of grain-size is considered as an important proxy describing paleoenvironment variations recorded from sediments. R/S analysis on the curves of the fractal dimension of the grain-size, paleotemperature of U^{k37} values, ^{18}O ratios and ^{13}C ratios, sea surface temperature in winter and summer, seasonal variability of sea surface temperature between winter and summer, $CaCO_3$ content and SiO_2 content yields time series fractal dimensions (D_H) of 1.2855, 1.1712, 1.2659, 1.4244, 1.2719, 1.2214, 1.2979, 1.1366, 1.1609 respectively. Although these climatic data were measured in different physical units and different time scales, fractal analysis allows for a mathematical comparison of them. Among them, the time series fractal dimension of seasonal variability of sea surface temperature is close to that of the fractal dimensions of grain-size. These show that the fractal dimensions of grain-size reveal climatic variability. Based on the grain-size fractal dimensions and climatic proxy, four abrupt climate events have been revealed during the Holocene.

Key words the Eastern South China Sea, grain size, R/S analysis, fractal comparison