

甜水海钻孔 TS95 若干地球化学指标的 非线性分析与意义

周厚云¹ 朱照宇¹ 李世杰² 李炳元³ 向明菊¹ 余素华¹

(1:中国科学院广州地球化学研究所,广州 510640;

2:中国科学院南京地理与湖泊研究所,南京 210008;3:中国科学院地理研究所,北京 100101)

提 要 应用关联维分析和 R/S 分析对西昆仑山甜水海孔 TS95 的 4 项指标(FeO 、 Fe_2O_3 、 $\text{Fe}_2\text{O}_3/\text{FeO}$ 和有机碳)进行分析,发现它们存在明显的混沌特征和 Hurst 现象.4 项指标的混沌吸引子分别为: FeO -2.8; Fe_2O_3 -3.2; $\text{Fe}_2\text{O}_3/\text{FeO}$ -2.9; 有机碳-2.5, 饱和嵌入维数为 5 到 6, 表明控制该地区气候环境演化的动力系统是由有限维数确定的混沌系统, 构筑该系统所需变量至少 3 到 4 个, 最多 5 到 6 个. 这整体上与深海氧同位素比较接近, 与黄土剖面一些指标差异较大. 4 项指标的 Hurst 指数(FeO -0.85; Fe_2O_3 -0.76; $\text{Fe}_2\text{O}_3/\text{FeO}$ -0.65; 有机碳-0.74) 显示该地区气候环境演化存在明显的持续性成分. 这与早期的研究一致, 很可能与青藏高原的构造抬升有关. 表明除了全球气候环境波动背景外, 区域性因素, 如青藏高原构造抬升和甜水海地区水系变迁, 都会在各种气候环境演化的替代性指标上有所反映. 4 项指标 Hurst 指数的差异可能反映 FeO 容易迁移, 受到了流域水系变化的影响, 因而有机碳和 Fe_2O_3 可能是反映这种环境演化持续性成分更好的指标.

关键词 甜水海 氧化铁 有机碳 混沌分析 R/S 分析

分类号 P592

非线性科学方法在第四纪研究中发挥着越来越重要的作用^[1]. 混沌分析和 R/S 分析是非线性分析中的两种重要方法. 本文介绍了应用这两种方法对西昆仑山甜水海钻孔 TS95 的 4 项指标(FeO 、 Fe_2O_3 、 $\text{Fe}_2\text{O}_3/\text{FeO}$ 和有机碳)所进行的分析. 笔者曾对这 4 项指标所进行的 R/S 分析分别著文介绍^[2,3], 这里再结合对这些指标的混沌分析做进一步论述. 由于甜水海湖地处青藏高原腹地, 具有代表意义, 因此分析结果对说明青藏高原地区气候环境演化的某些特征具有重要意义.

有关样品处理和分析技术、年代数据以及钻孔附近地质地理概况和岩芯特征等资料参见有关文献^[4]. 在进行混沌分析和 R/S 分析之前依据年代数据对 4 项指标的数据进行了等时处理, 方法参考有关文献^[2,3].

1 混沌分析

气候环境变化的动力系统包含多种因素, 是一个复杂系统, 所获得的反映气候环境变化信息各种时间序列反映了组成该动力系统的多个状态变量的影响. 通过混沌分析中的关联维分析, 相空间重组计算, 可以判断由时间序列重组的相空间是否收缩以及测算它最后收缩到的

• 国家攀登计划青藏项目(G1998040800-2-2)和中国科学院广州地球化学研究所所长基金项目(970502)联合资助.
收稿日期:2000-07-18;收到修改稿日期:2000-11-20. 周厚云, 1967年生, 男, 副研究员.

相空间的维数^[5].重组的相空间维数称为嵌入维数.如果关联维数在嵌入维数不断增大时趋向于一个稳定值,达到稳定关联维数时的嵌入维数称为饱和嵌入维数,稳定关联维数和饱和嵌入维数分别表示了构造时间序列所反映的动力系统所需要的基本变量个数的下限和上限.如果稳定关联维数值是一个分数,则该分数称为混沌吸引子或奇异吸引子.有关关联维分析的方法参见文献^[1,5-8].

1.1 分析结果

图1是对TS95氧化铁3项指标和有机碳进行混沌分析的结果.图2是这4项指标的关联维数随嵌入维数变化的情况.首先可以看到(图1),这4项指标都具有明显的分形特征,在一定的区域关联函数($C(r)$)和选择的距离(r)两者的对数之间有较明显的线性关系.而且这种分形特征具有混沌性,因为在嵌入维数不断增大时关联维数逐渐趋于一个稳定的分数——混沌吸引子(图2).还可看到,这4项指标的关联维数都是在嵌入维数达到5到6时趋于稳定的(图2).不过,4项指标的稳定关联维数各不一样,最小的为有机碳,只有2.5,最大的为 Fe_2O_3 ,达到3.2(图2).

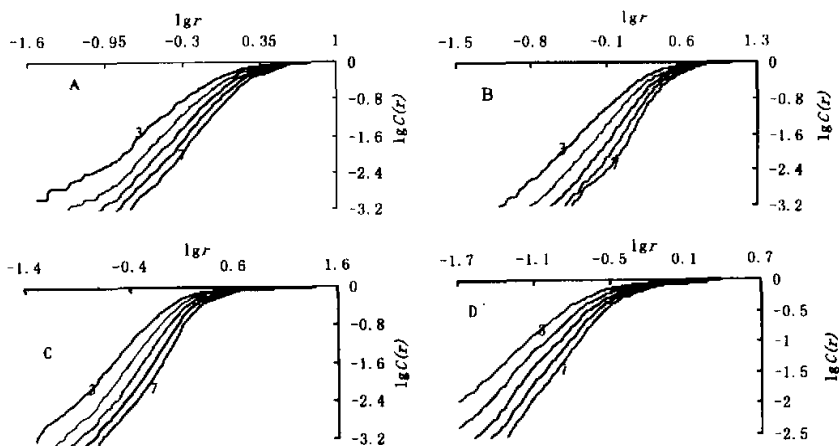


图1 TS95孔4项指标在不同嵌入维数时关联维数值随距离的变化
A:FeO; B:Fe₂O₃; C:Fe₂O₃/FeO; D:有机碳

Fig.1 Variation of correlation function of 4 indexes from Core TS95
on distances at different embedded dimensions

1.2 意义与讨论

分形分析多用于揭示一些看似随机的系统内部的确定性.而混沌分析,如前所述,其结果往往可以用于确定构筑时间序列所反映的动力系统所需要的基本变量的个数.故有一些学者在第四纪地质与环境的研究中开展了这方面的工作,如 Nicolis等^[6]对太平洋深海钻孔V₂₈₋₂₃₈氧同位素的研究,吕厚远等^[7]对陕西宝鸡黄土剖面粒度指标的分析.

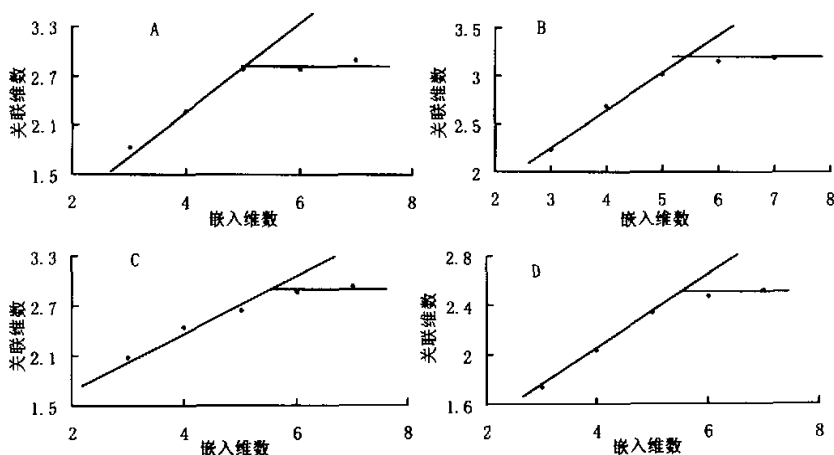


图2 TS95 孔 4 项指标的关联维数随嵌入维数的变化

A: FeO, 混沌吸引子 2.8; B: Fe₂O₃, 混沌吸引子 3.2;

C: Fe₂O₃/FeO, 混沌吸引子 2.9; D: 有机碳, 混沌吸引子 2.5

Fig. 2 Variation of correlation fractal dimension on embedded dimension of 4 indexes from Core TS95

本项研究表明 TS95 孔 4 项指标的关联维数都稳定于一个分数,这说明它们所反映的动力系统是混沌系统. 这样的系统对初始条件是敏感的,初始条件的微小变化可能会引起结果的巨大差异. 上述 4 项指标的混沌吸引子在 2.5—3.2 之间,只有 Fe₂O₃ 的大于 3,而饱和嵌入维数为 5 或 6,这说明构筑该 4 项指标的动力系统——气候环境系统——所需要的变量至少要 3 到 4 个,最多 5 到 6 个. 这些变量所代表的具体意义,吕厚远等^[7]曾将它们与地球轨道参数联系起来,但这里有一点很明显的是青藏高原的强烈隆升^[9]——至少目前还不能用地球轨道参数解释——必然对 TS95 孔 4 项指标的演化产生重要影响. 笔者认为这些变量可能反映了控制 TS95 孔 4 项指标的水热条件和地质地貌条件,即温度、降水量、蒸发量、岩性和地形. 其中温度、降水量和岩性可能是控制 TS95 孔 4 项指标的基本因素. 蒸发量虽然主要受温度影响,但其它因素如高原风速也有重要作用,不能将它作为完全依赖于温度的变量而排除.

与 Nicolis 等^[6]对深海沉积物和吕厚远等^[7]对宝鸡黄土剖面的粒度数据进行混沌分析的结果相比,这里计算所得的奇异吸引子整体上似乎要偏小. 这里可能有采样的原因,即这些数据的采样时间间隔(Δt)的不同. Nicolis 等^[6]和吕厚远等^[7]的采样时间间隔都在 1000a 以上;而对于 TS95 孔的 4 项指标,根据采取的数据样点数^[2,3]和年代数据^[4]推算,采样时间间隔约 600a. 笔者曾经对渭南黄土剖面碳酸盐(采样时间间隔 Δt 为约 200a)含量在未消除周期性因素影响的条件下进行混沌分析,其关联维数在嵌入维数达到 12h 趋于稳定,稳定值为 2.2. 这些反映采样时间间隔 Δt 似乎是影响混沌吸引子大小的一个因素.

从饱和嵌入维数看,TS95孔4项指标与深海沉积氧同位素^[6]一致,而与宝鸡黄土剖面粒度数据^[7]相差较大,但笔者对渭南黄土剖面碳酸盐含量的分析结果与吕厚远等^[7]的比较一致.似乎饱和嵌入维数与动力环境密切相关:TS95沉积物和深海沉积物都是在水动力环境下沉积的,而黄土物质则是风动力环境下沉积的.当然,除了这种主要的环境动力因素外,其他一些环境动力因素也应该有一定作用,比如对于甜水海钻孔,青藏高原新生代以来大规模构造抬升^[9],必然要对沉积物有所影响.比较这里的结果与 Nicolis等^[6]的工作,会发现TS95孔4项指标与 V_{28-238} 孔氧同位素的混沌吸引子之间有一定差异.笔者推测,这可能就是两者在某些环境动力因子方面存在差异——比如构造活动背景不同所造成的.

2 R/S分析

R/S分析即尺度重整分析(Rescaled Range R/S Analysis),是分形分析中的另一种重要方法.运用R/S分析可以判断一个时间序列是否存在Hurst现象以及时间序列包含的趋势性成分持续性(Persistence)还是反持续性(Antipersistence).对该方法的详细描述参见有关文献^[10-12].笔者曾对TS95孔4项指标进行过R/S分析^[2,3],图3是分析结果.

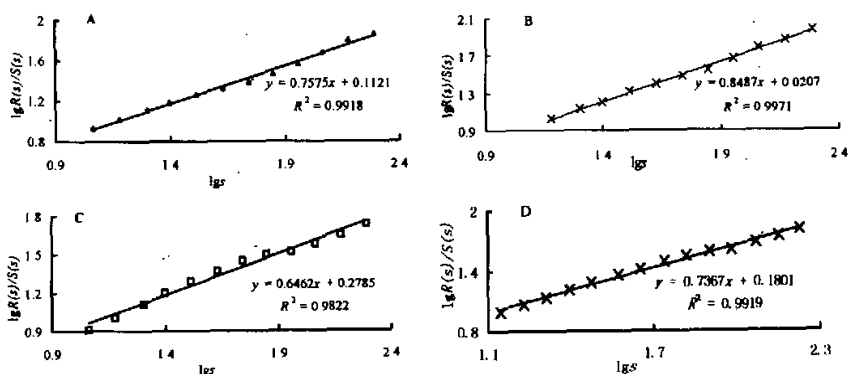


图3 TS95孔氧化铁3项指标和有机碳的R/S分析结果

s 为选取样品的时间长度, $S(s)$ 为该时间长度内样品数据的方差,

$R(s)$ 为极差,每条趋势线的斜率即为Hurst指数

A: Fe_2O_3 的R/S分析结果,Hurst指数 $H=0.76$;B: FeO 的R/S分析结果,Hurst指数 $H=0.85$;

C: $\text{FeO}/\text{Fe}_2\text{O}_3$ 的R/S分析结果,Hurst指数 $H=0.65$;D:有机碳的R/S分析结果,Hurst指数 $H=0.74$

Fig. 3 R/S analysis results of FeO , Fe_2O_3 , $\text{FeO}/\text{Fe}_2\text{O}_3$ and organic carbon from Core TS95

图3显示这4项指标都存在明显的Hurst现象,且Hurst指数都大于0.5,笔者认为^[2,3]这表明这4项指标中都含有持续性成分.这与余素华等^[13]、王苏民等^[14,15]在甜水海地区和高原

其他地区的结论一致.笔者将这种持续性成分与这一时期青藏高原的持续构造抬升联系起来进行了解释^[2,3].但是,这4项指标的 Hurst 指数之间存在差异(图3),笔者早期也注意到了这点,并推测可能与流域水系变化和 FeO 容易迁移有关^[2],此外有机碳含量的变化对氧化铁指标尤其是 FeO 有一定影响. Fe₂O₃ 本身难以迁移,在湖泊系统的转变过程中流失变化不大,不知是否巧合,其 Hurst 指数与有机碳的很接近,也与太平洋 V₂₈₋₂₃₉ 孔的氧同位素和美国东部9大城市100多年间降水量的分析结果非常吻合^[5].因此,在反映甜水海地区20多万年来环境演化的持续性特征方面,可能 TS95 孔的有机碳和 Fe₂O₃ 两项指标更具有代表性.

3 结论

对 TS95 孔4项指标进行的两项非线性分析表明:

(1)TS95 孔4项指标都具有明显的混沌特征.表明控制该地区气候环境演化的动力系统是一个由有限维数确定的混沌系统,构筑该系统所需要的变量至少3到4个,最多5到6个.这整体上与深海氧同位素比较接近,而与黄土剖面一些指标差异较大.这些变量可能是控制这些地球化学指标的水热条件和地质地貌条件,如温度、降水量、蒸发量、岩性和地形等.

(2)TS95 孔4项指标都具有明显 Hurst 现象.表明该地区气候环境演化存在明显的持续性成分.这与早期研究结果^[13-15]一致,很可能与青藏高原构造抬升有关.4项指标的 Hurst 指数存在差异,可能反映 FeO 容易迁移并受到流域水系变化影响.因此,有机碳和 Fe₂O₃ 两项指标可能是反映甜水海地区环境演化持续性更好的指标.

参 考 文 献

- 1 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):109-120
- 2 周厚云,余素华,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
- 3 周厚云,向明菊,朱照宇等.甜水海钻孔有机碳的 R/S 分析及其反映的气候环境变化持续性.地球化学,2000,29(1):89-93
- 4 施雅风,李吉均,李炳元.青藏高原晚新生代隆升与环境变化.广州:广东科技出版社,1998.215-246
- 5 仪垂祥.非线性科学及其在地质学中的应用.北京:气象出版社,1995.22-243
- 6 Nicolis C, Nicolis G. Is there a climatic attractor? *Nature*, 1984,311:529-533
- 7 吕厚远,赵永良,丁仲礼.2.5Ma 以来的古气候变化的混沌吸引子.第四纪研究,1993,(2):121-128
- 8 金友渔,孟宪国.地质时间空间序列定量分析.北京:中国地质大学出版社,1992.117-119
- 9 孙鸿烈.青藏高原的形成演化.上海:上海科学技术出版社,1996
- 10 Mandelbrot B B, Wallis J R. Noah, Joseph, and operational hydrology. *Water Resource Research*, 1968, 4(5):909-918
- 11 Mandelbrot B B, Wallis J R. Some long-run properties of geophysical records. *Water Resource Research*, 1969, 5(2):321-340
- 12 Mandelbrot B B, Wallis J R. Robustness of the rescaled ranged R/S in the measurement of noncyclic long run statistical dependence. *Water Resource Research*, 1969, 5(5):967-988
- 13 余素华,朱照宇,李世杰等.西昆仑山南麓甜水海湖岩芯铁变化的环境记录.地球化学,1996,25(6):88-98
- 14 王苏民,施雅风,沈吉等.青藏高原东部800ka 来古气候古环境变迁的初步研究.见:青藏项目专家委员会编,青藏高原形成演化、环境变迁与生态系统研究(学术论文年刊·1994).北京:科学出版社,1995.236-246
- 15 王苏民,吉磊,薛滨等.东南季风区及青藏高原东部湖泊沉积研究与古环境重建.第四纪研究,1995,(3):243-248

Non-linear Analyses of Some Geochemical Indexes of Tianshuihai Lake Core TS95 and Their Implications

ZHOU Houyun¹ ZHU Zhaoyu¹ LI Shijie² LI Bingyuan³
XIANG Mingju¹ YU Suhua¹

(1: *Guangzhou Institute of Geochemistry, Chinese Academy of Sciences, Guangzhou 510640, P. R. China;*

2: *Nanjing Institute of Geography and Limnology, Chinese Academy of Sciences, Nanjing 210008, P. R. China;*

3: *Institute of Geography, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100101, P. R. China)*

Abstract

Correlation fractal analysis and R/S analysis of four indexes from Core TS95, Tianshuihai Lake, western Tibetan Plateau, FeO, Fe₂O₃, the ratio of Fe₂O₃/FeO, and organic carbon, are conducted. It is found obviously that the 4 time series are chaotic and have Hurst phenomena. The chaotic or abnormal attractors for FeO, Fe₂O₃, Fe₂O₃/FeO and organic carbon are 2.8, 3.2, 2.9 and 2.5 respectively with saturated embedded dimensions ranging from 5 to 6, suggesting that the dynamic system controlling the local climatic and environmental evolution is chaotic. It has definite variables. To establish the system, at least 3 to 4 variables, at most 5-6 variables, are needed. This generally agrees with deep-sea oxygen isotope and differs by large from some climatic indexes of loess profiles. The Hurst indexes of the four proxies are FeO-0.85, Fe₂O₃-0.76, Fe₂O₃/FeO-0.65 and organic carbon-0.74 respectively, indicating that they have obviously long-run dependence-persistence. This is in accordance with previous studies^[13-15]. The persistence results most probably from the uplift of Tibetan Plateau. This suggests that in addition to the global vacillation of climate and environment, some local factors such as the uplift of Tibetan Plateau and the change in Tianshuihai Lake drain age, have probably played a role on the proxies of climate and environment. The differences between the four Hurst indexes result possibly from the relatively easy migration of FeO that is influenced by the hydrological change of the drainage. The organic carbon and Fe₂O₃, the two of the four, are probably more suitable to extract the persistence component of environmental evolution.

Key Words Tianshuihai Lake, Ferric Oxide, organic carbon, chaotic analysis, R/S analysis