

# 变差函数与沉积地球化学旋回周期率识别\*

孟宪伟 吴世迎 韩贻兵

(国家海洋局第一海洋研究所 青岛 266003)

**提要** 提出用变差函数(交叉变差函数)方法刻画地球化学旋回的层次结构,并利用东北太平洋 1787 柱状沉积物的硅质生物氧、硅同位素资料,具体说明了变差函数刻画地球化学旋回的有效性。

\* **关键词** 变差函数, 地球化学旋回, 层次结构

海底沉积物地层序列分析中的一个重要事实是岩性、厚度、古生物及矿物组合等形成韵律构造;不同尺度、不同级别的韵律构造相互叠加、嵌套形成具有层次结构的层序地层<sup>[3]</sup>。层序地层的这种层次结构必然导致地球化学元素或同位素组成的周期性变化和多级周期尺度的叠加,我们称之为地球化学旋回。

研究地球化学旋回及其层次结构对于恢复古海洋环境具有重要意义。

时间序列的谱分析方法是研究地球化学旋回的基本方法。它的基本原理是时间序列中地球化学参数的自相关。自相关函数是刻画时间序列自相关特性的基本工具,但并不是唯一的。本文提出用地质统计学的基本工具——变差函数来刻画时间序列中地球化学参数的自相关特性;利用交叉变差函数刻画地球化学变量对的互相关特性,进而有效地刻画地球化学旋回的层次结构和周期率。

## 1 变差函数和交叉变差函数

### 1.1 变差函数和交叉变差函数的概念

变差函数是地质统计学的基本工具,它的主要功能是揭示区域化变量的空间或时间序列的自相关结构<sup>[1]</sup>。如果某一变量受多种因素的制约,那么变差函数就具有多级套合结构;如果某一变量受周期性因素制约,那么其变差函数就具有周期性结构;如果某一变量受多个周期性时间(或空间)尺度的因素制约,那么其变差函数便会相应地呈现出多级周期性振荡。因此,利用变差函数的结构分析,便能够刻画地球化学旋回的层次结构。F. Olo'riz 等首次把变差函数应用到地层学的层次结构分析中,开辟了地质统计学应用的新领域<sup>[4]</sup>。

变差函数的理论公式为:

$$\gamma(h) = \frac{1}{2}E[Z(x) - Z(x+h)]^2 \quad (1)$$

在满足二阶平稳假设条件下,变差函数与协方差函数和自相关函数之间有如下关系<sup>[3]</sup>:

$$\gamma(h) = C(0) - C(h) \quad (2)$$

$$\gamma(h) = C(0)[1 - \rho(h)] \quad (3)$$

\* 国家海洋局青年基金资助项目 95204 号。  
收稿日期:1996 年 11 月 12 日

(1)~(3)中,  $E$  为数学期望;  $\gamma(h)$  为变差函数;  $C(h)$  为协方差函数;  $\rho(h)$  为自相关函数;  $C(o)$  为  $C(h)$  在  $h=0$  时的取值(基台值);  $Z(x)$  和  $Z(x+h)$  分别为区域化变量  $Z$  在  $x$  和  $x+h$  点处的实现。

从(3)式可知, 变差函数完全是自相关函数的等价函数。因此, 在实际应用时, 如果计算变差函数较方便, 那么便可用变差函数代替自相关函数。

不同的地球化学参数不仅自身在空间或时间域内存在自相关, 而且它们之间又存在互相关, 共同构成了协同区域化变量。刻画它们的互相关结构属于多元时间序列分析问题。互相关函数是刻画互相关结构的基本工具。多元地质统计学中交叉变差函数是互相关函数的一种等价函数。

一对协同区域化变量  $i$  和  $j$  的交叉变差函数的理论公式为:

$$\gamma_{ij}(h) = \frac{1}{2}E[Z_i(x) - Z_i(x+h)][Z_j(x) - Z_j(x+h)] \quad (4)$$

式中,  $E$  为数学期望;  $\gamma_{ij}(h)$  为变量  $i$  和  $j$  的交叉变差函数;  $Z_i(x)$  和  $Z_j(x+h)$  为变量  $i$  在  $x$  和  $x+h$  两点处的实现;  $Z_i(x)$  和  $Z_j(x+h)$  为变量  $j$  在  $x$  和  $x+h$  两点处的实现。

### 1.2 实验变差函数和交叉变差函数的计算

变差函数和交叉变差函数的解析表达式是在实验变差函数和实验交叉变差函数计算基础上, 通过理论模型拟合而得到的。因此实验变差函数和实验交叉变差函数是获得理论表达式的关键环节。在实际的地球化学旋回结构分析中通常直接应用实验变差函数和实验交叉变差函数。

实验变差函数的计算公式为:

$$\gamma(h) = \frac{1}{2N(h)} \sum_{i=1}^{N(h)} [Z(X_i) - Z(X_i+h)]^2 \quad (5)$$

式中  $Z(X_i)$  和  $Z(X_i+h)$  分别为随机函数  $Z(X)$  在点  $X_i$  和  $X_i+h$  处的实现,  $i=1, 2, \dots, N(h)$ ;  $h$  为空间或时间步长;  $N(h)$  为点对数目。

实验交叉变差函数的计算公式为:

$$\gamma_{ij}(h) = \frac{1}{2}[\gamma^*(h) - \gamma_i(h) - \gamma_j(h)] \quad (6)$$

式中  $\gamma_{ij}(h)$  为变量  $Z_i$  和  $Z_j$  的实验交叉变差函数;  $\gamma^*(h)$  为变量  $Z_i$  和  $Z_j$  之和的实验变差函数;  $\gamma_i(h)$  和  $\gamma_j(h)$  分别为变量  $Z_i$  和  $Z_j$  的实验变差函数。

从公式(5)和(6)来看, 计算实验变差函数和实验交叉变差函数似乎较简单, 实际并非如此。在计算过程中涉及到数据空间构形, 数据统计分布及相应的稳健处理等细节, 有关计算步骤详见文献[1]和[5]。

## 2 地球化学旋回周期率的识别

以东北太平洋 1787 测站柱状沉积物硅质生物的氧、硅同位素组成  $\delta^{18}\text{O}$  和  $\delta^{30}\text{Si}$  的时间序列分析为例, 来说明利用变差函数和交叉变差函数识别地球化学旋回周期率和周期层次结构的有效性。

从东北太平洋 1787 测站柱状沉积物  $\delta^{18}\text{O}$  和  $\delta^{30}\text{Si}$  的变化曲线中很难看出任何周期性变化特征<sup>①</sup>。但是, 当计算了氧、硅同位素组成  $\delta^{18}\text{O}$  和  $\delta^{30}\text{Si}$  的实验变差函数并绘成实验变差函数图后, 便可以很容易地识别出周期性变化特征和周期层次。

孟宪伟, 吴世迎, 1995. 《沉积环境演化与多金属结核成矿关系研究》。

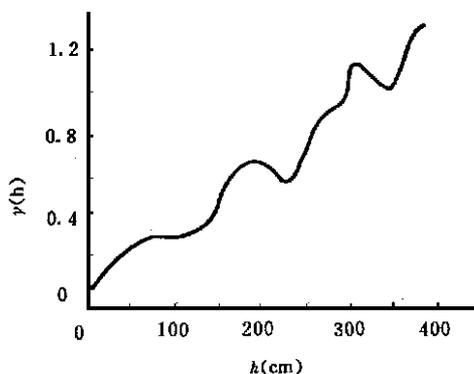


图1 氧同位素组成  $\delta^{18}\text{O}$  实验变差函数

Fig. 1 Variogram of the composition of oxygen isotope  $\delta^{18}\text{O}$

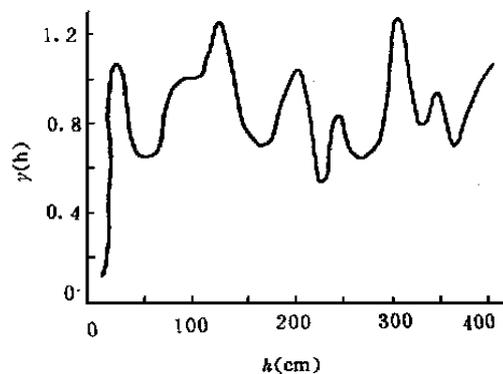


图2 硅同位素组成实验变差函数

Fig. 2 Variogram of the composition of silicic isotope  $\delta^{30}\text{Si}$

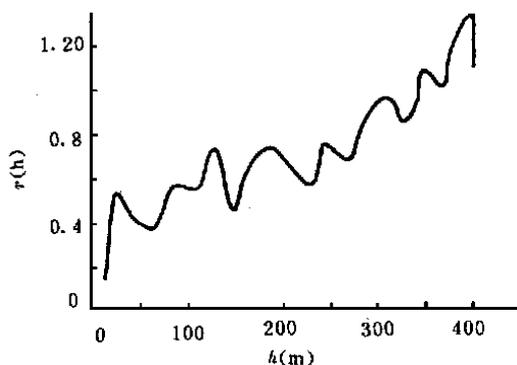


图3  $\delta^{18}\text{O}$  和  $\delta^{30}\text{Si}$  实验交叉变差函数

Fig. 3 The cross-variogram between  $\delta^{18}\text{O}$  and  $\delta^{30}\text{Si}$

图1和图2是利用公式(5)计算的氧、硅同位素组成  $\delta^{18}\text{O}$  和  $\delta^{30}\text{Si}$  的实验变差函数图。从  $\delta^{18}\text{O}$  的变差函数图(图1)中可以很容易地看出周期性变化特征,并可以识别出3种周期的空间尺度:105 cm, 225 cm 和 334 cm。硅同位素组成  $\delta^{30}\text{Si}$  的实验变差函数图(图2)显示的周期性变化特征更明显,并可识别出6种周期的空间尺度:45 cm, 170 cm, 225 cm, 265 cm, 325 cm 和 365 cm。如果以 1 mm/ka 为该柱状沉积物的平均沉积速率(未考虑沉积间断),则上述空间尺度对应的时间尺度分别为:2.25 Ma, 3.34 Ma, 3.45 Ma, 0.45 Ma,

1.70 Ma, 3.25 Ma, 2.65 Ma, 3.25 Ma 和 3.65 Ma。

在假定硅质生物氧、硅同位素组成  $\delta^{18}\text{O}$  和  $\delta^{30}\text{Si}$  反映古环境演化的前提下,对比它们的实验变差函数所揭示的周期尺度,不难看出:在现有的低分辨率取样条件下,硅同位素组成  $\delta^{30}\text{Si}$  能够描绘较小尺度的环境周期性变化,而氧同位素组成  $\delta^{18}\text{O}$  只能刻画较大尺度的环境周期性变化。也就是说它们对环境变化响应的灵敏程度并不相同:硅同位素组成对环境变化反应较敏感,而氧同位素组成却不太敏感,也就是说氧、硅同位素对环境变化并非同步响应。为此,作者考察二者的空间(时间)互相关——交叉变差函数(如图3)。

从氧、硅同位素组成  $\delta^{18}\text{O}$  和  $\delta^{30}\text{Si}$  的交叉变差函数图中可以看出,1787 柱状沉积物记录了7次时间(或空间)尺度不等的变化周期,其空间尺度分别为 65 cm, 105 cm, 145 cm, 225 cm, 265 cm, 325 cm 和 365 cm。很显然,  $\delta^{18}\text{O}$  和  $\delta^{30}\text{Si}$  的实验交叉变差函数所刻画的周期尺度几乎全部包括了  $\delta^{18}\text{O}$  和  $\delta^{30}\text{Si}$  各自的实验变差函数所反映的周期尺度。此外,由于实验交叉变差函数含有两个古环境指示参数,它们之间对于反映环境信息来说,相互补充、相互强化,因而反映的古环境信息更全面、更明显,刻画的周期尺度也更清晰、更准确。

## 参考文献

- [1] 王仁铎、胡光道编, 1988. 线性地质统计学. 地质出版社, 11~17.
- [2] E. Pardo-Igúzquiza *et al.*, 1992. *Computers and Geosciences* **18**(6): 665-688.
- [3] E. Pardo-Igúzquiza *et al.*, 1994. *Computers and Geosciences* **20**(4): 511-584.
- [4] F. Oloriz *et al.*, 1992. *Earth and Planetary Science Letters* **111**(2-4): 407-424.
- [5] P. Diamond *et al.*, 1984. *Mathematical Geology* **16**(8): 809-820.

# VARIOGRAM AND RECOGNITION OF GEOCHEMICAL CYCLES IN SEDIMENTS

Meng Xianwei, Wu Shiyang and Han Yibing  
(First Institute of Oceanography, SOA, Qingdao 266003)

**Received:** Oct. 11, 1996

**Key Words:** Variogram, Geochemical cycles, Hierarchical-structures

## Abstract

An important fact in the analysis of geochemical stratigraphy is that there is the feature of geochemical cycles with imposed different spatial or temporal scales, which were controlled by environmental factors with different scales. Therefore, recognizing of different scale geochemical cycles by means of some tools is useful for the study of paleoceanography. In the present paper, the author puts forward a tool used universally for this purpose in mining geology and in prognosis of mineral resource, variogram. And by making use of oxygen and silicic isotopic composition, the efficiency of variogram for recognizing of periodicity of geochemical cycles in deep sea sediments is illustrated.