

# 南沙群岛及其邻近海区第四纪气候演化的非线性特征

李 原<sup>1</sup> 孟仟祥<sup>1</sup> 罗斌杰<sup>1</sup> 李智明<sup>2</sup>

<sup>1</sup> (中国科学院兰州地质研究所, 兰州 730000)

<sup>2</sup> (中共兰州市委党校)

**提 要** 南沙群岛及其邻近海区近 18.5 万年以来气候与环境非线性研究表明曾发生三次明显气候转变, 形成四个映射区。其中氧同位素第 5 期与第 4 期转变较明显, 其次是氧同位素第 6 期与第 5 期的转变, 最后是第 3 与第 2 期之间的变化, 这与全球第四纪古气候研究结果是一致的, 得到了氧同位素和古生物资料的进一步印证。

半深海-深海海底沉积物有机质演化阶段在海进海退过程中表现出垂直分带和非线性变化。上陆坡以氧化堆积带为主, 有机质供给多, 但消耗迅速且水动力相对强; 中陆坡为利于有机质保存的还原带; 下陆坡为有机质缩合阶段, 陆坡下缘 远洋为有机质沉降氧化带与沉积埋藏阶段的植烷形成带。这几个带在古气候、古海平面非线性变化中是沿海底向上或向下迁移的, 其变化是非线性的。

**关键词** 南沙群岛及其邻近海区 古气候 古环境 非线性映射

**第一作者简介** 李原 男 31岁 博士 有机地球化学 数学地质

## 前 言

近代科学研究的大量证据表明, 非线性现象是广泛存在的, 甚至可以说世界的本质是非线性的, 不能用传统的线性方法逼近解决<sup>[1,2,3]</sup>, 古气候和古环境的变迁的研究也不例外。在过去 73 万年内, 全球曾经历了八次完整的气候旋回, 但各期冷暖的程度并不完全相同, 存在复杂的冷暖变化, 除大的冷暖波动外, 其中又有次一级和更次一级的冷暖波动, 而且还存在明显的迅速变化阶段<sup>[1,10]</sup>。从冷期到暖期, 再由暖期到冷期, 其总体特征是频繁振荡<sup>[28]</sup>。近年来的研究进一步发现, 由地球轨道波动引起太阳辐射量周期变化的天文学机制并不能对气候变化总量进行完全的解釋, 总量中的一部分应归因于气候系统内部的非线性反馈<sup>[3,28]</sup>。末次冰消期存在的“非米兰科维奇气候偏移”<sup>[11,3]</sup>, 正说明辐射量与气温之间有明显的非线性关系, 这是末次冰消过程中非线性反馈的结果。这种非线性反馈事件在全球范围内均有报道, 如南海北部陆坡的 V 36-06-3 柱样<sup>[3]</sup>, 45°N 以北的北大西洋及其两侧欧美陆地<sup>[13]</sup>、印度洋、南美洲、新西兰甚至南极冰盖<sup>[18,21]</sup>, 中国长江三角洲、甘肃巴谢黄土剖面等<sup>[1]</sup>。在海洋体系中, 由于太阳辐射量与大气温度, 气温与海面、海面与岸线等控制因素之间有着复杂的非线性关系<sup>[3]</sup>, 因此, 海洋的古环境和古气候条件的演化是受非线性系统

中变量组合控制的。位于南海海区  $12^{\circ}\text{N}$  以南的本研究区, 与南海北部的连通性较好, 因此, 有必要采用非线性的方法对其古气候古环境变化进行研究

近年来积累的大量地质资料和许多学者对南沙群岛及其邻近海区进行的详细的古生物、沉积岩、石学、元素地球化学等方面的研究, 具备了对南沙群岛及邻海区沉积柱样的古气候古环境进行非线性研究的充分条件。本文在 NS90-103 和 NS90-102 柱样有机地球化学数据的基础上, 结合了有关的矿物学、岩石学、古生物学、元素地球化学<sup>[5]</sup>和氧同位素<sup>[4]</sup>数据, 进行了 26 项变量、35 个样品的非线性映射, 综合 N87-8 柱样已发表的资料<sup>[3]</sup>, 进行了 18 个变量, 55 个样品的映射分析, 探讨了本研究区古气候古环境演化、有机质演化与古气候古环境的关系以及映射结果反映出的沉积旋回、古气候的振荡和分形等, 并通过已发表的古生物和氧同位素数据对形成机理进行了探讨。由于资料的局限性, 本文讨论了相当于氧同位素第 6 期, 时间大体距今 18.5—12.8 万年以来柱样<sup>[9]</sup>的古气候古环境变迁

## 1 南沙群岛及其邻近海域古环境古气候非线性研究的方法及应用

在许多确定性的非线性系统中, 人们已经发现了对初始条件极其敏感的随机行为, 即所谓混沌 (chaos) 现象。对混沌系统而言, 行为的长期预测是现代科学尚无法满足的, 因为它对初始条件和数据的精度要求太高。如果非线性系统表现为弱混沌行为, 则可进行长期预测。非线性科学给人们的基本启迪是, 具有数量十分庞大的自由度 (影响因素) 的系统, 在突变点附近的行为只由少量自由度决定。复杂性的根源不是“大数”, 而是非线性, 复杂性可由简单的动力机制产生。基于这种理论, 地学的许多非线性现象可以通过非线性理论和方法给予圆满的解释。

本文采用了非线性映射方法, 它是通过非线性变换的方法, 将高维空间几何图形变换成低维空间图形, 并寻找出突变点附近行为的少数受控自由度 (非线性变量组合), 探寻出各映射分区的分形机理, 并通过受控自由度, 推导出其物理涵义所反映的环境与气候变化, 计算程序和方法详见林少宫等人论著<sup>[8]</sup>。

### 1.1 样品与方法

本文所用 NS90-102、NS90-103 柱样 (三十五块样品) 由中国科学院南沙综合科学考察队于 1990 年间采集, 它们分别位于南沙西北部深海底大陆坡 (水深 2884m) 和中大陆坡 (水深 1581m)。首先将凉干的原样品粉碎至 80—100 目, 进行索氏抽提和族组分分离及色谱分析等获得了两个柱样详尽的有机地球化学数据, 包括有机碳、氯仿沥青“*A*”、饱和烃、芳烃、非烃十沥青质、 $\text{Pr}/\text{Ph}$ 、 $\text{Pr}/\text{nC}_{17}$ 、 $\text{Ph}/\text{nC}_{18}$  等数据, 另外引用了 NS90-102、NS90-103 柱样的常量和微量元素, 矿物组成<sup>[5]</sup>, 生物骨屑和微体生物化石<sup>[4]</sup>与古气候古环境同位素方面<sup>[4]</sup>的资料。以有机地球化学资料为主, 结合已有的无机地球化学、矿物岩石学和古生物学数据, 进行二十六变量单柱样非线性映射。

### 1.2 非线性映射结果

映射所用的二十六个变量是: 有机碳、氯仿沥青“*A*”、饱和烃馏分、芳烃、非烃十沥青质、 $\text{Pr}/\text{Ph}$ 、 $\text{Pr}/\text{nC}_{17}$ 、 $\text{Ph}/\text{nC}_{18}$ 、低镁方解石、粘土矿物、碎屑矿物、浮游有孔虫、底栖有孔虫、硅质生物屑、植物碎片、 $\text{SiO}_2$  (%)、 $\text{Al}$  (%)、 $\text{K}$  (%)、 $\text{Fe}$  (%)、 $\text{Mn}$  (%)、 $\text{P}$

(%),  $\text{Cu} (\times 10^{-6})$ ,  $\text{Sr} (\times 10^{-6})$  和  $\text{CaCO}_3$  (%).

表 1 NS90-103和 NS90-102柱样二十六个变量的映射向量表

Table 1 The results of the mapping vectors of 26 variations from NS90-103 and NS90-102 column samples.

向量 柱样 变量	NS90-103		NS90-102		NS90-102和 NS90-102	
	Y <sub>1</sub>	Y <sub>2</sub>	Y <sub>1</sub>	Y <sub>2</sub>	Y <sub>1</sub>	Y <sub>2</sub>
$\text{Co}_{\text{org}}$	0.3822	0.3534	0.2178	0.2154	0.3288	-0.0643
氯仿沥青 "A"	0.2643	0.2866	0.0439	0	0.4044	-0.1149
饱和烃	-0.0807	-0.0793	0	0	-0.1877	0.048
芳烃	0.0472	0.0016	0	0	-5.3498	0
非烃十沥青质	0	0	0	0	0.1663	-0.0280
Pr/Ph	0	0	-0.0687	-0.0680	-0.1718	0.0432
Pr/nC <sub>17</sub>	0	0	0	0	-0.0484	0
Pr/nC <sub>18</sub>	0	0	-0.0947	-0.0936	-0.1016	0.0255
SO <sub>3</sub>	-0.1517	-0.6476	0.04603	0	0.0771	-0.0193
Al (%)	0	0	0.21147	0.2091	0.2628	-0.066
Fe (%)	0	0	0.1879	0.1859	0.1957	-0.0492
K (%)	-0.0410	-0.0599	0.3871	0.3827	0.2316	-0.0582
Mn (%)	0.7595	-0.4288	0.2384	0.2357	0.2218	0.2476
P (%)	-0.0333	0.00012	0.17556	0.1736	0	0
SiO <sub>2</sub> (%)	-0.1232	0.00045	-0.2602	-0.2573	-0.2816	0.0381
$\text{Cu} (\times 10^{-6})$	-0.0013	0.1478	0	0	0.1500	-0.0203
$\text{Ni} (\times 10^{-6})$	0.2204	-0.2529	0.0922	0.0911	0.3254	-0.044
$\text{CaCO}_3$ (%)	0.0366	-0.00013	-0.6037	0.7451	0.1153	0.3906
$\text{Sr} (\times 10^{-6})$	0.0351	-0.00012	-0.1562	0	0	0.7407
低镁方解石	0.0569	-0.00021	0	0	0.1843	0.2242
碎屑矿物	0	0	-0.1387	0	-0.2327	0.0056
浮游有孔虫	0.0879	-0.0003	0	0	0.0903	0.2461
底栖有孔虫	0.0693	-0.01715	0	0	0	0.2988
硅质生物屑	-0.0694	0.00025	0.2295	0	0.1697	0
植物碎屑	0.2939	0.2538	0	0	-0.1603	0

NS90-103柱样二十六个变量十九个样品的映射结果详见图 1和表 1; NS90-102柱样二十六个变量十六个样品的映射结果如图 2和表 1所示; NS90-103和 NS90-102柱样二十六个变量三十五个样品的非线性映射结果如图 3和表 1所示。

## 2 NS90-103和 NS90-102柱样单柱的非线性映射特征以及反映出的沉积旋回和古气候变迁

第四纪古气候演化是一个非线性过程<sup>[1,3]</sup>;大量事实已经表明这种非线性过程在全球第四纪沉积物中都有反映<sup>[1,16]</sup>,因此南沙群岛及邻近海(18.5万年)的古气候演化和沉积环境的变化也必然在地处中下陆坡的NS90-103和下陆坡—远洋深海的NS90-102柱样的有机质组成和演化、矿物和元素组成、古生物特征以及氧同位素数据中均有所反映,而这种反映不应是简单的线性相关,而应该是非线性的并受多变量控制的反馈系统。鉴于这种理论,本文对NS90-103和NS90-102两个不同海洋沉积环境,但时限(近18.5万年)相同并可对比的柱样,分别进行了非线性映射,目的在于寻找出南沙群岛及邻海古气候变化的非线性规律,找出气候变迁中大的振荡和分形发生的时间和埋藏深度,并对次一级古气候变迁的冷暖程度做尝试性探索。

### 2.1 NS90-103柱样的非线性映射特征及古气候演化

如图1、表1、表2所示,NS90-103柱样二十六个变量、19个样品的非线性映射

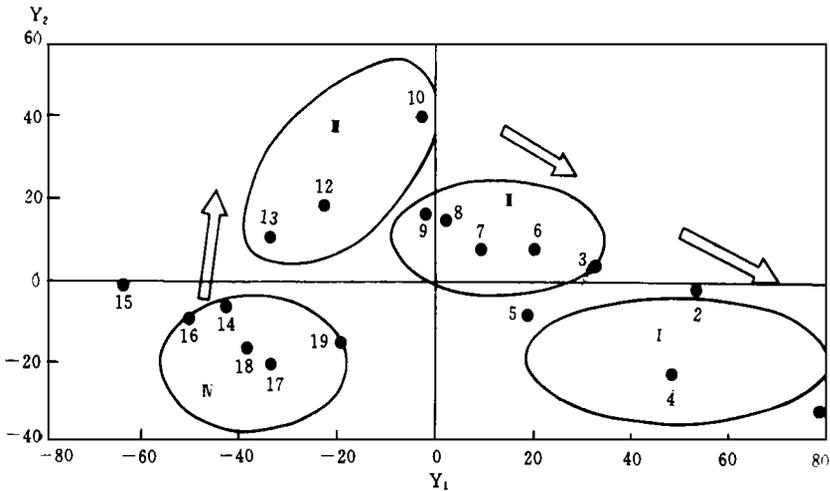


图1 NS90-103柱样的非线性映射图

Fig. 1 The non-linear mapping of the NS90-103 column samples

结果表明南沙群岛及邻海近18.5万年以来环境与气候存在四次明显的振荡,形成四个明显的映射分区,这四个分区是由深至浅在映射平面中顺时针分布的,从其内部样品展布方向以及各相邻分区的过渡变化可以看出,IV和III的样品(由深至浅)分布方向与II和I明显不同,而且III与II相邻分区之间有一明显台阶(10号→9号样),说明其间存在一次大的振荡,形成机制见后文所述。另外,II与I之间过渡平缓,而IV向III的过渡比较突然,这可能反映两者古气候转变时,冷暖变化幅度存在差异。

这种大的振荡运动中又包含次一级振荡的现象是不同时间范围非周期节奏性运动再次

叠加的结果, 随时间推移和环境因素的改变, 原来的振荡会失稳并产生新的频率, 表征新的振荡。若条件发生进一步变化时, 由新频率表征的振荡又会失稳再产生又一个新的振荡频率, 这种失稳是受变量组合改变控制的。振荡的不断分岔将产生非线性映射中的分形。古环境、古气候中的振荡也是这样。由于冰期—间冰期的变化产生失稳, 会在映射的变量组合中反映出来, 也会在映射分区的形态上表现出来, 因而给古气候环境的非线性研究带来了可能。

研究表明, NS90-103柱样近 18.5 万年以来存在两个明显的演化阶段, 代表了两次大的振荡和分形。如图 1, 表 2 所示, 位于  $Y_1$  轴负向的 IV 和 III 映射区与位于  $Y_1$  轴正向的 I、II 分区在受控非线性变量组合上截然不同, III、IV 分区主要受控于  $Y_1$  负轴方向的饱和烃、 $SO_4^{2-}$ 、K (%)、P (%)、 $SiO_2$  (%)、 $Cu$  ( $\times 10^{-6}$ )、硅质生物屑含量的变量组合, 反映以有机质缩合阶段为主, 饱和烃和  $SO_4^{2-}$  呈现正相关关系 (见第一节), 沉积组合是深海硅质软泥夹含生物硅质和植物碎屑, 因深海压溶稀释作用强, 不利于生物碳酸盐软泥保存, 反映海水深度较 I、II 分区大, 有机质供给比 I、II 分区贫乏, 说明已进入下陆坡附近。

表 2 NS90-103 柱样二十六个变量、十九个样品的映射分区变量组合  
Table 2 The results of variation composition of the mapping division for 19 samples and 26 variations of NS90-103 column

象限	变量及映射分区	$Y_1$ 轴向变量组合	$Y_2$ 轴向变量组合	映射分区
I		$C_{org}$ 氯仿沥青“ A”、芳烃、 $Mn$ ( $\times 10^{-6}$ )、 $Ni$ ( $\times 10^{-6}$ )、 $Sr$ ( $\times 10^{-6}$ )、 $CaCO_3$ (%)、低镁方解石、浮游有孔虫、低栖有孔虫、植物碎屑	$C_{org}$ 氯仿沥青“ A”、芳烃、P (%)、 $SiO_2$ (%)、 $Cu$ ( $\times 10^{-6}$ )、植物碎屑、硅质生物屑	II 分区第 6, 7, 8, 9, 3 号样
II		饱和烃、 $SO_4^{2-}$ 、K (%)、P (%)、 $SO_2$ (%)、 $Cu$ ( $\times 10^{-6}$ )、放射虫	同 I 象限 $Y_2$ 轴向	III 分区第 9, 10, 11, 12, 13 号样
III		同 II 象限 $Y_1$ 轴向	饱和烃、 $SO_4^{2-}$ 、K (%)、 $Mn$ (%)、 $Ni$ ( $\times 10^{-6}$ )、 $CaCO_3$ (%)、 $Sr$ ( $\times 10^{-6}$ )、低镁方解石、底栖有孔虫、浮游有孔虫	IV 分区第 14, 15, 16, 17, 18, 19 号样
IV		同 I 象限 $Y_1$ 轴向	同 III 象限 $Y_2$ 轴向 $\downarrow$ I 分区第 1, 2, 4, 5, 号样	

相反在 I、II 映射分区, 主控变量组合为  $C_{org}$  氯仿沥青“ A”、芳烃、 $Mn$  (%)、 $Sr$

( $\times 10^{-6}$ )、 $\text{CaCO}_3$  (%)、低镁方解石、浮游有孔虫、底栖有孔虫、植物碎片有机质处于还原富集阶段。因有机质分解,消耗了沉积物—水界面的氧,形成一个还原层带,此处海水中的  $\text{SO}_4^{2-}$  还原成  $\text{S}^{2-}$  和  $\text{H}_2$ ,因此  $\text{SO}_4^{2-}$  浓度降低。海水深度较IV、III分区浅,以有机质供给和保存条件为主,生物产量决定了有机质演化,生物供给多则保存条件好,此时还原层中  $\text{C}_{\text{org}}$  和生物碎屑富集;当生物供给少或海退水体动荡时,则破坏了有机质的保存条件,主控变量中  $\text{C}_{\text{org}}$ ,可溶有机质含量明显降低。有机质演化阶段表明I、II分区可能位于中陆坡附近。

综上所述: NS90-103柱样曾经历过由下陆坡向中陆坡的变迁,反映在有机质演化方面,前者以有机质缩合作用阶段为主;后者以有机质富集保存阶段为主。反映在生物组合中是前者以单一硅质生物屑为主,后者以浮游有孔虫、底栖有孔虫为主。在矿物成分中,前者是经远距离搬运抗风化的硅酸盐矿物,后者是生物碳酸盐,前者以  $\text{SiO}_2$  (%) 为主,而  $\text{CaCO}_3$  和  $\text{Sr}$  ( $\times 10^{-6}$ ) 含量低,后者则与此相反,这种变迁无疑代表了一次的海退过程和冷暖变更。

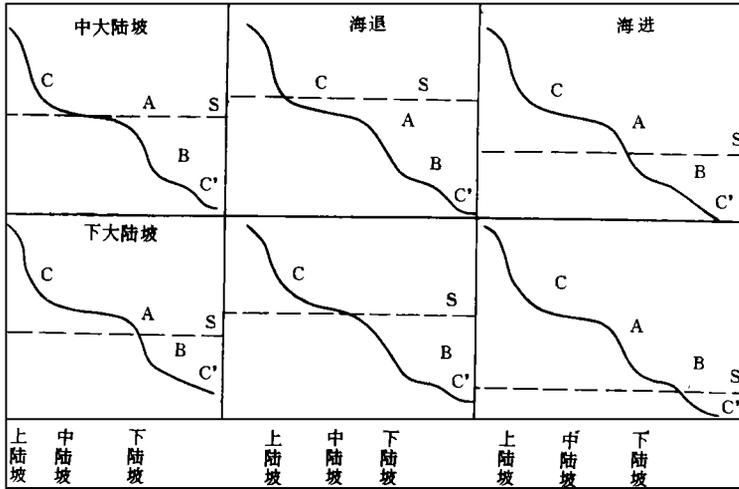
IV、III分区所在的下陆坡环境存在进一步的分形。其中IV分区主要受控于  $Y_2$  正轴的饱和烃、 $\text{SO}_4^{2-}$ 、 $\text{K}$  (%)、 $\text{Mn}$  (%)、 $\text{Ni}$  ( $\times 10^{-6}$ ) 等,III分区受  $Y_2$  负轴的  $\text{C}_{\text{org}}$ 、氯仿沥青“A”、芳烃、 $\text{P}$  (%)、 $\text{Cu}$  ( $\times 10^{-6}$ ) 的制约。因IV、III区均属远洋深海的下陆坡环境,前者的变量组合指示因浅海、陆边缘的生物产率低,到达深海的生物供给量很少,有机质演化阶段为有机质缩合阶段,反映了冰期的深海下陆坡沉积环境。后者指示当时生物产率相对较高,进入深海下陆坡的有机物质含量较高,反映当时气候暖热,浅海区生物产能增大,海进使海水变深,沉积物—水界面与远洋深海正常环境界面相接,落入深海的有机物质丰度增大。总体来看,IV、III两种振荡分形是在下陆坡环境这一大振荡上的次一级振荡叠合,是受主要环境背景制约的亚环境变迁。

同样,处于中陆坡环境的第二阶段也存在进一步分形和次一级振荡,形成II和I映射分区。因处于中陆坡附近的有机质保存带,此处的海进海退变化,导致有机质演化阶段在有机质还原保存带和有机质缩合作用带之间波动。如图1和表2所示,II映射分区的主控变量组合是  $\text{C}_{\text{org}}$  等见表2,指示了中陆坡附近的有机质还原保存带和生物死亡体的堆积区;而I分区则反映了有机质缩合阶段,饱和烃和  $\text{SO}_4^{2-}$  浓度呈正相关,由II区转向I区,沉积物—水界面降至中下陆坡之间,明显反映了气候由冷转暖,由冰期进入间冰期的海进过程。

图2展示了中陆坡和下陆坡海进海退时的有机质演化阶段的变迁。由图2可见,海进海退时,中陆坡环境的沉积物—水界面是在C和B带之间,即在上陆坡有机质迅速消耗但供给量较大的阶段和下陆坡有机质缩合阶段之间波动;下陆坡环境的上述界面是在A和C带之间,即在中陆坡有机质还原保存阶段和陆坡下缘的有机质供给少且迅速消耗的阶段之间波动。反映了NS90-103柱样在近18.5万年以来有机质的演化随海进海退的环境变化过程。

总之,近18.5万年以来NS90-103柱样,存在两次大的振荡,代表了两个沉积环境演化阶段,第一阶段为下陆坡沉积环境;第二阶段为中大陆坡环境。在第一阶段中存在次一级的分形和一次由海退向海进的转化;第二阶段同样存在次一级分形和一次海退向海进转化的过程。前者主要反映了海退时在深海中以有机质缩合作用为主,海进时以深海远洋的有机质耗氧阶段为主,不过由于大陆边缘在间冰期的生物产率较高,使得深海有机质相对含

量比冰期海退时多。中陆坡沉积环境的海退海进与下陆坡在有机质演化方向明显不同,海退过程中有机质演化进入保存阶段,以还原作用为主。SO<sub>4</sub><sup>2-</sup>还原为S<sup>2-</sup>和O<sub>2</sub>,SO<sub>4</sub><sup>2-</sup>浓度明显降低,同时,有利于有机质的保存,由于海水深度减小,离大陆边缘近,C<sub>org</sub>含量增加;海进时,有机质演化进入缩合阶段。由于海水深度增加,沉积物—水界面向下陆坡迁移,有机质供给量减少,有机质在异养细菌作用下,不饱和和族化合物在聚缩过程中沉积物中的HS<sup>-</sup>经氧化生成SO<sub>4</sub><sup>2-</sup>离子,不饱和烃向饱和烃转化,饱和烃和SO<sub>4</sub><sup>2-</sup>呈正比,而与C<sub>org</sub>成反比。



S. 代表沉积物—水界面 A. 有机质保存的还原阶段 B. 有机质缩合作用阶段 C. 上陆坡有机质迅速消耗阶段但供给较多 C'. 洋底的有机质迅速消耗阶段,有机质供给较贫乏,只在暖期时,C<sub>org</sub>含量相对增高。

图 2 N S90-103柱样海退海进与有机质演化界面的关系

Fig. 2 The relationship between the organic matter evolution stage and transgression or progression

2.2 NS90-102柱样的非线性映射特征及其古环境和古气候变迁

NS90-102柱样的现今海洋地理位置在下陆坡至下缘附近,它的单柱样二十六个变量、十六个样品的非线性映射结果更证明了这一点,同时对南沙群岛及其邻近海区近 18.5万年以来的古环境古气候变迁作了进一步的印证。

NS90-102柱样同样存在两个大的振荡,代表了两个明显的沉积演化阶段。如图 3所示,形成两大分区,即以 Y<sub>2</sub>轴为界的第二映射区包括I、II映射区和第一映射区包括III、IV映射发区。由表 3可见,第二映射分区主要受控于 Y<sub>1</sub>轴正方向的变量组合: C<sub>org</sub>、氯仿沥青“A”、SO<sub>4</sub><sup>2-</sup>、Al(%)、Fe(%)、K(%)、Mn(%)、P(%)、Ni(×10<sup>-6</sup>),粘土矿物、硅质生物屑;第二映射区受控 Y<sub>1</sub>负轴方向的变量组合: Pr/Ph、Ph/nC<sub>18</sub>、SiO<sub>2</sub>(%)、CaCO<sub>3</sub>(%)、Sr(×10<sup>-6</sup>)、碎屑矿物。第二映射区的变量组合反映了下陆坡附近的沉积环境,有机质供给虽少但比第一区多,粘土矿物,铁、锰结核和磷酸盐矿物含量较高,深度比

第一映射区浅,反映其沉积环境应属于正常深海相沉积;第二映射区的变量组合指示它以碎屑矿物,生物碳酸盐矿物为主,少生物屑和有机质供应。因地处远洋浊积或扇积环境,生物广布但低产,因而  $C_{org}$ , 氯仿沥青“ A” 丰度很低。表 1 图 1 图 3 的研究表明 NS90-102 总体落在有机质缩合阶段 (图 2, B) 和有机质早期成岩作用之间。

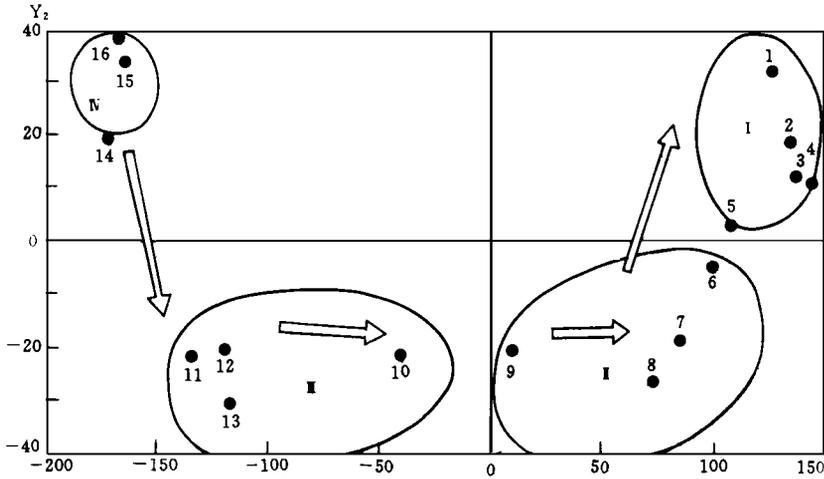


图 3 NS90-102柱样二十六个变量、十六个样品的非线性映射

Fig. 3 The non-linear mapping of the NS90-102 column samples

第一阶段的沉积物—水界面主要处于早期成岩作用阶段,植醇向植烷或姥鲛烷转化,有机质贫乏。第二阶段的沉积物—水界面在有机质缩合阶段和深海有机质耗氧且供给较少的 C 层带 (表 3, 图 2) 之间波动。

上述两个大的振荡之间的海退变化同 NS90-103 一样,反映一次气候由暖向冷的大转化,各阶段内部同样存在次一级振荡和分形,反映了古气候的进一步变化。由于深海生物碳酸盐岩供给较少且含量较稳定,只在发生海进海退时,  $CaCO_3$  (%) 浓度的变化才比较大,这是因为深海海水深度增大,压力增加导致  $CaCO_3$  (%) 含量减少,深度减小,则是  $CaCO_3$  (%) 含量增加的原因。在第一演化阶段,由于陆隆海底扇积相和浊流的影响,使原本属于正常深海沉积的环境发生了变化,碎屑矿物和含部分  $CaCO_3$  的浊积物的形成与堆积,抑制了铁—锰结核的形成,粘土成分大量减少,有机质含量很少,只发生吸附有机质的早期成岩作用的变化,即植醇脱水形成异构植二烯,加氢还原成植烷;若经氧化,植醇形成植烷醇,脱羧基形成姥鲛烷,植烷和姥鲛烷的相对含量能够反映当时有机质所处的介质环境条件。此时  $SiO_2$  和  $CaCO_3$  的相对贡献则指示了远洋深海海水深度的明显变化,即海进海退的变化。在第一阶段 (映射一区) 中,由 IV 分区向 III 分区转化时,  $CaCO_3$  (%) 明显减小,  $SiO_2$  (%) 则相对增加,反映海水深度明显增加,指示气候转暖的海进过程。

在第二阶段的内部,也可分为 II 和 I 两个映射分区,两者的变量组合区别类似于 NS90-103 下陆坡附近的变化,由生物屑和  $C_{org}$  等资料表明,它们可能位于下陆坡下缘附近。不过深度更深,由 II 向 I 变化中,有机质供给量、生物屑相对量和粘土矿物等增加,反映深海远洋环境向深海下陆坡下缘附近转变的海进变化。气候变暖,浅海及上层水生物产能增

加。

综上所述, NS90-103与 NS90-102柱样的非线性映射均具有两个大的振荡和四个小振荡, 分别反映了各自两个大的沉积环境阶段和四次海退海进, 并与冰期—间冰期变化相对应。由于各振荡的受控变量组合和频率不同, 因此反映了两个柱样在相同时间段内虽然同步变化, 但不是相同频率; 同处于一个大气候环境下, 但不具相同的沉积环境; 虽同在一个海域, 但受控于不同的变量组合, 既使如此, 它们的变化还是反映出了近 18.5 万年以来南沙群岛及邻海区的四次冰期和间冰期的明显变化。

表 3 NS90-102柱样二十六个变量、十六个样品的非线性映射变量组合

Table 3 The results of variation composition of the mapping division for 19 samples and 20 variation of NS90-102 column

映射分区 象限	Y <sub>1</sub> 轴向变量组合	Y <sub>2</sub> 轴向变量组合	映射分区
I	C <sub>org</sub> , 氯仿沥青“A”, SO <sub>4</sub> , Al(%) , Fe(%) , K(%) , Mn(%) , P(%) , Ni( $\times 10^{-6}$ ), 粘土矿物、硅质生物屑	C <sub>org</sub> , Al(%) , Fe(%) , K(%) , Mn(%) , P(%) , Ni( $\times 10^{-6}$ ), CaCO <sub>3</sub> (%)	第I分区
II	Pr/Ph, Ph/nC <sub>18</sub> , SiO <sub>2</sub> (%) , CaCO <sub>3</sub> (%) , Sr( $\times 10^{-6}$ ) 和碎屑矿物	同I象限 Y <sub>2</sub>	第IV分区
III	同II象限 Y <sub>1</sub> 轴	Pr/Ph, Ph/nC <sub>18</sub> , SiO <sub>2</sub> (%)	第III分区
IV	同I象限 Y <sub>1</sub> 轴	同III象限 Y <sub>2</sub> 轴	第II分区

研究发现, 有机质演化阶段在半深海—深海海底环境具有垂直分带性和非线性变化性。上陆坡以有机质供给较多消耗迅速的层带为主; 中陆坡以有机质还原带为主; 下陆坡为有机质缩合带, 下陆坡下缘至远洋为有机质缩合带以下的有机质氧化带或沉积埋藏阶段的植烷和姥鲛烷形成带。在海进和海退中, 这些界面层带, 会沿海底向下或上变迁, 由此可用来指示海进海退的变化。另外, 上、中陆坡这种变化比下陆坡至远洋的环境更明显, 这可能与陆缘海的生物产量、海底有机质含量和海水深度等因素有关。

### 2.3 非线性映射研究结果的氧同位素和古生物证据

根据刘韶、秦佩玲等人<sup>[4]</sup>氧同位素资料、涂霞、蔡慧梅等人古生物学资料<sup>[9]</sup>综合得出表

4

许多事实表明, 在过去 73 万年内, 地球曾经历过 8 次完整的冰川旋回, 包括 8 次寒冷期和 8 次温暖期, 其冷暖变化程度有很大差异<sup>[1,2,3]</sup>, 正是由于这种冷暖的非线性变化<sup>[1]</sup>, 造成了南沙群岛及邻海近 18.5 万年以来古环境的非线性变化。

NS90-103和 NS90-102柱样的两个明显沉积演化阶段是古气候在氧同位素第 5 期和第 4, 3 期之间气候由一种振荡向另一种振荡突然转化的结果。这种突然转化表现为一次大

的海退过程和气候由热向冷的明显转变。Kukla<sup>[23]</sup>、Bonifay<sup>[12]</sup>均用大量证据说明在两次温暖期中比较重要的是氧同位素第 15, 7, 5 期等; 历次寒冷期中比较重要的是氧同位素第 16, 10, 6 期。相比之下, 其它寒冷期或冰期, 如第 12, 10, 8, 4, 2 等阶段虽代表了气候寒冷, 但是, 是不重要的, 同样第 11, 9, 3 等虽然代表着温暖期或间冰期, 也是不重要的<sup>[12]</sup>。因此本文的氧同位素第 1—6 期的冷暖变化幅度就比较清楚了。造成两个明显沉积演化的原因是间冰期明显段氧同位素第 5 期与冰期不明显段第 4—3 的冷暖变化幅度大, 事实上是一次大的间冰期向冰期的突变过程, 正是这一过程, 使 NS90-103 由 III 映射区转向 II 映射区, 发生了明显的海退; 由下陆坡转向中陆坡附近; 使 NS90-102 由陆坡下缘的浊积相或海底扇积相转向下陆坡附近, 同样发生了海退变化, 这种变化在氧同位素组成和古生物资料上得到了进一步证实 (表 4)。

表 4 古气候变迁的氧同位素和古生物证据

Table 4 The evidences of oxygen isotopic composition and paleontology showing the paleoclimate migration

深度、气候阶段 柱样 氧期	NS90-103 柱样	NS90-102 柱样	氧同位素期
IV	深度 440—380 cm 孢粉资料: 凉干 气候特征 海退	364—300 cm 硅藻资料: 偏凉气候 海退	第 6 期
III	深度 380—260 cm 孢粉资料: 炎热而 潮湿气候特征 海进	300—99 cm 硅藻资料: 炎热气候 时期 海进	第 5 期
II	深度 260—30 cm 孢粉资料: 凉干 气候特征 海退	99—23 cm 硅藻资料: 偏凉气候 时期 海退	第 4—3 期
I	深度 30—0 cm 孢粉资料: 炎热而 潮湿气候特征 海进	0—23 cm 硅藻资料: 炎热气候 时期 海进	第 2—1 期

在次一级振荡变化中, IV 映射区与 III 映射区的变化要比 II 与 I 分区之间更显著, (图 1, 图 3), 这是因为氧同位素第 6 期和第 5 期分别是重要的冰期和间冰期的缘故。从 VI, III 分区的展布方向和分布形态可见, 两者之间存在突然变化; 而 II 分区与 I 分区之间除内部少数点外基本呈一递变过程, 说明南沙及邻海在氧同位素第 6—5 期之间的变化比第 4—1 期的变化更明显, 这与 Kukla<sup>[23]</sup>、Bonifay<sup>[12]</sup> 以及施雅风等人<sup>[27]</sup> 的结论是一致的。

## 总 结

南沙群岛及邻近海区的古气候古环境非线性研究表明,在近 18.5 万年内曾发生三个明显气候转变,形成四个映射区。其中氧同位素第 5 期向第 4 期转变较明显,其次是氧同位素第 6 期向第 5 期的转变,最后是第 3 与第 2 期之间的变化,这与全球第四纪古气候研究结果是一致的,并得到了氧同位素和古生物资料的进一步印证

半深海—深海海底沉积物有机质演化阶段在海进海退过程中表现出垂直分带和非线性变化。上陆坡以氧化堆积带为主,有机质供给多,但消耗迅速且水动力相对强;中陆坡为利于有机质保存的还原带;下陆坡为有机质缩合阶段,陆坡下缘—远洋为氧化带,为沉积埋藏的植姥烷形成带。这几个带在古气候、古海平面非线性变化中是沿海底向上或向下迁移的,其变化是非线性的。

由于受样品密度等原因的限制,古气候研究的分辨率有待进一步提高。

致谢: 本文的研究样品和分析资料得到陈清潮、罗又郎研究员的帮助,在此表示深切的谢意。

## 参 考 文 献

- [1] 艾南山. 非线性科学和理论地理学. 大自然探索, 1992, 11 (1): 10- 14
- [2] 任美镔. 全球气候变化与海平面上升问题. 科学, 1988, (4): 248- 253.
- [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] 刘韶, 秦佩玲, 张惠玲, 温孝胜. 南沙群岛及其邻近海区晚第四纪沉积年代学沉积层划分与比较. 《南沙群岛及其邻近海区的第四纪沉积地质学》, 中国科学院南沙综合科学考察队, 科学出版社, 1993, 256- 272.
- [5] 苏广庆, 王有强, 王晓彬, 王天行, 欧阳华等. 南沙群岛及其邻近海区的矿物沉积. 《南沙群岛及其邻近海区第四纪沉积地质学》, 中国科学院南沙综合科学考察队, 科学出版社, 1993, 256- 272.
- [6] 安芷生等. 最近 2万年中国古环境变迁的初步研究. 黄土·第四纪·全球变化, (2), 科学出版社, 1990, 1- 26.
- [7] 李后强, 艾南山. 分形地貌学及地貌发育的分形模型. 自然杂志, 1992, 15 (7): 516- 519.
- [8] 林少宫等人著. 多元统计方法在地质学上的应用. 冶金工业出版社, 1987, 233- 251.
- [9] 涂霞, 蔡慧梅等. 南沙群岛及其邻近海区沉积柱样微体生物化石与古环境. 《南沙群岛及其邻近海区第四纪沉积地质学》, 中国科学院南沙综合科学考察队, 科学出版社, 1993, 239- 255.
- [10] 黄定华, 吴金平. 地质学中的非线性问题. 地球科学进展, 1992, 7 (5): 10- 14.
- [11] Berger W H, Burke S and Vincent E. Glacial-Holocene Transition Climate Pulsations and Sporadic Shutdown of NADW Production. in Berger, W. H. and Labeyrie, L. D. (eds.), Abrupt Climate Change—Evidence and implications, D. Reidel, Dordrecht, 1987, 279- 297.
- [12] Bonifay M F. Relations entre les donnees isotopiques et l'histoire des grandes faunes europeennes plio-pleistocenes. Quaternary Research, 1980, (14): 251- 263.
- [13] Broecker W S, Andree, M., Wolfli, W., Oeschger, H., Bonani, G., Kennett, J. and Peteet, D., The Chronology of the Last Deglaciation Implications to the Cause of the Younger Dryas Event. *Paleoceanography*, 1988, 3 (1): 1- 19
- [14] Broecker, W. S., Peteet, D. M. and Rind, D., Does the Ocean-Atmosphere System Have More than One Stable Mode of Operation? *Nature*, 1985, (315): 21- 26.
- [15] Broecker, W. S., Salinity History of the Northern Atlantic during the Last Deglaciation. *Paleoceanography*, 1990, 5 (4): 459- 467.

- [16] Clark, J. A., Farrell, W. E. and Peltier, W. R., Global Changes in Postglacial Sea level: A Numerical Calculation. *Quaternary Research*, 1978, 9, 265–287.
- [17] Ergenzinger, P., Chaos and Order: The Channel Geometry of Gravel Bed Braided Rivers. *CATNA*, Suppl., 1987, (10): 85–98.
- [18] Fairbanks, R. G., Glacio-Eustatic Sea Level Record 0–17000 Years Before Present: Influence of Glacial Melting Rate on Younger Dryas "Event" and Deep Ocean Circulation. *ibid.*, 1989, (342): 637–642.
- [19] Fairbridge, R. W., Eustatic Changes in Sea Level. *Phys. Chem. of the Earth*, 1961, 4, 99–185.
- [20] Feigenbaum, M. J., Quantitative Universality for a Class of Non-linear Transformations. *J. Statist. Phys.*, 1978, (19): 25–52.
- [21] Harvey, L. D. D., Modelling the Younger Dryas. *Quaternary Science Review*, 1989, (8): 137–149.
- [22] Kong Zhaochen, *et al.*, The changes of natural environment around the time of *Homo erectus Pekinensis*. *Kexue Tongbao*, 1983, 28: 181–185.
- [23] Kukla, G., Pleistocene land-sea correlation I° Europe. *Earth-Science Reviews*, 1977, (13): 307–374.
- [24] Morner, N.-A., Eustasy, Geoid Changes and Dynamic Sea Surface Changes due to the Interchange of Momentum. *in: Qin Yunshan Song Ling (eds.)*, Late Quaternary Sea-level Changes, China Ocean Press, 1984, 26–39.
- [25] Paterson, W. S. B. and Hammer, C. U., Ice Core and Other Glaciological Data. *in: Ruddiman, W. F. and Wright, H. E., Jr. (eds.)*, North America and Adjacent Oceans during the Last Deglaciation, Geol. Soc. Amer., Colorado, 1987, 91–109.
- [26] Sagdeev, R. Z., Usikov, D. A., Zaslavsky, G. M., Nonlinear Physics: From the Pendulum to Turbulence and Chaos. Harwood Acad. Pub., 1988, 304–313.
- [27] Shi Yafen, Li Bingyuan, Li Jijun, *et al.*, Quaternary Glacial Distribution Map of the Qinghai° Xizang (Tibet) Plateau. Science Press, Beijing, China, 1991.
- [28] Thom, B. G. and Roy, P. S., Sea-level Rise and Climate: Lessons from the Holocene. *in: Pearnen, G. I. (ed.)*, Greenhouse, Planning for Climate Change, 1988, 177–188.
- [29] Xu Qinqi, Climatic changes during Peking Man's time. *Acta Anthropologica Sinica*, 1982, (1): 80–90.

## Non-Linear Characteristics of Quaternary Climate Evolution of Nansha Islands and their Adjacent Sea Areas

*Li Yuan*<sup>1</sup> *Luo Binjie*<sup>1</sup> *Meng Qianxiang*<sup>1</sup> and *Li Zhiming*<sup>2</sup>

<sup>1</sup> (Lanzhou Institute of Geology, Chinese Academy of Sciences 730000)

<sup>2</sup> (Lanzhou Party School, Lanzhou, Gansu Province, P. R. China 730000)

### Abstract

The non-linear mapping results for the latest 185 Ka sediments from the Nansha Islands and adjacent sea area show that they belong to bathyal or abyssal deposits and without tectonic movements' effects. Ns87-8, Ns90-103 and Ns90-102 column core samples deposits in upper continental slope, intermediate slope and downslope, respectively. The paleoclimate non-linear mapping research suggests that there are three significant alternations of cold and warm climate for the latest 185Ka, forming four mapping division. The

alternation between oxygen isotopic 5th division and 4th division is more important than the alternation between the 6th division and 5th division. The change between 3rd and 2nd oxygen isotopic division is less important than others. This conclusion are compatible with the data for the global paleoclimate. In addition, the organic matter evolution stage are of the vertical zonation and non-linear variations in progression and transgression.

**Key words** Non-linear characteristics Quaternary Climate Evolution

## 深水牵引流沉积一书评价

由我国沉积学家高振中教授等所著的《深水牵引流沉积》一书,在中国科学院科学出版基金的资助下,最近即将由科学出版社出版,与广大读者见面。该书是国内外关于深水牵引流—沉积学一个新的领域研究的第一部专著,笔者有幸在该书发行之前阅读全文,感受颇深,欣然提笔,愿向各位同行推荐共享。

《深水牵引流沉积》主要论述了内潮汐、内波沉积及等深流沉积的基本理论、研究现状和作者近年来有关的研究成果,代表了该领域的最新进展,资料翔实,文字简洁,图文并茂。

目前对深水牵引流沉积的研究主要集中于两种类型:一是内潮汐和内波沉积,一是等深流沉积。

内波和内潮汐是近几十年来海洋学研究重要成果。大量海洋学观测资料已经表明,在现代深海盆地中内潮汐和内波作用广泛发育。内潮汐和内波引起的底流流带一般在 5—70 cm/s 的范围内,而 15—40 cm/s 的流速是常见的,这样的流速足以引起海底泥砂质沉积物的侵蚀和搬运,因此必然会在沉积中记录下来。然而沉积学界没有及时吸取海洋学中的这一重要成果,虽然国外曾有个别研究者注意到了深水沉积中的潮汐迹象。直到 1990 年,长期从事深水沉积研究的高振中教授和他的合作者对美国阿巴拉契山脉中段奥陶系深水沉积进行研究时,才成功地识别出了水道峡谷内的内潮汐沉积,用内潮汐和内波沉积的理论圆满地解释了具有双向交错纹理的砂岩和指向水道上方的单向交错层理砂岩的成因,并首次使用内潮汐沉积 (internal-tide deposit) 这一术语。这一成果在《GEOLOGY》上发表后,引起了国际沉积学界的重视,正如孙枢院士所指出的那样:“这是一位中国沉积学家首先提出的一种新的沉积相类型并得到国际的承认”。此后,作者又在我国浙江桐庐等地上奥陶统中发现了内潮汐沉积,并正在开展深入的研究。本书第二、三章对这些崭新的内容进行了详细的论述。

自从 60 年代等深流的概念出现以来,人们对等深流的研究取得了长足进展,特别是由于深海钻探计划 (1968—1983) 的成功事实和大洋钻控计划 (1985—1995) 的持续开展,使人们对等深流的认识为之一新。研究发现,不但等深流沉积分布非常广泛,其粒度范围也相当宽广 (泥级—细砾级),而且可以形成规模能与海底扇相比拟的巨大的等深流沉积体—等深岩丘,这种等深岩丘的发现是等深流沉积的突破性进展。目前已在各大洋中发现了数十个大型等深岩丘,小型等深岩丘不计其数。这充分说明等深流沉积在深海和半深海沉积中占有非常重要的位置。我国虽然暂时尚没有条件开展耗资巨大的对现代等深流沉积和等深岩丘的调查和研究,但我国学者对古代地层记录中等深岩和等深岩丘的研究做出了自己的贡献,特别是对古代等深岩丘的识别,目前国内外见诸文献报道的三个古代等深岩丘,其中两个是高振中教授及其合作者在“七五”和“八五”国家科技攻关项目研究中所发现的,即“湖南桃源九溪下奥陶统碳酸岩等深岩丘”和“鄂尔多斯台地西缘甘肃平凉中奥陶统等深岩丘”。本书第四、五、六章对等深流及其沉积的基本特征和最新成果进行了详述。

研究深水牵引流沉积,不仅对沉积学和相关学科的发展有重要理论意义,而且对沉积矿产的研究具有重要实践意义。因为深水牵引流沉积可成为良好的油气储集体。砂级等深岩和内潮汐和内波沉积与深水细粒沉积间互成层,可构成良好的生储盖组合,这一点与浊积岩相似。由于深水牵引流沉积受到过长时间的筛选,其结构成熟度较浊积岩高,原生孔隙度更发育一些,故其储集性能较浊积岩更好。深水牵引流沉积研究是一个全新的研究领域,希望广大沉积工作者和石油地质工作者都来关注这一领域的发展,相信此书的出版必将对这一领域的研究产生巨大的促进作用。这也是我愿为之摇旗呐喊的初衷。

裘亦楠