

文章编号: 1000-0550(2012)02-0318-07

# 沉积物岩芯 X 光片图像灰度数值及其影响因素<sup>①</sup>

张喜林 范德江 刘明 王亮

(中国海洋大学海洋地球科学学院 海底科学与探测技术教育部重点实验室 山东青岛 266100)

**摘要** 沉积体的 X 光影像包含了沉积物密度、结构、构造等众多信息,对 X 光影像进行数字图像分析可快速提取这些信息,成为进行沉积记录和古环境演变研究的有力手段。基于长江水下三角洲沉积物岩芯的 X 光影像,利用 Matlab 软件平台把 X 光影像转换成数字灰度图像,进而提取了岩芯灰度值;结合该岩芯的粒度等沉积学属性,探讨了灰度图像的影响因素。结果表明:沉积物岩芯的 X 光图像灰度值是沉积物组成、结构和构造的综合反映,其中粒度对灰度值起到控制性的影响。平均粒径与灰度值之间为良好的线性关系;砂粒级、粉砂粒级含量与灰度之间存在较好的正相关,而黏土粒级含量与灰度存在很好的负相关。沉积物岩芯 X 光图像的灰度值可以作为该岩芯的粒度的良好替代性指标。

**关键词** 沉积物岩芯 X 光图像 灰度 粒度 影响因素

**第一作者简介** 张喜林 男 1984 出生 硕士研究生 海洋沉积学

**通讯作者** 范德江 E-mail: difan@ouc.edu.cn

**中图分类号** P512.2 **文献标识码** A

## 0 引言

沉积物岩芯的 X 光负片图像是沉积物密度、结构和构造等属性的综合体现,由于它直观、形象和易于获得,所以在沉积学研究中得到广泛应用<sup>[1]</sup>。针对沉积物岩芯而言,图像分析具有覆盖面广、连续性好、信息量大、效率高和无损坏成像等特点,这比将沉积物岩芯剖分、以一定间隔取样、分析沉积物样品、得到相关信息的传统研究途径具有明显的优势。当今,沉积体的高分辨记录研究方兴未艾,研究时间分辨率从千年际—百年际—十年际—年代际—季节性不断提高<sup>[2,3]</sup>,这对研究手段提出了极高的要求。很显然,仅靠传统的岩芯研究手段难以适应当今高分辨率沉积记录研究的需要,而沉积物岩芯图像的无缝连续信息正好弥补了传统研究方法的不足。

X 光图像很早就应用到沉积学研究,DeMaster 等<sup>[4]</sup>于 1985 对中国东海陆架沉积作用研究中就使用了 X 光成像技术,后来的国内外许多学者使用 X 光图像揭示沉积体中的层理构造<sup>[5]</sup>、事件沉积层<sup>[6]</sup>、生物扰动构造<sup>[7,8]</sup>;近期,Genty 等<sup>[9]</sup>、秦小光等<sup>[10]</sup>利用数字图像处理技术研究了石笋生长、微层特征等,孙东怀等<sup>[1]</sup>利用 X 图像灰度值研究了南海珊瑚的生长,并试图建立灰度与海水温度联系。迄今为止,由

于对 X 光图像进行数字化处理需要专业软件以及大型仪器的支持,仅有少数学者开展了针对结构和成分单一的如珊瑚、石笋等特定沉积体的灰度数字图像研究,绝大部分关于沉积物岩芯的 X 光图像的研究仍然停留在对影像的直接识别上,缺乏从定量化方面进行深入的探讨。为此,本文基于长江口沉积物岩芯 X 光影像,利用 Matlab 软件平台把 X 光影像转换成数字灰度图像,提取了岩芯的数字灰度值,结合该岩芯的沉积学特征探讨了灰度值的主要影响因素。

## 1 沉积物岩芯的灰度图像分析原理

X 射线又称伦琴射线,波长介于  $10^{-2} \sim 10^2 \text{ \AA}$  之间,具有很强的穿透能力,并使底片曝光。由于被照射物体结构、密度和厚度等的差别,X 线被吸收的程度不同,所以到达荧屏或胶片上的 X 线的通量有差异,形成了黑白对比不同的影像。

通过 X 光片得到的图像实质上是颜色值或灰度值的数字矩阵,单色图像的每个像点即为该点的灰度值。这类图像通常显示为从最暗的黑色到最亮的白色,共有 256 级灰度。图像分析的目的是从这一矩阵中提取相应的数字信息。

沉积物岩芯是在特定时期内形成的,该时期内的气候、沉积环境的变化都可能导致岩芯物质组成、结

<sup>①</sup>国家自然科学基金项目(批准号:40976020,41030856)和国家重大基础研究发展计划项目(编号:2010CB951202)联合资助。  
收稿日期:2010-08-01;收修改稿日期:2011-05-05

构和构造上的改变,并进而导致其 X 光影像的差异。很显然,沉积物岩芯的灰度图像的影响因素远较成分、结构单一的珊瑚、石笋等 X 图像复杂。

## 2 沉积物岩芯灰度图像处理

### 2.1 沉积物岩芯

本研究所使用的沉积物岩芯(18 站: 122°37.132' E 31°00.990' N) 为 2006 年 6 月中国海洋大学“东方红 2 号”科学考察船对长江口及其邻近海域进行调查时采用重力取样器采集的,它位于长江水下三角洲的前缘部分,该处水深 20.4 m。具体位置见图 1。

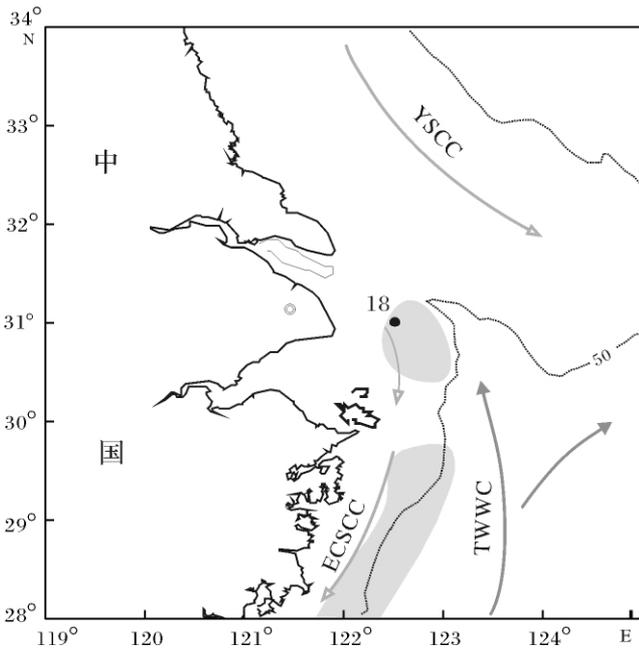


图 1 研究区及采样站位

(TWWC—台湾暖流; YSCC—黄海沿岸流; ECSCC—浙闽沿岸流。阴影区为泥质沉积体)

Fig. 1 Study area and sampling site

(TWC - the Taiwan Warm Current; YSCC - the Yellow Sea Coastal Current; ECSCC - the East China Sea Coastal Current. The shaded areas denote muddy deposition)

该站沉积物岩芯岩性以粉砂和黏土为主,两者的含量之和在 98% 左右,砂含量很少,不足 2%。个别层段粉砂较多,如 37~38 cm 处和 93~95 cm 处的粉砂含量明显增多,形成透镜状粉砂夹层。垂向上,粉砂和黏土相对含量的波动明显,并因此显示纹层构造(图 2)。总体上,该站沉积物岩芯沉积物组成较稳定,层序保存完整,反映了较为稳定的沉积动力环境。

### 2.2 沉积物岩芯 X 光成像

采用医用 SIEMENS—FX 型 X 射线成像系统对

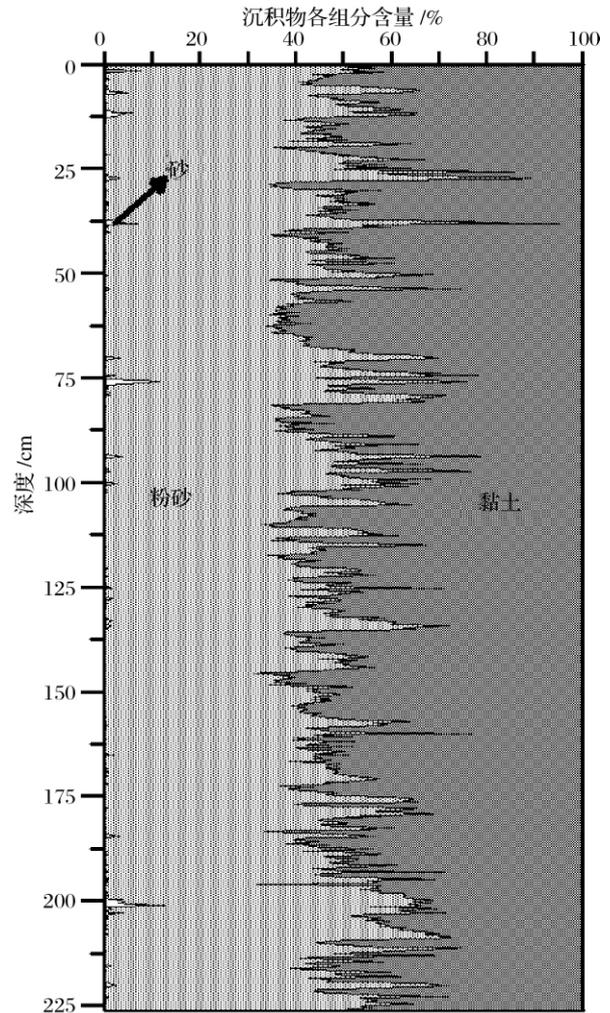


图 2 18 站沉积物岩芯的粒级组成

Fig. 2 Grain-size compositions of Core 18

18 站柱状沉积物进行 X 射线成像,仪器工作条件为 16 mA/70keV,获得的该岩芯的 X 光负片图像见图 3A。

### 2.3 灰度值提取技术

#### 2.3.1 灰度图像预处理

沉积物岩芯 X 光负片成像过程中受到采样管管壁及拍片时参照物等因素的影响,会导致 X 光负片灰度值的改变,所以必须对原始 X 光片用进行预处理。本研究使用 Photoshop 软件进行 X 光负片预处理,包括灰度转换、对比度优化等过程。预处理后的图像供后续灰度值提取使用(图 3B)。

#### 2.3.2 沉积物岩芯 X 光负片图像灰度提取

出于灰度数据与实测沉积物参数的严格对应的考虑,本研究选取了该柱样 0~55 cm 段作为研究对象。首先利用 Matlab7.0 软件中的 imread 函数读入

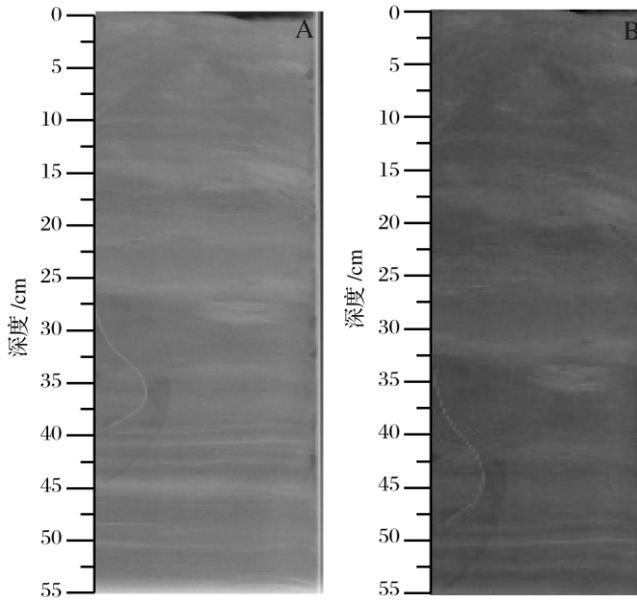


图3 18站沉积物岩芯 X 光负片图像  
 (A. 原始 X 光负片图像; B. 经预处理后的 X 光负片图像)  
 Fig. 3 X-ray negative of Core 18  
 (A. original X-ray negative; B. processed X-ray negative)

处理后的灰度图像,然后利用图像转换函数 `rgb2gray` 将该图像转换为灰度图像(图4),进而提取该灰度图像的灰度值,它是一个  $550 \times 30$  的灰度值矩阵,代表的垂向分辨率  $0.1\text{mm}$ 。限于篇幅,我们仅列出矩阵中的6行数据,见表1。

选取灰度矩阵中的第5、10、15、20、25、30等六列做图,得到6条随深度变化的灰度曲线(图5)。它们表明:该岩芯 X 光负片灰度值大部分集中在  $70 \sim 100$  之间,且这6条曲线总体变化趋势非常一致,它们在  $11\text{cm}$ 、 $26\text{cm}$ 、 $38\text{cm}$  等层位都出现明显的灰度峰值。

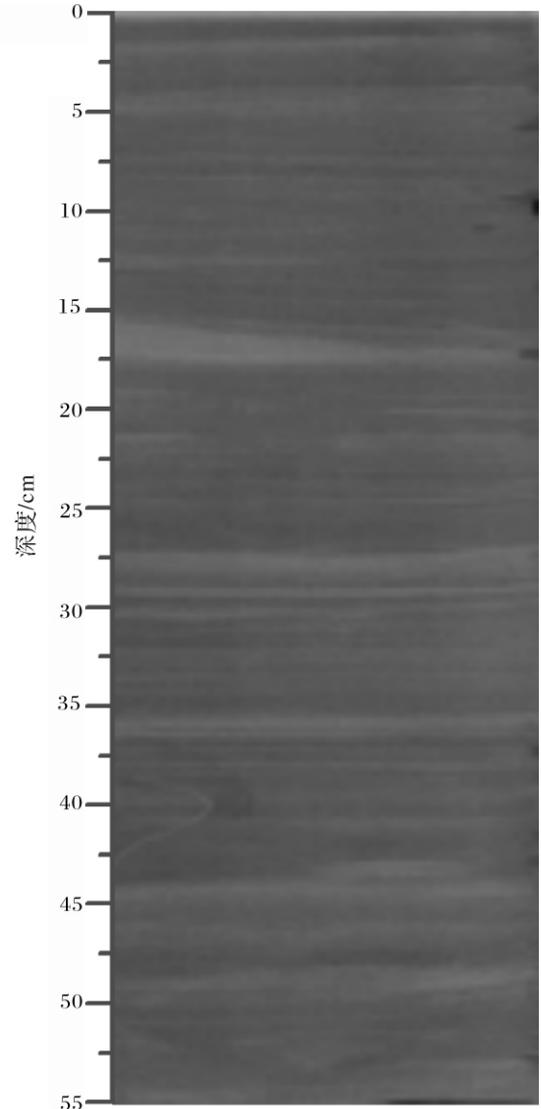


图4 18站 X 光负片灰度图像  
 Fig. 4 The gray image of X-ray radiograph negative of Core 18

表1 18站 X 光负片灰度值矩阵

Table 1 The matrix of the gray image of X-ray radiograph negative of Core 18  
 (该矩阵的行按照沉积物岩芯的长度进行排列,列按照岩芯的横截面进行排列)

82	85	91	94	92	95	96	95	93	94	90	87	88	92	92	94	97	95	90	75	49	44	55	53	58	66	64	65	68	84
82	85	92	95	93	95	96	95	94	95	89	87	88	92	92	94	96	95	91	77	54	49	57	56	61	69	69	67	71	85
86	86	94	98	97	98	98	94	94	97	92	88	87	90	90	93	94	93	92	85	75	71	75	73	78	83	83	83	85	92
89	87	96	101	102	101	98	93	95	99	93	89	86	89	89	90	92	92	94	94	95	93	92	90	96	98	98	99	98	98
89	88	95	100	102	100	96	92	95	98	94	90	84	87	89	90	90	91	94	96	103	101	100	99	104	104	103	103	103	100
87	89	93	96	97	97	94	92	95	95	92	89	86	88	89	89	89	90	93	91	96	97	97	98	101	101	99	98	100	99

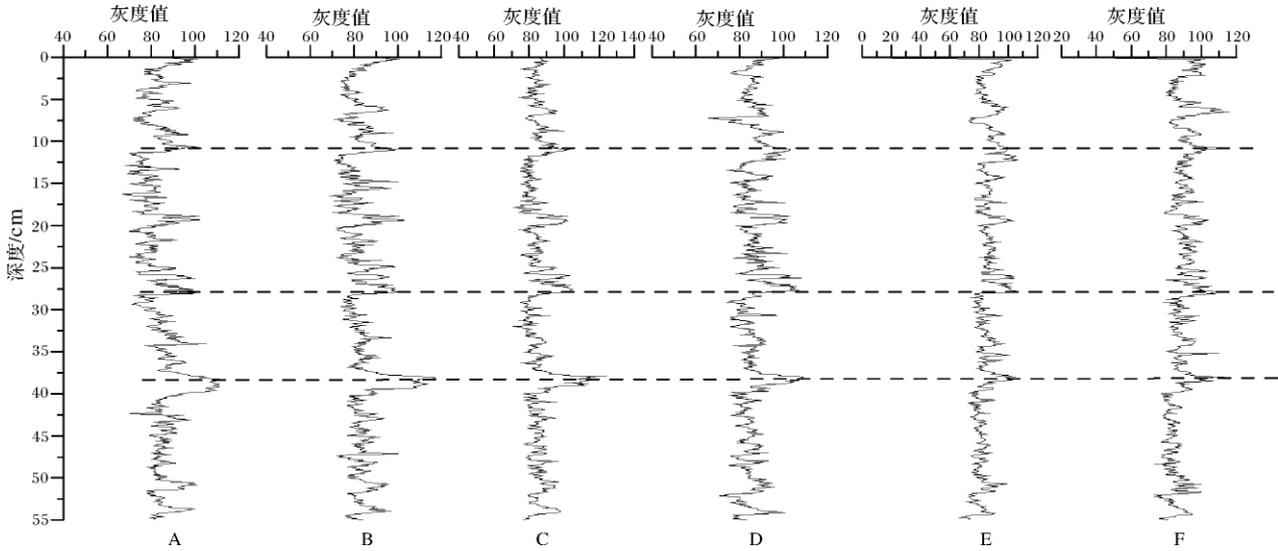


图 5 18 站沉积物岩芯灰度曲线  
(A - F 分别代表矩阵中的第 5、10、15、20、25、30 六列灰度变化曲线)

Fig. 5 The gray values curves of the Core 18

相关性分析表明这 6 列灰度曲线之间的相关性很强,仅在岩芯边缘(30 列)相关性变差(表 2)。岩芯边缘相关性变差可能与管壁两侧的岩芯变形或者与 X 光成像时的边缘效应有关。因此,我们选用位于岩芯中央的 C 列的灰度值作为该岩芯灰度垂向分布的代表,并据此探讨影响岩芯灰度值制约因素。

表 2 岩芯中 6 列灰度值的相关系数表 (n = 550)

Table 2 Correlations of the 6 rows of the gray values (n = 550)

	A	B	C	D	E	F
A	1	0.721	0.639	0.464	0.223	0.216
B		1	0.746	0.575	0.307	0.307
C			1	0.715	0.425	0.42
D				1	0.573	0.489
E					1	0.73
F						1

\*\* . Correlation is significant at the 0.01 level (2-tailed) .

### 3 影响沉积物岩芯 X 光负片影像灰度的因素

通过 X 射线成像得到的负片,其灰度值的变化实际上就是 X 射线穿透强度的表现。影响该图像灰度的因素十分复杂,除了采样、样品保存以及灰度成像过程的人为影响外,主要受到沉积物属性的影响。我们主要从以下几个方面进行探讨。

#### 3.1 沉积物粒度组成的影响

该岩芯在室内以 0.25 cm 间隔取样并使用激光

粒度分析仪进行了粒度分析,其平均粒径见图 6。通过该岩芯的粒径和灰度的对比分析发现两者之间的变化趋势基本一致,比如在 24 cm 和 38 cm 处都出现了峰值,并且在 38 cm 处为最大的峰值。

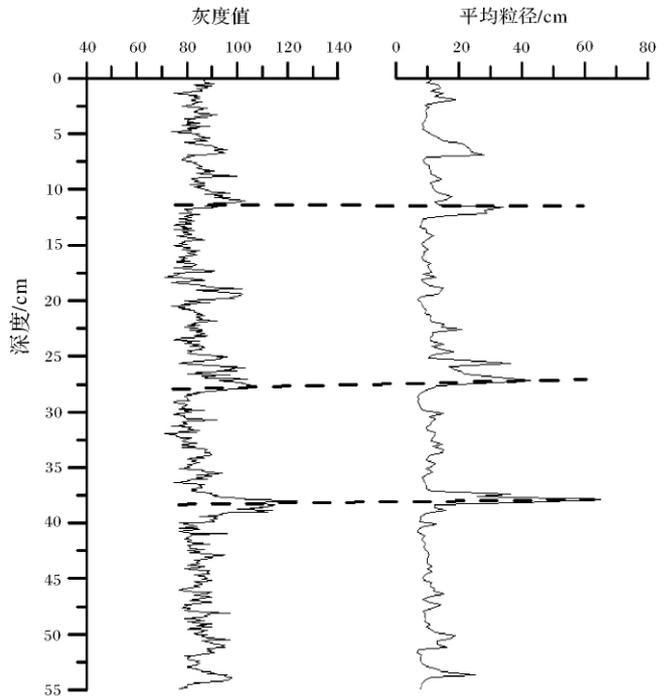


图 6 18 站沉积物岩芯平均粒径和灰度曲线  
(A. 灰度; B. 平均粒径)

Fig. 6 The curves of mean grain-size and gray value in Core 18  
(A. gray value; B. mean grain-size)

为了进一步说明平均粒径和灰度之间的关系,对不同层位沉积物的平均粒径及其对应的灰度值作相关性分析,结果表明两者之间存在着良好的线性相关(图7),有如下关系:

$$Y = 0.8665X - 62.527, R^2 = 0.80$$

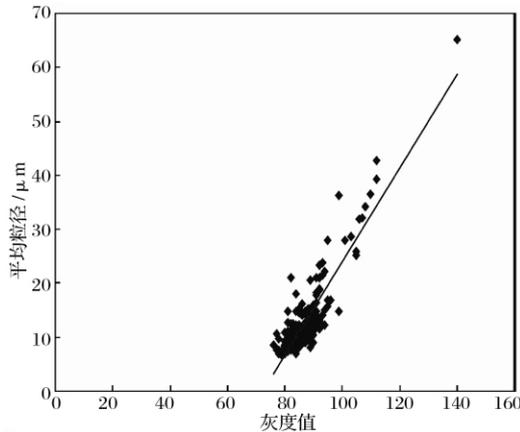


图7 灰度值与平均粒径相关图

Fig.7 The correlation between gray value and mean grain-size

根据X光负片成像原理,当物质密度大时颜色较浅、偏白;反之则较深、较暗。平均粒径指示了沉积物粒径频率分布的中心趋向,平均粒径越大,沉积物总体组成越粗,相对密度大,吸收的X光就越多,能透过的X光就越少,反映在X光负片上颜色浅,灰度值相应的增加;反之亦然。由于X光灰度值与沉积

物平均粒径具有非常好的线性相关性,完全有可能使用该关系式计算粒度数据。

接下来进一步分析沉积物灰度与沉积物中的砂、粉砂、黏土各个组分之间的相关关系,如图8所示。

从图8可以看到与灰度值与粉砂、砂粒级都为正相关关系,与粉砂的相关性优于砂,相关系数平方分别为0.69、0.39。灰度值与黏土粒级则为良好的负相关关系,相关系数平方为0.68。这进一步说明沉积物中砂、粉砂吸收的X光多,在X光负片上体现的颜色浅;相反地,黏土吸收的X光少,在X光负片上所体现出的颜色深。

考虑到平均粒度是沉积物粒级组成的综合反映,据此计算该孔粒度导致的灰度波动方差贡献为47.67,占总方差贡献的94.13%。表明粒度是控制X光负片灰度的决定性因素。

### 3.2 其它影响因素分析

虽然平均粒径对灰度值的变化有着非常重要的影响,但是并未完全控制灰度值的变化。通过粒度归一化处理,可以消除粒度对灰度的影响,即:以18站岩芯的总平均粒径为标准,把不同层位的平均粒径换算成总平均粒径,该层位的归一化灰度则依据上述得到的灰度与平均粒径的关系式进行换算得到。该方法也称为“当量粒径法”<sup>[11]</sup>。剔除粒度这一主要的影响后,得到灰度值随深度变化的曲线图(如图9)。

从图9可以清晰的看出,灰度值的变化存在明显的高频和低频的周期性波动,高频波动的间隔在1~

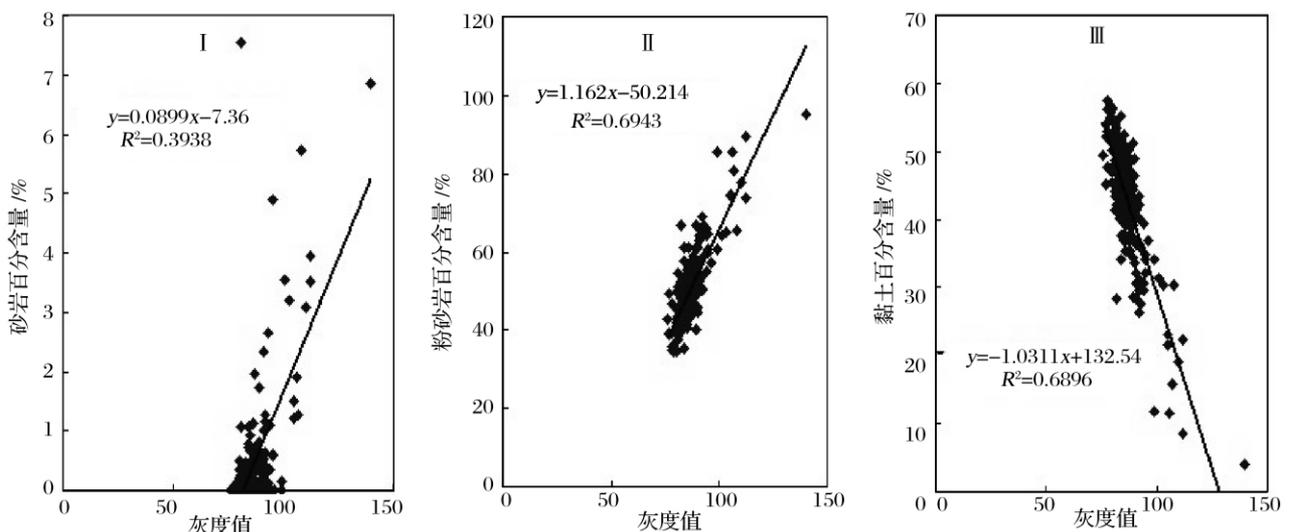


图8 灰度值与砂、粉砂、黏土粒级的相关图

( I. 灰度值和砂的相关图, II. 灰度值和粉砂的相关图, III. 灰度值和黏土的相关图)

Fig.8 The correlations between gray value and sand, silt and clay

( I. gray value and sand content, II. gray value and silt content, III. gray value and clay content)

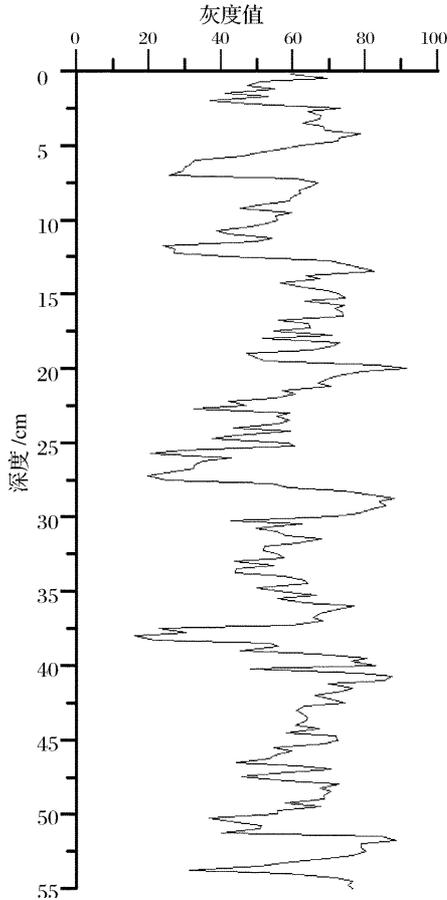


图9 18站粒度归一化后的灰度曲线

Fig. 9 The grain-size normalized gray curve of core 18

3 cm 左右, 低频波动间隔在 10 ~ 12 cm 左右, 根据该站的沉积速率  $2.1 \text{ cm/a}^{[3]}$ , 该岩芯高频、低频波动对应的时间约为 1 年及 4 年。1 年的波动与长江口沉积作用的季节性过程相符合, 而 4 年的波动则可能与 ENSO 事件有关。

无论是何种原因造成的周期性波动, 都是通过沉积物属性的差异体现出来的。以季节性变化为例, 夏秋季节, 长江输入的水量、砂量大, 沉积物颗粒细, 同时该季节生物生产力高, 沉积物中硅藻等生物组分含量高; 冬春季节, 长江输入的水量、砂量少, 沉积物颗粒较粗, 以硅藻为代表的生物生产力小, 沉积物中硅藻等生物组分含量低<sup>[3]</sup>。正是这种季节性过程导致了沉积物岩芯组成的改变, 并影响到 X 光影像。4 年的周期变化应该也与周期性的沉积物组成的改变相联系。受到目前所掌握的数据的限制, 现在尚无法确定是哪一种具体的组分影响到 X 光图像灰度的 1 年及 4 年的周期性波动。这有待下一步深入研究。

## 4 结论

(1) 沉积物岩芯的 X 射线灰度图像信息量大、信息综合性强, 可以通过该图像直接获取高分辨率沉积记录信息。

(2) 沉积物粒度与 X 射线负片图像的灰度值有着密切的关系, 其中平均粒径和灰度具有良好的线性关系, 砂、粉砂粒级与灰度值之间为正相关, 黏土粒级与灰度值存在较好的负相关。

(3) 除了粒度的影响之外, 沉积物 X 射线负片图像灰度值可能还受到沉积物中矿物、生物组分等因素的影响。

## 参考文献 (References)

- 1 孙东怀, 刘禹, 谭明. 古环境记录的数字图像分析及应用 [J]. 科学通报, 2002, 47(21): 1613-1619 [Sun Donghuai, Liu Yu, Tan Ming. The application and analysis of the digital image of paleoenvironmental records [J]. Chinese Science Bulletin, 2002, 47(21): 1613-1619]
- 2 杨作升, 陈晓辉. 百年来长江口泥质区高分辨率沉积粒度变化及影响因素探讨 [J]. 第四纪研究, 2007, 27(5): 690-699 [Yang Zuosheng, Cheng Xiao. Centennial high resolution records of sediment grain-size variation in the mud area off the Changjiang (Yangtze River) estuary and its influential factors [J]. Quaternary Science, 2007, 27(5): 690-699]
- 3 范德江, 齐红艳, 孙晓霞, 等. 长江水下三角洲现代沉积速率厘定的新途径: 季节性 Bio-Si 记录 [J]. 中国海洋大学学报, 2009, 39(5): 1025-1028 [Fan Dejiang, Qi Hongyan, Sun Xiaoxia, et al. A new method to evaluating sedimentary rate on the Yangtze River subaqueous delta: Seasonal sedimentary record of Bio-Si [J]. Periodical of Ocean University of China, 2009, 39(5): 1025-1028]
- 4 DeMaster D J, McKee B A, Nittrouer C A, et al. Rates of sediment accumulation and particle reworking based on radiochemical measurements from continental shelf deposits in the East China Sea [J]. Continental Shelf Research, 1985, 4(1-2): 143-158
- 5 Kniskern T A, Kuehl S A. Spatial and temporal variability of seabed disturbance in the York River subestuary [J]. Estuarine, Coastal and Shelf Science, 2003, 58: 37-55
- 6 Bentley S J, Sheremet A, Jaeger M. Event sedimentation, bioturbation, and preserved sedimentary fabric: Field and model comparisons in three contrasting marine settings [J]. Marine Geology, 2006, 26(17-18): 2108-2124
- 7 范德江, 徐琳, 齐红艳. 长江水下三角洲浅表沉积层中的生物扰动构造 [J]. 海洋与湖沼, 2008, 39(6): 578-584 [Fan Dejiang, Xu Lin, Qi Hongyan. Bioturbation in surficial sediment of subaqueous Changjiang river delta [J]. Oceanologia et Limnologia Sinica, 2008, 39(6): 578-584]
- 8 杨群慧, 周怀阳, 季福武, 等. 海底生物扰动作用及其对沉积过程

- 和记录的影响[J]. 地球科学进展, 2008, 23(9): 932-941 [Yang Qunhui, Zhou Huaiyang, Ji Fuwu, *et al.* Bioturbation in seabed sediments and its effects on marine sedimentary processes and records[J]. *Advances in Earth Sciences*, 2008, 23(9): 932-941]
- 9 Genty D, Baker A, Maire R. Comparison of annual luminescent and visible laminae in stalagmites, *Comptes Rendus DeL' Academie des Sciences, Ser II. Fascicule A* [J]. *Sciences Dela Terre et des Planetes*, 1997, 325: 193-200
- 10 秦小光, 刘东生, 谭明, 等. 北京石花洞石笋微层灰度变化特征及其气候意义[J]. 中国科学: D辑, 2000, 30(3): 240-248 [Qin Xiaoguang, Liu Dongsheng, Tan Ming, *et al.* The micro level gray scale characteristics of Beijing Shihuadong stalagmite and its climatic Significance[J]. *Science in China: Series D*, 2000, 30(3): 240-248]
- 11 焦春文. 工程类比法探讨岩基冲刷模拟试验[J]. 长江科学院院报, 1998, 15(2): 42-45 [Jiao Chunwen. Study on anti scour test in rock river bed by project comparison method [J]. *Journal of Yangtze River Scientific Research Institute*, 1998, 15(2): 42-45]

## The Gray Value of X-ray Radiograph in Sediment Core and Its Influencing Factors

ZHANG Xi-lin FAN De-jiang LIU Ming WANG Liang

(College of Marine Geosciences, Key Laboratory of Submarine Geosciences and Technology of Ministry of Education, Ocean University of China, Qingdao Shandong 266100)

**Abstract:** X-ray radiograph of sedimentary core contains much information, including sedimentary texture, density, structure, etc. We can quickly extract the information of climate and environment changes from sedimentary core by using digital image processing method, which may be a powerful research tool to exploring high-resolution sedimentary records and palaeo-environment evolution. Based on the matlab software platform, we obtained the X-ray images of the sediment core taken from the subaqueous Yangtze River delta and changed them into digital gray images then for extracting their gray values. Combined with the sediment properties in the core such as grain size parameters, influencing factors of the digital gray values were discussed. The results indicate that the gray values of sediment core are influenced comprehensively by sediment composition, texture and structure, with being dominantly influenced by sediment grain-size. There is a good linear relationship between mean grain-size and gray value. Furthermore, there is a positive correlation between sand, silt and gray value. In contrary, it is of a good negative relationship between clay and gray value. Generally, the X-ray image gray value of sediment core may be an ideal proxy of comprehensive sedimentary records.

**Key words:** sediment core; X-ray radiograph; gray value; grain-size; influencing factor