

新疆哈拉奇地区柯坪塔格组砂岩粒度特征

韩忠¹, 张枭^{2,3}, 刘晓煌³, 高增寿³, 赵阳刚^{2,3}, 李洪杰³

(1. 武警黄金第三总队, 四川成都 610000; 2. 中国地质大学(北京), 北京 100083;
3. 武警黄金第七支队, 山东烟台 264000)

摘要:以新疆哈拉奇地区柯坪塔格组砂岩为研究对象, 使用开源的ImageJ图像处理软件对薄片图像进行粒度测量, 用Matlab软件对获得的粒度数据进行分析统计。其粒度参数特征和概率累计曲线表明, 哈拉奇地区柯坪塔格组属于浅海相沉积。

关键词:粒度; 图像处理; ImageJ; 哈拉奇地区

中图分类号: P588.21 文献标识码: A 文章编号: 1009-6248(2013)04-0106-09

The Grain Size Characteristics of Kalpintag Formation's Sandstones in Kharrazi Region, Xinjiang

HAN Zhong¹, ZHANG Xiao^{2,3}, LIU Xiao-huang³, GAO Zeng-shou³,
ZHAO Yang-gang^{2,3}, LI Hong-jie³

(1. No. 3 Gold Geological General Party of CAPF, Chengdu 610000, China; 2. Chinese University of Geosciences, Beijing 100083, China; 3. No. 7 Gold Geological Party of CAPF, Yantai 264004, China)

Abstract: The paper selected sandstones in Kharrazi region of Kalpintag Formation as the research object, using the open source image processing software of ImageJ to measure the grain size of the slice image, and then Matlab software was used in statistical analysis of the data. Characters of granularity parameters and accumulative probability curve shows that Kharrazi region of Kalpintag Formation is of neritic facies.

Key words: grain size; image manipulation; ImageJ; Kharrazi region

沉积物的粒度大小受搬运介质和搬运营力强度控制, 与沉积环境密切相关。在判断沉积环境、鉴别不同成因类型沉积物、推断所处地埋环境时, 通常采用粒度分析方法。前人对塔里木盆地和西南天山泥盆系沉积特征、沉积环境和沉积相等作了较多的工作(施振生等, 2004; 张翔等, 2006; 王成林等, 2007; 武振杰等, 2012), 但对哈拉奇地区有关沉积物的粒度特征及可能记录的古环境信息的研究程度很低。粒度特征是碎屑岩重要的岩相分析标

志, 粒度概率累积曲线是常用的沉积相分析基础图件(杨欣德等, 2008)。随着计算机图像处理技术的日趋成熟, 结合先进图像采集设备, 使以图像处理理论为基础对粒度进行精确有效快速地统计具有较高的可行性和实用性。笔者使用开源的ImageJ图像处理软件对大量砂岩薄片粒度分析中的粒度参数进行计算, 绘制粒度概率累积曲线, 分析不同形态粒度概率累积曲线的水动力条件和沉积环境, 以期总结研究区柯坪塔格组沉积砂岩粒度概率累积曲

收稿日期: 2013-09-27; 修回日期: 2013-11-11

基金项目: 中国地质调查局地质调查项目“新疆哈拉奇地区区域地质矿产调查”(1212011120495)、“新疆1:5万卡克、色帕巴衣幅区域地质矿产调查”(1212011220661)

作者简介: 韩忠(1968-), 男, 江苏海安人, 硕士, 从事矿产勘查工作。E-mail: zh9xiao@163.com

线的规律性特征，为深入探讨其沉积环境和古地理格局演化提供依据。

1 区域地质概况

研究区位于塔里木陆块西北缘地带，是古亚洲洋和古塔里木地台古生代陆缘造山带的重要组成部分（赵仁夫等，2002；梁群峰等，2013）。

地层以古生代地层和新生代地层为主，存在奥陶系—志留系和泥盆系—石炭系2个不整合接触面，火山岩不发育（朱莲芳等，1991）。区内地质构造复杂，南部受向南逆冲的喀拉俊-柯坪塔格弧形推覆构造系统控制，北部受大型左旋压扭迈丹-喀拉铁克断裂带控制，受左行走滑运动影响，区内以北东—近东西向和北西向展布的褶皱和断裂构造组成（图1）。

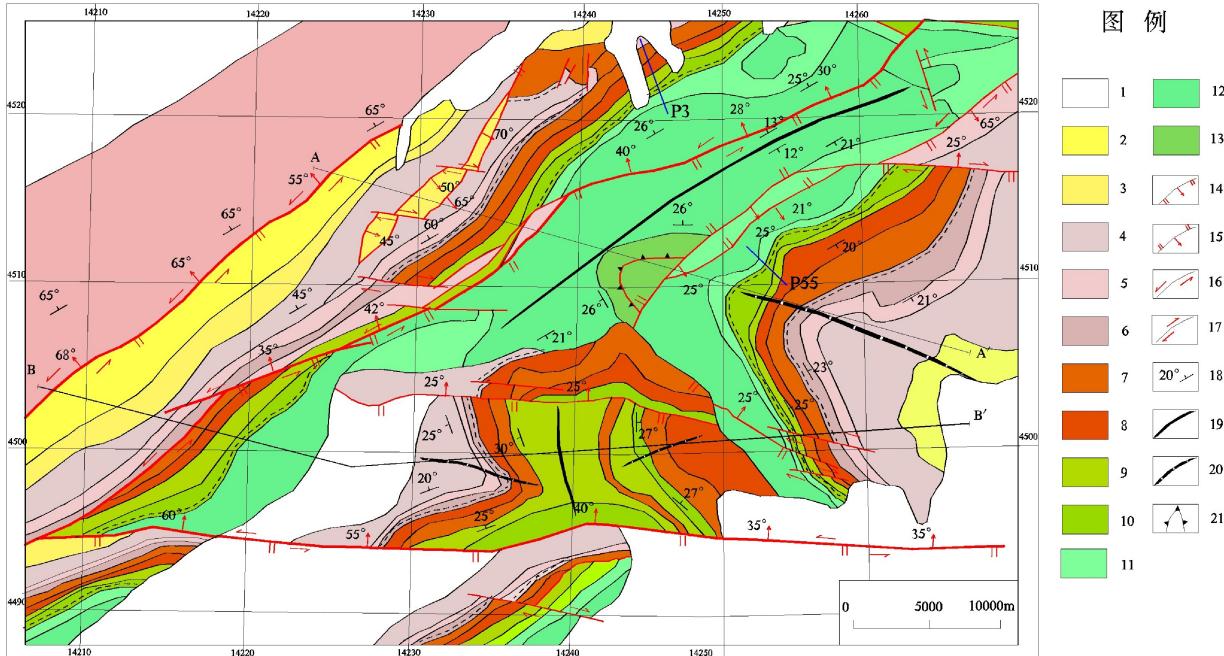


图1 哈拉奇地区区域构造简图

Fig. 1 The Halaqi regional structure map

- 1. 第四系；2. 上二叠统；3. 下二叠统；4. 上石炭统—下二叠统；5. 上石炭统；6. 下石炭统；7. 中—上泥盆统；8. 下泥盆统；
- 9. 中—上志留统；10. 下志留统；11. 中奥陶统；12. 下奥陶统；13. 寒武系；14. 正断层；15. 逆断层；16. 左行走滑断层；
- 17. 右行走滑断层；18. 产状；19. 背斜轴线；20. 向斜轴线；21. 鼻状背斜

2 样品采集与处理方法

2.1 样品采集及样品特征

样品采自新疆哈拉奇地区P3和P55剖面中志留系砂岩，共52件，时间自下而上贯穿志留系柯坪塔格组($S_1 k$)的不同层段（图2），具良好的连续性。空间上P3剖面位于比勒提东南，P55剖面位于库尔喀克库勒东南（图1），基本涵盖了研究区大面积出露的志留系，具有良好的代表性。

柯坪塔格组可分为上下2段：下段岩性主要为

灰黑色细砂岩、粉砂岩、粉砂质泥岩，夹2~3层灰白色（风化面褐色）中厚层中粒石英砂岩；上段为灰绿色中粒砂岩夹灰白色中粒石英砂岩。该组层型剖面（詹士高，1964）厚445 m（新疆维吾尔自治区地质矿产局，1999），所采样品剖面P3厚度为327 m，P55厚度为567 m。

样品主要岩性有：灰黑色细砂岩：灰黑色，细粒砂状结构，分选差，磨圆中等，杂基支撑，基底式胶结；粒屑成分有石英、长石、云母、磁铁矿、锆石和岩屑，其中，石英：次圆状-棱角状，粒径0.06~0.08 mm，有的具次生加大，约占60%；长

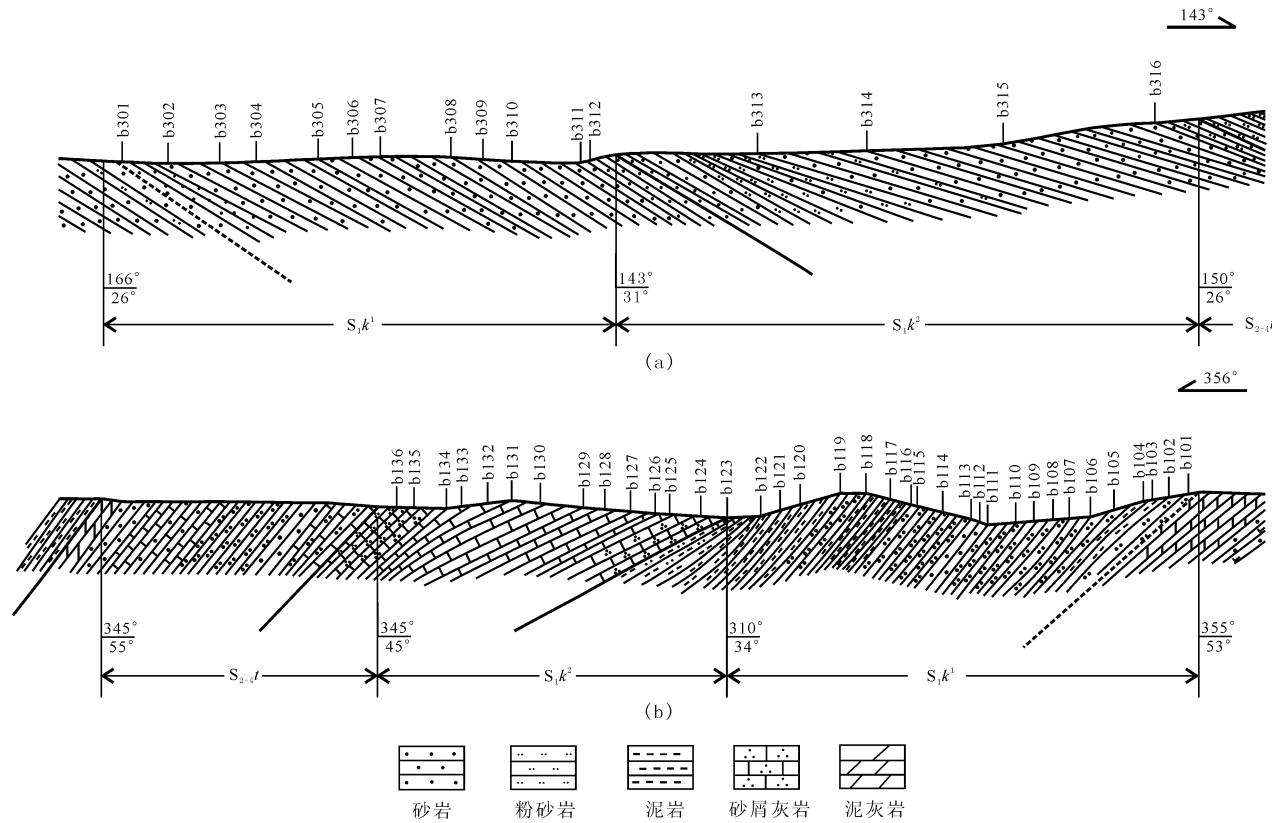


图2 新疆哈拉奇地区柯坪塔格组实测剖面图

Fig. 2 The actual profile map of Kepingtage Formation in Halaqi area, Xinjiang

石：棱角状，有的具聚片双晶，粒径 0.08 mm 左右，约占 3%；白云母：片状分布，部分已绿泥石化，约占 2%；岩屑主要由泥质岩（粒径 0.08 mm）或燧石（粒径 0.15 mm）组成，呈次棱角状，约占 10%。填隙物（25%）由杂基及胶结物组成，杂基为更细的砂质及泥质组成，胶结物为泥质、硅质及钙质、铁质，具重结晶现象，生成少量绢云母、绿泥石。

粉砂岩：风化面暗紫色或浅灰色，新鲜面暗紫红色或灰黑色，粉砂状结构，薄层状构造（层厚 1 ~ 5 cm），主要成分为粉砂及胶结物，粉砂主要为石英、少量岩屑，胶结物为泥质。

中粒石英砂岩：风化面灰黑色，新鲜面灰白色，厚层状构造（层厚 0.5 ~ 1.5 m），砂状结构，分选、磨圆中等，颗粒支撑，接触式胶结；碎屑成分：石英、岩屑。石英：次棱角状-棱角状，粒径 0.25 ~ 0.3 mm，有的具次生加大，约占 92%；岩屑主要由燧石组成，粒径为 0.3 mm，呈次棱角状，约占 3%。填隙物（5%）由胶结物组成，胶结物为泥质、硅质，具重结晶

现象，生成少量绿泥石。

粉砂质泥岩：风化面浅灰色，新鲜面灰黑色，粉砂结构，薄层状构造（层厚 2 ~ 5 mm），主要成分为粉砂、泥质。

柯坪塔格组砂岩中主要碎屑为石英碎屑，含量为 65% ~ 95%，碎屑石英以单晶石英为主，呈棱角状-次棱角状， Qm/Q 为 0.90 ~ 0.95；燧石等多晶石英在样品中含量相对较少。长石含量为 2% ~ 3%，长石碎屑中斜长石含量高于钾长石含量， K/F 为 0.1 ~ 0.3。岩屑含量为 3% ~ 32%，岩屑以沉积岩及变质岩岩屑为主，沉积岩屑主要由泥岩、碳酸盐岩等组成；变质岩屑主要为泥质变质岩类等， Ls/L 为 0.80 ~ 0.95。偶见少量火山岩岩屑，主要为酸性喷出岩屑。柯坪塔格组二段与一段石英和长石含量大致相同，二段中沉积岩和变质岩岩屑在岩屑中所占比重较一段高。

根据 Dickinson (1979) Q-F-L、 $Qm-F-Lt$ 、 $Qp-Lv-Ls$ 以及 $Qm-P-K$ 砂岩大地构造背景判别公式，判别柯坪塔格组砂岩物源为再旋回造山带及部

分陆块，表明砂岩大部分由再旋回的沉积物质组成，砂岩的成熟度比较高，石英颗粒含量高，石英与长石的比值高。

2.2 处理方法

由于固结的硅质胶结或重结晶的泥质胶结的砂岩和粉砂岩松解困难，或根本无法松解，目前采用薄片粒度分析对此类分析最为有效（丁喜桂等，2005；陈建强等，2008）。哈拉奇地区柯坪塔格组碎屑岩均为固结的硅质胶结或重结晶的泥质胶结的砂岩、粉砂岩，对粒度分析结果没有影响。笔者以砂岩的薄片数字图像为例，使用 ImageJ 软件进行粒度测量。

ImageJ (Wayne Rasband, et al, 2009) 是由美国国立卫生研究院的 Wayne Rasband 使用 Java 开发维护的开源软件，被广泛用于生物学实验。例如，细胞、染色体等粒径长度统计测量。该软件具有良好的交互性，支持插件拓展，数据输出格式方式多样，便于进行后续各种统计分析。

利用图像分析技术对砂砾岩粒度统计分为 4 个步骤：图像采集、图像处理、粒度测量和校正分析。

2.2.1 薄片数字图像获取

将制好的砂岩薄片置于配备图像采集设备的显微镜载物台上，通过物镜进行薄片观察，选择最佳观察视域，拍照抓取存储。样品薄片数字图像使用 LeicaDM2500P 偏光显微镜在正交偏振光下拍摄。放大倍数为 5×10 倍。

2.2.2 薄片数字图像处理方法

(1) 图像预处理。图像预处理的目的是校正图像，消除噪声，突出目标图像，衰减其他的特征，改善图像质量，提高对比度。在此使用中值滤波方法对图像进行平滑处理，在消除噪声的同时，还能防止边缘模糊。其滤波模板大小一般取 5×5 。

图像增强常用方法有线性增强法：

$$g(x, y) = Af(x, y) + B$$

式中： $f(x, y)$ 为原始图像的亮度值； A 为比例系数，取大于 1，拓展亮度级范围，提高图像对比度； $g(x, y)$ 为变换后亮度值。

在 ImageJ 下的图像增强，选择 $\text{adjust} \rightarrow \text{brightness/contrast}$ ，在弹出的对话框参照灰度直方图调节 4 个待设定参数值，在预览模式下使图像处于最佳，最后更新图像。或在 $\text{Process} \rightarrow \text{Math}$ 找到

Multiply，在弹出的对话框输入比例系数更新图像。

(2) 阈值分割。根据图像灰度直方图确定最佳阈值对图像进行二值化处理，实现图像分割。

选中 $\text{adjust} \rightarrow \text{threshold}$ ，在弹出对话框中根据灰度直方图及预览图像，调节界面上的 2 个参数，使图像分割最佳。对出现叠加或相连的颗粒，选择 $\text{Process} \rightarrow \text{binary}$ 中的 watershed 分水岭算法进行有效分割。二值化后的颗粒图像边缘存在毛刺现象，需再次进行滤波平滑，在此选择中值滤波，模板大小取 3 即可。

(3) 图像形态学运算。对二值化图像按顺序进行开运算、闭运算，使目标颗粒边缘封闭平滑，并对图像进行孔洞填充运算。

在 ImageJ 下的形态学处理步骤为：① 选择 $\text{binary} \rightarrow \text{Open}$ 菜单对图像进行开运算；② 选择 Closed 菜单进行闭运算；③ 选择 Fill Holes 菜单进行孔洞填充运算。

经以上方法步骤，经 ImageJ 处理的薄片图像效果见图 3。

(4) 薄片目标颗粒信息提取与保存。在 ImageJ 下获取薄片粒径步骤为：① 设置获取颗粒参数；选中 Set Measurements 菜单设置，其提供面积、周长、最大粒径、最小粒径、圆度、重心等 18 个可选参数；② 计算测量颗粒参数；在 Analyze Particles 下设置颗粒图像最小像素面积及剔除同边缘相交的颗粒后，得到颗粒参数信息统计结果；③ 保存数据至 excel 表，待后续进行校正及分析统计。

2.2.3 数据校正

(1) 图像尺寸标定。笔者以像素为单位对颗粒图像尺寸进行标定。选择精度为 $1\mu\text{m}$ 的标准刻度尺为测量基准，以标准尺寸与图像的像素比值为标定比例系数对颗粒图像进行尺寸标定。标定后的图像只需将每个颗粒尺寸的像素数除以标定比例系数即得到颗粒的实际尺寸。

(2) 薄片粒径校正。岩石薄片统计的粒度本质上是岩石随机一个截面上截面圆的粒径，它是一个平面粒径，无法完全地反映岩石的立体空间颗粒的粒度分布。同时一些粒径分析图版都是在实验基础上归纳出来的，是用筛析法得出的岩石粒度。因此需要对 2 者进行一次换算，根据弗里德曼 (Shepard F, 1954) 的实验结果，通常采用筛析校正换算公式如下：

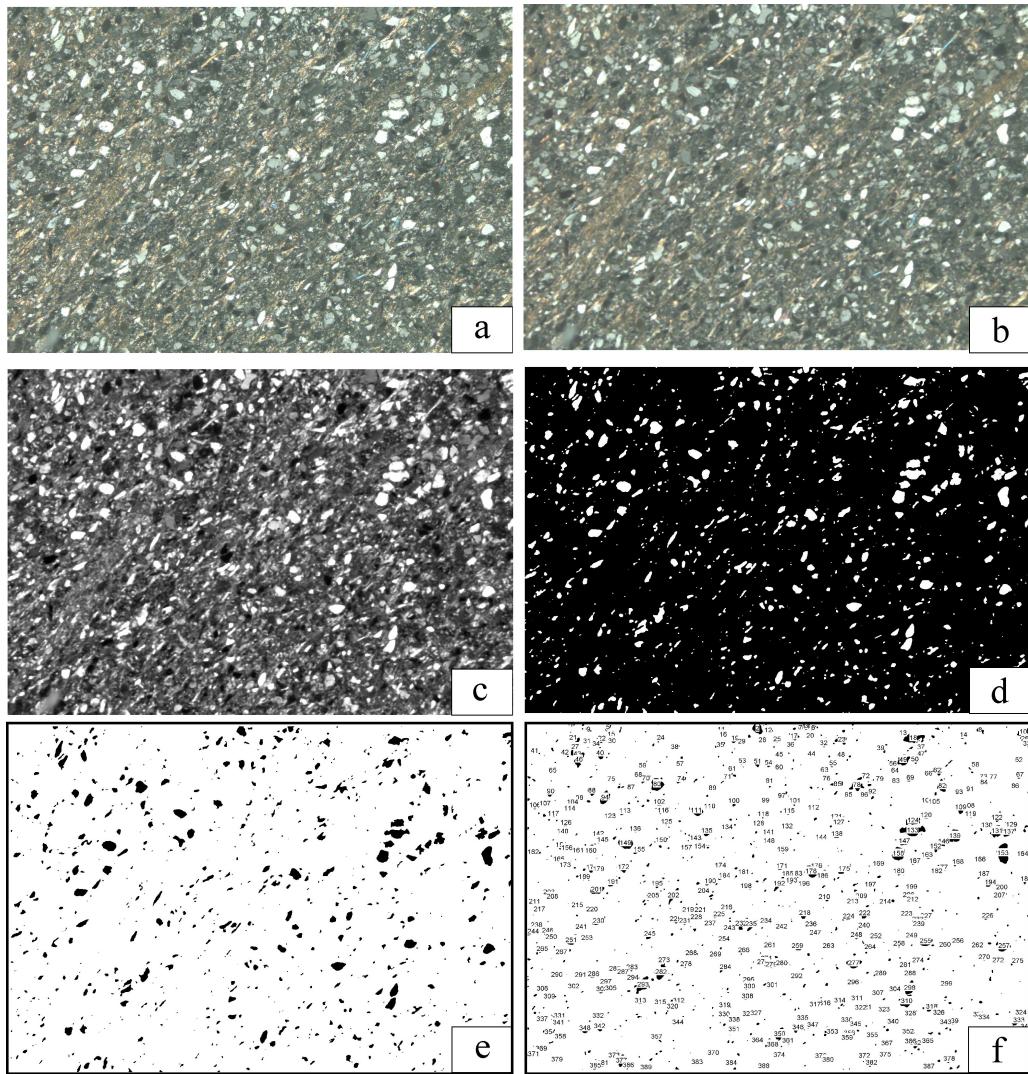


图3 ImageJ 处理的砂岩薄片图像 (5×10)

Fig. 3 image of sandstones processing base on ImageJ (5×10)

a. 原始图像; b. 3×3 中值滤波; c. 灰度化处理; d. 二值化处理; e. 孔洞填充处理; f. 粒度统计与标记

$$\varphi_s = 0.3815 + 0.9027\varphi_b$$

式中: φ_s 为筛析粒径; φ_b 为薄片粒径 (单位 $\varphi = -\log_2 D$)。

岩石薄片粒径:

$$\text{等效圆直径 } D = 2\sqrt{A/\pi}$$

式中: A 为颗粒的面积。

(3) 数据导入及校正计算。使用 Matlab 的 xlsread 导入 ImageJ 以 excel 表形式导出的薄片颗粒参数结果, 并根据以上公式计算校正薄片筛析粒径。

3 粒度特征

3.1 粒度参数特征

沉积物粒度参数是研究沉积物粒度特征以及沉积特征的一种重要方法, 主要反映沉积物来源和沉积环境。一般认为, 沉积物平均粒径和分选系数与沉积物来源关系密切, 偏态和峰态反映的是沉积环境对粒度的改造结果 (张富元等, 2003)。笔者采用福克-沃德提出的 4 种粒度参数, 即平均粒径 (M_z)、偏态 (S_k)、峰态 (K_g)、分选系数 (σ_i)。新疆哈拉奇地区柯坪塔格组沉积物粒度参数见表 1, 由此可得出该地区志留系属浅海相沉积。

表1 新疆哈拉奇地区柯坪塔格组砂岩粒度参数表

Tab. 1 The particle size parameters of Kepingtage Formation sandstones in Kharrazi region, Xinjiang

样品位置	样品数量 (件)	粒度参数(平均)								萨胡环境判别 (Y海/浅海)			
		平均粒径 (M_z)		标准偏差 (σ_i)		偏度 (S_k)		峰态 (K_G)					
		P3	P55	P3	P55	P3	P55	P3	P55				
柯坪塔格组	S_1k^2	13	4	4.47	5.31	0.94	0.58	-0.14	-0.24	0.79	1.02	139.72	119.98
	S_1k^1	23	12	4.80	5.15	0.87	0.62	-0.24	-0.17	0.94	0.84	137.25	118.30

注：萨胡环境判别公式： $Y_{\text{海}}/Y_{\text{浅}} = 15.6534 M_z + 65.7091 \sigma_i + 18.1071 S_k + 18.5034 K_G$; $Y_{\text{海}} < 65.3650$, $Y_{\text{浅}} > 65.3650$ 。

平均粒径(即粒度平均值 M_z): 代表粒度分布的集中趋势, 同时也反映了介质能量的大小。研究区柯坪塔格组一段(S_1k^1)砂岩平均粒径为 $4.80\sim5.15\varphi$, 柯坪塔格组二段(S_1k^2)砂岩平均

粒径为 $4.47\sim5.31\varphi$ 。研究区砂岩样品的粒度整体稳定, 粒级上未见砾石, 偶见粗砂, 少量中砂, 集中在细砂和粉砂, 从老到新表现为粗—细—粗的趋势, 反映了沉积环境整体较稳定(图4)。

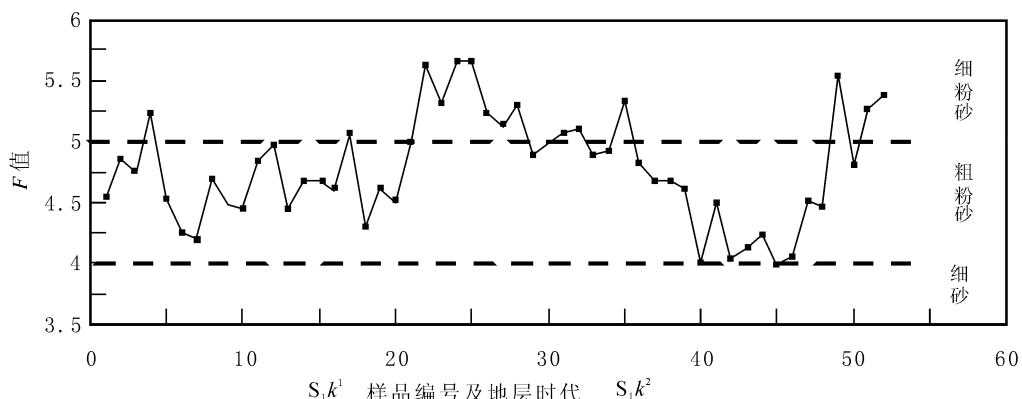


图4 研究区52个砂岩样品的平均粒径曲线图

Fig. 4 The average grain size curves of the fifty-two specimens in the study area

标准偏差(σ_i): 砂岩标准偏差是判别颗粒沉积介质环境的一项重要指标, 其对环境分析也很重要。标准偏差为0时, 表示样品粒度绝对均匀; 在0~0.5时, 表示分选性好; 在0.5~1时, 表示分选性中

等; 在1~2时, 表示分选性差; 当大于2时, 表示分选性很差。研究区52个样品的标准偏差主要集中在 $0.58\sim0.94$, 平均值为0.77(图5)。表明研究区砂岩的粒度分选中等, 自下而上有变好的趋势,

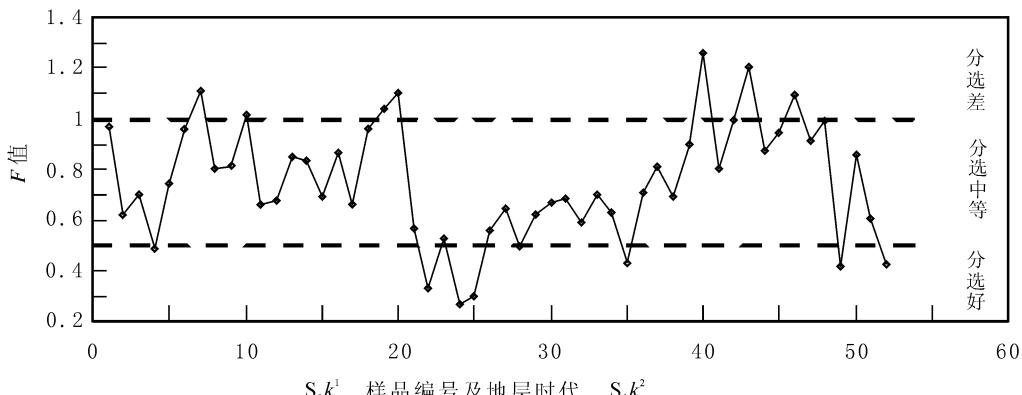


图5 研究区52个砂岩样品的标准偏差曲线图

Fig. 5 The standard deviation grain size curves of the fifty-two specimens in the study area

反映了水体逐渐变浅,水动力条件增强。

偏度(S_k):偏度反映了粒度分布的不对称性,并表明中位数与平均值的相对位置。通常, $S_k = 0$,样品粒度为对称分布; $S_k > 0$ 为正偏,表示沉积物粒度较粗,且有一个细尾部; $S_k < 0$ 为负偏,表示沉积物

集中在细粒部分,而有一个粗尾部。用这一参数能反映介质类型及搬运能力的强弱。在研究区砂岩样品偏度整体为低负偏,偶有正偏,偏度集中在 $-0.08 \sim -0.24$ (图6),表明沉积环境沉积物颗粒整体较细,含少量粗颗粒,自下而上分选有变差的趋势。

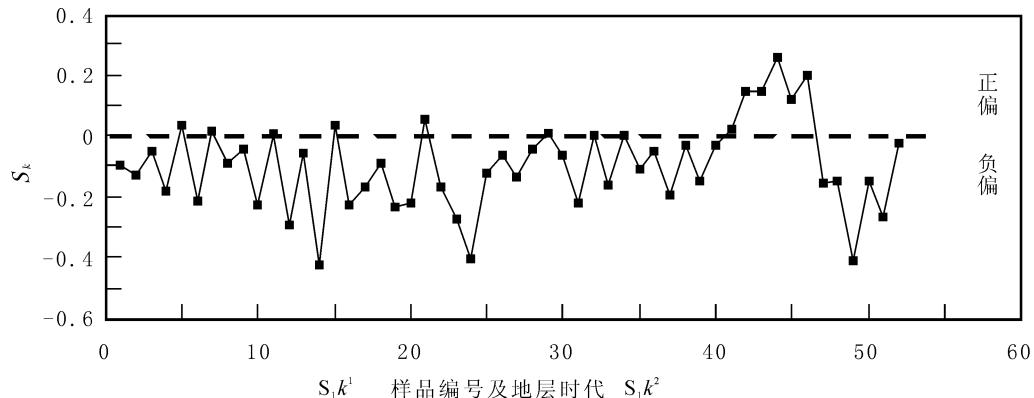


图6 研究区52个砂岩样品的偏度曲线图

Fig. 6 The skewness grain size parameter curves of the fifty-two specimens in the study area

峰态(K_g):峰态通常用来衡量粒度频率曲线的尖锐程度,也就是度量粒度分布的中部与两尾部的展形之比。正常的海滩沉积砂的频率曲线为单峰对称的正态曲线,其峰态正常,接近1,而多物源

沉积的砂岩的峰态值较低。分析结果表明,研究区大部分砂岩样品的峰态值范围集中在 $0.79 \sim 1.02$ (图7),属于中等(正态)一级,证明其物源供给单一,自下而上分选有变好的趋势。

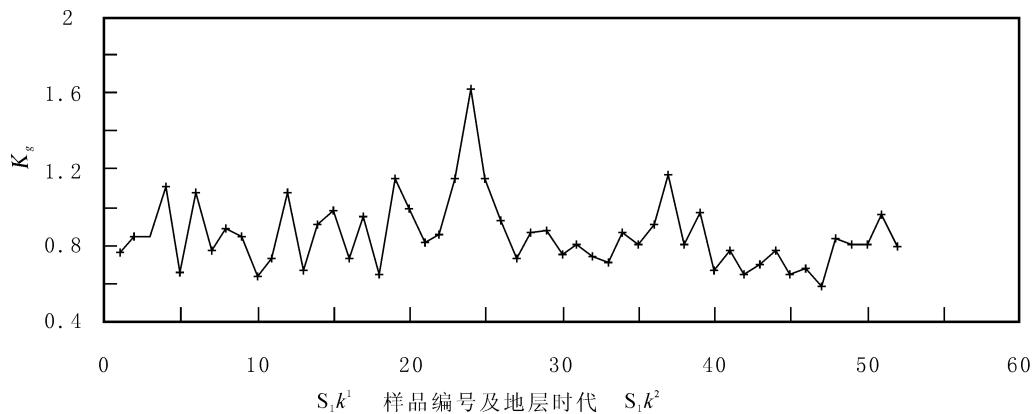


图7 研究区52个砂岩样品的峰态曲线图

Fig. 7 The kurtosis grain size parameter curves of the fifty-two specimens in study area

3.2 粒度概率累计曲线分析

不同的概率累积曲线组合特征反映了不同的沉积动力条件。在明确沉积动力条件之后,对于沉积环境的解释有一定的帮助。研究区志留纪砂岩粒度曲线、累积曲线和概率累积曲线见图7、图8,研究区柯坪塔格组砂岩粒度频率分布和概率累积曲线

基本上可分为2类。

第一组代表是P3剖面 S_1k^2 粒度曲线(图8d),其主要特点是沉积颗粒较粗,以细砂和粉砂为主,含少量中砂,分选中等,概率累积曲线为四段三跳跃-悬浮式,粒度频率曲线呈双峰。这些特点表明沉积物所处的沉积环境水动力条件弱,水体

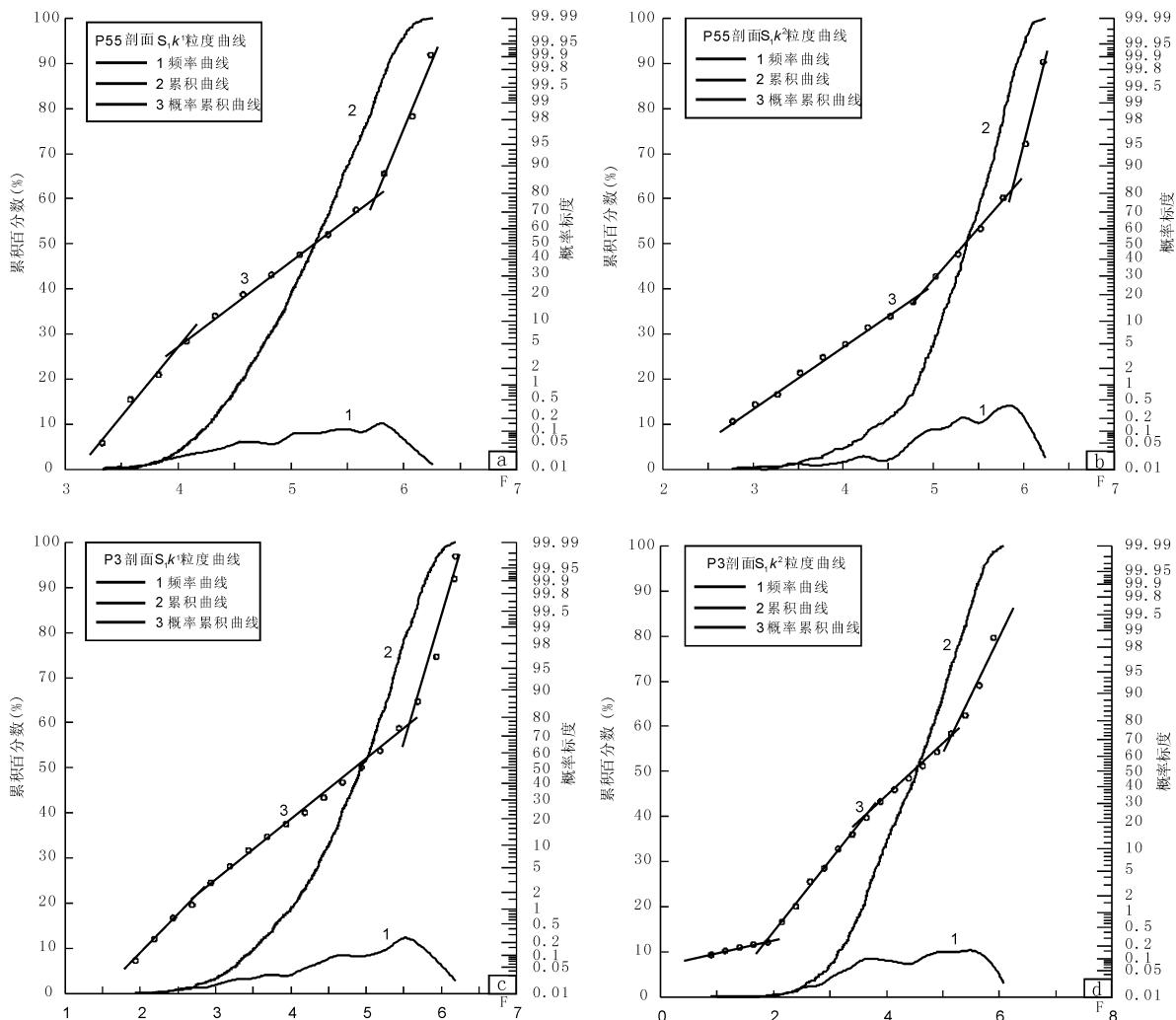


图 8 柯坪塔格组碎屑岩粒度曲线图

Fig. 8 The clastic rocks diameter curves in Kepingtage Formation

较深，物质为多种来源。

第二组代表是 P55 剖面 $S_1 k^1$ 、 $S_1 k^2$ 和 P3 剖面 $S_1 k^1$ 粒度曲线（图 8a、图 8b、图 8c），其主要特点是沉积颗粒较细，以砂和粉砂为主，分选较差，概率累计曲线为三段双跳跃-悬浮式，粒度频率曲线呈单峰。这些特点表明沉积物所处沉积环境水动力条件较弱，物质来源单一。

4 结论

(1) 笔者采用的基于数字图像处理技术的薄片粒度分析法，达到了薄片颗粒的识别、提取、几何形态的分析和数据统计的效果，能有效对沉积物进行粒度分析。该方法应用方便，成本低，效

率高。

(2) 通过分析，2 条剖面中样品的平均粒径、分选系统、偏度和峰度等具有相似的特征，概率累计曲线主要呈三段式特点。 $P3$ 剖面 $S_1 k^2$ 以砂为主，含少量砾、粉砂的较粗沉积物，主要位于水动力较强的其沉积环境，物质多种来源，受到后期现代细粒沉积作用的改造； $P55$ 剖面 $S_1 k^1$ 、 $S_1 k^2$ 和 $P3$ 剖面 $S_1 k^1$ 为以砂和粉砂为主的较细粒沉积物，主要位于水动力较弱、物质来源相对单一的其沉积环境。

(3) 柯坪塔格组二段 ($S_1 k^2$)，Y 值为 129.85，属浅海相沉积；柯坪塔格组一段 ($S_1 k^1$)，Y 值为 127.775，属浅海相沉积。结合塔里木盆地整体的沉积背景和柯坪塔格组的特征，判定新疆哈拉奇地

区柯坪塔格组砂体为浅海砂，沉积环境较稳定。

参考文献 (References) :

施振生, 朱筱敏, 王贵文, 等. 塔里木盆地志留系遗迹化石组合及其沉积环境 [J]. 西安石油大学学报(自然科学版), 2004, 19 (4): 32-39.

Shi Zhensheng, Zhu Xiaomin, Wang Guiwen, et al. Silurian ichnoassemblages of Tarim Basin and their sedimentary environments [J]. Journal of Xi'an Shiyou University (Natural Science Edition), 2004, 19 (4): 32-39.

张翔, 田景春, 彭军, 等. 塔里木盆地志留统塔塔埃尔塔格组沉积体系及沉积模式 [J]. 沉积学报, 2006, 24 (3): 370-377.

Zhang Xiang, Tian Jingchun, Peng Jun, et al. Study on sedimentary system and models for Tataertage Formation (Lower Silurian) in Tarim Basin [J]. Acta Sedimentologica Sinica, 2006, 24 (3): 370-377.

王成林, 张惠良, 李玉文, 等. 塔里木盆地志留系划分-对比及其地质意义 [J]. 新疆石油地质, 2007, 28 (2): 185-188.

Wang Chenglin, Zhang Huiliang, Li Yuwen, et al. Stratigraphic division, correlation and geologic significance of Silurian in Tarim Basin [J]. Xinjiang Petroleum Geology, 2007, 28 (2): 185-188.

武振杰, 姚建新, 陈留勤, 等. 塔里木盆地柯坪地区奥陶系层序地层研究 [J]. 岩石矿物学杂志, 2012, 31 (6): 875-884.

Wu Zhenjie, Yao Jianxin, Chen Liuqin, et al. Ordovician sequence stratigraphy of Keping area, Northwest Tarim Basin [J]. Acta Petrologia Et Mineralogica, 2012, 31 (6): 875-884.

杨欣德, 王宗秀, 郭通珍, 等. 青海巴颜喀拉山三叠系复理石沉积粒度概率累积曲线的特征 [J]. 地质通报, 2008, 27 (4): 477-490.

Yang Xinde, Wang Zongxiu, Guo Tongzhen, et al. Probability cumulative grain-size curves of Triassic flysch deposits in the Bayan Hea Mountains area [J].

Geological Bulletin of China, 2008, 27 (4): 477-490.

梁群峰, 杨克俭, 杨运军, 等. 西南天山梅尔盖西地区成矿地质条件及成矿预测 [J]. 西北地质, 2013, 46 (1): 91-102.

Liang Qunfeng, Yang Kejian, Yang Yunjun, et al. Metallogenetic prognosis in the Maiergaixi Region, Southwest Tianshan Orogeny [J]. Northwestern Geology, 2013, 46 (1): 91-102.

赵仁夫, 杨建国, 王满仓, 等. 西南天山成矿地质背景研究及找矿潜力评价 [J]. 西北地质, 2002, 35 (4): 101-121.

Zhao Renfu, Yang Jianguo, Wang Mancang, et al. The study of metallogenetic geologic setting and prospecting potential evaluation in Southwestern Tianshan mountains [J]. Northwestern Geology, 2002, 35 (4): 101-121.

朱莲芳, 马宝林. 塔里木盆地阿克苏-柯坪地区寒武系-奥陶系的沉积环境 [J]. 沉积学报, 1991, 9 (2): 55-61.

Zhu Lianfang, Ma Baolin. The sedimentary environment of Cambrian-Ordovician in the Aksu and Keping Areas of Tarim Basin [J]. Acta Sedimentologica Sinica, 1991, 9 (2): 55-61.

丁喜桂, 叶思源, 高宗军, 等. 粒度分析理论技术进展及应用 [J]. 世界地质, 2005, 24 (2): 203-207.

Ding Xigui, Ye Siyuan, Gao Zongjun, et al. Development and applications of grain size analysis technique [J]. Global Geology, 2005, 24 (2): 203-207.

陈建强, 周洪瑞, 王训练. 沉积学及古地理学教程 [M]. 北京: 地质出版社, 2008.

Chen Jianqiang, Zhou Hongrui, Wang Xunlian. Sedimentology and Sedimentary Palaeogeography [M]. Geological Publishing House, Beijing, 2008.

张富元, 章伟艳, 杨群慧. 南海东部海域沉积物粒度特征 [J]. 沉积学报, 2003, 21 (3): 452-460.

Zhang Fuyuan, Zhang Weiyan, Yang Qunhui. Characteristics of grain size distributions of surface sediments in the Eastern South China Sea [J]. Acta Sedimentologica Sinica, 2003, 21 (3): 452-460.