

# 地球化学在高分辨率层序界面识别中的应用\*

赵俊青<sup>1</sup>, 纪友亮<sup>1</sup>, 张善文<sup>2</sup>

(1. 石油大学地球资源与信息学院, 山东东营 257061; 2. 中国石化胜利油田分公司, 山东东营 257015)

**摘要:** 粘土矿物、微量元素普遍存在于各种沉积物中, 它们对环境的变化极为敏感, 它们的沉积分异、组合特征、矿物成分及其含量都从不同的角度记录了环境的变化。东营凹陷胜北断层下降盘沙河街组三段—沙河街组四段高分辨率层序地层单元中岩石地球化学标型参数的研究表明, 在古气候驱动下的湖平面变化旋回中, 沉积岩中的矿物成分(粘土矿物和胶结物)、化学成分(微量元素)等皆发生周期性变化。高分辨率层序界面上、下, 伊利石+伊/蒙混层含量及高岭石+绿泥石含量表现出截然不同的变化趋势; 界面上、下古盐度也具有完全不同的特征, 水进体系中, 从下往上高岭石相对含量增加, 蒙脱石则相应地减少, 古盐度值逐渐降低, 水退体系则正好相反, 反映不同的水进、水退序列。界面处白云质胶结物含量呈现相对较高值, 并对应着较低值的钙质胶结物和泥质胶结物。

**关键词:** 粘土矿物; 微量元素; 胶结物; 古盐度; 高分辨率层序地层; 东营凹陷

**第一作者简介:** 赵俊青, 男, 29岁, 博士生, 层序地层学

**中图分类号:** TE111.3 **文献标识码:** A

地壳中元素的迁移富集规律, 一方面取决于元素本身的物理化学性质, 另一方面又受地质环境的影响。因此, 在不同级别的高分辨率层序地层单元的基准面旋回过程中, 沉积物中化学元素变化与湖平面变化有一定的响应关系, 故我们可以沉积物元素的变化规律来识别和划分高分辨率层序地层单元。

## 1 粘土矿物法

砂砾岩中粘土矿物的种类及其含量与其形成时水介质的酸碱性和古盐度有关。通常地, 在偏酸性水介质中, 有利于高岭石的形成; 在偏碱性水介质中, 有利于蒙脱石的形成。随着水介质古盐度的增高, 会出现先沉积高岭石, 后沉积蒙脱石的现象<sup>[1]</sup>。

砂砾岩沉积后, 随着其埋深的加大、温压的升高, 不稳定的高岭石和蒙脱石逐渐向稳定的绿泥石和伊利石转化<sup>[2]</sup>。砂砾岩中粘土矿物沉积期后的转化方式直接地或间接地受封存于砂砾岩孔隙中的沉积物底水的物理化学条件影响, 而沉积期砂砾岩中的粘土矿物类型则直接受湖盆水体的物

理化学条件控制。因此砂砾岩中粘土矿物类型及其含量反映了湖盆古水体物理化学条件的变迁, 尤其古湖泊水介质的酸碱度和盐度的波动。这种波动现象通常与湖平面升降密切相关。

一般地, 湖平面上升意味着汇水量大于蒸发量, 大气降水和河流补给水充足, 湖水位上涨, 水体偏酸性且盐度下降(即水体发生冲淡作用), 故砂砾岩中高岭石相对含量增加, 而蒙脱石则相应地减少。相反, 湖平面下降表明湖盆水体相对浓缩, 水介质偏碱性且盐度增高(即水体发生咸化作用), 故砂砾岩中高岭石相对含量减少, 而蒙脱石则相应增多<sup>[3,4]</sup>。因此在一个准层序、层组甚至更小级别的高分辨率层序地层单元中, 湖平面呈现高→低变化, 砂砾岩中粘土矿物相对含量亦呈现规律性变化, 即高岭石呈高→低变化、蒙脱石呈低→高变化。由于沉积期后粘土矿物的转化作用影响, 蒙脱石向伊/蒙混层及伊利石转化, 因而掩盖了蒙脱石在一个陆相高分辨率层序地层单元旋回过程中的变化规律。但伊利石及伊利石+伊/蒙混层+蒙脱石和高岭石+绿泥石却呈现规律变化, 能较好地反映一个陆相高分辨率层序地层单元旋回过程中湖盆水体的物理化学条件波动, 因为这几种粘土矿物的大量出现与湖盆水介质的偏碱性及古盐度的相对偏高密切相关。

运用该方法对东营凹陷胜北断裂带沙河街组

\* 国家重点基金项目(G1999043304)及国家“十五”科技攻关项目(2001BA60509)部分成果

收稿日期: 2003-05-26

四段上亚段坨 762 井的扇三角洲沉积体系的取芯井段进行了高分辨率层序地层单元划分(图 1)。在由半深湖-前扇三角洲-扇三角洲前缘构成的一个准层序旋回中,由下向上高岭石+绿泥石的含量呈降低趋势,而伊利石+伊/蒙混层的含量为增加趋势。同时在该准层序内部,又可进一步根据高岭石+绿泥石和伊利石+伊/蒙混层含量曲

线的变化识别出 2 个急剧变化面,分别位于 3 436.63 m, 和 3 450.98 m 处;界面上、下粘土含量变化趋势截然不同,反映了在界面上、下水体的深浅的变化规律。据层组形成机理<sup>[5]</sup>,该准层序又可划分为 3 个层组。另外,在该旋回的 3 442.3 m 处,高岭石+绿泥石的含量呈最低值,而伊利石+伊/蒙混层含量呈最高值,该位置为控制该准层序

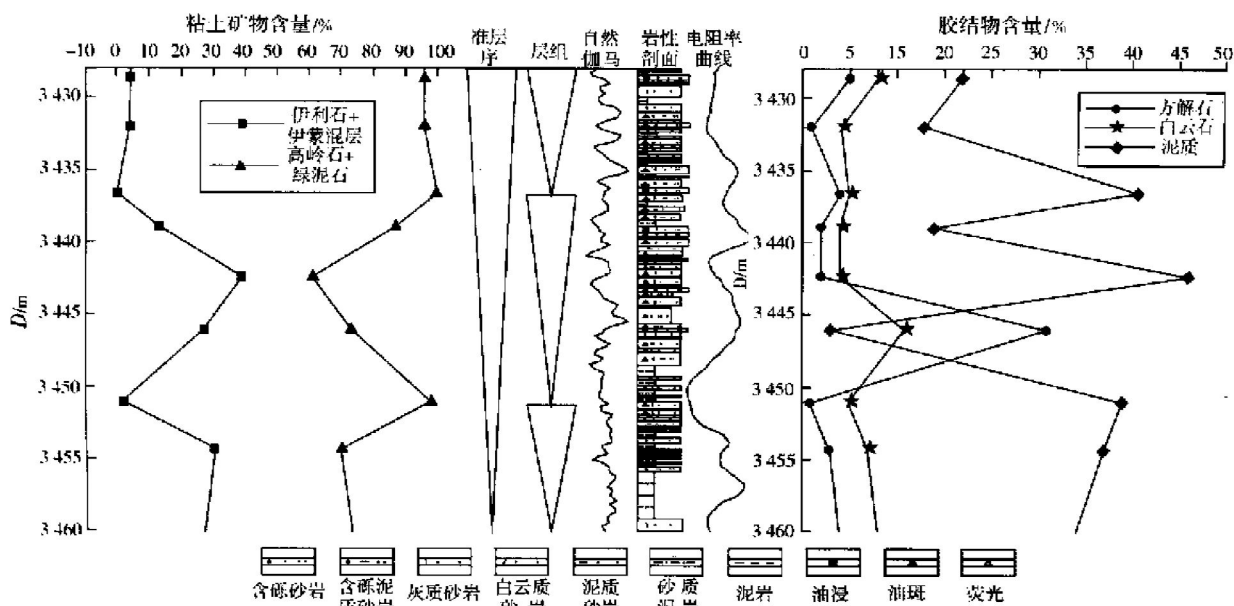


图 1 坨 762 井粘土矿物及碳酸盐胶结物含量法高分辨率层序单元划分模式图

Fig. 1 Pattern of high-resolution sequence units classified by the method of quantitative analysis of clay minerals and carbonate cements in Tuo 762 well

形成的该期 5 级湖平面上升的最高位置。

## 2 胶结物含量法

胜北断层下降盘沙河街组四段上亚段砂砾岩中胶结物主要类型有泥质、钙质和白云质 3 种。据坨 762 井岩石、粘土矿物等资料所划分的准层序、层组对比发现,在准层序、层组界面处的砂砾岩中白云质胶结物呈现相对较高值,但对应着较低值的钙质胶结物和泥质胶结物,这是由于在陆相高分辨率层序界面形成时期,湖水位下降至相对极小值,湖盆水体强烈浓缩,易于形成白云质沉积。

## 3 微量元素法

### 3.1 硼元素法

已有研究证明<sup>[6~8]</sup>,溶液中硼的浓度与盐度为线性相关,现代海水含硼量为  $4.7 \times 10^{-6}$ ,淡水

中一般不含硼。沉积物中硼含量与水体中的硼含量有关。一般认为,海相大于  $100 \times 10^{-6}$ ,陆相低于  $70 \times 10^{-6}$ 。沉积水体中,硼在沉积过程中被粘土质点吸附固定在质点表面,然后进一步被结合到结构里取代四面体层内的 Si 和 Al。不同粘土矿物结构不同,吸附和固定硼的能力也有很大的差异。一般认为伊利石吸附硼的能力是蒙脱石或绿泥石的 2 倍,是高岭石的 4 倍,故常用硼(B)计算古盐度<sup>[9,10]</sup>。

#### 3.1.1 伊利石硼法

一般选伊利石含量较高(伊利石大于 70%)的粘土岩来测试和计算,但是胜北断裂带地区各井的粘土岩中,伊利石含量都小于 70%,最高 40.9%,而伊/蒙混层含量高,需对粘土矿物进行校正,换算成“伊利石硼”,然后用伊利石的理论含钾量 8.5% 换算成纯伊利石的硼含量,“校正硼含量”再计算古盐度。因此,首先利用沃克(Walker)

作出的换算曲线<sup>[11]</sup>进行了硼含量校正,最后采用 Adams 公式<sup>[12]</sup>进行了古盐度计算。

利用计算得到的古盐度值(表 1),可以作出古盐度随深度的变化曲线。由于古盐度与古水深具有负相关对应关系,因此可以根据基准面变化原

理以及高频层序形成机理,来进行高分辨率层序地层单元的划分。根据上述原理对坨124井2 470~2 518 m 取芯井段进行了高分辨率层序地层单元划分(图 2)。在2 510.90 m 处,古盐度发生突变,之下古盐度值由0.96%突变为2.12%,之上则由

表 1 坨 124 井 Es<sub>4</sub><sup>+</sup> 伊利石硼法古盐度计算表

Table 1 Paleosalinity calculated with the method of equivalent boron cements of illite in Tuo124 well

| 井深<br>/m | 实测硼含量/<br>10 <sup>-6</sup> | 粘土矿物百分含量/% |      |      |       |      | K/%  | K <sub>2</sub> O<br>/% | 伊利石硼<br>含量/10 <sup>-6</sup> | 校正硼<br>含量/10 <sup>-6</sup> | 相当硼<br>含量/10 <sup>-6</sup> | 古盐度<br>/% |
|----------|----------------------------|------------|------|------|-------|------|------|------------------------|-----------------------------|----------------------------|----------------------------|-----------|
|          |                            | 高岭石        | 伊利石  | 绿泥石  | 伊/蒙混层 | 混层比  |      |                        |                             |                            |                            |           |
| 2 473.70 | 57.22                      | 14.0       | 19.6 | 6.0  | 60.4  | 75.0 | 1.92 | 2.314                  | 89.616                      | 329.2                      | 210                        | 1.2424    |
| 2 474.83 | 59.16                      | 15.0       | 21.4 | 4.0  | 59.6  | 74.0 | 2.47 | 2.976                  | 91.440                      | 261.1                      | 200                        | 1.1497    |
| 2 478.62 | 57.21                      | 17.1       | 14.8 | 9.9  | 58.2  | 63.0 | 1.74 | 2.097                  | 89.542                      | 363.0                      | 245                        | 1.5669    |
| 2 480.10 | 65.52                      | 13.6       | 12.2 | 5.3  | 68.9  | 65.0 | 2.2  | 2.651                  | 101.177                     | 324.4                      | 220                        | 1.3351    |
| 2 496.20 | 37.31                      | 27.1       | 18.3 | 12.7 | 41.9  | 54.0 | 1.78 | 2.145                  | 60.166                      | 238.4                      | 175                        | 0.9180    |
| 2 500.04 | 45.30                      | 44.9       | 32.6 | 14.0 | 8.5   | 43.0 | 2.23 | 2.687                  | 78.786                      | 249.2                      | 185                        | 1.0107    |
| 2 503.10 | 41.51                      | 24.6       | 36.3 | 13.1 | 26.0  | 37.0 | 1.65 | 1.988                  | 59.139                      | 252.8                      | 180                        | 0.9643    |
| 2 506.90 | 49.23                      | 27.7       | 29.1 | 12.4 | 30.8  | 36.0 | 1.46 | 1.759                  | 72.954                      | 352.5                      | 240                        | 1.5205    |
| 2 508.45 | 52.36                      | 26.9       | 18.3 | 13.1 | 41.7  | 45.0 | 1.38 | 1.663                  | 81.950                      | 418.9                      | 280                        | 1.8913    |
| 2 510.90 | 65.33                      | 31.2       | 40.9 | 9.8  | 18.1  | 55.0 | 1.53 | 1.844                  | 97.913                      | 451.4                      | 305                        | 2.1231    |
| 2 512.85 | 53.65                      | 38.9       | 22.5 | 14.1 | 21.5  | 36.0 | 2.65 | 3.193                  | 94.280                      | 251.0                      | 180                        | 0.9643    |

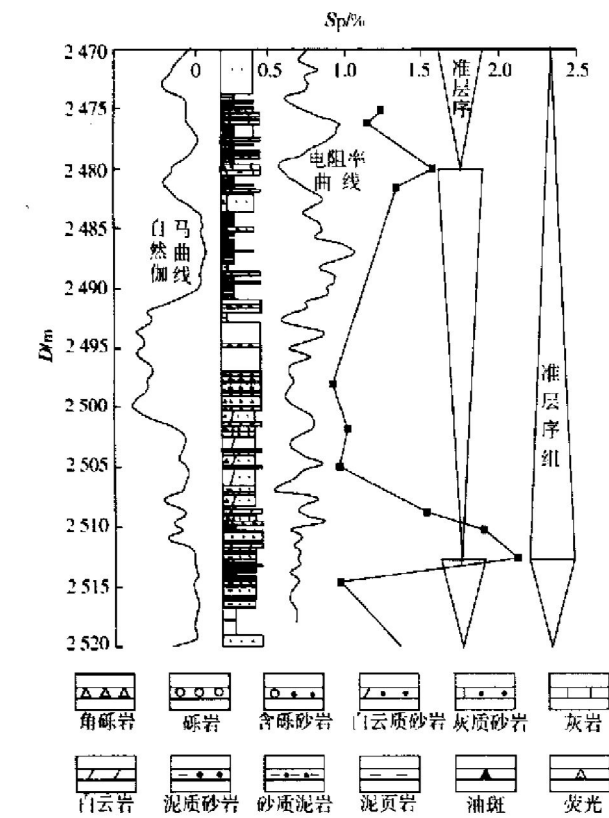


图 2 坨 124 井伊利石硼古盐度法高分辨率层序单元划分模式图

2.12%变为 1.24%。据此将该研究井段划分为 2 个准层序组,2 510.90 m 之下为一进积式准层序组;之上为一退积式准层序组,在其内部 2 478.62 m 处又可识别出一古盐度突变面,据此该准层序组进一步细化为 2 个准层序。该结果与岩芯资料具有很好的一致性。在利用古盐度曲线识别出的2 510.90 m,2 478.62 m 两个高频层序界面处,在岩芯资料上均对应于含膏的白云岩或灰质白云岩。

3.1.2 高岭石硼法

该方法是 Couch 在研究尼日尔河地区第三纪地层时提出的<sup>[7]</sup>。该方法的优点是考虑了多种粘土矿物的存在及其吸附能力的差别,较符合自然界的事实,适用的盐度范围较广,为 0.1%~3.5%,缺点是没有考虑到成岩过程粘土矿物组分变化的影响。当其变化不大时,可用该法。

利用高岭石硼法计算得到的古盐度(表 2)对坨 711 井第 I 层序湖侵体系域中的 3 260.0~3 320.0 m 进行了准层序划分。在 3 285.0 m 附近古盐度发生突变,从 0.85%骤降到 0.572%,说明水深在此处变深,形成一准层序边界。据此将该井段划分为 2 个准层序(图 3)。

Fig. 2 Pattern of high-resolution sequence units classified by the paleosalinity calculation with the equivalent boron cements of illite in Tuo124 well

表 2 坨 711 井  $E_{s3}^{\text{下}}$  高岭石硼法古盐度计算表

Table 2 Paleosalinity calculation by the method of equivalent boron cements of kaolinite in Tuo711 well

| 井深/m     | 实测硼含量/ $10^{-6}$ | 粘土矿物百分含量/% |      |      |       |      | 高岭石硼/ $10^{-6}$ | 古盐度/% |
|----------|------------------|------------|------|------|-------|------|-----------------|-------|
|          |                  | 高岭石        | 伊利石  | 绿泥石  | 伊/蒙混层 | 混层比  |                 |       |
| 3 198.61 | 100              | 15.0       | 20.8 | 5.0  | 59.2  | 55.0 | 35.730          | 13.41 |
| 3 270.44 | 49.62            | 16.0       | 20.5 | 4.9  | 58.6  | 79.0 | 19.879          | 8.48  |
| 3 274.13 | 58.03            | 14.2       | 15.9 | 8.8  | 61.1  | 60.0 | 21.776          | 9.11  |
| 3 277.6  | 52.14            | 10.2       | 10.6 | 7.2  | 72.0  | 60.0 | 19.412          | 8.32  |
| 3 280.15 | 56.35            | 25.0       | 20.2 | 10.8 | 44.0  | 50.0 | 21.723          | 9.09  |
| 3 281.08 | 45.41            | 46.9       | 32.6 | 12.3 | 8.2   | 30.0 | 19.762          | 8.44  |
| 3 283.86 | 33.64            | 26.9       | 34.0 | 11.0 | 28.1  | 30.0 | 11.995          | 5.72  |
| 3 288.36 | 54.67            | 28.8       | 29.4 | 10.1 | 31.7  | 30.0 | 19.925          | 8.50  |
| 3 289.02 | 48.78            | 28.1       | 16.9 | 11.7 | 43.3  | 20.0 | 17.739          | 7.76  |
| 3 296.18 | 52.14            | 31.9       | 41.2 | 7.1  | 19.8  | 20.0 | 18.478          | 8.01  |
| 3 309.4  | 47.1             | 22.5       | 28.9 | 11.5 | 34.1  | 20.0 | 16.593          | 7.36  |

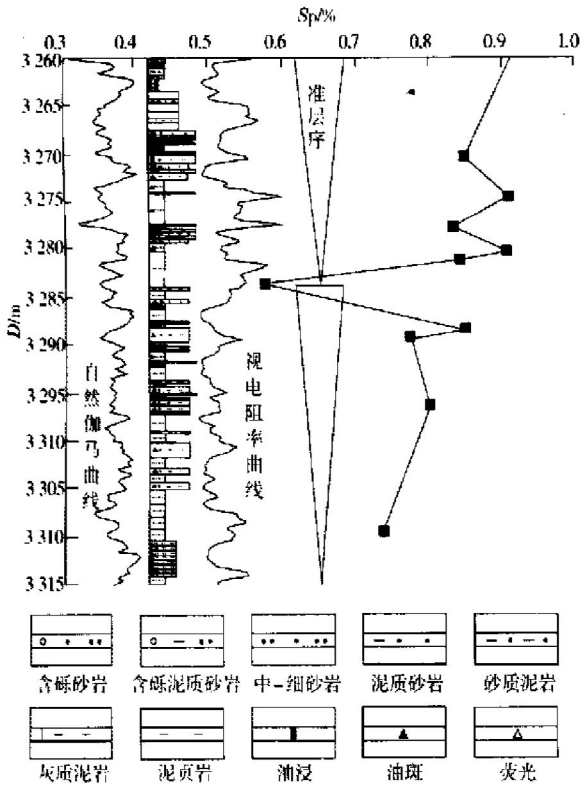


图 3 坨 711 井高岭石硼古盐度法  
高分辨率层序单元划分模式图

Fig. 3 Pattern of high-resolution sequence units classified by the paleosalinity calculation with the equivalent boron cements of kaolinite in Tuo711 well

3.2 沉积磷酸盐 Fe/Mn 法

3.2.1 沉积磷酸盐法

自 Nelson 于 1967 年提出这种方法<sup>[13]</sup>以来,得到了较广泛的应用。研究证实,沉积磷酸钙组分(Ca/(Ca+Fe))与盐度成正比关系。磷酸铁的含磷量在盐度较高的海相沉积物中偏低,在盐度低

的陆相沉积物中偏高,而磷酸钙中的含磷量在海相沉积中偏高,在陆相沉积中偏低。一般认为,磷酸钙组分大于 0.90(或 0.80)者,显示为海相沉积,小于 0.65 者显示为陆相沉积。

对坨 715 井第 I 层序利用沉积磷酸盐法计算得到的古盐度进行高频层序划分。从图 4 中可以看出,在 3 223.0 m 以浅古盐度值从 0.01%增大至 0.06%,反映了一种水体向上变浅的变化趋势;从

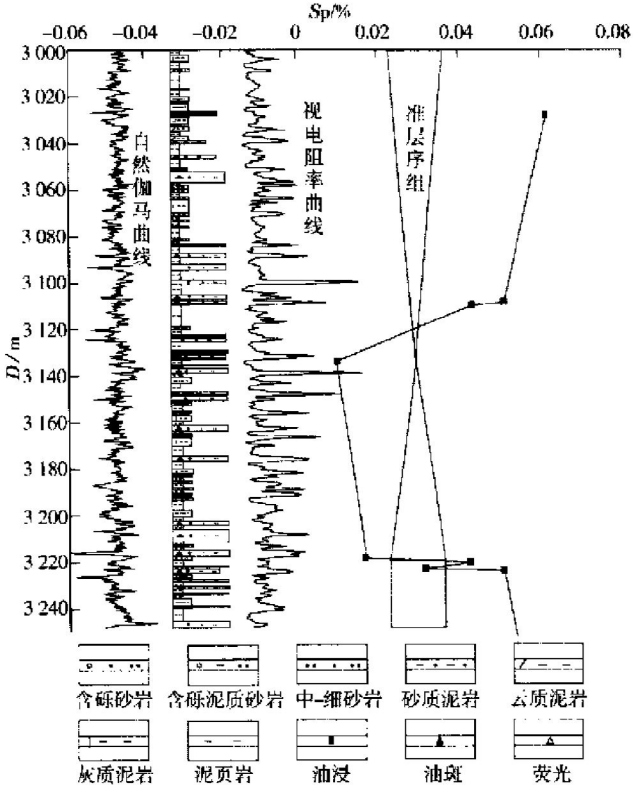


图 4 坨 715 井沉积磷酸盐法高分辨率  
层序单元划分模式图

Fig. 4 Pattern of high-resolution sequence units classified by the content of sedimentary phosphate in Tuo715 well

3 218.35 m 到 3 133.0 m 古盐度值由 0.017% 缓慢减小到 0.011%, 反映了一种水体缓慢加深的深水沉积环境; 而 3 133.0 m 以浅古盐度值基本保持在 0.03%~0.06% 之间, 变化幅度较小。根据上述古盐度变化规律, 将其划分为 3 个准层序组, 3 223.0 m 以深为一进积式准层序组, 3 223.0~3 133.0 m 为一退积式准层序组, 3 133.0 m 以浅为一加积式准层序组。同时根据这 3 个准层序组的组合关系, 还可以确定 3 133.0 m 为最大湖泛面, 以深为湖侵体系域沉积, 以浅为湖退体系域沉积。

### 3.2.2 $\text{Fe}^{2+}/\text{Mn}^{2+}$ 法

水体由浅变深,  $\text{Fe}^{2+}$  含量降低, 而  $\text{Mn}^{2+}$  含量升高。因此可以利用  $\text{Fe}^{2+}/\text{Mn}^{2+}$  值的相对大小判断水体深度的变化,  $\text{Fe}^{2+}/\text{Mn}^{2+}$  值越大, 水体越浅, 该比值越小, 水体越深。

利用 Fe/Mn 法对新坨 743 井段 2 930.0~2 980.0 m 进行了高频层序划分(图 5)。在

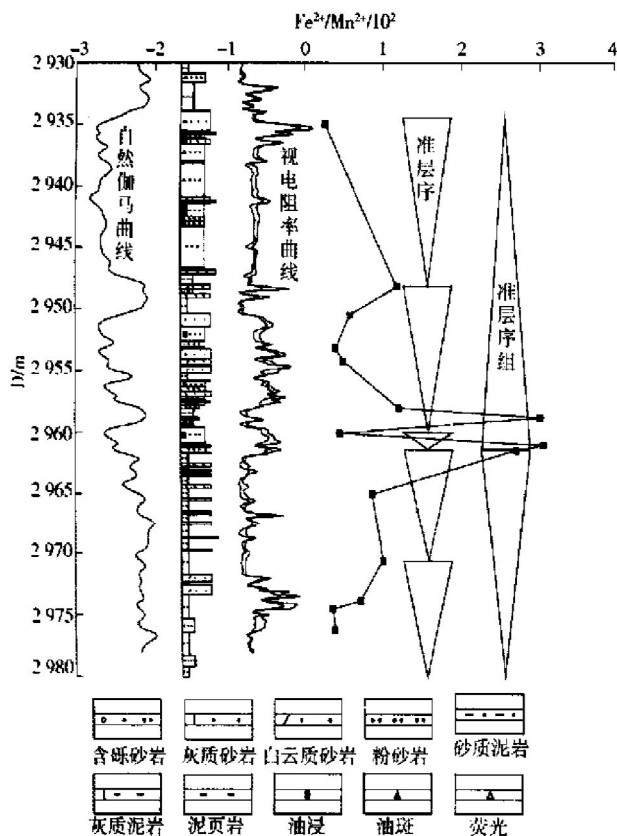


图 5 新坨 743 井 Fe/Mn 法高分辨率层序单元划分模式图

Fig. 5 Pattern of high-resolution sequence units classified by the ratio of Fe/Mn in Xintuo 743 well

2 959.3 m 处,  $\text{Fe}^{2+}/\text{Mn}^{2+}$  比值突然减小, 之上  $\text{Fe}^{2+}/\text{Mn}^{2+}$  比值向上的由大变小, 显示了水体向上加深的退积序列; 之下  $\text{Fe}^{2+}/\text{Mn}^{2+}$  比值向下变小, 显示水体由下向上逐渐变浅的进积系列。根据这种变化趋势, 以 2 959.3 m 为界划分为 2 个准层序组, 之上为一退积式准层序组, 其内部可进一步细化出 3 个准层序; 2 959.3 m 以下为一进积式准层序组, 内部细化为 2 个准层序。

### 参 考 文 献

- 1 赵永胜. 云南星云湖断陷湖盆中粘土矿物组合特征与沉积环境的初步探讨[J]. 海洋与湖沼, 1993, 24(5): 447~455
- 2 顿铁军, 高约友, 张丽虹. 粘土矿物与油层保护[M]. 西安: 西北大学出版社, 1994. 27~31
- 3 胡受权. 泌阳断陷下第三系核三段上段陆相层序各体系域岩石地球化学旋回性特征[J]. 地质地球化学, 1998, 26(2): 45~52
- 4 胡受权. 陆相层序界面的岩石地球化学标志探讨[J]. 石油学报, 1999, 20(1): 24~29
- 5 纪友亮, 张士奇, 张宏, 等. 层序地层学原理及层序成因机制模式[M]. 北京: 地质出版社, 1998. 24~38
- 6 Harder H. Boron content of sediment as a tool in facies analysis sediment[J]. Geomorph, 1970, 4(1): 153~175
- 7 Couch E L. Calculation of paleosalinities from boron and caly mineral data[J]. AAPG Bull, 1971, 55(10): 1 829~1 837
- 8 Potter P E, Shimp N P, Witters J. Trace element in marine and fresh-water argillaceous sediment[J]. Geochimi Cosmochim Acta, 1963, 27: 669~694
- 9 龙天才. 关于应用硼判别沉积环境的有效性问题的[A]. 见: 中国地质学会第四纪冰川与第四纪地质专业委员会, 江苏省地质学会合编. 第四纪冰川与第四纪地质论文集(5)[C]. 北京: 地质出版社, 1988. 233~235
- 10 周仰康, 何锦文, 王子玉. 硼作为古盐度指标的应用[A]. 见: 周明鑑编. 沉积学和有机地球化学学术会议论文集[C]. 北京: 科学出版社, 1984. 55~57
- 11 Walker C T, Price N B. Departure curves for computing paleosalinity from boron in illites and shales[J]. AAPG Bull, 1963, 47(5): 833~841
- 12 Adams T D, Haynes J R, Walker C T. Boron in Holocene illites of the dovey estuary wales and its relationship to paleosalinity in cyclethems[J]. Sedimentology, 1965, 4: 189~195
- 13 Nelson B. Sedimentary phosphate method for estimation paleosalinites[J]. Science, 1967, 158(3803): 917~920

(Please Turn to Page 273)

middle to lower  $E_{s3}$  and the related oil are characterized by  $Pr/Ph > 1$ , and relatively high concentration of hopane and dibenzofuran contents, representing freshwater lacustrine genesis. It is found that methylsteranes including dinosteranes are of importance to indicating sedimentary environment and even specific species of organisms. The algae-rich  $E_{s4}$  shales deposited in brackish water in the southern slope of Niuzhuang subsag are rich in  $C_{28-30}$  4-methyl steranes and dinosteranes, and but very small amount of dinosterane in the  $E_{s4}$  source rock buried at a depth over 2700 m. Similar phenomenon has been observed in  $E_{s3}$  mudstones deposited in fresh water, i. e.  $C_{28}$ ,  $C_{29}$ ,  $C_{30}$  4 $\alpha$ -methyl- $\Delta^5$ -sterane of  $E_{s3}$  mudstone distribute in the shape of "V" in the  $m/z$  231 mass chromatogram, while those in  $E_{s4}$  source rock have a linear distribution, suggesting that they have apparently different paleoenvironment and related geochemical environment. Analyses of formation water and trace element also show that the sedimentary environments in  $E_{s3}$  and  $E_{s4}$  are quite different. The Sr/Ba ratio, boron content, paleosalinity and saltiness in  $E_{s4}$  are relatively higher than those in  $E_{s3}$ . In a word, the development of the Tertiary lake in this area has been closely related to the tectonic movement and paleoclimates. Sedimentary environment and biomarker index show that the oil field in the deeper part of Niuzhuang subsag have mainly been sourced by the  $E_{s3}$  source rocks. They are actually of lenticular oil reservoirs characterized by short-distance migration and indigenous oil generation and accumulation. The oils generated from  $E_{s4}$  have mainly been accumulated in the tectonically high position, such as southern slope of Niuzhuang subsag and the adjacent area. They are characterized by relatively long-distance migration. The sedimentary environment indexes indicate that most of the oils discovered in the southern slope have been sourced from Niuzhuang subsag, only Guangli oilfield and the oil pools in northern Bamianhe oilfield have been sourced from Guangli subsag and adjacent area. It can, therefore, be concluded that paleoenvironment is one of the most important factors having controlled oil and gas distribution in the area.

**Key words:** Niuzhuang subsag; paleoenvironment; source rock; oil; biomarkers

(Continued from Page 268)

## APPLICATION OF GEOCHEMICAL METHODS IN THE RECOGNITION OF HIGH-RESOLUTION SEQUENCE BOUNDARY

Zhao Junqing<sup>1</sup> Ji Youliang<sup>1</sup> Zhang Shanwen<sup>2</sup>

(1. Resources and Information College, University of Petroleum, Beijing;

2. Shengli Oilfield Company, SINOPEC, Dongying, Shandong)

**Abstract:** Clay minerals and trace elements are widely distributed in the different types of sediments, which are so sensitive to environment change. The characteristics of clay minerals (sedimentary differentiation, mineral assemblages, and mineral composition and contents) has provided the information of environment change during their formation process. After studying the typical lithogeochemical parameters of high-resolution sequence units in the 3rd and 4th of Shahejie Fm in the fall-wall of Shengbei fault, Dongying depression, it has been found that mineral composition (including clay minerals and cements), chemical constituents (trace elements) would be periodically changed with the pace of change cycle of lake surface controlled by paleoclimate. The contents of illite + mixing-stratified illite/semectite and kaolinite + chlorite as well as paleosalinity show distinct change features above and below high-resolution sequences boundary. In the water transgressive system, the content of kaolinite is increased but the content of semectite and value of paleosalinity are gradually reduced from bottom to top. However these characteristics in water regressive system would be opposite. On the sequence boundary under different transgressive and regressive water systems, the contents of dolomitic cement is relatively high, while the contents of calcitic and mixing cements is relatively low.

**Key words:** clay minerals; trace element; cement; paleosalinity; high-resolution sequence stratigraphy; Dongying depression