

文章编号: 1000-0550(2004)01-0079-08

陆相高分辨率层序界面识别的地球化学方法

赵俊青¹ 纪友亮² 张世奇³ 夏 斌¹

1(中国科学院广州地球化学所 广州 510640)

2(同济大学海洋与地球科学学院 上海 200092)

3(石油大学地球资源与信息学院 山东东营 257061)

摘 要 粘土矿物、微量元素普遍存在于各种类型的沉积物和沉积岩中,它们对环境的变化敏感,同时它们的沉积分异、组合特征、矿物成分及其含量都从不同的角度记录了形成过程中各种环境因素的变化。这些对恢复古环境,研究陆相湖盆水深变化具有重要的指示意义。通过对东营凹陷胜北断层下降盘沙三段-沙四上段各层序内部高分辨率层序地层单元中岩石地球化学标型参数的研究发现,在一个高分辨率层序地层单元形成过程中,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(主要指粘土矿物和胶结物)、化学成分(微量元素)等皆发生周期性变化。

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 胜北断层下降盘 东营凹陷

第一作者简介 赵俊青 男 1974年出生 博士研究生 层序地层学 沉积学及石油地质学

中图分类号 P593 **文献标识码** A

1 引言

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。

2 粘土矿物法

在地质演化过程中,古环境特别是古气候会发生突变,从而引起水介质性质发生变化。这种变化对于各种矿物的生成、转变、消失有着直接的影响,其中粘土矿物对环境变化的反应尤为敏感。显然,在不同环境中形成的沉积体系中,粘土矿物类型及其组合特征必然会因环境的变化而变化,这是利用粘土矿物进行高分辨率层序地层划分、对比的基础。

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,高岭石的稳定性较高,有利于高岭石的形成;在偏碱性水介质中,蒙脱石的稳定性较高,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^[1]。在沉积地层中,高含量的蒙脱石是与寒冷的气候联系在一起的,且其含量随气候变暖而减少^[2]。蒙脱石的减少,高岭石的增

多,表明气候向暖湿方向发展。根据 Barshad 的研究,降雨量的增加将使蛭石、高岭石的百分含量增大,而使蒙脱石的百分含量减少。Singer 还在研究中发现^[3],蒙脱石含量与降雨量之间呈线性负相关。

砂砾岩沉积期后,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^[4]。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^[5-6]。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转化作用的影响,导致蒙脱石向伊/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四上亚段坨762井的扇三角洲沉积体系的取心井段进行了高分辨率层序地层单元划分。如图1所示,在由扇三角洲前缘席状砂 - 河口坝 - 分流河道构成的一个准层序旋回中,由下向上高岭石 + 绿泥石的含量逐渐降低,而伊利石 + 伊/蒙混层的含量逐渐增加,准层序界面上下它们的含量发生突变。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3440.46和3454.81 m处;界面之上高岭石 + 绿泥石含量向上逐渐增加,伊利石 + 伊/蒙混层含量则降低;界面之下高岭石 + 绿泥石含量向下逐渐降低,伊利石 + 伊/蒙混层含量则增加,反映了在界面之上水体的突然加深及界面之下水体变浅的变化规律,据层组形成机理^[7],该准层序又可划分为3个层组。同时与岩心剖面对比发

现,各高频层序根据粘土矿物含量变化确定的界面均对应于岩性剖面上的岩相突变面处(如图1),证明两者具有较好的一致性。

因此,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所形成的砂砾岩中粘土矿物类型的更替及其含量的变化,可再现断陷湖盆水体物理化学条件(如pH值和古盐度等)演变过程,重塑高频湖平面升降轨迹。

应用上述方法时,一定要注意后生成岩作用的影响,在同一成岩作用岩化阶段和较小的深度范围下,其影响可作为一个常量来看待,对粘土矿物的相对含量大小的影响可以忽略不计。在不同成岩阶段和较大的深度范围内,其影响较大,其界面识别精度较低,应配合地震和测井等资料综合判别分析。

3 胶结物含量法

胜北断层下降盘沙四段上段砂砾岩中胶结物主要类型有泥质、钙质和白云质等3种。据坨762井岩石薄片统计结果,它们在沙四段上段垂向剖面上变化特征如图1所示。通过与岩、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

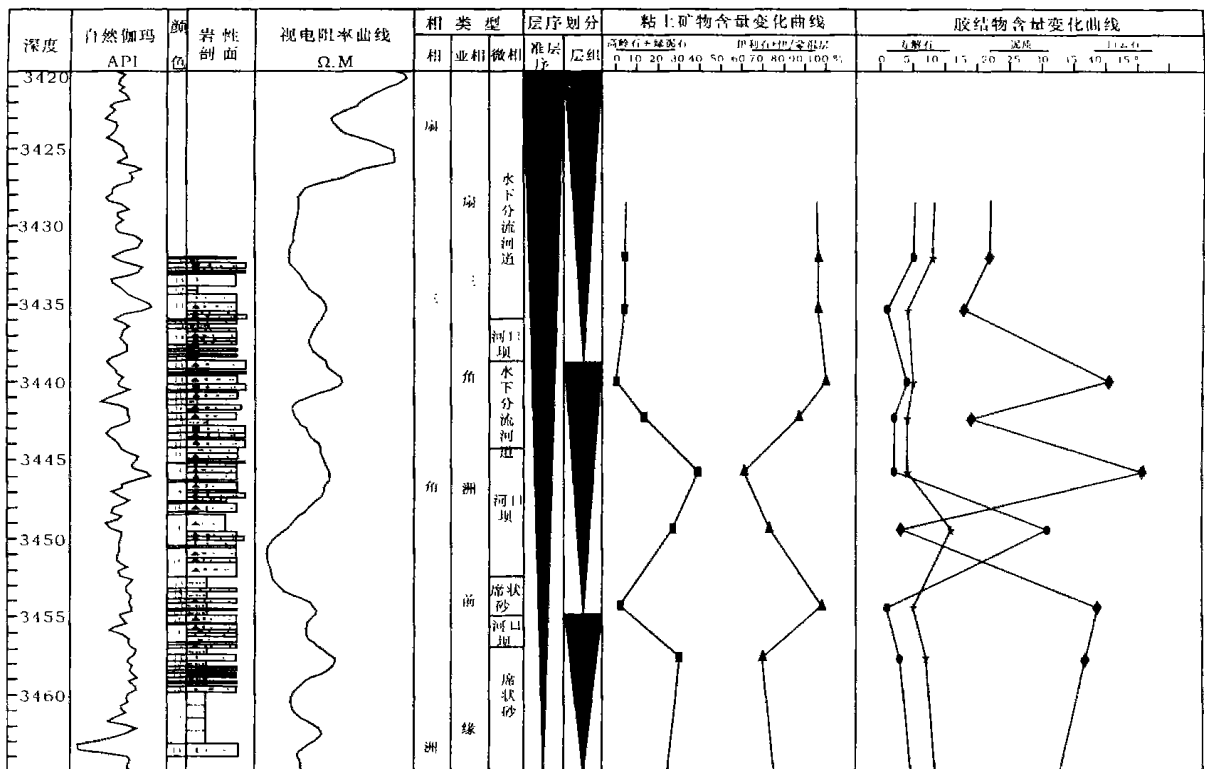


图1 粘土矿物及碳酸盐胶结物含量法高分辨率层序单元划分模式图

Fig. 1 The model of division in high-resolution sequence units by quantitative analysis of clay minerals and carbonate cements

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,易于形成白云质岩石淀积,相应地,砂砾岩中白云质胶结物亦普遍发育,而钙质胶结物和泥质胶结物的发育则受到抑制,呈现相对较低值态势。因此,也可以根据胶结物含量的变化规律来识别和划分高分辨率层序地层单元。

4 微量元素法

微量元素是指岩石中含量低于 10^{-2} 的化学元素,沉积盆地具有基本的地球化学环境,对元素的分布起主要的控制作用,并且表现出微量元素分布的规律性。微量元素的分配及比值的变化、组合和古盐度的分布,都在一定程度上指示着古气候环境的演化历程。这是因为,岩层中元素的分配一方面取决于元素本身的物理化学性质,另一方面又受到古气候、古环境的极大影响。而对于一个分布面积不大的湖相沉积体系来说,这种影响将尤为显著^[8]。在构造活动稳定,沉积物供给速率恒定的情况下,气候的变化对高频层序发育起着决定性的作用。对于一个封闭湖泊,蒸发/降雨条件控制着湖水的水位。当蒸发量大于降雨量时,湖水水位下降^[9]。蒸发/降雨条件变化的直接结果是使水体

盐度升高或降低,其趋势与蒸发/降雨的变化趋势是一致的。故古盐度的变化可以反映湖盆水位及基准面的变化,因此根据古盐度的变化可以进行高分辨率层序地层单元的识别和划分。

4.1 硼元素法

已有研究证明^[10-12],中硼的浓度与盐度为线性相关,现代海水含硼量为 4.7×10^{-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 100×10^{-6} ,陆相低于 70×10^{-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,粘土矿物形状不同,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^[13-14],有以下两种方法。

4.1.1 伊利石硼法

一般选伊利石含量较高(伊利石 > 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,需对粘土矿物进行性状校正,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,称“校正硼含量”再计算古盐度。因此,

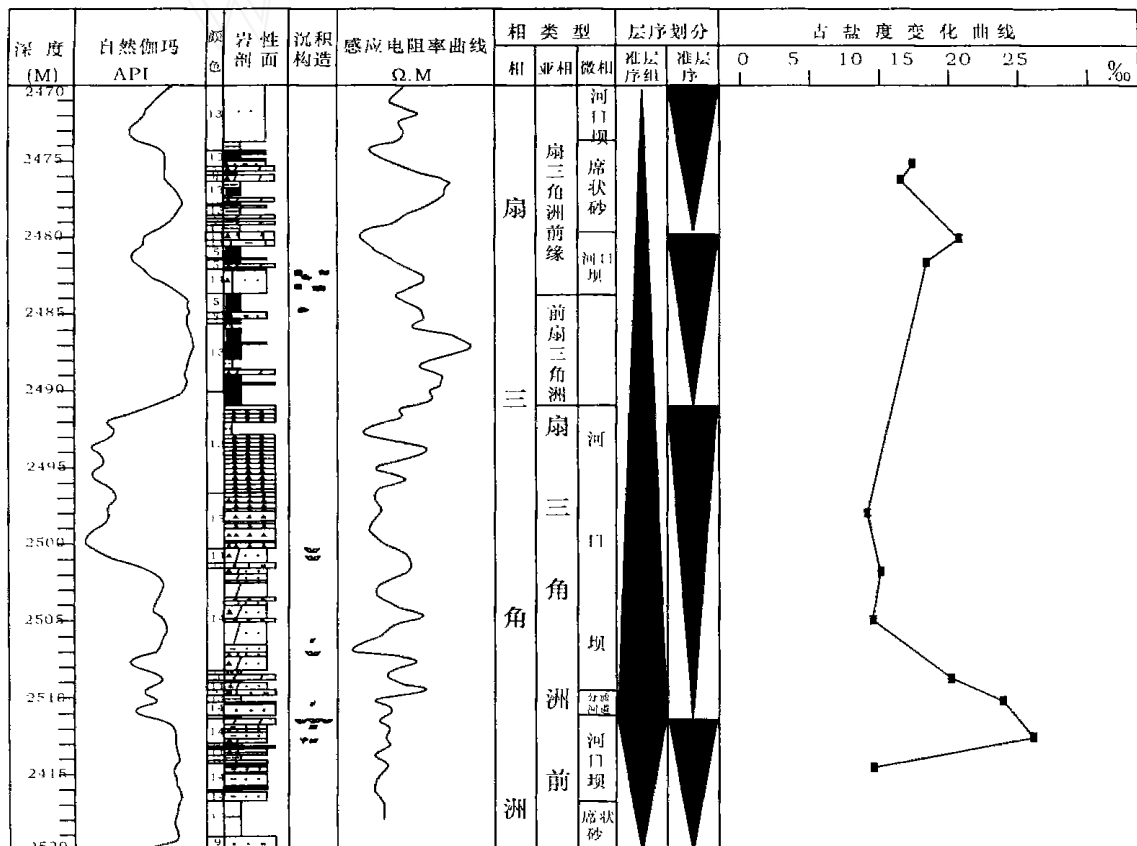


图 2 伊利石硼古盐度法高分辨率层序单元划分模式图

Fig. 2 The model of division in high-resolution sequence units by paleosalinity calculated with equivalent boron contents of illite

首先利用沃克(Walker)作出的换算曲线^[15]进行了硼含量校正,最后采用 Adams 公式^[16]进行了定量古盐度计算。

利用计算得到的古盐度值,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正相关对应关系,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2470~2518 m取心井段进行了高分辨率层序地层单元划分(如图2)。从图中可看出,在2512.67 m处,古盐度发生突变,之下古盐度值由9.6‰突变为21.2‰,之上则由21.2‰渐变为12.4‰。据此将该研究井段划分为2个准层序,2512.67 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2480.06 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。

我们将利用该方法划分的结果与岩心测井等资料进行了对比。根据岩心和测井等资料划分的下部进积式准层序组的界面位于扇三角洲前缘河口坝顶部2511.10 m的含膏的白云岩附近,而利用古盐度曲线所

示确定的界面深度位于2512.67 m,两者有1.57m左右的误差,究其原因可能与所做样品的密度有关,样品密度未能全面反映真实的古盐度变化趋势,考虑到这一点原因,可以认为两者所确定的界面深度具有较好的一致性。在上部的退积式准层序组内部,根据岩心和测井等资料划分出3个准层序,界面位置分别位于2490.10 m的厚层河口坝微相的角砾岩顶部和2480.06 m的白云质灰岩处。在2480.06 m处的准层序界面,岩心划分与古盐度划分吻合很好。而根据岩心资料所划分的2490.10 m处的准层序界面在古盐度曲线上没有明显反映,究其这与所做样品的密度有关,由于取样条件所限,在2418.50~2498.0 m之间仅有2个样品点分布,这就造成了真实情况与分析化验结果之间的误差。因此,在实际应用时与岩心资料配合使用判别效果会更佳,同时也可以弥补分析化验取样密度不足的缺憾。

4.1.2 高岭石硼法

该方法是 Couch 在研究尼日尔河地区第三纪地层是提出的^[11],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,较为符合自然界的事实,

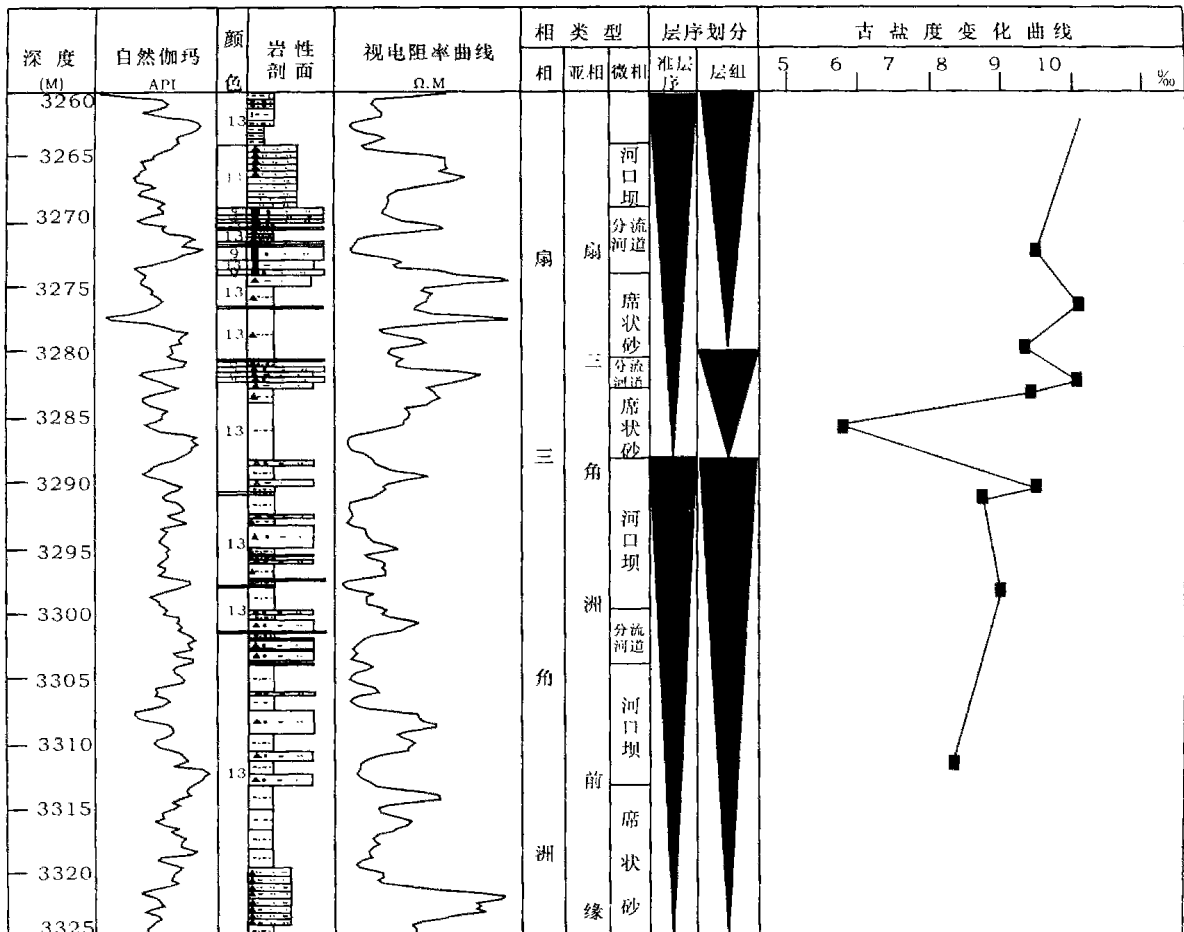


图3 高岭石硼古盐度法高分辨率层序单元划分模式图

Fig. 3 The model of division in high-resolution sequence units by paleosalinity calculated with equivalent boron contents of kaolinite

适用的盐度范围较广,为 1‰~35‰,缺点是没有考虑到成岩过程对粘土矿物组分变化的影响,当其变化不大时,可用该法。

利用高岭石硼方法计算得到的古盐度对坨 711 井第 层序湖侵体系域中的 3 260.0~3 320.0 m 进行了高频层序划分,可以看出,在从 3 291.36~3 285.86 m 之间,古盐度发生突然的变化,古盐度值从 8.5‰ 剧变到 5.72‰,说明在此过程中发生了水体的加深,在此深度范围之上古盐度值向上逐渐增大,之下古盐度值向下逐渐变小。据此,可将该段沉积划分为 2 个准层序单元(如图 3)。我们将通过古盐度变化得到的划分结果与岩心测井等资料得到的划分结果对比发现,其与剖面上显示的由席状砂-河口坝-分流河道-河口坝构成的 2 个岩性旋回具有很好的一致性。并且,通过与岩心测井等资料详细对比研究,可以确定准层序界面位于 3 288.0 m 处。

同时根据古盐度的细微变化,在上部的准层序内部进行了层组划分。在 3 282.15~3 279.60 m 之间,古盐度值发生降低,向上古盐度值逐渐增大,向下古盐度值逐渐降低,因此该准层序有可细化为 2 个层组,与通过岩心剖面划分的得到的由席状砂-分流河道-河口坝单元构成的 2 个旋回具有很好的一致性,并且通过对比可以确定层组界面为 3 280.08 m 处(如图 3)。

4.2 沉积磷酸盐、Fe/Mn 法

4.2.1 沉积磷酸盐法

用沉积磷酸盐法估测古盐度来判别沉积环境,自 Nelson 于 1967 年提出这种方法^[17]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,这是因为 Ca 与 Fe 元素的特征及迁移习性不同,随着含盐度增加,Ca 的活性增大,Fe 的活性降低,因而磷酸铁与磷酸钙随着盐度的变化而变化,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。

利用沉积磷酸盐法方法计算得到的古盐度对坨 715 井第 层序进行高频层序划分,从图中可以看出,在 3 133.40 m 之上古盐度值从 0.1‰ 逐渐增大至 0.6‰,反映了一种水体向上逐渐变浅的变化趋势;在 3 218.95.0 m 和 3 133.40 m 之间古盐度值 0.17‰ 缓慢减小到 0.11‰,反映了一种水体缓慢加深的深水沉积环境;而 3 218.95.0 m 之下古盐度值基本保持在 0.3‰~0.6‰ 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,3 133.40 m 之上为一进积式准层序组,3 218.15 m 和 3 133.40 m 为一退积式准层序组,3 218.95 m 之下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 3 133.40 m 为最大湖泛面,其下为湖侵体系域沉积,之上为湖退体系域沉积(图 4)。

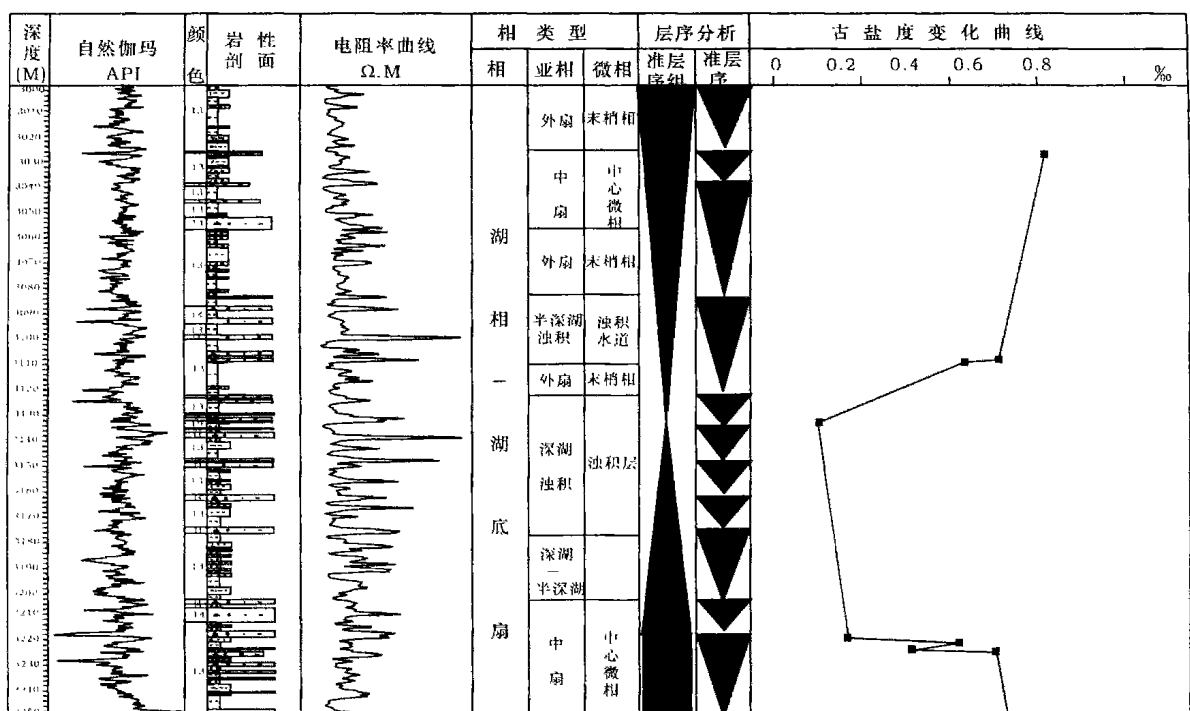


图 4 沉积磷酸盐古盐度法高分辨率层序单元划分模式图

Fig. 4 The model of division in high-resolution sequence units by paleosalinity calculated with contents of sedimentary phosphate

由于该井段为半深湖 - 深湖 - 湖底扇沉积组合, 在岩性剖面上单纯依据相序变化很难确定高频层序界面, 而通过上述方法, 首先可以将界面范围缩小, 同时结合岩心资料就可以很快的确定界面位置。通过对比发现由上述方法确定的最大湖泛面位置与岩心上观察结果很吻合, 在岩心上 3 134.10 ~ 3 136.0 m 之间为 1.90 m 黑色泥岩沉积, 其有别于邻近上下部位的灰色泥岩沉积, 据此可以确认该段即为凝缩段沉积。在该井段由于取样密度不足的原因, 使得古盐度曲线未能反映出准层序变化规律, 因此在该井段只能划分到准层序组级别。

所以, 在实际应用该法确定界面, 首先一定要根据所划分的深度范围和取样密度来确定划分级次, 这样才能使得划分结果具有较高的精度。

4.2.2 Fe²⁺/Mn²⁺法

由于铁、锰能形成巨大的外生矿床, 其表生作用的地球化学特征引起我们的注意。在表生带的酸性溶液中, 铁、锰能形成易溶的盐类(或低价的氧化物)转入各种水体。在淡水中铁、锰主要有以下几种存在方式: 碳酸盐(或重碳酸盐)和硫酸盐; 胶体溶液; 微粒碎屑悬浮物和有机络合物的形式。通常情况下, Fe²⁺、Mn²⁺多以胶体溶液方式迁移。锰与氧的亲合力低于铁与氧的亲合力。在铁、锰氧化物 Eh - Ph 稳定图上, 锰的

二价氧化物比铁的二价氧化物稳定区域大, 这就导致了沉积过程中铁、锰发生分离, 时间上铁的沉淀早于锰, 空间上铁多沉积在浅水而锰多沉积在较深的水域。所以 Fe²⁺、Mn²⁺的含量与水深有一定的对应关系, 随水深由浅变深, Fe²⁺含量降低, 而 Mn²⁺含量升高。因此可以利用 Fe²⁺/Mn²⁺值的相对大小判断水体深度的变化, Fe²⁺/Mn²⁺值越大, 水体越浅, 该比值越小, 水体越深。

用 Fe/Mn 法对 XT743 井段第 层序 TST 体系域 2 930.0 ~ 2 980.0 m 进行了高频层序划分。从图 5 中看到, 在 2 960.1 m 位置处, Fe²⁺/Mn²⁺比值突然的减小, 之上 Fe²⁺/Mn²⁺比值向上逐渐的由大变小, 显示了水体向上加深的退积序列; 之下 Fe²⁺/Mn²⁺比值向下逐渐变小, 显示水体由下向上逐渐变浅的进积序列。根据这种变化趋势, 以 2 960.1 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 6 个准层序; 2 960.1 m 以下为一进积式准层序组, 内部细化为 2 个准层序(图 5)。将该划分结果与依据岩心及测井资料得到的划分结果对比, 发现两者所确定的界面在大多数准层序中符合很好, 但也有例外如在退积式准层序组上部根据岩心、测井所划分的 3 个准层序, 在曲线上反映不明显, 可能与样品密度有关, 该段将近 20 m 的范围内, 仅有 2 个样品点分布, 这使得界面识别分辨率大大降低。

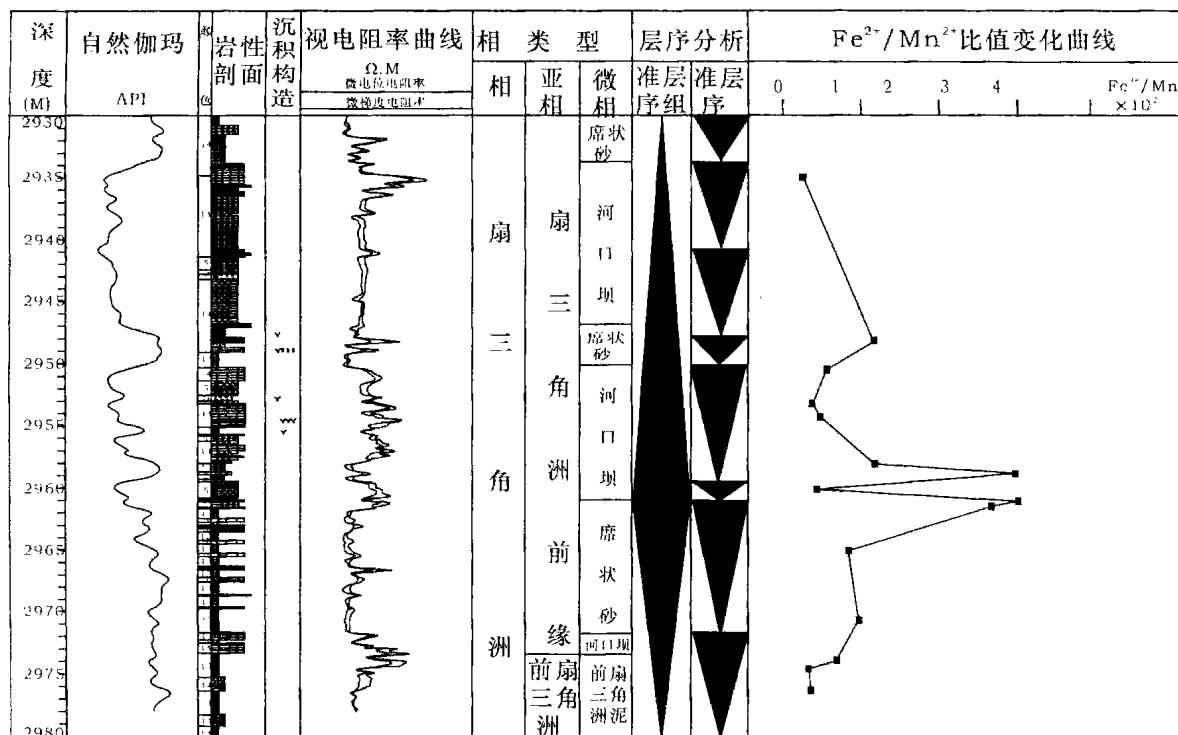


图 5 Fe²⁺/Mn²⁺法高分辨率层序单元划分模式图

Fig. 5 The model of division in high-resolution sequence units by Fe²⁺/Mn²⁺ ratio

5 讨论

粘土矿物法、胶结物含量法、高岭石法和伊利石法受后生成岩作用影响较大,在成岩作用强烈的层段不宜使用上述各法。在成岩作用较弱或同一成岩作用岩化阶段的较小深度范围内可以使用,界面识别精度较高。沉积磷酸岩法和 Fe^{2+}/Mn^{2+} 法,应用范围相对较广,精度较高。

上述 6 种方法的界面识别精度均受取样密度的影响,取样密度越大,则界面识别精度就越高,反之,则精度降低。

在实际应用时,根据实际的取样密度和划分层段的深度范围,选择合适的界面划分次级,这样可以相对地提高界面识别精度。

综上所述,在实际应用时,针对具体情况,只要选用合适的方法,就可以为高分辨率层序地层单元的识别和划分提供有力的佐证和依据。

参考文献(References)

- 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. 海洋与湖沼, 1993, 24(5): 447 ~ 455 [Zhao Yongsheng. A preliminary study on the relationship between the characteristics of clay mineral assemblage and sedimentary environments in down-faulted lake basin of Xingyun lake, Yunan province. *Oceanologia et Limnologia Sinica*, 1993, 24(5): 447 ~ 455]
- Blaise B. Clay. Minerals assemblages from late Quaternary deposits on Vancouver Island, Southwestern British Columbia, Canada. *Quaternary Research*, 1989, 31: 41 ~ 56
- Singer A. The paleoclimatic interpretation of clay minerals in soils and weathering profiles. *Earth Science Reviews*, 1980, 15: 303 ~ 326
- 顿铁军, 高约友, 张丽虹. 粘土矿物与油层保护. 西安: 西北大学出版社, 1994. 27 ~ 31 [Dun Tiejun, Gao Yueyou, Zhang Lihong. Clay mineral and reservoir protection. Xi'an: Northwest University Press, 1994. 27 ~ 31]
- 胡受权, 张永贵, 颜其彬. 泌阳断陷下第三系核三段上段陆相层序个体系域岩石地球化学旋回性特征. 地质地球化学, 1998, 26(2): 45 ~ 52 [Hu Shouquan, Zhang Yonggui, Yan Qibin. Lithologic-geochemical cyclicity in every system track of terrigenous sequence in the upper member of Eh₃ of Biyang fault depression. *Geology Geochemistry*, 1998, 26(2): 45 ~ 52]
- 胡受权, 颜其彬, 张永贵. 陆相层序界面的岩石地球化学标志探讨. 石油学报, 1999, 20(1): 24 ~ 29 [Hu Shouquan, Yan Qibin, Zhang Yonggui. Discussion on lithologic-geochemical features of boundary identification in terrigenous sequence. *Acta Petrolei Sinica*, 1999, 20(1): 24 ~ 29]
- 纪友亮, 张世奇. 层序地层学原理及层序成因机制模式. 北京: 地质出版社, 1998. 24 ~ 38 [Ji Youliang, Zhang Shiqi. The theory of sequence stratigraphy and genesis mechanism mode of sequence. Beijing: Geological Publishing House, 1998. 24 ~ 38]
- 王随继, 黄杏珍, 妥进才, 等. 泌阳凹陷核桃园组微量元素演化特征及其古气候意义. 沉积学报, 1997, 15(1): 65 ~ 70 [Wang Suiji, Huang Xiangzhen, Tuo Jincan, et al. Evolution characteristics and their paleoclimate significance of trace elements in the Hetaoyuan formation, Biyang depression. *Acta Sedimentologica Sinica*, 1997, 15(1): 65 ~ 70]
- 胡受权, 郭文平, 杨凤根, 等. 试论控制断陷湖盆陆相层序发育的影响因素. 沉积学报, 2001, 19(2): 256 ~ 262 [Hu Shouquan, Guo Wemping, Yang Fenggen, et al. Study on influential factors of terrigenous sequence formation and development in fault-depressed lacustrine basin. *Acta Sedimentologica Sinica*, 2001, 19(2): 256 ~ 262]
- Harder H. Boron content of sediment as a tool in facies analysis. *Sedimentary Geology*, 1970, 4(1): 153 ~ 175
- Couch E.L. Calculation of paleosalinities from boron and clay mineral data. *AAPG Bulletin*, 1971, 5(10): 1829 ~ 1837
- Potter P E, Shimp N P, Witters J. Trace element in marine and fresh-water argillaceous sediment. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 1963, 27: 669 ~ 694
- 龙天才. 关于应用硼判别沉积环境的有效性问题. 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). 北京: 地质出版社, 1988. 233 ~ 235 [Long Tiancai. Effective problem on sedimentary environment distinguishing by applying boron. In: The Committee of Quaternary Glacial and Quaternary Geology, Geological Society of China, Geological Society of Jiangsu Province. Papers Collection of Quaternary Glacial and Quaternary Geology Symposium(5). Beijing: Geological Publishing House, 1988. 233 ~ 235]
- 周仰康, 何锦文, 王子玉. 硼作为古盐度指标的应用. 沉积学和有机地球化学学术会议论文选集. 北京: 科学出版社, 1984. 55 ~ 57 [Zhou Yangkang, He Jinwen, Wang Ziyu. Application of boron on paleosalinity indication. Papers Collection of Sedimentary and Organic Geochemistry Symposium. Beijing: Science Press, 1984. 55 ~ 57]
- Walker C T, Price N B. Departure curves for computing paleosalinity from boron in illites and shales. *AAPG Bulletin*, 1963, 47(5): 833 ~ 841
- Adams T D, Haynes J R, Walker C T. Boron in Holocene illites of the dovey estuary wales and its relationship to paleosalinity in cyclothem. *Sedimentology*, 1965, 4: 189 ~ 195
- Nelson B. Sedimentary phosphate method for estimating paleosalinities. *Science*, 1967, 158(3803): 917 ~ 920

Geochemical Methods of Boundary Identification in Terrigenous High-Resolution Sequence

ZHAO Jun-qing¹ JI You-liang² ZHANG Shi-qi³ XIA Bin¹

1(Guangzhou Institute of Geochemistry, Chinese Academy of Sciences, Guangzhou 510640)

2(Institute of Earth and Ocean Science, Tongji University, Shanghai 200092)

3(Institute of Earth Resource and Information, University of Petroleum China, Dongying, Shandong 257061)

Abstract Clay minerals and trace elements are distributed in different types of sand deposits and sedimentary rocks. They are sensitive to environmental changes. The characteristics of clay minerals such as sedimentary differentiation, composition and assemblage, contents has recorded the information of environmental change during the processes of clay mineral formation. These information will help to reconstruct paleoenvironment with huge significance in the research of water depth change. By studying lithologic-geochemical parameters of high-resolution sequence units in different sequences of the third member and the fourth upper member of Shahejie formation in Shengbei fault's downwall side of Dongying depression, it has been found in pace of cyclicity of water depth controlled by paleoclimate during the formation period of high-resolution sequence units, mineral composition (clay mineral and cement) of sedimentary rocks, chemical constituents (trace element) would be cyclically changed.

Key words clayminerals, trace element, cement, paleosalinity, high-resolution sequence, Shengbei fault's downwall side, Dongying depression