# 东濮凹陷古近系锶、硫、氧同位素 组成及古环境意义

# 史忠生<sup>1</sup>,陈开远<sup>2</sup>,何 生<sup>1</sup>

1.中国地质大学资源学院,湖北武汉 430074
 2.中国地质大学能源学院,北京 100083

摘要: 东濮凹陷是渤海湾地区一个典型的盐湖盆地,其古近系沙河街组发育多套盐岩. 通过对古近系锶、硫、氧同位素组成特征的研究,讨论了古近系盐类沉积的成因及当时的古环境. 研究表明:(1)东濮凹陷古近系的盐岩为陆相成因而并非来源于海水的侵入,其湖水锶同位素的主要控制因素为高<sup>87</sup> Sr/<sup>86</sup> Sr(0.720±0.005)的壳源硅铝质岩石;(2)东濮凹陷古近系盐岩中的 $\delta^{34}$  S((28~33)×10<sup>-3</sup>)普遍偏高且大于现代海相蒸发盐中的 $\delta^{34}$  S(20×10<sup>-3</sup>),表明盐类形成时的沉积环境对硫酸盐是封闭的,而对 H<sub>2</sub>S 是开放的;(3)锶和氧的同位素变化特征表明:东濮凹陷在由 Es<sub>4</sub> 上段向 Es<sub>3</sub> 上段过渡时气候较为湿润,降雨量逐渐增大,导致 $\delta^{18}$  O 的降低和<sup>87</sup> Sr/<sup>86</sup> Sr 值的升高;而由 Es<sub>3</sub> 上段向 Es<sub>1</sub> 段过渡时,气候骤然变得干旱,导致降雨量减小,蒸发量增大.

关键词:东濮凹陷;锶、硫、氧同位素;古环境;盐湖. 中图分类号: P59 文章编号: 1000-2383(2005)04-0430-07

收稿日期: 2004-12-15

# Strontium, Sulfur and Oxygen Isotopic Compositions and Significance of Paleoenvironment of Paleogene of Dongpu Depression

SHI Zhong-sheng<sup>1</sup>, CHEN Kai-yuan<sup>2</sup>, HE Sheng<sup>1</sup>

Faculty of Earth Resources, China University of Geosciences, Wuhan 430074, China
 School of Energy Resources, China University of Geosciences, Beijing 100083, China

Abstract: Dongpu depression is a typical saline lake basin in the Bohai Bay region. Many sets of halites have been deposited in the Shahejie Formation of Paleogene. The genesis of halites and the paleoenvironment are considered, based on the study of strontium, sulfur and oxygen isotopic composition characteristics of the Paleogene halites. The research results are as follows: (1) The halites of Paleogene of Dongpu depression were formed form continental lake water and not from the invasion of sea water. The composition of strontium isotopes was mainly controlled by the silicon-aluminum rock with a higher value of <sup>87</sup>Sr/<sup>86</sup>Sr (0. 720±0.005); (2) The value of  $\delta^{34}$ S ((22~33)×10<sup>-3</sup>) of Paleogene halites of Dongpu depression was higher than that of the marine evaporate (20×10<sup>-3</sup>), which indicates that the sedimentary environment was closed to sulfate and open to sulfurated hydrogen; (3) The variation of strontium and oxygen isotope compositions show that from the upper Es<sub>3</sub> member, the paleoclimate was humid in the Dongpu depression, and rainfall gradually increased, which resulted in a decrease of  $\delta^{18}$ O and increase of <sup>87</sup>Sr/<sup>86</sup>Sr; and from the upper Es<sub>3</sub> to the Es<sub>1</sub> member the paleoclimate became abruptly dry, which resulted in a decrease in rainfall and rapid evaporation.

Key words: Dongpu depression; strontium, sulfur and oxygen isotope; paleoenvironment; saline-lake.

东濮凹陷位于渤海湾盆地南缘临清凹陷的东南 部(图1),它是在中、古生界基础上发育的新生代断

基金项目:横向合作项目:"东濮凹陷盆地发育特征及其油气成藏机制研究". 作者简介:史忠生(1978一),男,博士研究生,从事石油地质方面的研究.E-mail: shiluck@163.com



图1 东濮凹陷构造分区简图

Fig. 1 Schematic map of structures in Dongpu depression

陷湖盆,新生界厚度超过8km,蕴藏着丰富的油气 资源,是我国东部一个重要的油气生产基地,东濮凹 陷以古—中生界地层为基底,以新生界地层为盖层, 是一东断西超式单断箕状断陷. 区内发育巨厚的下 第三系地层,形成多套生储盖组合,其中沙河街组发 育四套盐膏层,盐膏层的存在对于区内地层的成岩 演化、油气的生成、运移、聚集和保存发挥着重要的 控制作用,前人虽然已对这4套盐膏层做了大量的 研究工作,但对其形成机制及形成时的古气候仍存 在一些争议,如张孝义等(2002)认为东濮凹陷的盐 岩成因为海侵后的浅水蒸发成盐,任来义等(2002) 通过对钙质超微化石、沟鞭藻类、遗迹化石、枝管藻、 鱼类等古生物化石资料和石盐中的溴(Br<sup>-</sup>)及溴氯 系数 $(Br^- \times 10^{-3}/Cl^-)$ 、碳酸盐岩中氧和碳同位素  $(\delta^{18}O, \delta^{13}C)$ 值、泥岩中的 w(Th)/w(U)值等地化资 料的分析研究,也认为东濮凹陷古近系沙河街组沙 三段和沙一段沉积时期曾发生过海侵事件,然而,陈 发亮等(2000)、胥菊珍等(2003)研究认为东濮凹陷 的盐岩成因为"深水成盐",盐类物质为沿深大断裂 上涌的卤水,为此,本文旨在通过对东濮盐湖古近系 沙河街组含盐层位锶、硫、氧同位素的沉积地球化学 分析,一方面探讨其盐类形成机制即盐类沉积是属 干陆相成因还是属于事件性海侵成因:另一方面通 过对锶、硫、氧同位素发育特征的研究,了解盐类沉 积时的古气候变化特征.

# 1 锶同位素特征及沉积地球化学分析

锶有 4 个稳定同位素:<sup>84</sup> Sr、<sup>86</sup> Sr、<sup>87</sup> Sr 和<sup>88</sup> Sr,其 中只有<sup>87</sup> Sr 是放射源的,它由<sup>87</sup> Rb 经过 β 衰变而来, 所以随着<sup>87</sup> Rb 的衰变,<sup>87</sup> Sr 在地质历史中是逐渐增 多的. 锶和钙在元素周期表中同属一个主族且位置 相邻. 锶、钙离子半径相近,比值为 1. 14,同时,锶、 钾离子半径相差不大,比值为 0. 85,所以锶常以分 散状态出现在含钙、钾矿物中,如碳酸盐、硫酸盐、斜 长石和磷灰石等.

壳源的硅铝质岩石具高的<sup>87</sup> Sr/<sup>86</sup> Sr 值(平均为 0.720 $\pm$ 0.005),但锶浓度较低;幔源的镁铁质岩石 具低的<sup>87</sup> Sr/<sup>86</sup> Sr 值(平均为 0.704 $\pm$ 0.002);海洋碳 酸盐和硫酸盐也具有低的<sup>87</sup> Sr/<sup>86</sup> Sr 值(平均为 0.708 $\pm$ 0.001),但浓度高(可达 1 000 $\times$ 10<sup>-6</sup>).由于锶 在海水中的残留时间( $\approx$ 106 a)大大长于海水的混合 时间( $\approx$ 103 a),因而任一时代全球范围内海相锶元素 在同位素组成上是均一的(McArthur *et al.*, 1992).

锶在化学和生物学过程中不会产生同位素分 馏,因而在研究物质迁移和变化过程中,<sup>87</sup> Sr/<sup>86</sup> Sr 是 有效的示踪剂.虽然蒸发等地质作用可以改变锶同位 素的浓度,但锶同位素在同一地质时期、同一水域组 分<sup>87</sup> Sr/<sup>86</sup> Sr 的比值几乎不变(Kerry, 1987).

以上锶同位素的这些基本地球化学特性,是研 究锶同位素以及用锶同位素进行示踪环境变化的基 础.

由干 $^{87}$ Sr/ $^{86}$ Sr 与较轻同位素( $^{13}$ C, $^{18}$ O)不一样, 不受如相分离、化学状态、蒸发作用或生物同化作用 这些过程的分馏(Miller et al., 1993; Bailey et al., 1996).因此,在任何水体中与碳酸钙矿物共沉 淀的 Sr(进入晶体格子)不会产生同位素分馏作用. 沉积后如没遭受成岩后生作用,碳酸钙矿物就记录 了沉淀时水体的<sup>87</sup> Sr/<sup>86</sup> Sr 比值(Reinhardt et al., 1998). 由于<sup>87</sup> Sr 还可以通过<sup>87</sup> Rb 的放射性衰变形 成,因而<sup>87</sup>Sr 的丰度是变化的. 然而在碳酸盐类矿物 中<sup>87</sup> Rb 的含量极低(Matin and Macdougall, 1991), 且半衰期长(48.8 Ga) (Faure, 1986),因此,一般情 况下可以不考虑<sup>87</sup> Rb 的衰变对<sup>87</sup> Sr 的贡献. 所以在 沉积环境中<sup>87</sup> Sr /<sup>86</sup> Sr 的变化将是由不同来源 Sr 的 混合造成的(Douglas et al., 1995). 根据锶同位素 的这一特点,可以依据碳酸中<sup>87</sup> Sr/<sup>86</sup> Sr 值的大小来 定性地探讨影响当时盆地锶同位素组成的主要控制 因素是什么.

#### 表 1 不同层位<sup>87</sup> Sr/<sup>86</sup> Sr 值的组成特征

Table 1 Composition character of <sup>87</sup> Sr/<sup>86</sup> Sr of different layers

层位	<sup>87</sup> Sr/ <sup>86</sup> S 最大值	<sup>87</sup> Sr/ <sup>86</sup> S 最小值	<sup>87</sup> Sr/ <sup>86</sup> S 最大值一最小值	<sup>87</sup> Sr/ <sup>86</sup> Sr 平均值
$Es_1$	0.712 292	0.71158	0.000712	0.711 894
$Es_2^{\pm}$	0.713 026	0.711 812	0.001214	0.712 309
$Es_3^{\pm}$	0.717 244	0.717 244	0	0.717 244
$Es_3 \Phi$	0.715179	0.713 001	0.002179	0.71 408
$Es_3$ $F$	0.713759	0.711 585	0.002174	0.712672
$Es_4$ <sup><math>\pm</math></sup>	0.713691	0.711877	0.001814	0.712 422

中国科学院青海盐湖研究所测试;Es1表示沙一段,以下类同.

为此,笔者对东濮凹陷沙河街组不同层位进行 了锶同位素的测定,其<sup>87</sup> Sr/<sup>86</sup> Sr 值的变化特征如表 1. 从表 1 看出,每个层位内的<sup>87</sup> Sr/<sup>86</sup> Sr 值变化范围 很小,最大也只有 0.002 179,这说明在同一段地质 时期内锶同位素是比较稳定的.同时该区的 <sup>87</sup> Sr/<sup>86</sup> Sr普遍偏大,且远大于现代海洋的<sup>87</sup> Sr/<sup>86</sup> Sr 值(0.709 2),而现代海洋的<sup>87</sup> Sr/<sup>86</sup> Sr 值又大于地质 时期的海相碳酸盐的<sup>87</sup> Sr/<sup>86</sup> Sr 值又大于地质 时期的海相碳酸盐的<sup>87</sup> Sr/<sup>86</sup> Sr 值,所以从<sup>87</sup> Sr/<sup>86</sup> Sr 值这个角度来说,东濮凹陷古近系沙河街组时期的 盐岩应为陆相成因,影响锶同位素组成的主要控制 因素应该是高<sup>87</sup> Sr/<sup>86</sup> Sr 值的壳源硅铝质岩石的输入 量. Palmer *et al.* (1989)研究认为全球河流输入的 平均<sup>87</sup> Sr/<sup>86</sup> Sr 值为 0.711 9,较现代海水的 0.709 2 要高,也证实了以上论点.

表1的数据还表明,不同层位间的 $^{87}$  Sr/ $^{86}$  Sr 值 变化要稍大些. 如 Es1 段和 Es3 上段 2 个时期 <sup>87</sup> Sr /<sup>86</sup> Sr 的差值达到了 0.005 351,这说明由于不同 时期控制锶同位素的因素发生了变化,所以锶同位 素的组成也发生了变化. 总体上由 Es4 上段到 Es3 上段, ${}^{87}$ Sr/ ${}^{86}$ Sr 值逐渐增大,而由 Es<sub>3</sub> 上段到 Es<sub>1</sub> 段 以降低趋势为主(图 2),由上面的分析可知,东濮凹 陷古近系时期的盐岩应为陆相成因,盆地锶同位素 组成的主要控制因素为高 $^{87}$ Sr/ $^{86}$ Sr(0,720±0,005) 值的壳源硅铝质岩石,所以对该区来说<sup>87</sup> Sr/<sup>86</sup> Sr 值 的大小反映了陆源碎屑物对盆地的供应情况.在  $Es_4$  上段向  $Es_3$  上过渡时期, 由<sup>87</sup> Sr/<sup>86</sup> Sr 值的逐渐 增大可知,这一时期河流向盆地提供的陆源碎屑物 应该逐渐增多,这反映出在由 Esa 上段向 Esa 上段 过渡时期,降雨量逐渐增大,河水把大量的高 <sup>87</sup>Sr/<sup>86</sup>Sr值的硅铝质风化产物带到湖中, 使湖水的 锶同位素增高:相反由 Esa 上段向 Esa 段过渡时期 <sup>87</sup> Sr/<sup>86</sup> Sr 值以降低趋势为主,这表明从 Es<sub>3</sub> 上段开 始,该区的气候开始向干旱气候过渡,降雨量的减少



图 2 不同层位<sup>87</sup> Sr/<sup>86</sup> Sr 平均值特征



使陆源碎屑物的供应也相应减少,所以湖盆中 <sup>87</sup> Sr/<sup>86</sup> Sr 值也降低. 由  $E_{s_3}$  上段与  $E_{s_2}$  上段之间 <sup>87</sup> Sr/<sup>86</sup> Sr 值的突变可以推测,该区在由  $E_{s_3}$  上段向  $E_{s_2}$  上段过渡时,气候上可能存在一次突变.

### 2 硫同位素特征及沉积地球化学分析

自然界中硫有 4 种稳定同位素,其相对丰度 为: ${}^{32}$  S: 95. 02%; ${}^{33}$  S: 0. 75%; ${}^{34}$  S: 4. 21%和 ${}^{36}$  S: 0. 02%. 一般研究的是 ${}^{34}$  S 与 ${}^{32}$  S 之比,即 $R={}^{34}$  S/  ${}^{32}$  S,而 ${}^{33}$  S 和 ${}^{36}$  S 常用于地外物质的研究.

Sakai(1968)指出,25 °C溶解的 SO<sub>2</sub><sup>-4</sup>与沉淀硫 酸盐之间的硫同位素分馏系数很小. 世界上其他一 些盆地中现代石膏结晶作用中硫的同位素分馏作用 也非常弱(Holser and Kaplan, 1996). 这些研究进 一步说明硫酸盐的硫同位素比值可以代表古湖水或 海水的硫同位素比值,因而可以依据现代蒸发岩中 硫酸盐的硫同位素来判断古环境. 据李任伟(1989) 引用 Holser 和 Kaplan 及格里年科的资料显示:海相 蒸发岩及其所反映的古海洋硫酸盐的硫同位素组成 只在较狭窄的范围内变化,现代海洋硫酸盐及海相蒸 发岩的  $\delta^{34}$  S 值 约 为 20 × 10<sup>-3</sup>. 其中,红海海水为 20.8×10<sup>-3</sup>,其底部流动的热卤水为 20.3×10<sup>-3</sup>,而 第三纪海相蒸发岩与此并无明显差别,最大的  $\delta^{34}$  S 大 概不超过 25×10<sup>-3</sup>. 因此,一般认为海相蒸发岩的  $\delta^{34}$  S代表了海水硫酸盐的  $\delta^{34}$  S 特征.

对于陆相盐湖来说,由于易受物源、气候以及湖 泊封闭性等因素的影响,硫同位素的变化要比海洋 复杂一些,即陆相盐湖中蒸发岩的 δ<sup>34</sup> S 既可以小于 海相蒸发岩中的 δ<sup>34</sup> S 也可以大于海相蒸发岩中的 δ<sup>34</sup> S. 对此,前人已经做了许多研究可以说明这一现 象,如中国科学院盐湖研究所的研究资料表明,新 疆、青海的盐湖中硫酸盐(石膏、芒硝等) δ<sup>34</sup> S 为1×

 $10^{-3} \sim 17 \times 10^{-3}$ ,但多数为  $5 \times 10^{-3} \sim 10 \times 10^{-3}$ :西 藏盐湖的  $\delta^{34}$ S 为 3.9×10<sup>-3</sup>~6.9×10<sup>-3</sup>,这些盐 湖的硫同位素都小于海洋,而李仟伟在研究渤海湾 盆地东濮凹陷第三纪蒸发岩硫同位素组成与美国尤 因塔盆地第三纪陆相绿河组的关系时,发现二者的 硫同位素组成有类似的特点,它们都大大超过现代 海洋硫酸盐的数值,李仟伟(1989)认为,决定一个盆 地水体和沉积物中硫同位素的组成有 2 个重要因 素:一个是陆源(经过岩石风化和搬运)各种形式的 硫自身的同位素组成:另一个是生物分馏作用.他认 为来源于以前的蒸发盐时,常相对富集重同位素组 分,而来源于黑色页岩风化产物时,则常相对富集轻 的硫同位素组分(因为黑色页岩主要含还原形式的 硫化物). 他还引用 Faure1977 年的意见(生物分馏 的作用可使  $\delta^{34}$ S 的差别达到  $50 \times 10^{-3} \sim 60 \times 10^{-3}$ ) 进一步指出,由于硫还原菌的作用对封闭的内陆湖 泊完全不同于海洋,"由硫还原菌造成的生物分馏可 以大大改变硫同位素原来的组成,盆地中硫酸盐以 及最终可能形成的蒸发盐沉积,明显富集重的硫同 位素, $\delta^{34}$ S具有大的正值,"

从本次测试的结果来看(图 3),东濮凹陷古近 系沙河街组各层段  $\delta^{4}$ S 值普遍较大,且都大于现代 海相蒸发盐中硫酸盐的  $\delta^{34}$ S 值,这也验证了东濮凹 陷的盐岩为陆相成因这一观点,由上面的分析可知, 陆相蒸发盐中 <sup>№4</sup> S 值的偏高与硫酸盐还原菌有着 密切的关系.硫酸盐在生物细菌的作用下发生还原, 其结果使硫酸盐和还原产物硫化物之间产生极为显 著的硫同位素分馏,即在硫化物中富集轻同位素 <sup>32</sup>S. 而残余的硫酸盐则富集重同位素<sup>34</sup>S. 大多数研 究表明,沉积硫化物的  $\delta^{34}$  S 值为 $-30 \times 10^{-3} \sim$  $-10 \times 10^{-3}$ ,相对于伴生的硫酸盐的  $\delta^{34}$  S 值要小  $15 \times 10^{-3} \sim 62 \times 10^{-3}$ ,而硫酸盐还原过程则主要出 现在有机质堆积速度较快、介质环境缺氧的较强的 还原环境中(邓宏文和钱凯,1993).例如,四川盆地  $T_1 j^2$ 段  $\delta^{34}$ S 值的高异常,就是由于当时盆地海水处 于封闭环境,大量的厌氧细菌将硫酸盐还原为 H<sub>2</sub>S 所造成的. 同样柴达木盆地狮子沟地区的高 ♂4 S 值 也是在强还原条件下形成的. 据刘群(1987)的资料: 潜江、东营、大汶口、莱芜等凹陷 48 块下第三系硫酸 盐样品中  $\delta^{34}$ S 平均值的范围 30.10×10<sup>-3</sup>~40.43×  $10^{-3}$ ,潜江凹陷的个别样品达 42.1×10<sup>-3</sup>.反之,大汶 口凹陷同一层段中 3 个自然硫的  $\delta^{4}$  S 平均值就只有 15.83×10<sup>-3</sup>.显然,硫还原菌的作用是很大的.



图 3 不同层位 δ<sup>34</sup> S 组成特征



由于 <sup>δ<sup>34</sup>S 值与沉积环境的密切关系, 笔者对东</sup> 濮凹陷古近系沙河街组时期的沉积环境进行了分 析,从图 4 可以看出,沙四上段到沙一段时期 δ<sup>34</sup> S 值的变化呈现出明显的旋回性,而且这种变化规律 与东濮凹陷古近系层序的旋回性非常吻合。(陈发亮 等,2000)曾对东濮凹陷古近系的地层进行了层序发 育特征的研究,认为东濮凹陷古近系主要发育两套 间和沉积物的比值决定了沉积物的堆积速度、保存 程度和内部结构特征, 笔者认为, 在层序发育的初 期,由于可容纳空间较小,这时如果沉积物的供给比 较充分,就会形成比较大的埋藏速率,造成介质的缺 氧,在这种条件下硫酸盐就会被厌氧细菌大量还原, 结果造成 δ<sup>34</sup>S 值的升高. 层序 ↓ 和层序 Ⅱ 中低位体 系域所对应的沙四段和沙二上段的高 δ<sup>34</sup> S 值正说 明了这一点:在层序发育的中期,即水侵体系域时, 可容纳空间迅速增大,使沉积物供应不足,结果造成 沉积有机质的埋藏速率减小,厌氧细菌的还原作用减 弱,∂<sup>34</sup>S就会随着还原作用的减弱而呈现降低的趋势 (沙三下段—沙三中段);在层序发育的后期,即高位 体系域时,可容纳空间增加的速度又将减慢,沉积有 机质的埋藏速率也将增大,所以 δ<sup>34</sup>S 又开始向增大的 趋势发展(沙三上段),由此看出 ♂4S值的发育与层序 的发育有着密切的联系.

从不同层位间  $\delta^{34}$ S 的变化特征(图 3)看出,沙 二上段到沙一段时期  $\delta^{34}$ S 值出现突然的降低. 这说 明硫还原菌的作用出现了突然的减弱,反映了当时 的沉积环境动荡较大,由强还原环境向弱还原以至 弱氧化的环境过渡. 这可能由于在盆地蒸发析盐的 早期湖水较深,所以其还原性比较强,而到了晚期, 随着蒸发作用的加强,湖水变浅,还原性减弱,导致  $\delta^{34}$  S值降低;同时Nielsen and Ricke(1964)的研究



#### 图 4 硫同位素的组成特征与层序发育特征的对应关系(陈发亮等,2000)

 Fig. 4
 Relationship between sulfur isotopic composition and sequence development

 LST. 低位体系域; TST. 水侵体系域; HST. 高位体系域; FSST. 下降体系域

也指出在蒸发旋回晚期阶段产生的硫酸盐(即属于 钾—镁盐相)的 $\partial^{34}S$ 较低,这是由于早期石膏和硬 石膏的分馏已耗去了大量的 $\partial^{34}S$ ,因此,这也可能是 沙一段时期 $\partial^{34}S$ 值偏低的一个原因.

纵观沙四上段到沙一段  $\delta^{34}$  S 的变化情况, 笔者 发现 δ<sup>34</sup>S 值变化较大,同时 δ<sup>34</sup>S 值明显大于海相蒸 发岩中 $\delta^{34}$ S值,这说明当时的沉积环境对硫酸盐来 说是封闭的,硫酸盐的补充小干细菌的还原作用,所 以造成硫酸盐中 δ<sup>34</sup>S 值偏高. 因为如果在开放的环 境下,即硫酸盐能够得到源源不断的补充,则细菌的 还原作用将显得相对较弱,所以蒸发岩中的 $\delta^{34}$ S值 应该维持在硫酸盐中的 20×10<sup>-3</sup> 左右. 同时该区的  $\delta^{34}$ S 值基本上落在 20×10<sup>-3</sup>~40×10<sup>-3</sup>之间,而如 果按照前人的研究成果,即认为如果湖泊沉积体系 对 H<sub>2</sub>S 封闭,则  $\delta^{34}$ S 值变化范围为( $-50 \sim 20$ )×  $10^{-3}$ ,若开放则为 $(-50\sim 40)\times 10^{-3}$ ,则东濮凹陷沙 河街组时期的沉积环境对 H<sub>2</sub>S 来说应该是开放的. 也就是说,被细菌由硫酸盐中还原出来的  $S^{2-}$  能够 与足够的金属离子结合,形成不溶硫化物从系统中 沉淀出来,所以,东濮凹陷在沙河街组沉积时期对硫 酸盐来说是封闭的,而对硫化氢是开放的.

## 3 氧同位素特征及沉积地球化学分析

对于一个水体停留时间长、封闭性的湖泊,蒸发 作用将对湖水的化学组成起着决定性的作用.随着 蒸发作用的增强,较轻的<sup>16</sup> O 优先逸出,造成水体 中<sup>18</sup> O 含量的增加,从而使湖水的 δ<sup>18</sup> O 值也随之增 加.平衡状态下沉积的碳酸盐的 δ<sup>18</sup> O 值,取决于碳 酸盐的矿物相、水体盐度和温度 (张秀莲,1985).笔



#### 图 5 不同层位氧同位素组成特征

Fig. 5  $\delta^{18}$ O composition character of different layers

者认为,正常湖泊 (除滨岸相和撒巴哈型)碳酸盐的 沉积速率相当缓慢,是可以与水体达到平衡的.事实 上,在内陆干旱地区干燥的气候条件下湖水 δ<sup>18</sup> O 的 高低波动主要受湖水的蒸发 (或淡化)作用控制.干 旱地区的封闭湖泊在干燥气候条件下,其湖水蒸发 量往往要超出湖盆所接受的降水量和河水的补给 量,这样,湖泊沉积物中碳酸盐的 δ<sup>18</sup> O 就随蒸发作 用的加强 (或减弱)而相应表现出增高 (或降低)的 特征.因此,干旱地区封闭湖泊水体中碳酸盐 δ<sup>18</sup> O 值的高低变化除了可以反映湖水古温度变化之外, 更为客观的是湖泊水体蒸发 (或淡化)作用的直接 体现.因此,可以利用已沉积的碳酸盐中的 δ<sup>18</sup> O 值 揭示当时的沉积环境.

从沙河街组不同层位间 δ<sup>18</sup> O 值的组成特征来 看(图 5),δ<sup>18</sup> O 值从沙四上段到沙三上段除沙三中 段有些波动外基本上呈降低的趋势.这反映出该段 时期的气候较为湿润,降雨量逐渐增大.其中沙三上 段的 δ<sup>18</sup> O 达到了最低值,反映出降雨量达到了最 大,这与锶同位素所揭示的情况基本一致.从沙三上 段到沙二上段时 δ<sup>18</sup> O 突然升高,这表明东濮凹陷在 由沙三上段向沙二上段过渡时,可能存在一次气候 上的突变,使得沙二上段和沙一段时期的蒸发量远 大于降雨量,从而使 ∂<sup>18</sup>O 值迅速增大.

对于一个封闭湖泊,蒸发和降雨条件控制着湖 水的水位. 当蒸发量大于降雨量时,湖水水位下降. 前已述及,随着蒸发作用的增强,将意味着水体中有 较多<sup>16</sup>O逸出,从而导致水体中 ∂<sup>18</sup>O值的增加,也使 得湖相碳酸盐岩的 δ<sup>18</sup>O值增加. 因此,可以根据湖 相碳酸盐岩的 δ<sup>18</sup>O值恢复古湖水面的变化. 从图 5 中不同层位间 δ<sup>18</sup>O值的变化特征可以推断出东濮 凹陷在由沙四段上到沙一段时期湖平面的大致变化 趋势为:从沙四上段到沙三上段除沙三中段有些波 动外东濮凹陷基本上处于扩张阶段,湖面逐渐上升; 而从沙三上段到沙二上段 δ<sup>18</sup>O值的突然降低,可知 当时该区蒸发作用骤然加强,湖面出现迅速下降. 但 总的来说,东濮凹陷从沙三上段到沙一段时期因处 于湖盆萎缩阶段,湖平面逐渐降低.

综上分析,可以看出东濮凹陷古近系沙河街组 时期的古环境变化为:由沙四上段到沙三上段时期 气候较为湿润,降雨量逐渐增加.降雨量的增加将导 致相对多的高<sup>87</sup> Sr/<sup>86</sup> Sr 比值的硅铝质风化产物被带 到湖中,结果使湖水的<sup>87</sup> Sr/<sup>86</sup> Sr 比值增大,相应的沉 积物中的 $^{87}$  Sr/ $^{86}$  Sr 比值也增大(图 2). 同时降雨的 增加也将导致湖平面的上升,从而使 ∂<sup>18</sup> O 值降低 (图 5),这一时期主要发育水侵体系域,而在水侵体 系域发育时,沉积物的供应相对较弱,有机质的埋藏 速率降低,从而使厌氧细菌的活动作用减弱,所以  $\delta^{34}$ S值在这一时期呈现降低的趋势(图 4). 而由沙 三上段向沙一段过渡时期,该区的气候由湿润变得 干旱,降雨量出现相应的降低,降雨量的降低削弱了 高<sup>87</sup> Sr /<sup>86</sup> Sr 比值的硅铝质风化产物被带到湖中,从 而使湖水的<sup>87</sup> Sr/<sup>86</sup> Sr 比值降低,相应的沉积物中 的<sup>87</sup> Sr /<sup>86</sup> Sr 比值也降低(图 2). 降雨量的降低也导 致湖平面出现下降的趋势,造成湖盆水体和沉积物 中 $\delta^{18}$ 〇的升高(图 5),这时主要发育低位体系域 (高位体系域).在低位体系域(高位体系域)形成时 沉积物的供应相对较充足,有机质易被快速埋藏,所 以厌氧细菌的还原作用将增强,δ<sup>34</sup>S值出现升高的 特征(图4).

#### 4 结论

(1)通过对东濮凹陷古近系沙河街组不同含盐 层位锶、硫同位素的组成特征分析表明,东濮凹陷沙

河街组时期的盐岩应属于典型的陆相成因,其 <sup>87</sup>Sr/<sup>86</sup>Sr值和 δ<sup>34</sup>S 值分别大于海相碳酸盐的<sup>87</sup>Sr/ <sup>86</sup>Sr值和硫酸盐的  $\delta^{34}$ S 值. (2) 由锶和氧的沉积地球 化学分析表明,东濮凹陷古近系沙河街组时期的气 候变化情况为:沙四上段到沙三上段时期气候较为 湿润,降雨量逐渐增加;而由沙三上段到沙一段时 期,气候突然变得干旱,降雨量骤然降低,从而导 致<sup>87</sup> Sr/<sup>86</sup> Sr 的降低和 δ<sup>18</sup> O 的升高. (3) 硫同位素的 分析表明:东濮凹陷沙河街组时期 $\delta^{34}$ S的发育呈现 出明显的旋回性,且这种旋回性与层序的旋回性吻 合较好:同时沙河街组时期的沉积环境对硫酸盐是 封闭的,而对  $H_{s}S$  是开放的. (4)氧同位素的分析表 明,东濮凹陷从沙四上段到沙三上段时期除沙三中 段有些波动外基本上处于扩张阶段,湖面逐渐上升; 而从沙三上段到沙二上段时期 d<sup>18</sup> O 突然降低,表明 该区当时出现了蒸发作用的骤然加强而使湖面出现 讯谏下降的情况,但总的来说,东濮凹陷从沙三上段 到沙一段时期处于湖盆萎缩阶段.

#### References

- Bailey, S. W., Hornbeck, J. W., Priscoll, C. T., et al., 1996. Calcium inputs and transport in a base poor forest ecosystem as interpreted by Sr isotopes. *Water Resources Research*, 32:707-719.
- Chen, F. L., Zhu, H., Li, X. T., et al., 2000. Partition of sequence strata and discussion about salt-rock resource in Shahejie Formation of Eogene, Dongpu depression, *Acta Sedimentologica Sinica*, 18(3): 384-394 (in Chinese with English abstract).
- Deng, H. W., Qian, K., 1993. Sedimentary geochemistry and environmental analysis. Gansu Science and Technology Press, Lanzhou (in Chinese).
- Douglas, G. B., Gray, C. M., Hart, B. T., et al., 1995. A strontium isotopic investigation of the origin of suspended particulate matter (SPM) in the Murray-Darling River system, Australia. *Ceochim. Cosmochim. Acta*, 59: 3799.
- Faure, G., 1986. Principle of isotope geology. 2nd Edition. John Wiley & Sons, New York, 117-199.
- Holser, W. T., Kaplan, I. R., 1966. Isotope geochemistry of sedimentary sulfates. *Chem. Geol.*, 1:93-135.
- Kerry, K., 1987. Lacaustrine basin analysis and correlation by strontium isotope stratigraphy. Abstract of 13rd International Sedimentary.
- Li, R. W., Xin, M. A., 1989. Origin of evaporates of Dongpu

basin. *Acta Sedimentologica Sinica*, 7(4):141-147 (in Chinese with English abstract).

- Liu, Q., Chen, Y. H., Li, Y. C., et al., 1987. Mesozoic and Cenozoic salt deposition of terrigenous clastic chemical rock of China. Science and Technology Press, Beijing (in Chinese).
- Matin, E. E., Macdougall, J. D., 1991. Seawater Sr isotope at the Cretaceous/Tertiary. *Earth Planet. Sci. Lett.*, 104: 166-180.
- McArthur, J. M., Burnett, J., Hancock, J. M., 1992. Strontium isotopes at K/T boundary: Discussion. Nature, 355 (6355):28.
- Miller, E. K., Blum, J. D., Friedland, A. J., 1993. Determination of soil exchanheable—cation loss and weathering rates using Sr isotope. *Nature*, 362:438-441.
- Nielsen, H., Ricke, W., 1964. Schwefel-isotopenverhältnisse von evaporiten aus Deutschland. Ein. Beitrag zur kenntnis von  $\delta^{34}$  S im meerwasser-sulfat. *Geochim. Cosmochim. Acta*. 28,577–591.
- Palmer, M. R., Edmond, J. M., 1989. The strontium isotopic budget of the modern ocean. *Earth Planet. Sci. Lett.*, 92:11-26.
- Reinhardt, E. G., Blenkinsop, J., Patrerson, R. T., 1998. Assessment of a Sr isotope (<sup>87</sup> Sr/<sup>86</sup> Sr) vital effect in marine taxa from Lee Stocking Island, Bahamas. *Geo-Marine Letters*, 18(3):241-246.
- Ren, L. Y., Lin, G. F., Tan, Y. M., et al., 2002. Studying marine transgression of Early Tertiary in Dongpu depression from paleontologic and geochemical marks. *Journal of Xi'an Petroleum Institute* (Natural Science Edition), 17(1): 20-23 (in Chinese with English abstract).
- Sakai, H., 1968. Isotopic properties of sulfur compounds in hydrothermal processes. *Geochem. J.*, 2(1):2.
- Xu, J. Z., Jiang, F. H., Zhang, X. Y., et al., 2003. Sedimenta-

ry characteristics and origin of salt rock of Shahejie Formation of Paleogene in Dongpu sag, Henan Province. *Journal of Paleogeography*, 5(2):162-170 (in Chinese with English abstract).

- Zhang, X. L., 1985. Relationship between carbon and oxygen stable isotope in carbonate rocks and paleosalinity and paleotemperature of seawater. Acta Sedimentologica Sinica, 3 (4):17-30 (in Chinese with English abstract).
- Zhang, X. Y., Wang, Y. S., Duan, H. M., et al., 2002. The halites formed in shallow water and hydrocarbon distribution in Dongpu depression. *Fault-Block Oil & Gas Field*, 9 (4): 12 - 14 (in Chinese with English abstract).

附中文参考文献

- 陈发亮,朱晖,李绪涛,等,2000. 东濮凹陷下第三系沙河街组 层序地层划分及盐岩成因探讨. 沉积学报,18(3): 384-394.
- 邓宏文,钱凯,1993. 沉积地球化学与环境分析. 兰州:甘肃科 学技术出版社.
- **李任伟,辛茂安,**1989. 东濮盆地蒸发岩的成因. 沉积学报, 7(4): 141-147.
- 刘群,陈郁华,李银彩,等,1987.中国中、新生代陆源碎屑-化学岩型盐类沉积.北京:科学技术出版社.
- 任来义,林桂芳,谈玉明,等,2002.从古生物和地球化学标志 看东濮凹陷早第三纪的海侵事件.西安石油学院学报 (自然科学版),17(1):20-23.
- 胥菊珍,蒋飞虎,张孝义,等,2003.河南东濮凹陷古近系沙河 街组盐岩沉积特征及成因.古地理学报,5(2):162-170.
- 张秀莲,1985.碳酸盐岩中氧、碳稳定同位素与古盐度古水温 的关系.沉积学报,3(4):17-30.
- 张孝义,王运所,段红梅,等,2002.东濮凹陷北部浅水成盐与 油气分布初探.断块油气田,9(4):12-14.