

东营凹陷生油岩中介形虫 氧、碳同位素的古湖泊学意义

刘传联,赵泉鸿,汪品先

(同济大学海洋地质教育部重点实验室,上海 200092)

摘要:对山东东营凹陷沙河街组一段27个生油岩样品中的介形虫进行了氧、碳同位素分析,其 $\delta(^{18}\text{O})$ 全为负值, $\delta(^{13}\text{C})$ 多为正值,两者之间有明显的相关性,相关系数(r)为0.92.同时, $\delta(^{18}\text{O})$ 与 $\delta(^{13}\text{C})$ 垂向变化明显,沙一段下、中亚段明显高于上亚段.通过与现代湖泊碳酸盐氧、碳同位素特征的比较得出:沙一段生油岩沉积时期的古湖泊是一封闭咸水或半咸水湖泊,中、下亚段沉积时期,气候干燥、蒸发作用强烈、湖水面较低、盐度高、生产力高,而上亚段沉积时期,气候较湿润、降雨量大、湖水面高、盐度偏低、生产力降低.

关键词:氧、碳同位素;介形虫;生油岩;古湖泊学.

中图分类号: P53

文献标识码: A

文章编号: 1000-2383(2001)05-0441-05

作者简介:刘传联(1963—),男,副教授,1998年毕业于同济大学海洋地质专业,获博士学位,现主要从事古海洋学和古湖泊学的研究与教学工作.

介形虫氧、碳同位素分析是目前国内外第四纪古湖泊学研究中常用的一种方法,可以用来再造湖泊的封闭与开放性、湖水面变化、盐度变化、生产力特征和集水盆地古气候等^[1,2],如我国对青海湖^[3]和新疆巴里坤湖^[4]的研究.但该方法在前第四纪湖相盆地研究中的应用实例不多.众所周知,我国以湖相生油而闻名于世,丰富的石油资源多来自第三纪和中生代古湖泊沉积而成的巨厚生油岩.而介形虫正是这些生油岩中最普遍、最丰富的化石.能否通过这些化石氧、碳同位素的分析,来再造生油湖泊环境,无疑是一项具有实际意义的课题.为此,本文以山东东营凹陷生油岩作为实例,对这一问题进行了探讨.

1 材料与方法

东营凹陷位于山东北部的东营市和滨州市境内,在构造上是渤海湾盆地济阳拗陷中的一个次级单元,面积约为5700 km²(图1).凹陷的北缘是陈家庄凸起和垦东青坨子凸起,西缘为滨县凸起、林樊家背斜和青城突起,南缘为鲁西隆起和广饶凸起,

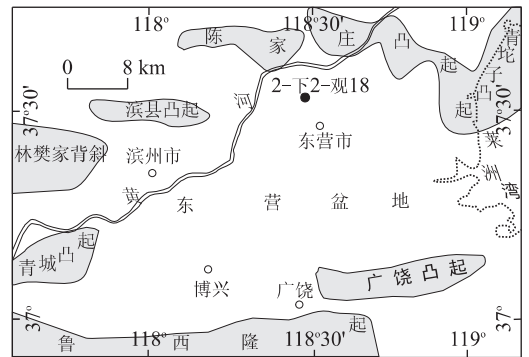


图1 研究钻孔位置

Fig. 1 Location of the studied well

东部则与青东凹陷相连.该凹陷第三系总厚达7300 m,可分为上第三系明化镇组、馆陶组,下第三系东营组、沙河街组和孔店组,各组又可分为不同的段和亚段,如沙河街组(E_s)从上而下分为沙一段、沙二段、沙三段和沙四段^[5].已有研究表明,该凹陷的生油岩主要分布在沙一段、沙三段和沙四段^[5].本次研究的材料是位于凹陷北部的2-2-18井(即2-2-观18井)(图1)中的沙一段(E_{s1})(早渐新世,1713~1918 m井段),其岩性特征为:下亚段为深灰色泥岩夹白云岩,中亚段为灰色泥岩、粉砂岩夹生

物灰岩(螺灰岩、介形虫灰岩)和白云岩,上亚段主要是灰色、灰绿色泥岩夹砂岩。

研究中,首先对该井段岩心样品进行了系统的介形虫化石分析,发现化石极为丰富。其中,中、下亚段主要以两瓣近等的小个体属种为主,如 *Phacocypris huiminensis*, *P. vulgata*, *P. panheensis*, *Pseudocandona boxingensis*, *P. deplanata* 等;而上亚段以大个体的 *Xiyingia* 和 *Guangbeinia* 特别发育为特征,如 *Xiyingia luminosa*, *X. magna*, *X. alta*, *Guangbeinia lijiaensis* 等。这些介形虫化石保存状况各异,既有完整的双瓣,也有单瓣或碎片。双瓣个体大多数被方解石、白云石、黄铁矿或泥质充填,成岩作用较为严重;而单瓣多为壳薄、透明的个体,成岩作用影响较低^[6]。

用来进行同位素测试的样品就是上述那些无充填、无矿化的单瓣或壳体碎片,共分析 25 个样品。由于样品中单个属或种的数量都达不到氧、碳同位素分析的要求,所以测试的是上述属种的混样。测试工作在青岛国土资源部海洋地质研究所完成,使用仪器为 Finnigan-MAT 公司的 Delta E 型稳定同位素质谱仪,使用的工作标准为 TTB-1,所给数据均为相对于国际标准的 *PDB* 值。

2 氧、碳同位素特征

介形虫壳体氧、碳同位素测试结果如表 1 所示,它们有以下特征:(1) $\delta(^{18}\text{O})$ 全为负值,变化范围为 $-4.853 \times 10^{-3} \sim -0.341 \times 10^{-3}$,变化幅度为 4.512×10^{-3} ,平均值为 -1.808×10^{-3} ; $\delta(^{13}\text{C})$ 除 8 号样品为负值外,其他样品均为正值,其变化范围为 $-0.360 \times 10^{-3} \sim 2.961 \times 10^{-3}$,变化幅度为 3.321×10^{-3} ,平均值为 1.839×10^{-3} 。如以 $\delta(^{18}\text{O})$ 为横坐标、 $\delta(^{13}\text{C})$ 为纵坐标作散点图,上述分析数据除一个点外均落在第二象限(图 2)。(2) $\delta(^{18}\text{O})$ 与 $\delta(^{13}\text{C})$ 之间有明显的相关性,相关系数(r)为 0.92(图 2)。(3) $\delta(^{18}\text{O})$ 与 $\delta(^{13}\text{C})$ 垂向变化明显,从下亚段到中亚段再到上亚段, $\delta(^{18}\text{O})$ 和 $\delta(^{13}\text{C})$ 都越来越趋于偏负,下、中亚段明显高于上亚段的氧、碳同位素比值(图 3)。下亚段 $\delta(^{18}\text{O})$ 平均值为 -1.040×10^{-3} , $\delta(^{13}\text{C})$ 平均值为 1.092×10^{-3} ; 中亚段 $\delta(^{18}\text{O})$ 平均值为 -1.385×10^{-3} , $\delta(^{13}\text{C})$ 平均值为 1.931×10^{-3} ; 上亚段 $\delta(^{18}\text{O})$ 平均值为 -3.00×10^{-3} , $\delta(^{13}\text{C})$ 平均值为 2.493×10^{-3} 。

表 1 东营凹陷 2-2-18 井沙一段介形虫壳体氧、碳同位素成分

Table 1 Oxygen and carbon isotopic compositions of ostracoda from the first member of Shahejie Formation

样品号	深度/m	$\delta(^{13}\text{C}) \pm \sigma / 10^{-3}$	$\delta(^{18}\text{O}) \pm \sigma / 10^{-3}$
1	1 714.5	2.961±0.053	-0.792±0.102
2	1 717.0	2.763±0.014	-0.637±0.066
3	1 720.0	0.257±0.013	-4.616±0.040
4	1 739.0	0.344±0.008	-4.463±0.035
5	1 740.0	0.060±0.024	-4.126±0.028
6	1 747.0	1.906±0.013	-2.007±0.036
7	1 748.8	1.306±0.010	-2.358±0.012
8	1 752.4	-0.360±0.006	-4.853±0.038
9	1 754.3	0.598±0.036	-3.168±0.068
10	1 762.7	0.502±0.032	-2.810±0.047
11	1 765.7	1.974±0.010	-1.234±0.035
12	1 767.0	1.519±0.010	-2.191±0.010
13	1 781.0	2.668±0.007	-1.381±0.032
14	1 790.0	2.152±0.005	-1.332±0.033
15	1 809.7	1.905±0.012	-0.345±0.014
16	1 816.5	2.432±0.014	-0.655±0.022
17	1 825.0	1.767±0.007	-2.124±0.020
18	1 832.0	2.460±0.012	-0.395±0.037
19	1 850.0	2.828±0.010	-0.341±0.050
20	1 859.9	2.810±0.018	-1.472±0.027
21	1 871.5	2.816±0.005	-0.954±0.041
22	1 881.8	2.145±0.015	-1.157±0.050
23	1 891.5	1.880±0.019	-1.436±0.010
24	1 910.0	2.144±0.016	-0.888±0.062
25	1 928.0	2.830±0.017	-1.031±0.011
平均值		1.839	-1.808

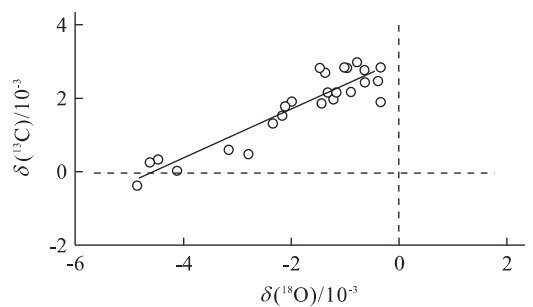


图 2 2-2-18 井沙一段介形虫壳体 $\delta(^{18}\text{O})$ 和 $\delta(^{13}\text{C})$ 值散点图

Fig. 2 Scatter plot of $\delta(^{18}\text{O})$ and $\delta(^{13}\text{C})$ of ostracoda from the first member of Shahejie Formation in well 2-2-18

3 讨论

3.1 氧、碳同位素的相关性与生油湖泊类型

通过对现代不同类型湖泊中碳酸盐氧、碳同位

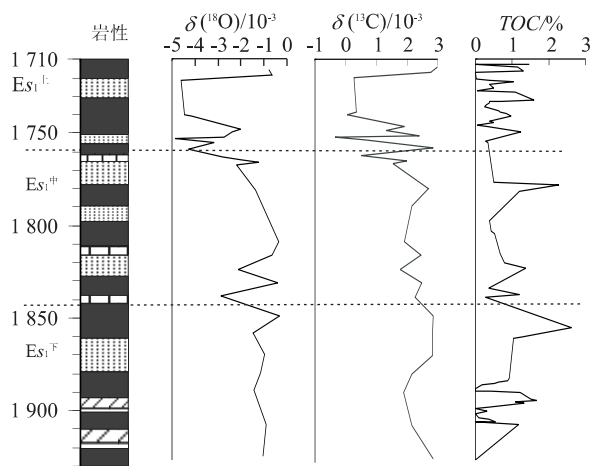


图 3 2-2-18 井沙一段介形虫壳体 $\delta(^{18}\text{O})$ 和 $\delta(^{13}\text{C})$ 及生油岩 TOC 垂向变化曲线

Fig. 3 Vertical variation of $\delta(^{18}\text{O})$ and $\delta(^{13}\text{C})$ of ostracoda and TOC of oil source rocks in well 2-2-18

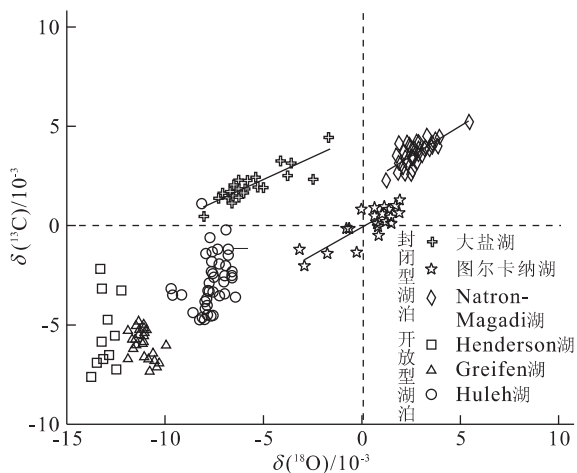


图 4 现代封闭与开放湖泊原生碳酸盐氧、碳同位素的相关性^[7]

Fig. 4 Covariance carbon and oxygen isotopic trends in primary carbonates from modern lakes

大盐湖、Natron-Magadi 湖为超咸水湖, 图尔卡纳湖为半咸水湖, 见文献^[7], Henderson 湖、Greifen 湖和 Huleh 湖均为淡水湖, 见文献^[8,9]

素进行大量测试后发现: 开放型淡水湖泊中, 原生碳酸盐 $\delta(^{18}\text{O})$ 和 $\delta(^{13}\text{C})$ 之间不相关或略呈相关, 而且 $\delta(^{18}\text{O})$ 和 $\delta(^{13}\text{C})$ 均为负值, 其投点落在第三象限, 如瑞士 Greifen 湖、美国 Henderson 湖和以色列 Huleh 湖(图 4); 而封闭型咸水、半咸水湖泊中, $\delta(^{18}\text{O})$ 和 $\delta(^{13}\text{C})$ 之间呈明显的相关关系, 相关系数 (r) 一般大于 0.7, 封闭性越强, 相关系数越大, 且 $\delta(^{18}\text{O})$ 正负均有, $\delta(^{13}\text{C})$ 则基本属正值, 其投点落在

一、二象限内, 如美国大盐湖 ($r=0.87$)、图尔卡纳湖 ($r=0.86$)、Natron-Magadi 湖 ($r=0.84$)^[8,9](图 4)。

上述规律的原因是, 开放型湖泊中, 水体快速更替, 停留时间短, 湖水同位素的演化微乎其微, 其氧、碳同位素更多地反映了注入水的同位素特征, 因此在其中形成的原生碳酸盐氧和碳同位素组分的变化各自独立^[8]. 封闭型湖泊中则不然, 由于水体停留时间长, 蒸发作用对湖水的化学组成起决定性的作用^[8]. 随着蒸发作用的增强, 较轻的 ^{16}O 和 ^{12}C 优先从湖水表面逸出, 造成湖水中的 ^{18}O 和 ^{13}C 含量增加, 使得湖水的 $\delta(^{18}\text{O})$ 和 $\delta(^{13}\text{C})$ 较注入水明显偏正. 同时由于这种演化作用对于氧、碳同位素是同步的, 所以两者呈明显的共变趋势, 反映在其中形成的原生碳酸盐同位素成分上, $\delta(^{18}\text{O})$ 和 $\delta(^{13}\text{C})$ 呈明显的相关性^[8,9].

这一规律已成为判断第四纪古湖泊或更老湖泊封闭性的标志之一, 并已有许多成功的例子. 如对加纳 Bosumtwi 湖晚更新世—全新世沉积^[8]、对东非 Kivu 湖晚第四纪沉积^[10]、对西班牙 Cenajo 盆地中新世沉积^[11] 和苏格兰 Orcadian 盆地泥盆纪沉积^[12] 的研究等等。

把东营凹陷沙一段介形虫氧、碳同位素与现代湖泊碳酸盐同位素相比较(图 2, 图 4), 可以看出它们与封闭型咸水、半咸水湖泊的特征极为相似, 而且相关系数较之更大, 这反映了沙一段沉积时期(渐新世)的东营湖是一封闭咸水或半咸水湖。

3.2 氧同位素与古气候、古湖水面

如上所述, 在水文条件封闭、水体停留时间长的封闭湖泊中, 蒸发作用是控制氧同位素的决定因素^[10]. 随着蒸发作用的增强, 使湖水的 $\delta(^{18}\text{O})$ 值增加, 反映在其中生活的介形虫壳体上, $\delta(^{18}\text{O})$ 值也增加. 所以, 可以根据介形虫壳体 $\delta(^{18}\text{O})$ 值的变化, 恢复蒸发/降雨古气候条件的变化。

沙一中、下亚段介形虫壳体的 $\delta(^{18}\text{O})$ 明显高于沙一上亚段. 说明沙一中、下亚段沉积时期, 气候干燥, 蒸发作用强烈, 蒸发量明显大于降雨量; 而沙一上亚段沉积时期, 降雨量增加, 气候趋于湿润。

在封闭湖泊中, 蒸发/降雨条件的变化必然引起古湖水面的波动. 蒸发量大于降雨量, 湖水面降低, 反之则湖水面升高. 所以, 据介形虫壳体 $\delta(^{18}\text{O})$ 值的变化同样可以再造古湖水面的变化情况. 沙一中、下亚段沉积时期, 总体上湖水面较低, 但其间又有微小的波动; 沙一上亚段沉积时期, 湖水面升高, 到了

晚期,湖水面又降低。

3.3 碳同位素与古生产力

原生碳酸盐的碳同位素组分与其生活水体中溶解无机碳的碳同位素组分平衡。而影响湖水溶解无机碳碳同位素组分的一个重要因素就是湖泊的生产力。Stiller 等^[13]曾提出湖泊溶解无机碳(DIC)的碳同位素组分生产力控制模式。按该模式,在稳定分层条件下,当浮游植物勃发、生产力高时,浮游植物通过光合作用吸收较多的¹²C,使表层水体中溶解无机碳储库中¹³C含量相对增加,从而使表层水体中形成的原生碳酸盐的 $\delta(^{13}\text{C})$ 值偏高;而随着¹²C富集的有机质不断下沉,使得湖下层生活的底栖生物壳体的 $\delta(^{13}\text{C})$ 值逐渐降低。

这是深水分层湖泊的模式,对于浅水、不分层的湖泊来说,则有极大的不同。当湖水生产力高,造成水体中DIC储库中¹³C含量增加时,生活在其中的介形虫也是"受益者"。其壳体的 $\delta(^{13}\text{C})$ 值也应是增高,而不是降低。

前已述及,东营凹陷沙一段的介形虫以小个体属种为主,且壳面光滑、壳壁薄、两瓣近等,只是沙一上亚段有大个体的 *Xiyingia* 和 *Guangbeinia*。这样一套介形虫组合普遍被认为是浅水属种组合^[14]。另外根据腹足类化石的分布、岩石类型与分布,也表明东营凹陷沙一段沉积时期的古湖泊是一宽广的浅湖^[5]。所以,在这样一种浅水环境中,介形虫壳体的 $\delta(^{13}\text{C})$ 值应随着古生产力的增高而升高。

如图 3 所示,沙一中、下亚段介形虫壳体的 $\delta(^{13}\text{C})$ 值要高于沙一上亚段介形虫壳体的 $\delta(^{13}\text{C})$ 值,说明沙一中、下亚段沉积时期古湖泊的生产力较高,而沙一上亚段沉积时期古湖泊的生产力较低。

上述由介形虫氧、碳同位素得出的生油湖泊特征与根据生油岩沉积学、古生物学和有机地球化学证据得出的结论是一致的。如王秉海等^[5]根据岩性的分布认为沙一段沉积的早期气候干燥、水质较咸,晚期气候逐渐湿润,水质变淡;而单怀广等^[14]根据介形虫化石生态学分析认为沙一中、下亚段沉积时期湖水较浅,到沙一上亚段沉积时期湖水开始变深。生油岩有机碳含量(TOC)是表示有机质丰富程度的一项指标,它在一定程度上也能反映古生产力的。高低。在保存条件相同的情况下,湖水的生产力越高,当然保存的有机质越丰富,有机碳含量也就越高。本文对 2—2—18 井沙一段生油岩有机碳含量也进行了分析,其变化如图 3 所示。从中可以看出,沙

一中、下亚段有机碳含量也普遍高于沙一上亚段,与介形虫壳体 $\delta(^{13}\text{C})$ 值的变化趋势基本一致,同样说明沙一中、下亚段沉积时期古湖泊生产力要高于沙一上亚段沉积时期的古湖泊。

4 结语

东营凹陷生油岩中介形虫氧、碳同位素的分析表明,该方法对于第三纪生油湖泊研究具有重要意义。 $\delta(^{18}\text{O})$ 和 $\delta(^{13}\text{C})$ 比值及两者之间明显的相关性,指示东营凹陷沙一段沉积时期的古湖泊是一封闭型咸水湖泊。这一湖泊在中、下亚段沉积时期:气候干燥、蒸发作用强、湖水面较低、盐度较高、生产力较高;而上亚段沉积时期:气候湿润、降雨量增加、湖水面升高、盐度降低、生产力较低。

参考文献:

- [1] Lister G S. Stable isotopes from lacustrine ostracoda as tracers for continental palaeoenvironments [A]. In: De Deckker P, Colin J P, Peypouquet, eds. Ostracoda in the Earth Sciences [C]. Amsterdam: Elsevier, 1988. 201—218.
- [2] 刘传联. 稳定同位素地球化学方法在古湖泊学研究中的应用[A]. 见: 汪品先, 刘传联, 主编. 含油盆地古湖泊学研究方法[C]. 北京: 海洋出版社, 1993. 96—123.
- [3] 张彭熹, 张保珍, 杨文博. 青海湖冰后期以来古气候波动模式的研究[J]. 第四纪研究, 1989, 1: 66—77.
- [4] 吴世迎, 黎明明. 新疆巴里坤湖氧、碳同位素测定的古气候意义[J]. 新疆大学学报(自然科学版), 1990, 7(4): 81—84.
- [5] 王秉海, 钱凯. 胜利油区地质研究与勘探实践[M]. 东营: 石油大学出版社, 1992. 348.
- [6] 刘传联, 赵泉鸿, 洪太元, 等. 东营凹陷沙河街组介形虫化石保存特征研究及应用[J]. 微体古生物学报, 1998, 15(2): 186—195.
- [7] Kelts K. Environment of deposition of lacustrine petroleum source rocks: an introduction [A]. In: Fleet A J, Kelts K, Talbot M R, eds. Lacustrine petroleum source rocks [C]. Geological Society Special Publication, 1988, 40: 3—29.
- [8] Talbot M R, Kelts K. Paleolimnological signatures from carbon and oxygen isotopic ratios in carbonates from organic carbon-rich lacustrine sediments[A]. In: Katz B J, ed. Lacustrine basin exploration — case studies and modern analogs [C]. AAPG Memoir, 1990, 50: 61—

- 76.
- [9] Talbot M R. A review of the palaeohydrological interpretation of carbon and oxygen isotopic ratios in primary lacustrine carbonates [J]. *Chemical Geology (Isotope Geoscience Section)*, 1990, 80: 261—279.
- [10] Botz R P, Stoffers E, Faber E, et al. Isotope geochemistry of carbonate sediments from Lake Kivu (East-Central Africa) [J]. *Chemical Geology*, 1988, 69: 299—308.
- [11] Bellanca A, Calvo J P, Censi P, et al. Evolution of lacustrine diatomite carbonate cycles of Miocene age, southeastern Spain — petrology and isotope geochemistry [J]. *Journal of Sedimentary Petrology*, 1989, 59: 45—52.
- [12] Janaway T M, Parnell J. Carbonate production within the Orcadian basin, northern Scotland — a petrographic and geochemical study [J]. *Palaeogeogr Palaeoclimatol Palaeoecol*, 1989, 70: 89—105.
- [13] Stiller M, Hutchinsons G E. The waters of Merom; a study of Lake Huleh BI stable isotopic composition of carbonates of a 54 m core. Paleoclimatic and paleotrophic implications [J]. *Arch Hydrobiol*, 1980, 89: 275—302.
- [14] 单怀广, 张慧娟. 山东油气区早第三纪介形类[A]. 见: 中国油气区地层古生物编委会. 中国油气区地层古生物论文集[C]. 北京: 石油工业出版社, 1990. 1—56.

PALEOLIMNOLOGICAL SIGNIFICANCE OF CARBON AND OXYGEN ISOTOPIC RATIOS OF OSTRACODA FROM OIL SOURCE ROCKS IN DONGYING DEPRESSION

Liu Chuanlian, Zhao Quanhong, Wang Pinxian

(*Laboratory of Marine Geology of Tongji University, Shanghai 200092, China*)

Abstract: Stable-isotopic analyses of 27 ostracoda samples from oil source rocks in Dongying depression (Bohai Gulf basin, East China) have been carried out. The results show that the $\delta(^{18}\text{O})$ of the ostracoda is negative and the $\delta(^{13}\text{C})$ is positive except one sample ($\delta(^{18}\text{O})$: -4.853×10^{-3} to -0.341×10^{-3} ; $\delta(^{13}\text{C})$: -0.360×10^{-3} to 2.961×10^{-3}), which displays the characteristics, highly correlated in covariance between oxygen and carbon isotopic variations ($r=0.92$). This characteristics is similar to the stable oxygen and carbon isotopic compositions of primary carbonates from modern hydrologically closed lakes. Therefore, we concluded that the paleolake during the oil source rocks deposition in Dongying depression is a closed saline or brackish lake. Based on the vertical variation of $\delta(^{18}\text{O})$ and $\delta(^{13}\text{C})$, the changes of the paleoclimate, paleolake level and paleoproductivity have been discussed. In the early stage of oil source rocks deposition, the climate was dry, the lake level, lower and the productivity, high, but it became wet, and the high water level and lower productivity occurred in the late depositional period.

Key words: oxygen and carbon isotope; ostracoda; oil source rocks; paleolimnology.