

文章编号 : 0379 - 1726(2001)04 - 0363 - 05

湖相碳酸盐氧碳同位素的相关性与生油古湖泊类型

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 : 对山东东营盆地和南海珠江口盆地早第三纪生油层中的湖相碳酸盐氧碳同位素进行了分析。结果显示,前者 $\delta^{18}\text{O}$ 多为负值、 $\delta^{13}\text{C}$ 基本为正值,两者之间相关性强,相关系数大于 0.8,而后者 $\delta^{18}\text{O}$ 和 $\delta^{13}\text{C}$ 均为负值,两者不相关。通过与现代湖泊碳酸盐氧碳同位素特征的比较,得出东营盆地早第三纪生油湖泊为封闭型咸水或半咸水湖,珠江口盆地早第三纪生油湖泊为开放型淡水湖。这一结论与两盆地生油层的沉积学和古生物学证据相一致,说明利用湖相碳酸盐氧、碳同位素的特征及其相关性可以判断生油古湖泊的类型。

关键词 : 氧碳同位素 ; 相关性 ; 湖相碳酸盐 ; 古湖泊

中图分类号 : P597 文献标识码 : A

0 引 言

湖相碳酸盐氧碳同位素分析已广泛应用于第四纪古湖泊学研究^[1-6],利用氧碳同位素之间的相关性来判断湖泊的封闭程度和水化学性质,从而确定古湖泊的类型是其中的一个重要方面^[1,2]。这种方法在前第四纪湖相盆地研究中也已有成功的实例^[7,8]。我国以湖相生油闻名于世,在巨厚的生油层中,广泛分布着湖相碳酸盐。它们或以碳酸盐岩薄层的形式夹于碎屑岩中,或以钙质微体化石的形式直接散布在生油岩中。本文以我国南北两个典型含油盆地——山东东营盆地和南海珠江口盆地为研究对象,对其生油层中的碳酸盐进行氧碳同位素分析,并根据两者之间的相关性,讨论生油古湖泊的类型。

1 湖水同位素的相关性

对现代不同类型湖泊中碳酸盐氧碳同位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,在以 $\delta^{18}\text{O}$ 为横坐标、 $\delta^{13}\text{C}$ 为纵坐标、0 为原点的坐标系中,其投点落在第 III 象限,如瑞士格赖芬湖(Greifensee)、美国亨德森湖(Henderson)和

以色列 Huleh 湖(图 1);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, $\delta^{13}\text{C}$ 则基本为正值,其投点大多落在 I、IV 象限,如美国大盐湖(Great Salt Lake)($r = 0.87$)、图尔卡纳(Turkala)湖($r = 0.86$)、纳特龙-马加迪湖(Natron-Magadi)($r = 0.84$)^[1,2](图 1)。

上述现象之所以出现,是由于开放、封闭两类湖泊中影响同位素演化的因素的差异造成的。在开放型淡水湖泊中,水体快速流动,停留时间短,湖水同位素的演化较之注入水微乎其微,因此其氧、碳同位素更多地反映了注入水的同位素特征^[1]。注入水主要是地表径流(河水)、地下水和直接落在湖泊表面的雨水。这些水体中,影响氧和碳同位素的因素并不同^[4],所以两者的变化趋势不可能一致。同时,由于相对于海水而言,大陆河水及大气降水的氧、碳同位素比值都要偏负得多^[4],所以反映在其中形成的原生碳酸盐氧碳同位素组分及其变化上,两者不但互相独立,而且都是负值。封闭型咸水湖泊中则不然。由于水体只进不出,使得水体停留时间增长,这时,同位素将要发生显著的演化作用。在这种演化过程中,蒸发作用起着主导性的控制作用^[1]。随着蒸发作用的增强,较轻的 ^{16}O 和富含 ^{12}C 的 CO_2 优先从湖水表面逸出,造成湖水中的 ^{18}O 和 ^{13}C 含量增加,

收稿日期:2000-09-15;接受日期:2001-03-02

基金项目:教育部高等学校骨干教师资助计划项目

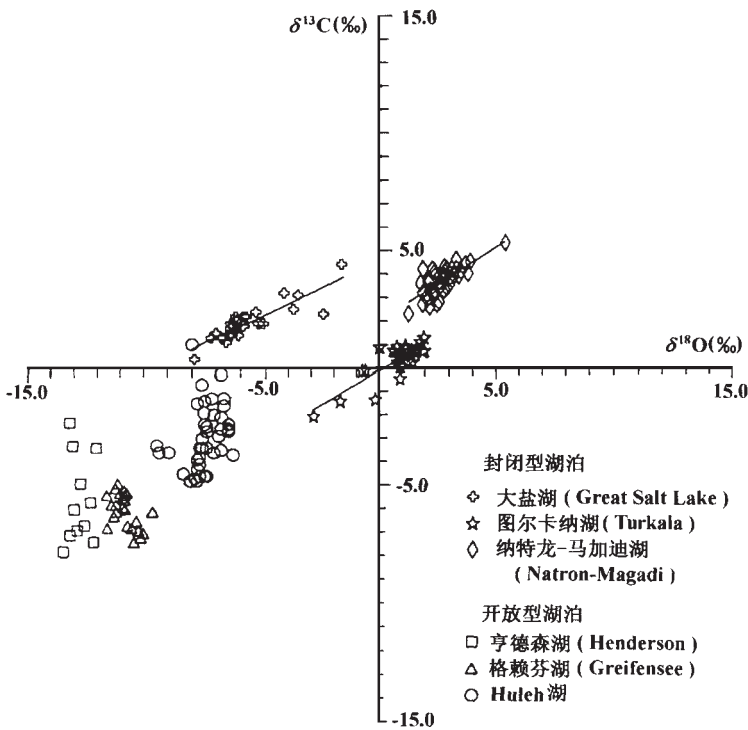


图1 现代不同类型湖泊原生碳酸盐
氧碳同位素的相关性(据文献[1])

Fig.1 Relationship between $\delta^{18}O$ and $\delta^{13}C$ for primary lacustrine carbonates from different modern lake types (after [1])

Closed lakes: Great Salt Lake (hypersaline), Turkala (brackish), Natron-Magadi (hypersaline)

Open lakes: Henderson (freshwater), Greifensee (freshwater), Huleh (freshwater) (after [1, 2])

大盐湖、纳特龙-马加迪湖为超咸水湖, 图尔卡纳湖为半咸水湖(据文献[9])。亨德森湖、格赖芬湖和 Huleh 湖均为淡水湖(据文献[1, 2])

从而使湖水的 $\delta^{18}O$ 和 $\delta^{13}C$ 较注入水明显偏正。水体停留时间越长, 蒸发作用越强, 这种影响越显著。另外, 由于封闭型咸水湖泊多是高生产力湖泊, 会有大量的藻类^[10], 这些藻类对湖水碳同位素值也会有显著的影响。在光合作用下, 藻类植物会优先吸收较轻的 ^{12}C , 使植物体内的 $\delta^{13}C$ 变低, 而湖水中 $\delta^{13}C$ 值则升高, 生产力越高, 湖水 $\delta^{13}C$ 值越偏正^[9]。这样, 在封闭性咸水湖泊中, 蒸发作用对于湖水氧、碳同位素演化控制的同步性, 使得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, $\delta^{18}O$ 和 $\delta^{13}C$ 呈明显的相关性^[1, 2]。生物光合作用对于碳同位素的影响, 又加

剧了 $\delta^{13}C$ 变正的趋势, 所以封闭湖泊原生碳酸盐的 $\delta^{18}O$ 既有负值也有正值, 但 $\delta^{13}C$ 则以正值为主。

湖相碳酸盐同位素的这一特征, 已成为判断第四纪古湖泊或更老湖泊类型的标志之一, 并已有许多成功的例子。如对加纳博苏姆推湖 (Bosumtwi) 晚更新世—全新世沉积^[11]、对东非基伍湖 (Kivu) 晚第四纪沉积^[11]、对西班牙塞纳霍盆地 (Cenajo) 中新世沉积^[7]和苏格兰 Orcadian 盆地泥盆纪沉积^[8]的研究等。

2 我国湖相生油层中的碳酸盐氧碳同位素

2.1 材料与方法

山东东营盆地主要生油层为下第三系沙河街组, 该组共分为四段(从上而下为: 沙一段、沙二段、沙三段和沙四段, 各段又可分为不同的亚段), 其中碳酸盐岩主要分布在沙一段和沙四上亚段, 而介形虫化石在各段均有大量分布^[12]。南海珠江口盆地主要生油层为文昌组和神狐组, 两组地层中均无碳酸盐岩, 钙质微体化石也稀少, 仅见个别贝壳碎片^[13]。

本研究的钻井和样品情况如表 1 所示。碳酸盐岩样品均是通过磨制薄片后, 在偏光显微镜下挑出的泥晶方解石。对化石样品, 由于没有足够数量的单个属或种, 所供测试的介形虫由 *Phacocypris huiminensis*, *Chinocythere* sp., *Guangbeinia*, *Candona* sp. 等组成。为避免成岩作用的影响, 选择那些无充填、无矿化、壳薄、透明的单瓣壳或碎片来测试。氧、碳同位素测试在青岛国土资源部海洋地质研究所完成。

表 1 同位素分析样品一览表

Table 1 Description of samples for stable isotope analysis

地区	钻井	层位	年代	分析材料	样品数
东营盆地	2-下2-观18井	沙一段(上、中、下亚段)	渐新世	介形虫	25
	滨297井	沙一中、下亚段	渐新世	碳酸盐岩	20
	纯11井	沙四上亚段	始新世	碳酸盐岩	16
珠江口盆地	SH19-1-3	文昌组	始新世	贝壳	6
		神狐组	始新世—古新世	贝壳	1

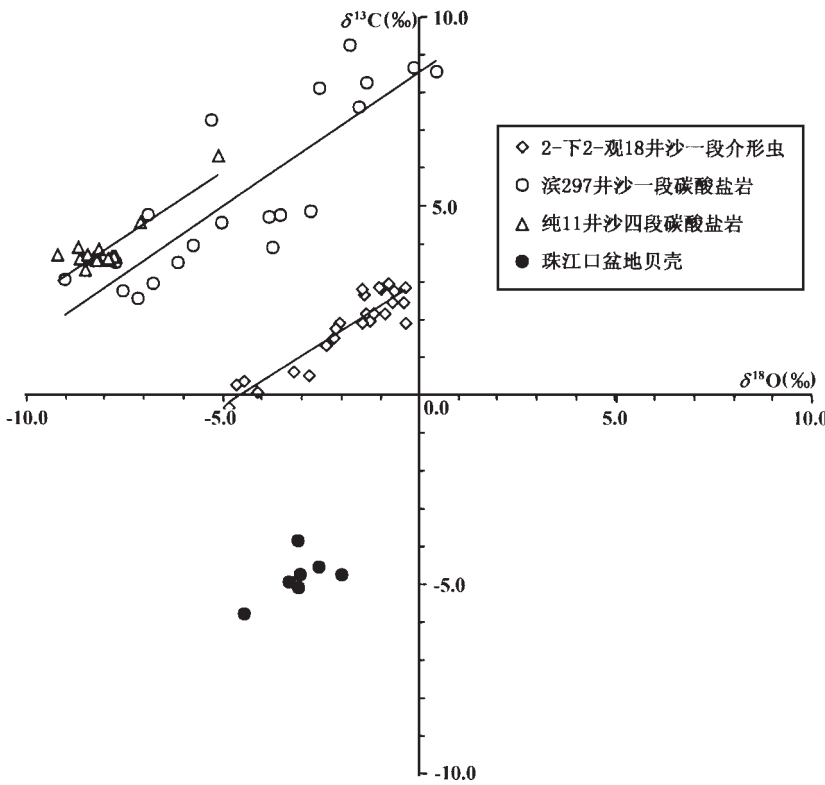


图 2 我国两个含油盆地生油层中湖相碳酸盐氧碳同位素的相关性

Fig. 2 Relationship between $\delta^{18}\text{O}$ and $\delta^{13}\text{C}$ for lacustrine carbonates from the Dongying and Zhujiang Kou basins

东营盆地碳酸盐氧碳同位素明显相关 2-下2-观18井沙一段介形虫相关系数为 0.92, 滨 297 井沙一段碳酸盐岩相关系数为 0.85, 纯 11 井沙四段碳酸盐岩相关系数为 0.88. 珠江口盆地氧、碳同位素之间不相关。

Dongying Basin: 2-2-18 Well: $r = 0.92$ (Ostracoda); Bin297 Well: $r = 0.85$ (carbonates); Chun 11 Well: $r = 0.88$ (carbonates).

Zhujiang Kou Basin: no correlated covariance between $\delta^{18}\text{O}$ and $\delta^{13}\text{C}$.

表 2 东营盆地和珠江口盆地不同组段碳酸盐氧碳同位素平均值

Table 2 Average compositions of O and C isotopes of different formations and members in the Dongying and Zhujiang Kou basins

地区	层位	$\delta^{18}\text{O}(\text{‰})$			$\delta^{13}\text{C}(\text{‰})$		
		碳酸盐岩	介形虫	贝壳	碳酸盐岩	介形虫	贝壳
东营盆地	上		-3.002			1.093	
	沙一段	中	-5.124	-1.385	4.650	1.931	
		下	-2.721	-1.034	7.048	2.498	
	沙四上亚段	-7.984		3.858			
珠江口盆地	文昌组、神狐组			-3.075		-4.827	

2.2 分析结果

同位素测试结果如图 2 和表 2 所示,其特征如下。

东营盆地 (1)除一个样品 $\delta^{13}\text{C}$ 为负值外,其他

样品 $\delta^{13}\text{C}$ 均为正值; $\delta^{18}\text{O}$ 除一个样品外,其他全部为负值;两者的投点落在第 IV 象限。具体数值为:沙一段介形虫(2-下2-观18井) $\delta^{18}\text{O}$ 值范围为 $-4.853\text{‰} \sim -0.341\text{‰}$, $\delta^{13}\text{C}$ 值范围为 $-0.360\text{‰} \sim 2.961\text{‰}$;沙一段碳酸盐岩(滨297井) $\delta^{18}\text{O}$ 值范围为 $-9.016\text{‰} \sim 0.446\text{‰}$, $\delta^{13}\text{C}$ 值范围为 $2.546\text{‰} \sim 9.258\text{‰}$;沙四段碳酸盐岩(纯11井) $\delta^{18}\text{O}$ 值范围为 $-9.215\text{‰} \sim -5.134\text{‰}$, $\delta^{13}\text{C}$ 值范围为 $3.294\text{‰} \sim 6.297\text{‰}$ 。

(2)三组分析数据 $\delta^{18}\text{O}$ 和 $\delta^{13}\text{C}$ 之间均有明显的相关性。沙一段介形虫相关系数为 0.92,沙一段碳酸盐岩相关系数为 0.85,沙四段碳酸盐岩相关系数为 0.88。(3)各组不同亚段同位素平均值又有明显不同:对于碳酸盐岩,其 $\delta^{18}\text{O}$ 平均值沙一下亚段 (-2.721‰) > 沙一中亚段 (-5.124‰) > 沙四上亚段 (-7.984‰), $\delta^{13}\text{C}$ 平均值也呈相同的规律,沙一下亚段为 7.048‰ , 沙一中亚段为 4.650‰ , 沙四上亚段为 3.858‰ ;对于介形虫,其 $\delta^{18}\text{O}$ 和 $\delta^{13}\text{C}$ 平均值都是沙一下亚段 > 沙一中亚段 > 沙一上亚段。

珠江口盆地:神狐组和文昌组七个贝壳样品的 $\delta^{18}\text{O}$ 和 $\delta^{13}\text{C}$ 均为负值, $\delta^{18}\text{O}$ 值范围为 $-4.47\text{‰} \sim -1.962\text{‰}$, 平均值为 -3.075‰ , $\delta^{13}\text{C}$ 值范围为 $-5.796\text{‰} \sim -3.871\text{‰}$, 平均值为 -4.827‰ , 两者不相关,投点均落在第 III 象限。

2.3 讨论

根据东营盆地和珠江口盆地湖相碳酸盐的氧碳同位素特征,结合前述现代湖泊碳酸盐同位素的变化规律,首先可以讨论两盆地的封闭与开放性。东营盆地无论是碳酸盐岩还是介形虫壳体,其 $\delta^{18}\text{O}$ 与 $\delta^{13}\text{C}$ 之间都呈强烈的相关性,与封闭型咸水、半咸水湖泊的同位素特征极为相似,说明东营盆地渐新世(沙一

段)与始新世古湖泊是封闭型咸水半咸水湖泊。而珠江口盆地碳酸盐 $\delta^{18}\text{O}$ 和 $\delta^{13}\text{C}$ 之间相关性差,而且 $\delta^{18}\text{O}$ 和 $\delta^{13}\text{C}$ 均为负值,这与开放型湖泊的同位素特征相似,说明其始新世—古新世古湖泊是开放型淡水湖。

东营盆地样品分析较为系统,根据氧碳同位素还可进一步探讨古湖泊的演化。如前所述,在封闭型湖泊中,蒸发作用是控制氧同位素组成的决定因素。蒸发作用越强,湖水的 $\delta^{18}\text{O}$ 值越大,反映在其中形成的碳酸盐沉积上, $\delta^{18}\text{O}$ 值也越大。所以,可以根据碳酸盐 $\delta^{18}\text{O}$ 值的变化,恢复蒸发/降雨古气候条件的变化。封闭型湖泊中,蒸发/降雨条件的变化又会引起湖水面和盐度的变化,蒸发作用增强,湖水水位下降,盐度升高。因此,根据碳酸盐 $\delta^{18}\text{O}$ 值的变化还可进一步推测古湖泊水面和古盐度的变化。碳同位素组成与古湖泊的生产力有很大的关系,生产力越高,光合作用越强,原生碳酸盐的 $\delta^{13}\text{C}$ 值就越高,所以根据 $\delta^{13}\text{C}$ 值的变化可以推测古湖泊生产力的变化。据这些规律,可以推测:东营盆地沙一下亚段沉积时期,是气候最干燥、蒸发作用最强的时期,因此古湖泊水位低,盐度较高,而古生产力则最高;沙一中亚段沉积时期,蒸发作用有所减弱,古湖水面上升,盐度有所降低,古生产力也降低;沙一上亚段沉积时期,古气候较为湿润,古湖水面再次升高,盐度和古生产力相对降低;沙四上亚段沉积时期,古气候也较为湿润,古湖水面较高,盐度和古生产力较之沙一下、中亚段沉积时期都低。

根据碳酸盐氧碳同位素得出的这些结论,还可以通过生油层的沉积学和古生物学特征来验证。东营盆地沙一段和沙四段生油层中不但碳酸盐岩发育,而且在沙四段中更是有盐岩和石膏等蒸发岩类出现^[12],这些都反映了其沉积时期古湖泊封闭程度高、湖水盐度高。东营盆地的古生物化石群也是以地方性属种占绝对优势,如地方性介形虫种占 98%,腹足类占 95%^[14]。这种结果的发生也是古湖泊长期封闭所造成。在东营盆地中还有一些指示咸水、半咸水湖的特殊化石——海源陆生化石^[15],如钙质超微化石^[16]、有孔虫^[17]、沟鞭藻类^[18]等,同样证明了当时是一咸水湖。单怀广等^[19]根据介形虫化石生态学分析还得出沙一中、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。

珠江口盆地文昌组和神狐组沉积学和古生物学特征与东营盆地则有极大的不同。首先,该盆地无碳酸盐岩和蒸发岩,即使是泥岩和砂岩中钙质含量

也很低;其次,钙质微体化石极为少见,仅在个别样品中发现贝壳碎片^[20]。这些都反映珠江口盆地是开放型淡水湖泊。

3 结 语

湖相碳酸盐氧碳同位素分析揭示出我国南北在早第三纪时,存在两类不同的生油湖泊。北部的东营盆地碳酸盐 $\delta^{18}\text{O}$ 多为负值、 $\delta^{13}\text{C}$ 基本为正值,两者之间相关性强,相关系数大于 0.8,显示其生油湖泊是封闭型咸水或半咸水湖;南部珠江口盆地碳酸盐 $\delta^{18}\text{O}$ 和 $\delta^{13}\text{C}$ 均为负值,两者不相关,显示其生油湖泊为开放型淡水湖泊。这一结论与两盆地生油层的沉积学和古生物学证据相吻合,说明利用碳酸盐氧碳同位素的相关性来判断湖泊的类型这一方法,不但适用于第四纪古湖泊研究,也同样可用于第三纪生油湖泊的研究。

参考文献:

- [1] Talbot M R, Kelts K. Paleolimnological signatures from carbon and oxygen isotopic ratios in carbonates from organic carbon-rich lacustrine sediments[J]. AAPG Memoir, 1990, 50: 61 ~ 76.
- [2] Talbot M R. A review of the palaeohydrological interpretation of carbon and oxygen isotopic ratios in primary lacustrine carbonates [J]. Chem Geol (Isotope Geoscience Section), 1990, 80: 261 ~ 279.
- [3] Kelts K, Talbot M R. Lacustrine carbonates as geochemical archives of environmental change and biotic/abiotic interactions [A]. Tilzer M M, Serruya C. Ecological Structure and Function in Large Lakes [C]. Madison Wis., Science Tech, 1990. 290 ~ 317.
- [4] Lister G S. Stable isotopes from lacustrine ostracoda as tracers for continental palaeoenvironments [A]. De Deckker P, Colin J P, Peypouquet, . Ostracoda in the Earth Sciences [C]. Amsterdam: Elsevier, 1988. 201 ~ 218.
- [5] 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.
- [6] 刘传联. 稳定同位素地球化学方法在古湖泊学中的应用 [A]. 汪品先, 刘传联. 含油盆地古湖泊学研究方法 [C]. 北京: 海洋出版社, 1993. 96 ~ 123.
- [7] 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]. J Sediment Petrol, 1989, 59: 45 ~ 52.
- [8] Janaway T M, Parnell J. Carbonate production within the Orcadian basin, northern Scotland—A petrographic and geochemical study [J]. Palaeogeog, 1989, 70: 89 ~ 105.
- [9] McKenzie J A. Carbon isotopes and productivity in the lacustrine and marine environment [A]. Stumm, W, Chemical Processes in

- Lakes[C]. New York: Wiley, 1985. 99~118.
- [10] Kelts K. Environment of deposition of lacustrine petroleum source rocks: an introduction[A]. Fleet A J, Kelts K, Talbot M R. Lacustrine Petroleum Source Rocks[C]. Geological Society Special Publication 40, 1988. 3~29.
- [11] Botz R P, Stoffers E, Faber E, *et al.* Isotope geochemistry of carbonate sediments from Lake Kivu (East-Central Africa) [J]. Chem Geol, 1988, 69: 299~308.
- [12] 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. 348p.
- [13] 蒋仲雄, 曾麟, 李明兴, 等. 中国油气区第三系(Ⅷ): 南海北部大陆架油气区分册[M]. 北京: 石油工业出版社, 1994. 145p.
- [14] 姚益民, 梁鸿德, 蔡治国, 等. 中国油气区第三系(Ⅳ): 渤海湾盆地油气区分册[M]. 北京: 石油工业出版社, 1994. 240p.
- [15] 汪品先. “海源陆生化石”与中国新生代“海侵”问题[J]. 同济大学学报, 1995, 23: 126~135.
- [16] 刘传联, 成鑫荣. 渤海湾盆地非海相钙质超微化石的锶同位素证据[J]. 科学通报, 1996, 10: 908~910.
- [17] 汪品先, 闵秋宝, 林景星, 等. 我国东部几个盆地半咸水有孔虫群的发现及意义[A]. 地质科学研究院地层古生物论文集编辑委员会. 地层古生物论文集(第二辑)[C]. 北京: 地质出版社, 1975. 1~35.
- [18] 徐金鲤, 潘昭任, 杨玉梅, 等. 山东胜利油区早第三纪沟鞭藻类和疑源类[M]. 东营: 石油大学出版社, 1998. 241p.
- [19] 单怀广, 张慧娟. 山东油气区早第三纪介形类[A]. 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.
- [20] 吴国, 赵泉鸿. 早第三纪东营与珠三两个古湖泊的比较研究[J]. 同济大学学报, 1995, 23: 154~160.

Correlation between carbon and oxygen isotopic ratios of lacustrine carbonates and types of oil-producing paleolakes

LIU Chuan-lian, ZHAO Quan-hong, WANG Pin-xian

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

Abstract: Stable carbon and oxygen isotopic analyses of lacustrine carbonates in source rocks from the Dongying Basin (Shandong Province) and the Zhujiang Kou Basin (South China Sea) have been carried out. The results show that carbonates from the Dongying Basin typically show highly correlated covariance between oxygen and carbon isotopic variations ($r > 0.8$), with negative $\delta^{18}\text{O}$ and positive $\delta^{13}\text{C}$, and carbonates from the Zhujiang Kou Basin show poorly or no correlated covariance between them, with both negative $\delta^{18}\text{O}$ and $\delta^{13}\text{C}$. Comparison with the results of carbonates precipitated from different types of modern lake, it is concluded that the Paleogene oil-producing lake in the Dongying Basin is a closed saline or brackish one, whereas that in the Zhujiang Kou Basin is an open freshwater one. This conclusion is consistent with sedimentological and palaeontological evidence of source rocks, and it is also suggested that the oil-producing lake types can be determined from the characteristics and correlation of $\delta^{18}\text{O}$ and $\delta^{13}\text{C}$ of lacustrine carbonates.

Key words: oxygen and carbon isotopes; correlation; lacustrine carbonates; paleolake