

从化石群及壳体同位素看古近纪东营湖湖水化学

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 从“海源陆生化石”、壳体 O、C 和 Sr 同位素等几个新的角度和方法对山东东营凹陷古近纪古湖泊湖水化学性质进行讨论。通过与现生“海源陆生生物”的比较,得出原先认为是“海相”标志的有孔虫、钙质超微化石、沟鞭藻和疑源类、多毛类和鱼类等实际上是“海源陆生化石”,它们生活在以 Cl^- 和 Na^+ 为主的咸水湖泊环境。超微化石 S 同位素分析表明,渐新世与始新世钙质超微化石的 $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ 比值都明显高于同时期海水的 $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ 比值,而与现代河、湖水的 $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ 比值相近,进一步揭示它们生活的环境不是海,而是与海无关的湖。介形虫壳体 O、C 同位素分析则表明,古东营湖是一封闭型咸水湖泊,从另一角度也否定了与海连通的可能性。根据不同层段同位素特征讨论了湖水矿化度的相对变化。

关键词 海源陆生化石 O、C 和 Sr 同位素 湖水化学 古近纪 东营凹陷

Water Chemistry of the Paleogene Dongying Lake : Evidence from Fossil Assemblages and Shell Isotopes

LIU Chuanlian ZHAO Quanhong WANG Pinxian

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

Abstract Water chemistry of the Paleogene Lake existent in Dongying depression of Shandong Province has been discussed by means of several new methods including talassogenous fossils, oxygen, carbon and strontium isotope of fossils. Foraminifera, calcareous nanofossils, dinoflagellates and acritarchs, fish and other groups of “marine type fossils” were discovered in Paleogene sediments from Dongying depression and were then used as the indicators of marine transgression. Comparing them with modern talassogenous fauna, the authors have reached the conclusion that these fossils are talassogenous in nature and lived in the saline lake rich in Na and Cl. Strontium isotopic analysis indicates that $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ ratios of nanofossils from Eocene and Oligocene sediments are higher than those of sea water of the same periods, and are close to the $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ ratios of modern river and lake water. These results imply that nanofossils lived in a paleolake rather than in seawater. Carbon and oxygen isotopic analysis also demonstrates that the Paleogene Dongying Lake was a hydrologically closed lake. Variations in paleosalinity have also been discussed based on the stratigraphic changes of ^{18}O and ^{13}C .

Key words talassogenous fossils isotope water chemistry Paleogene Dongying depression

位于山东北部的东营凹陷是渤海湾盆地济阳拗陷内的一个次级盆地。已有研究表明,该凹陷在古近纪广泛发育了湖泊环境(王秉海等,1992),简称为东营湖。东营湖古近纪沉积了厚约 6 000 m 的地层,自上而下分为东营组、沙河街组和孔店组,共同构成了油源岩的主体,尤以沙一中、下亚段,沙三中、下亚段和沙四上亚段 3 套生油层为最佳(邓宏文等,1993)。生油层中含有极为丰富的微体古生物化石。

1 “海源陆生化石”与湖水化学类型

东营凹陷以及渤海湾盆地其他地区沙河街组沉积时期的湖水性质问题是一个早已研究而至今仍有的争议的问题。争论的焦点是沙河街组沉积时期有无“海侵”或与海有无某种联系(汪品先等,1982;姚益民等,1992,1994;董晓光,1985;茅绍智等,1990;胡见义等,1991);争论的原因主要是在其中发现了一

本文由教育部高等学校骨干教师资助计划和教育部重大科学技术“中国新生代地形倒转及资源环境效应”项目资助。

改回日期:2001-8-20;责任编辑:宫月萱。

第一作者:刘传联,男,1963年生,博士,从事古湖泊、古海洋学研究;通讯地址:同济大学海洋地质与地球物理系,E-mail:clliu@online.sh.cn。

些所谓“海相”化石,包括有孔虫(汪品先等,1975)、介形虫(石油化学工业部石油勘探开发规划研究院等,1978)、藻类(石油化学工业部石油勘探开发规划研究院等,1978)、双棱鲱等鱼类(张弥曼等,1978)、“多毛类虫管”、枝管藻等各种群体钙藻和钙质超微化石(郝诒纯等,1984;钟俊春等,1988)。由于对这些化石所指示的环境观点不一,所以引起对湖水性质的认识也不尽相同。

1.1 “海源陆生生物”的提出及其环境

80年代以来,随着对世界现代咸水湖泊生物群研究的深入,特别是澳洲、非洲等干旱区的工作,发现了一些与海洋无空间联系的湖泊中也有通常见于海水中的生物,至少包括有孔虫、海生介形虫、瓣鳃类、腹足类等几个门类。对这些源自海相环境,而已适应内陆盐湖,曾有过“似海相”称呼的生物,学术界称之为“海源陆生生物”(汪品先,1995)。

现生“海源陆生生物”及其第四纪化石在世界各地分布很广(Cann,1981;Plaziat,1991,1993)。中国青海小柴旦湖第四纪样品中,也发现了有孔虫(孙镇城等,1992)。在美国加利福尼亚州更新世 Tecopa 盐湖中发现有孔虫化石群(Patterson,1987)。

然而,并不是所有的咸水湖泊或盐湖都会有这类生物。只有当湖水的矿化类型与海水近似,即有较多的 Cl^- 、 Na^+ 时,才有可能出现上述“海源陆生生物”。如美国加州的索尔顿湖(Salton Sea;Arnal,1961)是一个“海源陆生”生物群发生和发展的著名实例。

1.2 沙河街组海源陆生化石与湖水化学类型

东营湖沙河街组海源陆生化石层位分布情况如图1:有孔虫和多毛类见于沙四上亚段上部;钙质超微化石见于沙四上亚段上部和沙一中、下亚段;鱼类见于沙四上亚段上部至沙三下亚段;沟鞭藻和疑源类见于沙四中亚段至沙一段。而这些层段恰恰是东营湖组的主力生油地层和主要油源岩所在。

该组海源陆生化石群特点为:海相生物门类少、分异度低、丰度高、个体较小和形态变异强烈,并与陆相化石共生(单怀广等,1990;姚益民等,1992)。但是,这些特征同样也是过渡相化石群所具有的。因此,区分这两类化石群,推断是由海侵造成的过渡相化石群,还是与海无关的陆相海源陆生化石群,还需要依赖古生物以外的证据来解决。Sr 同位素($^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$)分析是一个重要的手段。

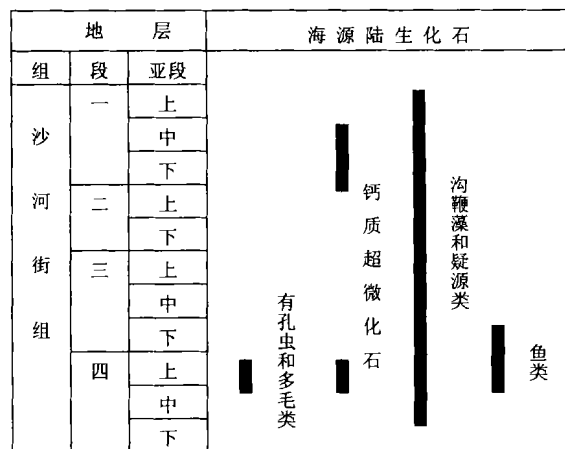


图1 沙河街组海源陆生化石的分布

Fig.1 Stratigraphic occurrence of talessogenous fossils from Shahejie fomation

2 Sr 同位素与“海”、“陆”相的识别

研究表明,生物碳酸盐骨骼中的 $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ 比值与其生活的海水保持平衡,地质历史上海水的 $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ 比值在不断变化,但任一时期全球海水的 $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ 比值则是均一的(DePaolo等,1985);同时人们还发现由于河、湖水中的Sr与海水中的Sr来源物质不同,造成河、湖水的 $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ 比值明显高于海水,如现代海水的 $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ 比值为0.709,河水中的 $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ 比值为0.71(Wadleigh等,1985)。另外,海水中Sr的浓度也与河、湖水相差悬殊,如新生代海水中Sr含量在 $10^2 \sim 10^3 \text{ mg/L}$ 之间(DePaolo等,1985;Koepnick等,1985),河、湖水中Sr含量多在 $10 \sim 10^2 \mu\text{g/L}$ 之间(Wadleigh等,1985),二者相差3个数量级。因此,为利用 $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ 比值来判别“海相”、“陆相”奠定了理论基础,无论正常海相还是与海水有关连的海陆过渡相化石都应呈现其生活时期海水的 $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ 比值(刘传联,1993)。

利用 $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ 方法对沙河街组钙质超微化石进行Sr同位素分析。样品分别取自含钙质超微化石的沙一中、下亚段和沙四上亚段(刘传联等,1996)。结果表明,沙一中、下亚段(渐新世)钙质超微化石的 $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ 比值(平均0.71146)明显高于渐新世海水的 $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ 比值(0.7076~0.7084);沙四上亚段(始新世)钙质超微化石的 $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ 比值(平均0.71151)也高于始新世海水 $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ 比值(0.7076~0.7099)。证明沙河街组钙质超微化石生活的环境不是海相,而是以 Cl^- 和 Na^+ 为主的咸水湖泊。

3 O、C 同位素与湖水化学

通过对现代湖泊中及实验室条件下淡水软体动物、介形虫等的饲养,证明生物成因的非海相碳酸盐与其生长介质同位素平衡,所以利用湖相介形虫壳体 O、C 同位素能提供湖水化学方面的许多信息,在古湖泊学研究中得到了广泛的应用 (Lister, 1988)。以往此项工作用于第四纪古环境研究,本次研究在古近纪古湖泊研究中作了尝试。

3.1 材料与分析结果

工作中对东营凹陷 2-下 2-观 18 井沙一段 29 个样品中的介形虫化石进行了 O、C 同位素分析。由于成岩作用对碳酸盐 O、C 同位素影响极大,在取介形虫样品时,主要选择那些无充填、无矿化的单瓣壳或壳体碎片,同时由于没有足够数量的单个属(种)和壳体,所供测试的介形虫标本由 *Phacocypris huiminensis*, *Chinocythere* sp., *Guanbeinia*, *Candona* sp. 等组成;同位素测试由青岛海洋地质研究所 Finnigan-MAT DeIta E 型气体稳定同位素质谱仪上测试完成,使用的工作标准为 TTB-1,所给数据均相对于国际标准 PDB 值(图 2)。

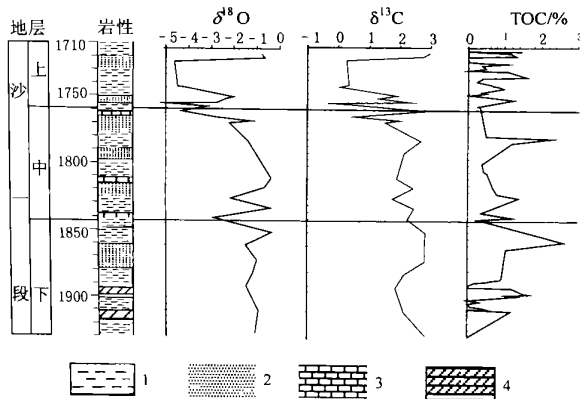


图 2 2-下 2-观 18 井沙一段介形虫壳体 $\delta^{18}\text{O}$ 和 $\delta^{13}\text{C}$ 及生油岩 TOC 垂向变化曲线

Fig. 2 Vertical variation in $\delta^{18}\text{O}$ and $\delta^{13}\text{C}$ of ostracoda and TOC of oil source rocks in well 2-Xia2-Guan18
1-泥岩;2-砂岩、粉砂岩;3-生物灰岩;4-白云岩
1-mudstone;2-sandstone,siltstone;3-bioclastic limestone;4-dolomite

3.2 湖泊的封闭性与开放性

在一个水文条件开放的淡水湖泊内,水体快速更替,停留时间短,湖水的 C、O 同位素组份更多地反映了注入水的同位素特征,因此,在其中形成的碳酸盐的 C、O 同位素组份的变化是各自独立的。随着蒸发作用的增强,较轻的 ^{16}O 和 ^{12}C 优先逸出,造

成水体中的 ^{18}O 和 ^{13}C 含量增加,从而使湖水的 C、O 同位素值同步增加,反映在介形虫 C 和 O 同位素组份的变化上,二者呈共变趋势。所以,如果以 ^{18}O 为横座标、以 ^{13}C 为纵座标作散布图,开放性淡水湖泊介形虫的 ^{18}O 和 ^{13}C 投点是分散的,而封闭咸水湖泊介形虫的 ^{18}O 和 ^{13}C 投点是呈线性相关的,封闭程度越高,相关系数越大 (Talbot 等, 1990)。因此根据介形虫 O、C 同位素的相关性可以判断湖泊是封闭的还是开放的。

从图 3 可以看出,介形虫的 ^{18}O 和 ^{13}C 呈明显的线性相关,相关系数为 0.92。反映了沙一段沉积时期东营湖是一封闭型咸水湖泊,也从另一个侧面反映了当时不可能有海水的侵入,而是一个盐湖。

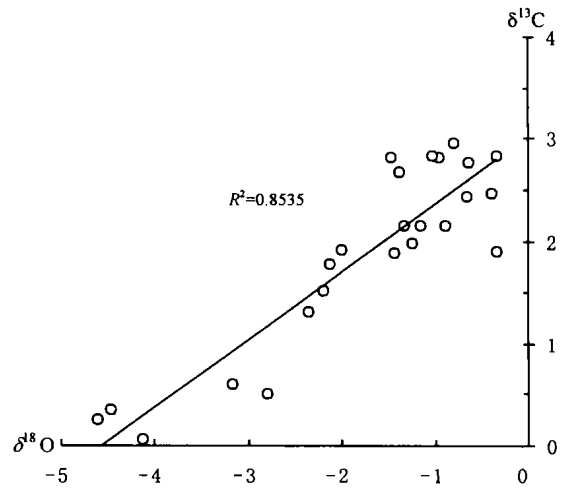


图 3 2-下 2-观 18 井沙一段介形虫壳体 $\delta^{18}\text{O}$ 和 $\delta^{13}\text{C}$ 值散点图

Fig. 3 Scatter plot of $\delta^{18}\text{O}$ and $\delta^{13}\text{C}$ of ostracoda from first member of Shahejie formation in well 2-Xia2-Guan18

东营凹陷沙河街组湖相碳酸盐岩的 O、C 同位素分析结果显示,它们呈较好的相关性,相关系数分别为:沙一段 0.76;沙四上亚段上部 0.71;沙四上亚段下部和沙四中亚段 0.75 (刘传联, 1998)。说明沙一段和沙四段沉积时期的东营湖是封闭型湖泊。

3.3 O 同位素与湖水盐度

对于一个水文条件封闭的湖泊,蒸发作用是控制湖水同位素组份的决定因素。因此,利用介形虫化石 ^{18}O 的变化,可以反映湖泊蒸发/降雨条件的变化。而对于封闭湖泊蒸发/降雨条件的变化又会引起湖水盐度的变化,所以 ^{18}O 的变化又可用来指示古湖水古盐度的变化趋势。

沙一中、下亚段介形虫壳体的 ^{18}O 明显高于沙

一上亚段(图2)。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,湖水盐度高;而沙一上亚段沉积时期,降雨量增加,气候趋于湿润,湖水盐度降低。

将利用介形虫分析的结果与分析碳酸盐岩的O、C同位素特征(刘传联,1998)结合起来,可看出湖相碳酸盐(包括生物与非生物成因) ^{18}O 值和盐度变化趋势在沙四中亚段和上亚段下部最高,由高到低依次为沙一下亚段—沙一中亚段—沙四上亚段上部(表1)。

表1 东营凹陷沙河街组各层段湖相碳酸盐O、C同位素特征(碳酸盐岩数据据刘传联,1998)

Table 1 Carbon and oxygen isotopic compositions of lacustrine carbonates and ostracoda from Shahejie formation (data of carbonates from Liu Chuanlian, 1998)

层位	平均 ^{18}O (‰)		平均 ^{13}C (‰)	
	介形虫	碳酸盐岩	介形虫	碳酸盐岩
沙一上亚段	-3.00		2.493	
沙一中亚段	-1.385	-5.398	1.931	4.423
沙一下亚段	-1.040	-2.812	1.092	6.124
沙四上亚段上部		-7.983		4.065
沙四中亚段和上亚段下部		-0.854		-2.709

3.4 C同位素异常与湖水硫酸盐含量

与 ^{18}O 值的地层分布相比较, ^{13}C 在沙四中亚段和上亚段下部显著偏负,其平均值分布为-2.709(表2),是沙河街组各层段中最低的。邓宏文和钱凯(1993)亦曾报道沙四段含膏泥岩中 ^{13}C 值偏负的异常现象。此外,在沙一中、下亚段的一些

样品中发生 ^{13}C 值大于6%的偏正现象,如沙一中、下亚段碳酸盐岩 ^{13}C 的平均值达5.273,是所测试层中最高值。湖泊原生碳酸盐沉积的 ^{13}C 变化范围为-2‰~6‰(Kelts等,1990), ^{13}C 值在沙四段的“偏负”和在沙一段的“偏正”现象可用湖水硫酸盐含量差异来解释(Talbot等,1990)。沙四段中亚段和上亚段下部的 ^{13}C 值偏负表明,当时湖水富含硫酸盐和酸性性质,是细菌硫酸盐的还原作用使有机物质氧化,将大量富 ^{12}C 的 CO_2 和 HCO_3^- 释放于水中,致使非生物成因的碳酸盐富 ^{12}C 。沙四中亚段和上亚段下部富含石膏(王秉海等,1992)更是以上观点的证明。当然,沙四段 ^{13}C “偏负”还可能迭加了当时湖水因盐度较高(产盐岩)造成低生产力的因素。沙一段 ^{13}C 值的“偏正”可能与当时湖水贫硫或生产力较高相关(刘传联,1993)。

4 生油地层沉积时期湖水化学演变

在海水中利用地球化学和矿物学标志定量求取古盐度的方法并不适用于古湖水化学研究。在第四纪古湖泊研究中,可借助于现代生物详细的生态资料,定量计算包括矿化度在内的古湖水化学参数。但对于像东营湖这样具有强烈地方性色彩化石群的古近纪湖泊来说,由于对大量灭绝属种生态缺乏了解,很难依据化石群得出矿化度的定量数据,只能求取其相对变化。前人已在其他方面做过大量工作(王秉海等,1992;邓宏文等,1993;姚益民等,1994)。依据此次工作的结果,引用已发表的一些资料对沙河街组主要生油时期湖水的化学演变进行了初步总结(表2)。

表2 沙河街组生油时期东营湖的水化学演变

Table 2 Water chemistry evolution of the Paleor Dongying lake during Shahejie formation depositional periods

生油地层	水化学标志				湖水化学性质	
	海源陆生化石	$^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ 比值	^{18}O 和 ^{13}C	其它	水化学类型(主要离子)	矿化度
沙四上亚段	有孔虫、钙质超微化石、多毛类、德弗兰藻、鲕形目鱼类	0.711, 高于同时期海水	相关系数 0.71~0.75	下部发育石膏和盐岩沉积,沙四上亚段上部发育碳酸盐沉积,介形虫化石稀少	Na^+ 、 Cl^-	盐湖,咸水,湖水中富含硫酸盐
沙三中、下亚段	鲕形目鱼类、德弗兰藻			存在细粒($4\mu\text{m}$ ±)的纯方解石;介形虫壳体以薄壳或薄膜状产出	Na^+ 、 Cl^-	微咸-半咸水,近淡水
沙一中、下亚段	钙质超微化石、德弗兰藻	0.711, 高于同时期海水	相关系数 0.92		Na^+ 、 Cl^-	半咸水,贫硫酸盐

沙四上亚段沉积时期:出现有孔虫、钙质超微化石、多毛类、德弗兰藻、鲱形目鱼类等典型的海源陆生化石;钙质超微化石的 $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ 比值高于同时期海水的 $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ 比值;碳酸盐岩 ^{18}O 和 ^{13}C 呈线性相关,且沙四上亚段下部碳酸盐岩的 ^{18}O 在所有生油层段最高,沙四上亚段下部 ^{18}O 低于沙四上亚段下部而高于沙一中、下段, ^{13}C 有“偏负”现象。表明当时是以 Na^+ 、 Cl^- 为主的封闭咸水湖泊,且沙四上亚段下部沉积时期盐度是各个生油时期最高的,可能为盐湖。湖水中富含硫酸盐。沙四上亚段下部发育石膏和盐岩沉积,沙四上亚段上部发育碳酸盐沉积,介形虫化石稀少(王秉海等,1992)也证明了这一结论。

沙三中、下亚段沉积时期:海源陆生生物中有孔虫、钙质超微化石和多毛类已消失,底部含一些鲱形目鱼类,但沟鞭藻类繁盛,且沟鞭藻/淡水藻类比值较高(徐金鲤等,1998),钙质块状纹层泥岩和富有机质纹层页岩的纹层中含大量细粒($4\ \mu\text{m}\pm$)纯方解石(刘传联等,2001);介形虫壳体以薄壳或薄膜状产出(刘传联等,1998)。反映沙三段湖水化学可能仍以 Na^+ 、 Cl^- 占优势、矿化度和pH值较低的微咸-半咸水,甚至淡水为特征。

沙一中、下段沉积时期:海源陆生化石(钙质超微化石、沟鞭藻)又趋繁盛;钙质超微化石 $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ 比值高于同时期海水的 $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ 比值;出现较多的碳酸盐沉积,碳酸盐岩 ^{18}O 和 ^{13}C 呈线性相关, ^{18}O 高于沙四上亚段上部而低于沙四上亚段下部, ^{13}C 有“偏负”现象。表明仍是以 Na^+ 、 Cl^- 为主的封闭湖泊,其湖水矿化度稍大于沙四上亚段上部和沙三段,而明显小于沙四上亚段下部,为半咸水。

参考文献

- 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,154.
- 胡见义,黄第藩等. 1991. 中国陆相石油地质理论基础. 北京:石油工业出版社.
- 郝谄纯,李惠生. 1984. 渤海沿岸及邻近地区早第三纪钙质超微化石的发现及其意义. 科学通报,29(12):741~745.
- 刘传联. 1993. 稳定同位素地球化学方法在古湖泊学研究中的应用. 见:汪品先,刘传联主编. 含油盆地古湖泊学研究方法. 北京:海洋出版社,230.
- 刘传联,成鑫荣. 1996. 渤海湾盆地早第三纪非海相钙质超微化石的锶同位素证据. 科学通报,41(10):908~910.
- 刘传联,赵泉鸿等. 1998. 东营凹陷沙河街组介形虫化石保存特征研究及应用. 微体古生物学报,15(2):186~195.

- 刘传联. 1998. 东营凹陷沙河街组湖相碳酸盐岩碳氧同位素组分及其古湖泊学意义. 沉积学报,16(3):109~114.
- 刘传联,舒小辛,刘志伟. 2001. 济阳坳陷下第三系湖相油源岩的微观特征. 沉积学报,19(2):293~298.
- 茅绍智,余静贤. 1990. 陆相沟鞭藻的起源和演化及其生油意义. 地球科学,15(3):283~290.
- 石油化学工业部石油勘探开发规划研究院等. 1978a. 渤海沿岸地区早第三纪介形类. 北京:科学出版社.
- 石油化学工业部石油勘探开发规划研究院等. 1978b. 渤海沿岸地区早第三纪沟鞭藻及疑源类. 北京:科学出版社.
- 单怀广,张慧娟. 1990. 山东油气区早第三纪介形类. 中国油气区地层古生物论文集(二) 山东油气区专辑. 北京:石油工业出版社.
- 王秉海,钱凯(主编). 1992. 胜利油区地质研究与勘探实践. 山东东营:石油大学出版社,357.
- 汪品先等. 1975. 我国东部新生代几个盆地半咸水有孔虫的发现及其意义. 地层古生物论文集,(2):1~36.
- 汪品先等. 1982. 关于我国东部含油盆地早第三纪地层的沉积环境. 地质论评,28(5):402~411.
- 汪品先. 1995. “海源陆生化石”与中国新生代“海侵”问题. 同济大学学报(自然科学版),23卷(增刊):129~135.
- 童晓光. 1985. 中国东部早第三纪海侵质疑. 地质论评,31(3):261~267.
- 姚益民等. 1992. 山东济阳坳陷早第三纪海侵的讨论. 石油学报,13(2):29~34.
- 姚益民等. 1994. 中国油气区第三系()渤海湾盆地油气区分册. 北京:石油工业出版社,240.
- 钟筱春,钟石兰等. 1988. 渤海湾盆地沙河街组一段颗石藻类化石及其沉积环境. 微体古生物学报,5(2):145~151.
- 张弥曼等. 1978. 我国东部中、新生代含油地层的鱼化石及有关沉积环境的讨论. 古脊椎动物与人类,(4):229~237.
- 孙镇城,曾学鲁,陈克造等. 1992. 柴达木盆地盐湖有孔虫的发现及其地质意义. 石油学报,13(2):252~256.

References

- Arnall R E. 1961. Limnology, sedimentation and microorganisms of the Salton Sea, California. Geol. Soc. Amer. Bull., 9:124~137.
- Cann J H, De Deckker P. 1981. Fossil Quaternary and living Foraminifera from athalassic (non-marine) saline lakes, southern Australia. J. palaeontol., 55(3):660~670.
- Chang Mee-mann, Chow Chia-chien. 1978. On the fossil fishes in Mesozoic and Cenozoic oil-bearing strata from east China and their sedimentary environment. Vertebrata Palasiatica, 16(4):229~237 (in Chinese with English abstracts).
- Deng Hongwen, Qian Kai. 1993. Sedimentary geochemistry and paleo-environmental analysis. Lanzhou: Gansu Science and Technology Press (in Chinese).
- DePaolo D J, B L Ingram. 1985. High-resolution stratigraphy with strontium isotopes. Science, 227:938~941.
- Hao Yechun, Li Huisheng. 1984. Discovery and significance of Paleogene calcareous nannofossils from Bohai gulf. Chinese Science Bul-

- letin, 29(12):741~745 (in Chinese).
- Hu Jianyi, Huang Difan. 1991. The bases of nonmarine petroleum geology in China. Beijing: Petroleum Industry Press, 322.
- Kelts K, Talbot M R. 1990. Lacustrine carbonates as geochemical archives of environmental change and biotic/abiotic interactions. In: Tilzer, M. M. & Serruya, C. C. (eds.), *Ecological Structure and Function in Large lakes*. Madison, Wis., Science Tech., 290~317.
- Koepnick R B, W H Burke et al.. 1985. Construction of the seawater $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ curve for the Cenozoic and Cretaceous. *Chem. Geol.*, 58:55~81.
- Lister G S. 1988. Stable isotopes from lacustrine Ostracoda as tracers for continental palaeoenvironments. In: De Deckker, P. et al (eds.), *Ostracoda in the Earth Sciences*. Elsevier, 201~218.
- Liu Chuanlian. 1993. Application of stable isotopes in paleolimnology study. In: Wang Pinxian, Liu Chuanlian (eds), *Methods on the paleolimnology in oil-bearing basins*. Beijing: China Ocean Press (in Chinese).
- Liu Chuanlian, Cheng Xinrong. 1996. Non-marine calcareous nannofossils in Paleogene lacustrine oil source rocks, Bohai Gulf Basin, east China: evidence from $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$. *Chinese Science Bulletin*, 41(10):908~910 (in Chinese).
- Liu Chuanlian, Hong Taiyuan, Bi Haihong, Zhao Quanhong. 1998. Preservation characteristics of ostracods from the Shahejie Formation in the Dongying Depression. *Acta Micropalaeontologica Sinica*, 15(2):186~195 (in Chinese with English abstracts).
- Liu Chuanlian, Shu Xiaoxin, Liu Zhiwei. 2001. Micro-characteristics of Paleogene lacustrine petroleum source rocks in Jiyang depression. *Acta Sedimentologica Sinica*, 19(2):293~298 (in Chinese with English abstracts).
- Liu Chuanlian. 1998. Carbon and oxygen isotopic compositions of lacustrine carbonates of the Shahejie Formation in the Dongying Depression and their paleolimnological significance. *Acta Sedimentologica Sinica*, 16(3):109~114 (in Chinese with English abstracts).
- Mao Shaozhi, Yu Jingxian. 1990. Origin and evolution of terrestrial dinoflagellates and their significance in source potential for petroleum. *Earth Science-Journal of China University of Geoscience*, 15(3):283~290 (in Chinese with English abstracts).
- Patterson R T. 1987. Arcellaceans and Foraminifera from Pleistocene Lake Tecopa, California. *J. Forami Res.*, 7(4):333~343.
- Plaziat J C. 1993. Modern and fossil potamid (Gastropoda) in saline lakes. *Jour Paleolimnology*, 8:163~169.
- Research Institute of Petroleum Exploration and Development et al.. 1978. Early Tertiary ostracode fauna from the coastal region of Bohai. Beijing: Science Press (in Chinese with English abstracts).
- Research Institute of Petroleum Exploration and Development et al.. 1978. Early Tertiary dinoflagellates and acritarchs from the coastal region of Bohai. Beijing: Science Press (in Chinese with English abstracts).
- Reyment R A. 1975. Canonical correlation analysis of hemicytherinid and trachyleberinid ostracodes in the Niger Delta. In: Swain F. M. (eds). *Biology and Paleobiology of Ostracoda*. Bull. Am. Paleontol., 65:141~146.
- Shan Huaiguang, Zhang Huijuan. 1990. Ostracods of paleogene in the Shandong oil-gas-bearing region. In: The symposium on stratigraphy and palaeontology of oil and gas bearing areas in China-Special papers of oil-gas-bearing areas in Shandong Province. Petroleum Industry Press, 1~56 (in Chinese with English abstracts).
- Sun Zhencheng, Zeng Xuelu, Chen Kezao et al.. 1992. Discovery of foraminifera in the salt lake, Chaidamu basin and its geological significance. *Acta petrolei Sinica*, 13(2):252~256 (in Chinese with English abstracts).
- Talbot M R, Kelts K. 1990. Paleolimnological signatures from carbon and oxygen isotopic ratios in carbonates from organic carbon-rich lacustrine sediments. In: Katz B J eds, *Lacustrine Basin Exploration-Case Studies and Modern Analogs*. AAPG Memoir 50, 61~76.
- Tong Xiaoguang, 1985. Doubts about the validity of Paleogene transgression in eastern China. *Geological Review*, 31(3):261~267 (in Chinese with English abstracts).
- Wadleigh M A, Veizer J, Brooks C. 1985. Strontium and its isotopes in Canadian rivers: fluxes and global implications. *Geochim. Cosmochim. Acta*, 49:1727~1736.
- Wang Binghai, Qian Kai. 1992. Geology research and exploration practice in the Shengli petroleum province. Dongying: The Petroleum University Press (in Chinese).
- Wang Pinxian, Min Qiubao and Bian Yunhua. 1982. On the sedimentary environments of the Paleogene strata in oil-bearing basins in the eastern part of China. *Geological Review*, 28(5):402~411 (in Chinese with English abstracts).
- Wang Pinxian, Min Qiubao, Lin Jingxing et al.. 1975. Discovery and significance of brackish water foraminifera from several Cenozoic basins in east China. The Symposium on Stratigraphy and Palaeontology, (2):1~36 (in Chinese).
- Wang Pinxian. 1995. Talassogenous fauna and "Cenozoic Transgressions" in China. *Journal of Tongji University (Natural Science)*. 23:129~135 (in Chinese with English abstracts).
- Yao Yimin, Liang Hongde, Chai Zhiguo et al.. 1994. Tertiary in petroliferous regions of China. Volume () *The Bohai Gulf Basin*. Beijing: Petroleum Industry Press, 240 (in Chinese with English abstracts).
- Yao Yimin, Xu Jinli, Shan Huaiguang, Li Jingrong. 1992. A discussion of the Paleogene transgression in the Jiyang depression, Shandong Province. *Acta Petrolei Sinica*, 13(2):29~34 (in Chinese with English abstracts).
- Zhong Xiaochun, Zhong Shilan, Fei Xuandong, Nie Yuseng, Lin Tian. 1988. Calcareous nannofossils from the oligocene Shahejie member in the Bohai basin and their sedimentary environment. *Acta Micropalaeontologica Sinica*, 5(2):145~151 (in Chinese with English abstracts).