

文章编号 :1000-0550(2002)01-0144-07

生油古湖泊生产力的估算方法及应用实例^①

刘传联¹ 徐金鲤²

1(同济大学海洋地质教育部重点实验室 上海 200092)

2(胜利石油管理局地质科学研究所 山东东营 257000)

摘 要 文中综述了生油古湖泊生产力估算的常用方法,并以山东东营凹陷早第三纪生油湖为例进行了应用尝试。结果表明,无论是定性分析还是定量计算,均以沙三中、下亚段、沙四上亚段和沙一段沉积时期的古湖泊生产力最高,其次是沙三上亚段沉积时期,沙二段沉积时期古生产力最低。把东营湖古生产力定量计算的结果与现代不同营养类型湖泊生产力的值相比较,可以发现沙三中、下亚段、沙四上亚段和沙一段沉积时期的东营湖是超养湖,沙三上亚段沉积时期是富养湖,沙二段沉积时期是中养湖。所以沙三中、下亚段、沙四上亚段和沙一段沉积时期古湖泊最有利于生成石油,这与油气勘探的实际结果极为吻合。

关键词 古生产力 生油湖泊 估算方法 早第三纪 东营湖

第一作者简介

中图分类号 TE122.1 文献标识码 A

高生产力是生油湖泊的基本条件之一,这已被许多研究所证实^[1-3]。如在伦敦地质学会组织的“海相油源岩”(1983)和“湖相油源岩”(1985)两次国际讨论会上就得出结论:对于生油岩的形成来说,表层水的高生产力,比底层水的缺氧环境更为重要,只要生产力高,在含氧的水底也能形成生油岩^[4]。所以,评价一个古湖泊是否能生油,一个重要的指标就是看其生产力的 高低。所谓生产力,是指生物在能量循环过程中固定能量的速率,通常用每年每平方米有机碳的克数来表示。生产力有初级生产力和次级生产力之分,在湖泊中,初级生产力主要为浮游植物(藻类)和一些边缘水生植物,次级生产力则主要为一些微体动物,如介形虫、腹足类等等。通常所说的生产力主要是指初级生产力,在现代湖泊中可以直接进行测定。然而,对古代湖泊生产力的确定却要复杂的多。即便如此,在古代湖泊沉积中仍存在许多替代性标志,可以用来对其沉积时期湖水的古生产力进行估算。本文介绍了这些标志和估算方法,并以山东东营凹陷早第三纪生油湖为例进行了应用尝试。

1 古生产力的估算方法

(1)有机碳法 有机碳含量是表征岩石有机质丰度最常用的一种指标。因为研究表明,岩石中有机质的含量与有机碳含量存在着一定的比例关系,如一些学者认为有机质/有机碳比值为 1.22^[5]。岩石中有机质的含量又与古湖泊水体中有机质的生产量即生产

力有极大的关系。在相同的保存条件下,古湖泊生产力高,有机质丰富,沉积下来的有机质就多,反映在有机碳含量上,数值就高。所以,利用有机碳含量可以定性地评价古湖泊生产力的高低。

但应特别注意的是,有机碳含量与生产力之间并非总存在这样的对应关系。这是因为,表层水体中的浮游生物从死亡开始,在沉降、埋藏、成岩过程中要受到一系列的破坏作用,使得部分有机质分解、耗损有些甚至转化为烃而运移到储层中去。所以,由于保存条件的不同,即使是表层生产力高的湖泊,沉积物中有机碳含量也不一定高。如东非裂谷西枝的四个湖泊,生产力以 Albert 湖和 Edward 湖最高,但表层沉积中的有机碳含量却是 Albert 湖最低(2.92%),Edward 湖最高(7.80%)。就是因为 Albert 湖水浅,风大,湖水搅混、湖底充氧,有机质难以保存。而 Edward 湖较深,40 m 以下季节性缺氧而水体分层,在 80 m 以下形成纹层沉积,有机质易于保存。坦噶尼喀湖和 Kivu 湖虽然生产力相对较低,但水体分层、湖下层缺氧,使得沉积物中有机碳含量达到中等水平^[6]。所以,利用岩石中有机碳含量评价古生产力,只是一种相对的指标,在应用时还必须结合其它标志来进行综合分析。

利用有机碳含量来估算古生产力,在古海洋学研究中应用的较多^[7],并提出了换算的经验公式^[8]:

$$R = \frac{C_o(1-\varphi)}{0.003S^{0.30}} \quad (1)$$

其中:R 为生产力(每年每平方米面积上的有机

① 教育部重大科学技术项目(中国新生代地形倒转及资源环境效应)资助

碳克数), C 为有机碳(占沉积物干重的百分比), S 为沉积速率(每千年的厘米数), ρ_s 为干沉积物的密度(每立方厘米的克数), φ 为孔隙率(用百分比表示)。

湖泊沉积与海洋沉积有很大的不同,湖水中的有机碳也与海水不同,只有 10% 呈颗粒状态(POC),而 90% 呈溶解状态(DOC),因此其沉降机理也与海洋不同。另外,湖泊接受更多的陆源物,有时陆生植物可以是湖相沉积中有机质的主要来源。但海洋与湖泊中有机质的埋藏和保存机理却是相似的。所以,在下面的讨论中,我们尝试性地把这一公式用于生油湖泊古生产力的测算。

(2) 古生物法 古生物化石是水体生产力的直接见证,其数量的多寡可以作为古生产力的替代性标志。

最常用的是浮游藻类化石丰度,它直接记录了古湖泊初级生产力的水平。浮游藻类化石丰度高,有时甚至以化石纹层的形式保存下来,往往是古湖泊高生产力的标志。浮游藻类化石丰度有多种表示方法:可以用浮游藻类化石占全部孢粉型组合的百分比来表示,也可以用藻类/孢粉比值来表示,有时还可用每个盖玻片所观察到的藻类个数来表示,或者用单位面积样品(限纹层状沉积)中所见到的藻类个数来表示。

但无论何种表示方法,都是指示的藻类化石的相对丰度,并不能反映当时湖泊的实际生产量和反映浮游植物群总体特征。因为藻类化石同样也存在保存作用影响的问题。首先不同的藻类和孢粉本身抗分解和破坏作用的能力不同,会造成保存下来的机会不均等;其次,即使是同一属种,在不同的保存环境中,残留下来的机会也不等。所以,这增加了解释的复杂性。但一般来说,同一生物群在相似的环境中,如果保存下来的化石多,反映了当时古生产力较高。

(3) 同位素法 利用湖相原生碳酸盐的碳同位素来再造古湖泊生产力的变化是第四纪古湖泊研究中常用的方法,详细论述见文献^[9]。其基本原理是:原生碳酸盐的碳同位素组份与湖水中溶解无机碳(DIC)的碳同位素组份变化一致,而湖水 DIC 的碳同位素组份与湖水内的生物的生命活动密切相关。当表层湖水中浮游植物勃发、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 DIC 储库中¹³C 含量相对增加,从而使在其中形成的原生碳酸盐的 $\delta^{13}C$ 值偏高。

在前第四纪生油湖泊研究中应用该方法的前提是,用来进行同位素分析的材料必须是未受成岩变化或成岩变化弱的湖相碳酸盐岩。为此,应选择泥晶结构的灰岩、泥灰岩或白云岩。所以,在进行同位素分析之前,必须对样品磨制薄片,以便在偏光镜下观察其结构、成分和成岩变化情况。

2 研究实例:早第三纪东营湖

2.1 地质概况

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 5 700 km²。已有研究表明,该凹陷在早第三纪的大部分时期是一四面环山的古湖泊^[10](本文称为东营湖,下同)(图 1),其北边是陈家庄单面山和青坨子块断山,西缘为滨县块断山和青城单面山,南缘和东南缘为鲁西块断山和广饶单面山。东营湖在发育过程中沉积了近 7 000 m 的地层,从上而下分为东营组、沙河街组和孔店组,其中以沙河街组沉积时期(始新世到渐新世)古湖泊最为发育,其古生产力的变化也是本文研究的重点。沙河街组从上而下分为沙一段、沙二段、沙三段和沙四段,每段又可分成不同的亚段(图 2)。

2.2 古生产力定性估算

根据上述古生产力的替代性标志,首先对沙河街组沉积时期东营湖古生产力的垂向变化进行了定性估算。

共选择了 5 口典型钻井(图 1),来合成沙河街组垂向剖面(缺少沙三上亚段和沙四中、下亚段)。分析有机碳样品 292 个,浮游藻类(主要是沟鞭藻)化石丰度样品 305 个,碳同位素样品 76 个。由于样品数多,工作量大,沟鞭藻化石丰度用孢粉制样中每个盖玻片(18mm×18mm)中所统计的个数来表示,对个别纹层状沉积样品,在生物显微镜和扫描电镜下观察了藻类化石的分布特征。沙河街组湖相碳酸盐仅分布在沙一段和沙四段的上亚段,所以同位素分析也仅限于这两

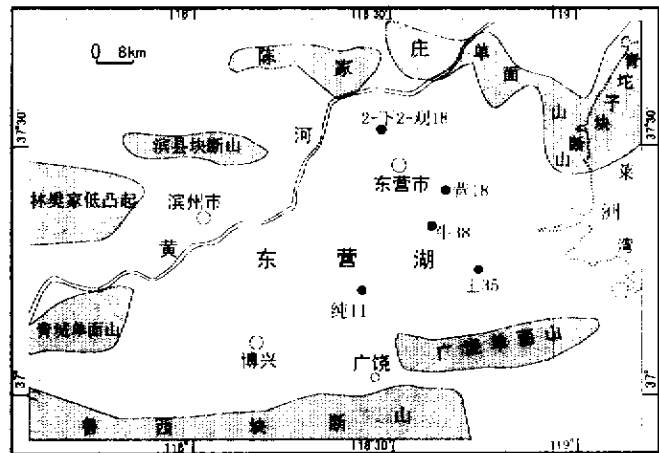
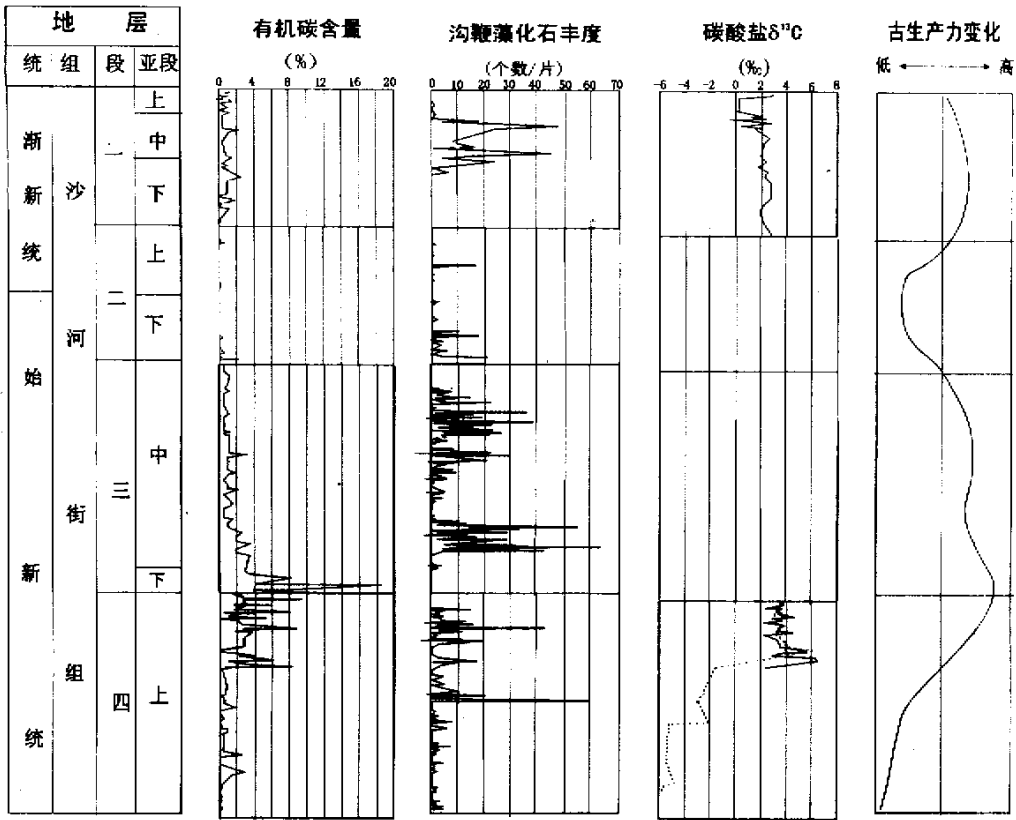


图 1 早第三纪东营湖的地理位置、轮廓及研究井位图

Fig. 1 Geographic map of the Paleogene Dongying Lake and the site of the studied well



(沙一段 2-下 2-观 18 井 沙二段 营 18 井 沙三中、下段 牛 38 井 沙四上亚段 纯 11 井和王 35 井)

($\delta^{13}\text{C}$ 曲线中实线代表方解石分析结果, 虚线代表白云石分析结果)

图 2 东营凹陷沙河街组有机碳含量、沟鞭藻化石丰度、碳酸盐碳同位素及反映的古生产力变化

Fig. 2 Organic carbon, abundance of dinoflagellates, carbon isotope of lacustrine carbonates and the changes of paleoproductivity.

个层位。所有分析的结果均表示在图 2。

从有机碳含量看, 沙一段平均值为 0.619, 沙二段为 0.115, 沙三中亚段为 1.701, 沙三下亚段为 6.024, 沙四上亚段为 2.144(上部为 2.899, 下部为 0.660)。所以单纯根据有机碳含量, 东营湖古生产力的变化趋势为: 沙三下亚段 > 沙四上亚段(主要是上部) > 沙三中亚段 > 沙一段 > 沙二段。

沟鞭藻化石丰度的变化特征为: 沙三中亚段最高, 一般每个盖玻片可达 20~30 个, 最高可达 60 多个, 其次是沙四上亚段的上部, 一般为 10~20 个, 最高可达 50 个, 再次为沙一中、下亚段, 一般为 10 个左右, 个别样品中丰度较高, 可达 40 个以上, 沙一段的上亚段、沙二段和沙四上亚段的下部沟鞭藻丰度较低, 一般每个片中仅见数个化石, 偶有个别样品含有 10 个以上。据沟鞭藻化石丰度, 东营湖在沙三中亚段沉积时期, 古生产力最高, 其次是沙四上亚段沉积的晚期和沙一中、下亚段沉积时期。而沙一上亚段、沙二段和沙四上亚段

下部沉积时期, 古生产力则较低。值得提出的是, 沙三下亚段样品中, 沟鞭藻化石罕见。这可能正是前述藻类化石保存作用影响的结果。因为这些样品中有机碳含量很高, 而且有机质多呈无定形。这些无定形有机质很可能来源于浮游藻类。所以, 尽管藻类化石少见, 但沙三下亚段沉积时期, 古湖泊的生产力仍然很高。

沙三中亚段、沙四上亚段和沙一段沉积时期较高的古生产力在其沉积岩中藻类化石的分布方式上也有反映。这三个地层单元中的纹层状泥页岩中常常有藻类化石纹层存在, 沙一段中出现的是颗石藻化石层(图 3), 沙三中亚段和沙四上亚段中出现的是沟鞭藻化石纹层(图 4)。

这些化石纹层具有共同的特征, 即都是由单种组成。类似的化石纹层常见于现代海洋和湖泊沉积中, 并认为是藻类勃发的结果^[11]。在古代湖相沉积中, 也已有报道, 一般也认为是藻类勃发所造成^[12]。这说

明 在沙三中亚段、沙四上亚段和沙一段沉积时期,古东营湖曾经出现过藻类勃发现象,这也从另一侧面说明当时的高古生产力。

湖相碳酸盐碳同位素组份的特征为:沙一段方解石平均值为 1.861‰,而且沙一中、下亚段高于沙一上亚段,沙四上亚段上部方解石平均值为 3.771‰,白云石为 3.190‰,下部白云石为 -4.496‰。 $\delta^{13}\text{C}$ 的变化顺序为:沙四上亚段上部>沙一中、下亚段>沙一上亚段>沙四上亚段下部。所以,据碳同位素的变化,东营湖古生产力的变化应是:沙四上亚段上部>沙一中、下亚段>沙一上亚段>沙四上亚段下部。

综合上述各项指标,可以看出东营湖在沙三中、下亚段沉积时期古生产力最高,其次是沙四上亚段的上部沉积时期,再次是沙一中、下亚段沉积时期。而沙二

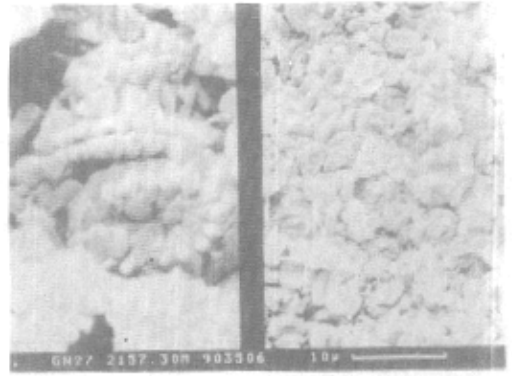


图 3 沙一段生油岩中的颗石藻化石层
(由 *Reticulofenestra bohaisensis* 单种组成)

Fig.3 Coccolithus layer in the oil source rocks of SHA 1
(composed of one species-*Reticulofenestra bohaisensis*)

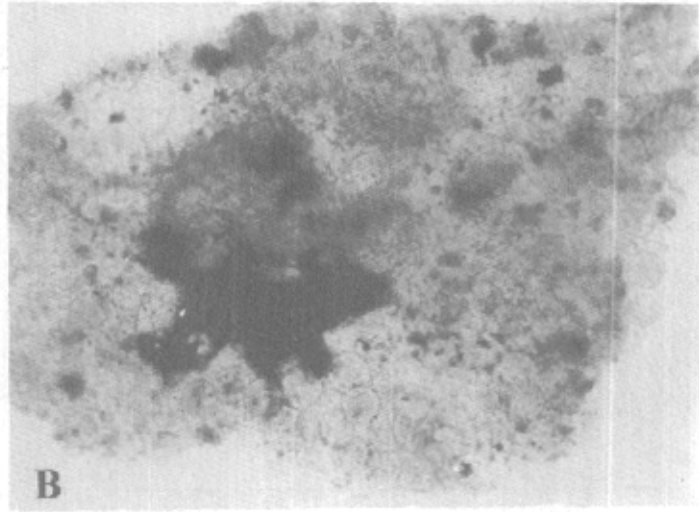
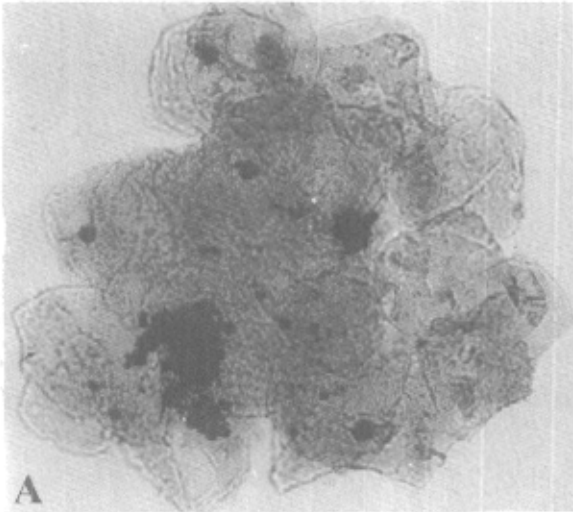


图 4 沙三中和沙四上亚段生油岩中的沟鞭藻化石层(A *Bohaidina* 藻; B *Fromea* 藻)

Fig.4 Dinoflagellates layer in the oil source rocks of middle SHA 3 and upper SHA 4
(A: *Bohaidina* B: *Fromea*)

段和沙四上亚段的下部沉积时期古湖泊的生产力较低。

2.3 古生产力定量测算

除了对沙河街组沉积时期古生产力的垂向变化进行了定性评价外,还使用前述公式(1)对沙河街组六个沉积时期(沙四段、沙三下亚段、沙三中亚段、沙三上亚段、沙二段和沙一段)古生产力的平面分布进行了定量测算。

各项参数取得的途径是:C 值采用胜利油田第一次和第二次资源评价附图中的有机碳含量平面分布

图①; $i\rho_s$ 和 φ 值取自张敦祥等^②对济阳拗陷不同深度泥岩孔隙度和密度的实际测量值(表 1);S 值沙三段和沙二段采用文献(13)图 2-15 的数据,沙四段和沙一段则是根据对纹层状页岩的实测获得。在测量中假设纹层状页岩是季节性形成,每个层偶的厚度代表了一年沉积的厚度,据此转换为沉积速率(每千年的厘米数)。沙一段共测量纹层 233 层,每个层偶平均厚度为 0.072 mm,沉积速率为 7.2 cm/千年;沙四段共测量纹层 36 层,每个层偶平均厚度为 0.451 mm,沉积速

① 胜利石油管理局地质科学研究所,济阳拗陷油气资源评价报告。

率为 45.1 cm/千年。

计算结果如图 5 所示。

沙四段:由湖盆边缘到中心,古生产力逐渐增高,最高可达 2 460,大部分地区均在 900 以上;沙三下亚段沉积时期,东营湖的最高生产力为 1 600,大部分地

表 1 沙河街组各段泥岩孔隙度、密度值(据张敦祥等①)

Table 1 Porosity and density of mudstones

from the Shahejie Formation (after Zhang Dunxiang *et al.*)

层位	$\varphi/\%$	$\rho_s/g \cdot cm^{-3}$
沙一段	19.7	2.15
沙二段	18.65	2.20
沙三上亚段	10.4	2.35
沙三中亚段	3.7	2.51
沙三下亚段	2.75	2.55
沙四段	2.6	2.60

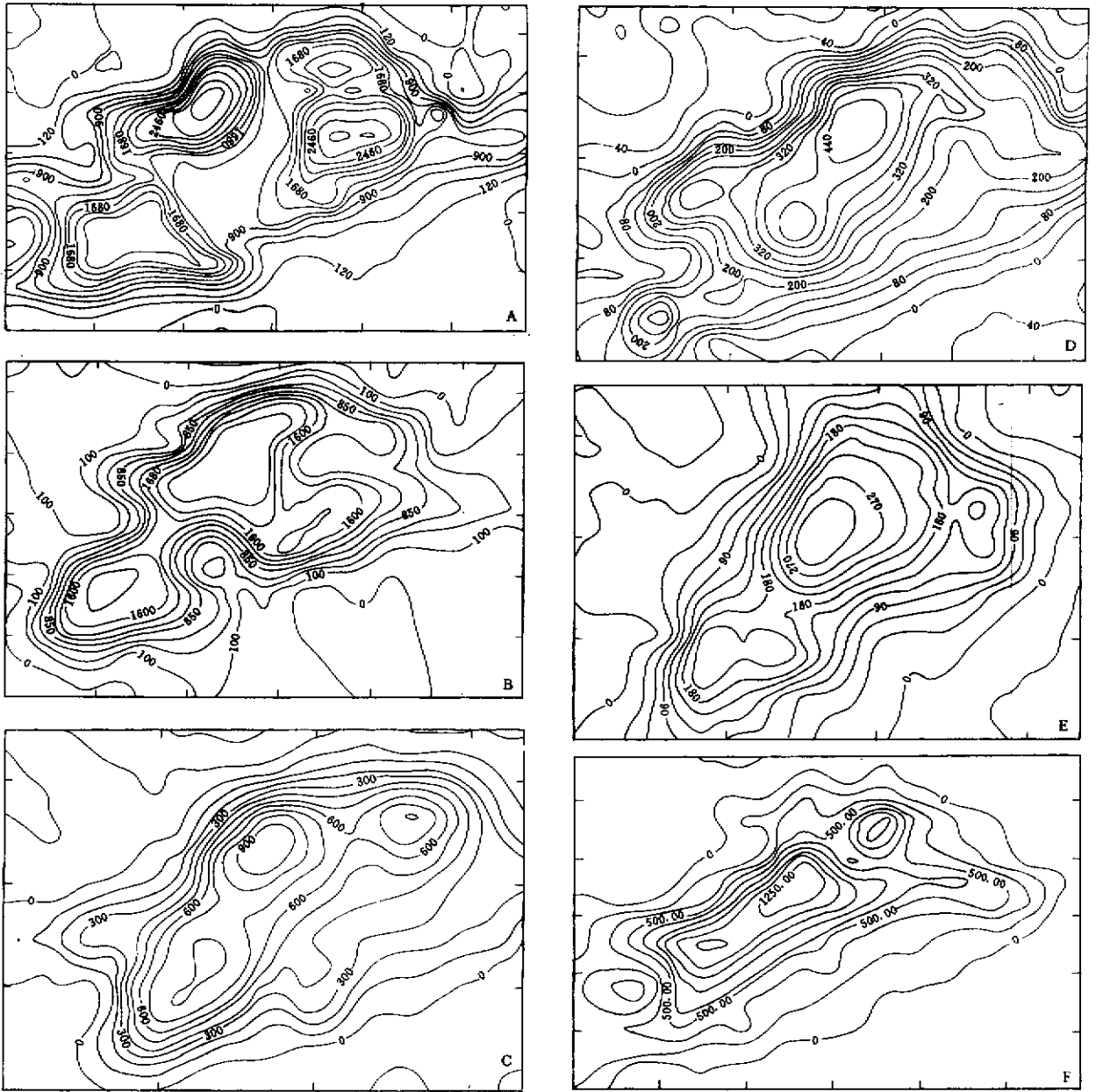


图 5 早第三纪不同阶段东营湖生产力等值线图

Fig. 5 Paleoproductivity isoline of the Dongying Lake ($g \cdot cm^{-2} \cdot y^{-1}$) (A. Es_4^+ ; B. Es_3^- ; C. Es_3^+ ; D. Es_3^+ ; E. Es_2 ; F. Es_1)

表 2 早第三纪东营湖古生产力与现代湖泊的对比(现代湖泊资料据文献 14)

① 张敦祥,东营凹陷泥岩压实实验——油气初次运移的初步报告.

Table 2 Comparison between the paleoproductivity of Paleogene Dongying Lake and that of modern lake (Data of modern lake from reference 14)

湖泊类型	现代湖泊		早第三纪东营湖	
	实例	生产力/(g·cm ⁻² ·y ⁻¹)	沉积时期	古生产力/(g·cm ⁻² ·y ⁻¹)
贫养湖	休伦湖	100		
	安大略湖	180		
中养湖	丹麦 Esrom 湖	260	沙二段	90~270
	Erie 湖	310		
	苏黎世湖	200		
富养湖	瑞士 Zug/Greifensee 湖	400~440	沙三上亚段	200~440
	Luganano 湖	350~460		
	东非维多利亚湖	680		
	坦噶尼喀湖	430		
超养湖	加里福尼亚珊瑚湖	1 050	沙三中亚段	300~900
	大盐湖	1 800		
	图尔卡纳湖	300~1 500	沙一下段	500~1250
	Aranguandi 湖	3 000~6 000		
	Natron 湖	900~1 200	沙四段	900~2460
	Nakuru 湖	900~1 200		
	Mono 湖	1 000		

区在 850 以上,沙三中亚段沉积时期,古生产力最高为 900,大部分地区在 300 以上;沙三上亚段沉积时期古生产力最高为 440,多数地区在 200 到 300 之间;沙二段古生产力最高为 270,大部分地区在 90 以上;沙一段沉积时期古生产力最高为 1 250,大部分地区在 500 以上。从上可以看出,古生产力定量计算结果的变化趋势与定性分析的结果是相似的,即沙三中、下亚段、沙四段和沙一段的古生产力较高,而沙二段与沙三上亚段沉积时期古生产力较低。沙四段之所以最高,是因为在计算时未把上、中、下三亚段分开。实际上,三个亚段的有机碳含量与沉积速率、孔隙度、岩石密度有极大的不同。而计算时用的是上亚段的有机碳含量和沉积速率,所以造成计算结果偏大。

2.4 与现代湖泊的比较

把早第三纪东营湖古生产力的计算结果与现代不同营养类型湖泊的生产力相比较,可以发现沙四段、沙三中、下亚段和沙一段沉积时期的东营湖为超养湖,沙三上亚段沉积时期为富养湖,而沙二段沉积时期为中养湖(表 2)。

所以,沙四段、沙三中、下亚段和沙一段沉积时期的东营湖是最有利于生油的湖泊,沙三上亚段沉积时期也应具有一定的生油能力,而沙二段沉积时期古湖泊的生油能力较差。这一结论与油气勘探的实际结果极为吻合,沙三中、下、沙四、沙一段正是东营凹陷的主力生油层位,而沙二段生油潜力低,是主要的储层^[10]。

3 结语

有机碳含量、微体古生物化石丰度和湖相碳酸盐

碳同位素比值是确定早第三纪生油湖泊古生产力的重要指标,即可以进行定性评价也可以进行定量计算。特别是本次研究把古海洋学中计算古生产力的公式用于古湖泊中,取得了较好的效果,证明了该方法适用的广泛性,为生油湖泊古生产力评价提供了一种新的手段。

定性分析和定量计算结果显示,早第三纪东营湖在发育的不同阶段具有不同的生产力水平。沙三中、下亚段、沙四上亚段和沙一段沉积时期,东营湖具有高的生产力水平,与现代湖泊生产力水平相比,可以达到超养湖的生产力水平。沙三上亚段沉积时期,东营湖生产力仍然较高,为富养湖。而沙二段沉积时期,东营湖生产力下降,为中养湖。就总体而言,早第三纪东营湖生产力水平较高,所以它具有较高的生油潜力,特别是沙三中、下亚段、沙四上亚段和沙一段沉积时期最有利于石油的生成。这一结论与油气勘探的实际结果是一致的。

参 考 文 献

- 1 Katz B J. Factors controlling the development of lacustrine petroleum source rocks-An update[J]. AAPG Studies in Geology, 1995, 40: 61~79
- 2 Parrish J T. Paleogeography of Corg-rich rocks and the preservation versus production controversy[A]. In: Huc A Y, eds. Paleogeography, Paleoclimate, and Source Rocks[C]. AAPG Studies in Geology, 1995, 40: 1~20
- 3 Pedersen T F, Calvert S E. Anoxia vs. productivity: what controls the formation of organic-carbon-rich sediments and sedimentary rocks? [J]. AAPG Bulletin, 1990, 74: 454~466
- 4 汪品先. 开展含油盆地的古湖泊学研究——代序言[A]. 见: 汪品

- 先,刘传联等编译. 古湖泊学译文集[C]. 北京:海洋出版社,1991. 1~14
- 5 Hunt J M. Petroleum geochemistry and geology[M]. San Francisco: W. H. Freeman and Company, 1979
- 6 Katz B J. Controls on distribution of lacustrine source rocks through time and space[A]. In: Katz B J, eds. Lacustrine Basin Exploration-case studies and modern analogs[C]. AAPG Memoir 50, 1990. 61~76
- 7 同济大学海洋地质系编著. 古海洋学概论[M]. 1989. 184~198
- 8 Miller P J, Suess E. Productivity, sedimentation rate and sedimentary organic matter in the oceans[J]. Deep Sea Res., 1979, 26:1347~1362
- 9 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
- 10 王秉海,钱凯. 胜利油区地质研究与勘探实践[M]. 山东东营:石油大学出版社,1992. 357
- 11 Ackleson S, Balch W M, Holligan P M. White waters of the Gulf of Maine[J]. Oceanography, 1988, 11:18~22
- 12 Gallois R W. Coccolith blooms in the Kimmeridge Clay and origin of North Sea oil[J]. Nature, 1976, 259:473~475
- 13 邓宏文,钱凯. 沉积地球化学与环境分析[M]. 兰州:甘肃科学技术出版社,1993. 154
- 14 Kelts K. Environment of deposition of lacustrine petroleum source rocks: an introduction[A]. In: Fleet A J, Kelts K, and Talbot M R, eds. Lacustrine Petroleum Source Rocks: Geological Society Special Publication 40, 1988. 3~29

Estimation Method on Productivity of Oil-producing Lake and a Case Study

LIU Chuan-lian¹ XU Jin-li²

1 (Laboratory of Marine Geology, Tongji University, Shanghai 200092)

2 (Geological Institute of Shengli Petroleum Administrative Bureau, Dongying Shandong 257000)

Abstract Commonly used methods on evaluating the productivity of oil-producing lake have been reviewed and take the Paleogene Lake (referred to as Dongying Lake) in the Dongying depression, Shandong Province, as a case study. These methods include organic carbon analysis, paleontological analysis and stable carbon isotopic analysis. The Paleogene sediment of the Dongying depression mainly composed by the Dongying Formation (Oligocene) and the Shahejie Formation (Eocene-Oligocene). These formations can be subdivided into some members, for example, the Shahejie Formation is divided into four members including first member (SHA1), second member (SHA2), third member (SHA3) and fourth member (SHA4). Both qualitative and quantitative methods show that the level of productivity in the lower-middle SHA 3, upper SHA 4 and SHA 1 are the highest, the second is the upper SHA 3, and the level of productivity in SHA 2 is the lowest. Compared with the productivity of different modern lakes, we concluded that the lake in lower-middle SHA 3, upper SHA 4 and SHA 1 depositional period are hypertrophic lake and these lake are the most favorable for the formation of lacustrine oil. The lake in the upper SHA 3 is eutrophic lake and in SHA 2 is Mesotrophic Lake. These lakes have poor potential for the formation of lacustrine oil.

Key words paleoproductivity, oil producing lake, estimation method, Paleogene, Dongying lake