

论成油和成煤的若干基本条件 ——以云南三个湖泊为例

陈应泰 王有孝

(中国科学院兰州地质研究所)

内容提要 本文以云南三个湖泊水生生物的数量和质量、沉积环境与有机质的关系、有机质埋藏初期和成岩早期的演化趋势等方面,着重讨论了成油和成煤的基本条件,并联系我国新生代成油成煤的有关条件,提出六点主要认识:1.成油、成煤必须具有构造条件;2.湖泊所处气候带必须适中;3.湖水须属富营养型;4.成煤与成油要求湖水深度不同;5.湖水的氧化还原状况;6.成煤还需没有陆源碎屑物质的补入。

主题词 陆相生油 沉积环境 水深 温跃层 营养型湖泊

第一作者简介 陈应泰 男 55 研究员 沉积学

在七十年代末,有关能源方面的一次通俗讲座上,叶连俊教授根据沉积学的基本原理,简要地论述过湖泊成油和成煤的基本规律及其相互关系。本文试图以近期内获得的实际材料扼要地叙述这一命题。

能源的勘探和研究结果表明,决定沉积物中有机质向成油和成煤方向演化,表面上与生物的数量和质量有关,实质上与沉积环境密切相关。云南三个湖泊提供了讨论成油和成煤的沉积模式,它有助于认识那些在古代沉积岩中已经消失了的过程,有助于认识控制这些过程的主要因素。

早在五十年代末,兰州地质所在总结中国西北区中新生代陆相油气田的形成及其分布规律时,曾经用“内陆潮湿拗陷”来概括陆相生油的主要控制因素。八十年代初又用“陆相潮湿拗陷”来总结陆相生油的主要地质规律^[1]。近年来的研究实践表明,作为构造背景的“拗陷”或“断陷”都可以成为陆相生油的重要场所,我国东部的“断陷”湖盆赋存着丰富的油气资源,就是有力的证明。可以说“断陷”和“拗陷”对陆相生油有着相似的控制作用。

过去把潮湿气候作为陆相生油的环境因素,也需要做些检讨。笔者认为,作为提供陆源有机质丰度的条件来说,潮湿气候仍然是重要的因素。因为实践表明,在极端干旱的气候条件下,如在当今柴达木盆地的小柴旦湖的有机质是极其贫乏的。但在云南的气候条件下,同样属于比较潮湿的气候条件下的三个湖泊,为什么有机质的类型和丰度有那样明显的差异?这说明气候条件并非唯一的控制因素。湖水的营养类型及其生物量、

湖水的深度、盐度及有关水生生物繁殖条件和有机质的保存条件及有无永久性分层湖水等，都是不容忽视的重要因素。

下面对云南三个湖泊水生生物的数量和质量、沉积环境与有机质的关系及有机质埋藏初期和成岩早期的演化趋势等进行讨论。

一、水生生物的数量和质量

各种水生生物的数量，除水生植物外，几乎都以滇池为最高，其次为洱海，抚仙湖最少（图1）。造成这种差异的原因不仅决定于湖水的营养类型，而且与湖盆流域面积的大小和它供给的营养元素的数量密切相关。滇池是富营养水体，它的流域面积最大，水生生物的数量也最多。抚仙湖是贫营养型湖泊，汇流面积最小，水生生物的数量也最少。洱海的上述指标都介于两者之间。三个湖均属大水系的源头湖泊，都有一部份湖水沿出水河道泄入各自的水系。

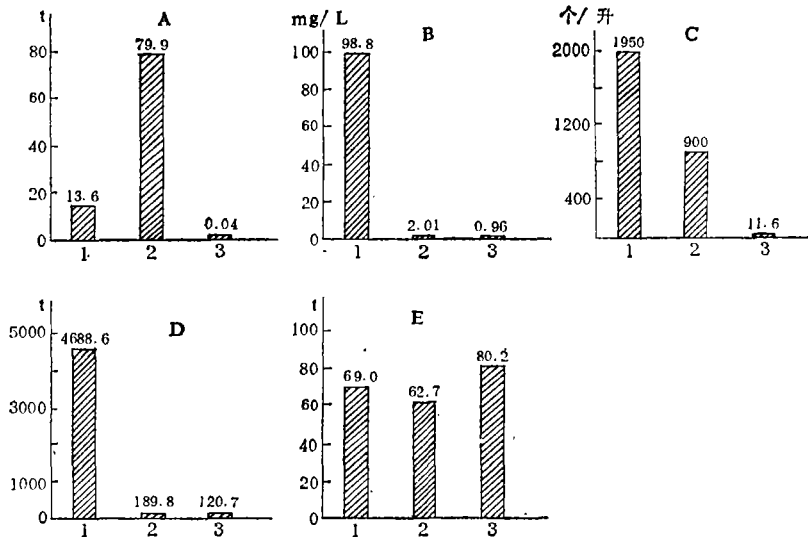


图1 云南三个湖泊生物量对比图

1.滇池 2.洱海 3.抚仙湖 A.水生植物 B.浮游植物
C.浮游动物 D.水蚯蚓 E.摇蚊幼虫

Fig.1 Correlation of biomass in the Dianci, Erhai and Fuxian Lakes

脂肪、蛋白质、蜡质、树脂等是陆相原油的主要生油母质。除蜡质和树脂来源于陆地高等植物外，脂肪和蛋白质主要来源于湖泊水生动物和浮游植物。其中又以水生动物的脂肪和蛋白质含量最高，其次为浮游植物。水生植物的脂肪和蛋白质含量低，结合其生长在水深不超过10m的浅水区来看，原地不是生油环境，但当有机质被搬运到湖水较深的水域也可成为生油母质。腹足类、瓣鳃类和浅水介形类，虽然它们含有丰富的脂肪和蛋白质，具备成为生油母质的前提，但是，由于它们多生活在水深不超过10m的浅水

区，也不可能成为主要的生油母质。所以，成油的主要物质应当是浮游动物、底栖动物、广水性的介形类和浮游植物。藻类的生物组成从总体看虽不及浮游动物，但它的产量是非常巨大的，也应当是成油的主要生源物质。

在湖泊生态系统中，浮游植物（藻类）和水生植物都是重要的组成部分和原始生产者，因而也是自然界能源的创造者之一。湖水中的营养元素通过光合作用使浮游植物和水生植物得以大量繁殖，而它们又成为其他动物的食料。水生动物之间，低等的又成为高等动物的食物，彼此之间维持着生态平衡。由于某些条件的变化，打破了原来的平衡，就会造成某些生物的大繁殖。在湖泊发展的晚期阶段，当湖水深度小于10m的情况下，水生植物大量生长，与浮游植物争夺阳光和营养盐，从而使藻类的数量大大下降，而水生植物则每年以百万吨以上的残体沉积于湖底，成为形成泥炭的物质基础。如在60年代滇池就曾经出现过水生植物大量繁殖的时期，水生植物的分布面积占滇池湖面积的90%以上，水生植物的数量曾跃居三个湖的首位。

湖水的深度是关系到成油或成煤的重要因素。三个湖的情况表明，湖水深度小于10m是形成泥炭的必要条件；深度大于10m是成油母质的生物大量繁殖和保存的必要条件。这一深度有利于浮游植物、浮游动物和底栖动物（水蚯蚓、摇纹幼虫等）的大量繁殖，从而为成油创造了物质基础。同时，还有利于分散有机质沉积于湖底被埋藏和保存。由于这一深度的水体不再受到湖浪的直接搅动，有机质易于保存而不被氧化，所以生油条件起码要求湖水的深度在浪基面以下。三个湖的湖浪波长的 $\frac{1}{2}$ ，一般为9m，可以考虑把10m水深作为有机质保存的起码深度。然而，湖水在相当大的深度内仍然存在垂直对流作用，只有水深大于温跃层的深度时才能成为垂直对流不明显的静水区。如果风力更加强劲，或湖水面积更大，风的吹程更长，从而影响水体垂直对流的深度就会增加，表现为温跃层的深度更大，以上条件相反则更浅。根据国内外湖泊的温跃层深度，笔者认为把湖水深度大于20—30m的水域划为静水区更为合理。在这一深度以下，每天湖水的垂直对流不明显，有利于沉积物中分散有机质的堆积和保存。云南三个湖泊的水深不同，其淤泥抽提物中的总烃含量百分数（表1），以湖水最深的抚仙湖含量最高，这除与有机质的类型有关外，湖水的深度也是不容忽视的重要因素。

生油岩中分散有机质的来源，除湖泊本身的水生生物是主要的生产者之外，陆地的高等植物还提供了一部分。所以，湖泊的流域面积及其植被状况就成为有关的因素。植被状况好和流域面积大，无疑是有利的条件。例如柴达木盆地的小柴旦湖的有机碳含量最低，与该湖内缺乏水生生物，周围又缺乏植被有关。云南三个湖的植被状况相似而汇流面积的大小不同，以滇池的汇流面积最大，次为洱海，抚仙湖最小。相应的有机碳的含量也以滇池最高，次为洱海，抚仙湖最少。

从三个湖总的成油条件看来，滇池早已进入形成泥炭的时期，洱海的深度也逐渐进入形成泥炭的阶段，由于它缺少水深大于温跃层的水域，所以不是成油有利的沉积时期。只有抚仙湖的水深条件最好，但由于它是贫营养型湖，汇流面积又小，有机质含量低，又是不利条件。假如把抚仙湖的水深条件和滇池的流域面积大、湖水的富营养型和水生生物数量丰富的条件结合起来，再加上深湖区的温跃层之下，如果有永久性分层湖水的存在，就会成为有利于生油母质形成的湖泊。

表 1 滇池、洱海、抚仙湖湖底淤泥有机地化分析结果

Table 1 Analytical result of organic matter and GC data of saturated HC in recent sediments from the Dianchi, Erhai and Fuxian Lakes

地区	柱状样		年龄 (千年)	总烃%	总烃/Corg	OEP值	S ₁ */S ₂	姥鲛烷 正17烷	植烷 正18烷	姥鲛烷 植烷	样品数
	分层	深度 (m)									
滇池	上层	0—0.7	<4	13.08	0.27	3.96	0.50	0.48	0.66	0.45	6
	下层	0.7—1.97	4—10	10.62	0.15	3.74	0.30	0.46	0.66	0.33	6
洱海	上层	0—0.7	<4	9.02	0.058	5.16	0.36	0.39	0.96	0.46	6
	下层	0.7—1.8	4—10	5.70	0.029	3.93	0.29	0.40	0.98	0.48	6
抚仙湖	表层	0.2	<1	27.05	0.066	7.11	1.07	0.44	0.88	0.42	2

* S₁—代表C₁₃—C₂₂的和S₂—代表C₂₃—C₃₅的和

二、沉积环境与有机质

(一) 一般认为姥鲛烷和植烷是由叶绿素演化而成的。但是, 姥鲛烷又是海洋浮游生物的主要组分^[2]。在原油和沉积岩中, 广泛存在着这两种类异戊二稀烷烃, 对它的研究, 目前主要应用于油源对比和成油环境的探讨。云南三个湖泊淤泥和钻井岩心的抽提物中姥鲛烷与正17烷比值、植烷与正18烷比值和姥鲛烷与植烷比值(表1、2)都小于一。这是云南淡水湖开放性水体的特征。无论埋藏初期的上、下层和钻井岩心的不同层位都没有明显的变化, 说明它们都是比较稳定的有机化合物。如将这三种比值与我国某些中、新生代淡水湖相沉积的生油岩和原油的比值对比, 陕甘宁盆地上三叠系及中下侏罗系的生油岩Pr/n-C₁₇为0.28—0.95, Ph/n-C₁₈为0.27—0.28, 原油的Pr/n-C₁₇为0.30—0.85, Ph/n-C₁₈为0.21—0.64, 与云南的数据比较接近。三水、酒西、泌阳等盆地的原油的Pr/Ph也与云南比较近似, 其中三水和酒西盆地原油的Pr/Ph分别为0.55和0.86, 泌阳凹陷原油的Pr/Ph为0.35—0.42^{[8][4]}。这些相似性也许说明它们的

表 2 参一井岩心有机质分析结果

Table 2 Analytical result of organic matter and GC data of saturated HC in the corehole C-1, Kunming Basin

井深 m	年龄 万年	总烃%	总烃/Corg	OEP值	S ₁ /S ₂	姥鲛烷 正17烷	植烷 正18烷	姥鲛烷 植烷	样品数	
段上	19—78	73	12.6	0.22	3.79	0.28	0.39	0.58	0.86	3
中段	152—285	240	14.1	0.31	4.78	0.08	0.64	0.79	0.59	3
下段	358—470	340	14.8	0.40	3.66	0.10	0.65	0.71	0.59	3
粉砂岩	405		29.0	4.04	2.0	0.60	0.26	0.39	0.64	1

沉积环境与云南三个湖泊有某些相似之处。

(二) 沉积环境不仅决定了原始有机质的组成，而且也决定了有机质向成煤或成油方向的演化 昆铝井井深由60.15—32.55m的五块岩心的有机质分析结果，提供了两种环境

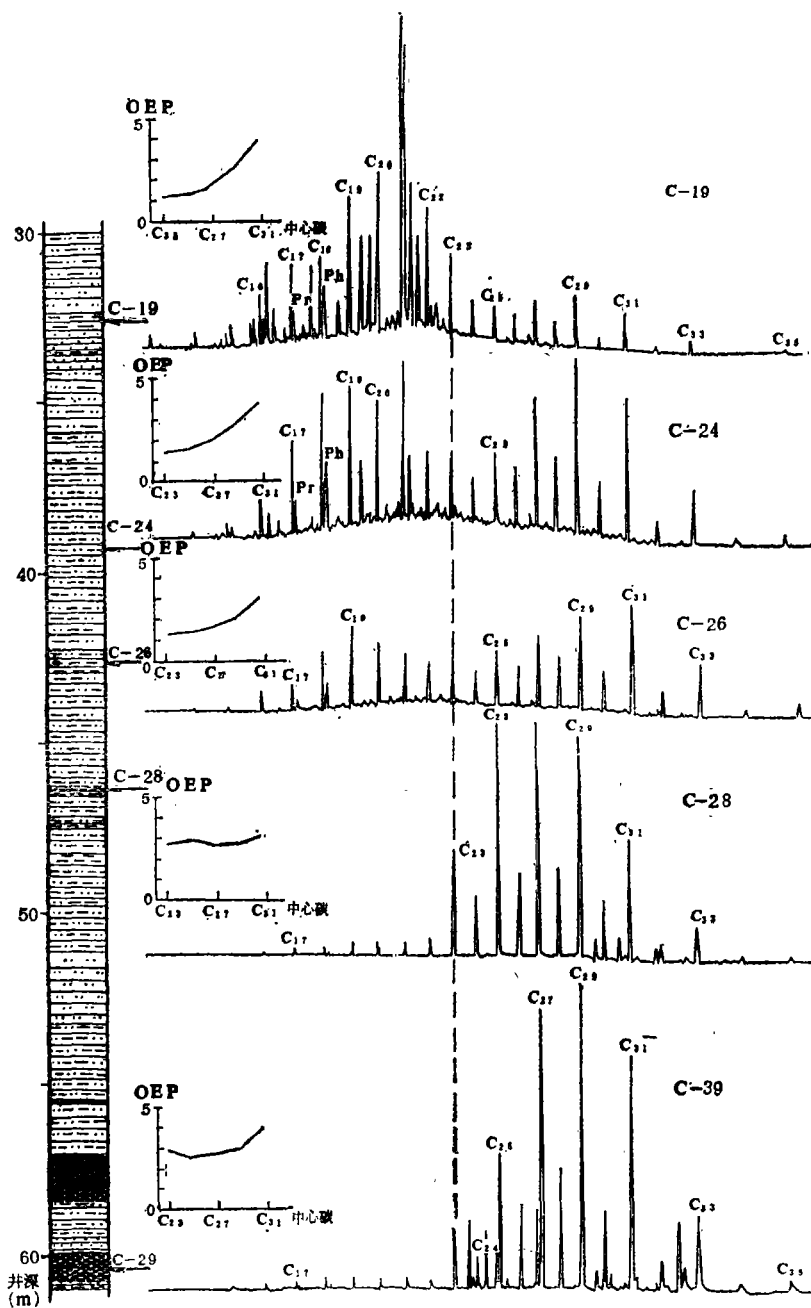


图 2 昆铝井井深30—60m沉积物饱和烃色谱图

Fig.2 GC of Saturated hydrocarbon in sediments from Gorehole KL (30-60m in depth), Kunming Basin

表3 昆铝井有机地化分析结果

Table 3 Analytical result of organic matter and GC data of saturated HC in core from Corehole KL, Kunming Basin

样品号	岩性	采样井 深 m	有机碳 %	氟仿沥青 APPM	总烃%	碳数分布	主峰碳数	OEP 值	S ₁ /S ₂
B ₁₉	兰灰色粘土	32.55	0.11	140	36.8	C ₁₃ —C ₃₅	C ₂₁ C ₂₉ 低峰	2.75	1.69
B ₂₄	浅灰色含粉砂泥岩	39.20	0.30	84	/	C ₁₃ —C ₃₅	C ₂₁ C ₂₉	2.75	0.63
B ₂₆	兰灰色粉砂质泥岩	43.52	0.19	27	/	C ₁₄ —C ₃₅	C ₁₉ 低峰C ₃₁	3.17	0.47
B ₂₈	黑色碳质粘土	46.31	6.44	3902	10.4	C ₁₆ —C ₃₅	C ₂₅ —C ₂₇	2.67	0.058
B ₂₉	褐煤	69.15	7.41	9909	9.9	C ₁₅ —C ₃₅	C ₂₉	2.99	0.045

剖面(图2、表3)的良好例证。剖面下部的两个样品属于沼泽沉积,剖面上部的三个样品属于湖相沉积。前者的原始有机质以水生和陆生植物为主,表现在色谱图上以高碳数(C₂₃—C₃₅)谱峰占绝对优势的单峰型谱图。后者是双峰型谱图,低碳数谱峰(C₁₃—C₂₂)是以藻类和水生动物为原始有机质,高碳数峰(C₂₃—C₃₅)是以水生和陆生植物为原始有机质,表现为混合型原始有机质的特点。S₁与S₂的比值自下而上增加,也说明藻类和水生动物提供的原始有机质数量不断增加。这些样品的干酪根碳同位数 $\delta^{13}C$ 值也相应的由-29.4‰变为-25.7‰,也说明两类原始有机质的明显变化。

值得指出的是我国第三纪陆相原油也有类似的双谱峰现象,如任丘油田的饱和烃色谱图上,也存在不对称的双峰,其主峰为C₂₂或C₂₃,次主峰为C₁₇或C₁₈^[3]。

另外,昆铝井的三块泥炭和褐煤样品的S₁与S₂的比值分别为0.082、0.058、0.10。参一井的四块褐煤样品的S₁与S₂比值都是0.02或0.03。这都说明它们的原始有机质主要是水生和陆生植物,低碳数烃类含量极低。上述事实说明,不同沉积环境、沼泽和湖泊所提供的原始有机质类型完全不同。所以,不同环境的沉积物从接受沉积开始就决定了向成煤或成油方向的演化。

(三)在昆铝井和参一井,以湖沼环境为主的岩心中,其“芳烃馏分”中吡的含量较高。这种现象,可能代表浅水的湖沼环境。它可供研究生油岩指标时参考和验证。

三、埋藏初期和成岩早期有机质的演化趋势

在滇池和洱海,深度不到2m的淤泥柱状样品大约经历了一万年的时间。这期间有机质的变化代表埋藏初期的演化趋势,主要表现为生物化学作用对有机质的改造。在这个过程中一部分有机质被氧化而消耗了,或变成轻组份而散失在大气之中。表1中滇池和洱海上层的总烃含量大于下层的含量,S₁与S₂比值由上层向下层降低的现象都是有机质消耗反映。在有机质消耗氧气的同时,也为自身的保存创造了有利条件,逐渐由氧化变为还原环境。滇池和洱海柱状样品的Eh值由上到下层,分别由+149变为-70,

由 +280 变为 +43。根据王大珍等在青海湖的研究，微生物在沉积层的还原环境下起着产氢、转氢、脱氧、脱氮等作用，促使有机质向石油方向转化”。滇池和洱海上、下层淤泥相差数千年，C23和C25稀烃和相邻C23和C25烷烃的比值，由上层到下层相差近一倍左右，下层的烯烃明显减少。笔者认为烯烃的减少与生物化学作用密切相关。烯烃转化为烷烃的过程，从昆铝井岩心分析数据来看，在井深11.62m的淤泥样品中，烯烃峰几乎已经没有显示，说明大约在十万年期间，是转化过程迅速进行的阶段。

在埋藏初期的演化过程中，烷烃的奇偶优势也发生了比较明显的变化。原始有机质中烷烃的奇数碳占有很大优势，如抚仙湖表层淤泥的OEP值最大可达7.83，随着有机质成熟度的增加，到成为原油时，一般OEP值接近于1。滇池和洱海的OEP值经过数千年的历史，均有减少的趋势。

成岩早期阶段有机质的演化趋势，可从参1井岩心的有机地球化学研究中得到某些启示。参1井上、中、下三段地层的年龄分别大约为73、240、340万年。分三段统计分析数据的平均值，统计结果（表2）表明，参1井三段的总烃，自上而下增高，分别为12.6%、14.1%和14.8%。相应的S₁与S₂比值也自上而下逐渐增加，三段分别为0.22、0.31和0.40。这都说明随着埋藏深度增加和时间的增长，有机质转化为烃类的相对数量增加了。而与埋藏初期有机质的“转耗”情况相反，变为烃类“转增”。说明成岩早期已经生成少量烃类。还有一个值得注意的现象是参1井井深405m的一层粉砂岩与众不同。总烃和S₁与S₂比值都很高，其中总烃含量可达29.0%，总烃/C_{org}竟达4.04。而且OEP值只有2.0，是全井段最低数值。在饱和烃色谱图上出现两组谱峰，主峰碳分别为C18和C29，说明成岩早期形成的烃类已经向砂层发生运移的迹象。虽然砂层中的氯仿沥青A的含量只有97ppm，但毕竟是发生在340万年以内的现象。当然这样短暂的时间一般还不具备形成油流的条件。

笔者认为，在干酪根热降解成油理论占优势的今天，选择完整的上第三系生油岩剖面，研究生油岩完全成熟之前究竟有多少烃类已经生成，这不仅是一个理论问题，而且对我国上新世生油岩发育的地区，如对我国的大陆架地区，寻找低成熟石油将会有实际的经济意义。至于对天然气来说，在第四系，国内外已经发现一部分天然气藏。参1井也发现了天然气，可惜因天然气着火，发生井塌，没有取得有关数据。

总之，从云南三个湖及滇池晚新生代沉积的研究结果，并联系我国新生代成油和成煤条件来分析，可以归纳为以下几点主要认识：

1. 无论“断陷”或“拗陷”都是成油或成煤必需的构造背景条件。

2. 湖泊所处的气候带只要能保证提供必需的陆源有机质和湖泊水生生物大量繁殖的水介质含盐度，就能达到有机质赋存的先决条件。具体来说，如果湖泊所处的气候带比较干燥时，湖水的含盐度只要不高于石膏沉积的阶段，则可成为水生生物繁殖的基本水介质条件。而且，如果湖水的蒸发量大于降雨量时，更有利于深湖区形成含盐度较高的永久性分层水，反而比降雨量大于蒸发量的潮湿气候带更有利于有机质的保存。

3. 湖水的营养类型也是水生生物大量繁殖的重要条件。富营养型的滇池和中营养型的洱海都具有水生生物繁殖的有利条件，所以水生植物群落丰富，水生生物的产能高。而贫营养型的抚仙湖则对水生生物的大量繁殖不利，所以水生植物群落稀少，水生生物

的产能很低。

4.就湖水深度来说,成煤条件一般要求湖水的深度不超过10m,才能保证水生植物的生长有足够的阳光条件。而对成油条件来说,湖水的深度起码要在浪基面以下的沉积区,有机质沉积后才不易被氧化。从云南三个湖泊的情况来看,浪基面的水深一般不超过10m。如果湖水的深度能够达到温跃层以下的水深,即一般深度大约在20—30m以下的沉积区,则有机质沉积后更不易遭受湖水垂直对流的影响,有机质更易于得到保存。

5.世界湖水物理的研究资料表明,具有永久性分层水的湖泊,由于湖底水层的比重大,含盐度高,底层水的溶解氧含量低,有利于有机质沉积后的保存,是深水湖生油有利的条件之一。抚仙湖虽然也是深水湖,但只有季节性分层水,而缺乏永久性分层水,所以它在水深100m处的溶解氧仍可高达4 mg/L左右,在150多m深的湖底还存在水蚯蚓。说明湖底并未形成还原环境,这是抚仙湖不利于生油的又一原因。

6.对于成煤条件来说,除有大量的有机质生成和赋存之外,没有非有机质的大量陆源物质的混入,也是必需的沉积环境。

可见,只有上述基本条件都具备的湖泊才能成为成煤或成油的有利环境。

收稿日期1987年4月23日

参 考 文 献

- [1] 中国科学院兰州地质研究所, 1981, 《中国陆相油气的形成演化和运移》甘肃人民出版社, 1—94页。
- [2] 中国科学院地球化学研究所有机地球化学与沉积学研究室, 1982, 《有机地球化学》科学出版社, 109—111页。
- [3] 石油勘探开发科学研究院地质研究所, 1982, 《中国陆相油气生成》石油工业出版社, 75—77、155—174、216—231、258—266、310—336页。
- [4] 王有孝等, 1981, 石油与天然气地质, 第2卷, 第2期, 158—167页。
- [5] 中国科学院兰州地质研究所等, 1979, 《青海湖综合考察报告》科学出版社, 233—264页。

ON SOME BASIC CONDITIONS OF COAL AND OIL FORMATION TAKING THREE LAKES IN YUNNAN AS EXAMPLES

Chen Yingtai Wang Youxiao

(Lanzhou Institute of Geology, Academia Sinica)

Abstract

In the earlier stage of 1980's, almost a hundred of scientists from several institutes organized by the Earth Sciences Division of Academia Sinica synthetically studied the environments and sediments of Dianchi, Erhai and Fuxian Lakes. What dealt with in this paper is one of these research achievements. Stress was put on the basic conditions of coal and oil formation, through the study of the quantity and quality of aquatic organisms of the three lakes, the relationship between sedimentary environments and organic materials, evolution tendency of organic materials during early-burial and early diagenesis. Relating to the formation conditions of Cenozoic coal and oil in China, the paper puts forward six viewpoints as follows:

1. Both depression and fault subsidence are necessary tectonic background conditions for oil and coal formation.

2. If the climate zone in which the lakes stand can ensure the water salinity necessary for the multiplication of aquatic organisms and continental organic materials, the favorable conditions for the preservation of organic materials can be got. particularly, when the climatic zone is relatively dry and water salinity is not higher than that in which gypsum can deposit, the essential water medium conditions for aquatic plants multiplication could be satisfied. Furthermore, if the rainfall of the lake is less than evaporation the permanent layered water with high salinity is much more profitable to form in deep lake so that the organic materials can better preserved

3. The nutrient type of lakes is also an important factor for the multiplication of aquatic organisms. Both Dianchi lake of rich nutrient type and Erhai Lake of middle nutrient type are favourable for the multiplication of aquatic organisms. So aquatic plants communities are wealthy and the productive ability of aquatic organisms is high. On the contrary, in the poorly nutrient Fuxian Lake, there is less community and the yield is much lower.

4. As to the depth of lake water, coal formation requires less than 10 meters, which can provide sufficient sunshine for aquatic plant growing. But for the oil formation, the depth of lake water must be at least deeper than the wavebases, so that organic materials can not be easily oxidated after their deposition. From the investi-

gation of three lakes in Yunnan, the depth of wavebases is less than 10 meters. If the lake water is deeper than the thermal layer, that is in the sedimentary regions with the water depth of 20-30 meters, the deposited organic materials will be affected less easily by the vertical convection of lake water, so to be preserved better.

5. Research data on the lake-water physics collected from all the world have suggested that lakes with permanent layered water, as the specific gravity of the bottom water is larger and the salinity higher and the content of dissolved oxygen lower, are suitable for the preservation of deposited organic materials. Therefore, it is one of the profitable conditions for oil formation in deep lakes. Although Fuxian Lake is a deep lake, it has only seasonal layered water, so the dissolved oxygen in 100m water depth can reach to about 4mg/L, and there are aquatic earthworms in the bottom of the lake at 150m. It shows that the reducing condition has not been formed yet at the bottom of Fuxian Lake. That is another reason why Fuxian Lake is not suitable for oil formation.

6. As to the conditions of coal formation, besides the sufficient mass and preservation of organic materials, small input of continental clastic materials is also the essential factor.