

文章编号: 1000-0550(2010) 05-0917-09

古湖泊学研究^①

——以桦甸断陷盆地为例

刘招君 孟庆涛 柳蓉 胡菲 周人杰

(吉林大学地球科学学院 长春 130061)

摘要 古湖泊学是研究湖泊系统历史演变的科学, 是一门综合性很强的地球科学。本文综述了古湖泊学的定义、研究现状及常用的研究方法, 并以吉林桦甸古近纪断陷含油页岩湖盆为例进行了应用。桦甸盆地小型半地堑盆地, 盆地南缘 F_1 断裂控制了古近系湖泊演化特征。桦甸盆地富含油页岩资源, 具有开展古湖泊学研究的优势条件。桦甸油页岩具明显的黑白相间的双层结构特征, 有机质条带和陆源碎屑颗粒呈现良好的韵律互层, 有机质呈现褐色或黑色条带, 夹杂石英、长石颗粒的粘土矿物呈白色条带。根据泥岩和油页岩的有机碳含量垂向变化特征, 桦甸组古湖泊生产力演化趋势为: 中部含油页岩段 > 上部含煤段 > 下部含黄铁矿段, 反映油页岩沉积时, 湖盆古湖泊生产力最高。根据油页岩岩石学特征、 $V/(V+N)$ 、 Sr/Ba 和 B/Ga 等元素比值分析, 中部含油页岩段时期, 表现出一种淡水与半咸水—咸水交替变化的沉积演变过程, 可以形成一定程度的盐度分层, 使底层水处于缺氧环境, 有利于有机质的保存。随着古湖泊学的不断发展, 它已经在油气资源勘探开发及全球环境与气候变化等领域发挥了重要作用, 但仍存在一些理论及方法问题需要湖泊地质工作者的不断努力与探索。

关键词 断陷盆地 古湖泊学 桦甸盆地 油页岩

第一作者简介 刘招君 男 1951 年出生 教授 博士生导师 沉积学 E-mail liuzq@jlu.edu.cn

中图分类号 P512.2 **文献标识码** A

1 概述

1.1 古湖泊学的定义

古湖泊学 (Paleolimnology) 是湖泊学与古生态学、古气候学、湖沼学、地学、物理学、化学等密切相关的交叉学科, 其着眼于重建内陆湖泊水体 (咸水、微咸水、淡水) 的古环境, 特别是在气候变化和人类影响下所发生的一系列变化和其自身内在的过程。古湖泊学研究通常是基于细致的分析沉积物, 包括其物理、化学和矿物学特征及各种生物记录 (如化石硅藻、枝角类、介形类、软体类、花粉等)^[1~5]。

汪品先等定义古湖泊学是研究湖泊系统历史演变的科学, 其研究对象是地质时期的湖泊系统。从集水盆地的气候和地质条件, 到湖水的物理、化学性质, 再到湖泊的生产力和有机质的堆积, 相互之间都有着“牵一发而动全身”的内在联系。古湖泊学的研究任务就是从沉积记录中分别提取这些信息, 通过多学科定量研究和建立湖泊系统演变模式的方法, 揭示湖泊沉积、湖泊矿产和形成规律^[6]。

因此, 古湖泊学涉及的学科甚多, 如湖泊学、湖沼

学、古生态学、古生物学、古气候学、地球物理学、地球化学、环境科学、岩石学、沉积地质学、石油地质学、煤田地质学等, 它是一门综合性很强的地球科学。它不仅具有重要的科学意义, 还有重要的生产实践意义, 还与各种生物及人类赖以生存的环境密切相关。因此, 古湖泊学是一门十分重要的地球科学。

1.2 古湖泊学研究现状

1.2.1 国外古湖泊学研究历史与现状

古湖泊学的研究始于美国 19 世纪末叶, Russell 对内华达州西部更新世 Lahontan 湖和 Gilbert (1891) 对美国犹他州大盐湖前身更新世 Bonneville 湖的研究是古湖泊研究的先河^[7]。20 世纪 20—70 年代, 古湖泊学研究主要是以高、中纬度区冰川成因的短暂小湖为主要对象, 期间有代表性的著作是 Hutchinson 出版的《论湖泊学》, 对湖泊学的内容进行了较全面的论述^[8]; 70 年代后期以来, 古湖泊学在国际地质学界备受重视, 确定了两大研究方向: 一是以古气候演变及其趋势预测和环境保护为目标, 基本在湖泊沉积的晚第四纪地层中进行; 二是以盆地构造、油气形成和地质演化为重点, 主要在构造湖泊的中新生代地层中

①国家自然科学基金 (批准号: 40972076) 和国家科技重大专项 (编号: 2008ZX05018-001-004) 资助。

收稿日期: 2010-05-20 收修修改稿日期: 2010-06-05

展开,其重点侧重于非洲的裂谷湖泊^[6]。随着我国、巴西和印尼等陆相油田的不断发现,陆相湖盆的研究逐渐受到石油界的重视。其中,美国绿河页岩的古湖泊学研究在陆相生油和古环境重建两方面都具有特殊意义。尽管形成绿河组地层的湖泊究竟是季节性干涸的浅湖还是水体分层的深湖一直存在争议^[9-10],但它确实为非海相含油盆地的古湖泊研究奠定了基础。90年代以来,人们对中外陆相油气田纷纷进行总结和研究^[11-16],在研究过程中注重与现代湖泊的研究成果进行比较,而且这期间有关现代盐湖的研究成果也逐渐增多。Håkanson L等出版了《湖泊沉积学原理》从物理、化学和生物等环境参数入手探讨了湖泊环境特点、湖泊的沉积动力学及沉积物的沉积机制和分布规律^[5]。

1.2.2 国内古湖泊学研究历史与现状

我国也在一直积极进行着古湖泊学研究探索。自20世纪50年代以来,我国学者开始对青海湖、茶卡、大柴旦等高原盐湖,太湖、鄱阳湖、洞庭湖、抚仙湖、滇池、洱海等构造断陷湖进行过较为系统的湖泊学研究^[17-20],还采用了稳定同位素^[18]和环境磁学^[21]等新技术方法,为湖泊沉积和环境演变提供了宝贵的资料。随着我国大庆等油田的发现、陆相成油理论的发展及中、新生代湖相地层沉积学研究的深入,古湖泊学的研究也逐渐涉入到中、新生代含油气湖盆,先后从古湖泊学的角度探讨了断陷盆地的演变,水体季节分层^[22]、湖相生物特征和油页岩特征^[23]、断陷(东营凹陷)和坳陷(松辽)盆地古湖泊生产力^[24-25]和缺氧事件^[26-27]等。

总之,随着国际油气勘探的进展和对全球环境与气候演变研究的需要,古湖泊学的研究受到了更加广泛的重视。我国发育有众多中、新生代陆相含油气、含油页岩和含煤断陷湖盆,为古湖泊学研究提供了良好的素材,同时,通过古湖泊学的研究,可以解决断陷湖盆中古环境、古气候、有机质生成与保存等一系列问题,将对油气、油页岩和煤勘探具有重要的指导意义。

1.3 古湖泊学研究方法

从古湖泊盆地系统研究的角度看,古湖泊学研究除传统的物理、化学和生物古湖泊学之外,在应用到陆相断陷盆地时,要正确解释古湖盆地质记录,还应涵盖沉积学、岩相古地理、盆地分析和层序地层学等沉积地质学研究方法。

1.3.1 物理古湖泊学

物理古湖泊学是根据沉积记录,研究湖水的古温度、密度、古水深、湖水分层等特征。自生碳酸盐矿物和介形虫壳瓣中的氧同位素 $\delta^{18}O$ ^[28]、长链不饱和酮分子、Sr/Ca比值和Mg/Ca比值等是确定湖水古温度的替代性指标^[29]。

古水深的确定是长期未解决的难题,盆地的古水深可根据沉积物的分布规律、沉积构造、古生物类型及生态等标志来确定。如一般情况下,湖盆的粗碎屑为浅水沉积,由浅水至深水,砂砾沉积减少,粘土质沉积递增,较深和深水区主要是粘土质沉积^[30-31];湖泊沉积构造取决于水体深浅和水动力条件变化,盆地的深水—较深水区主要形成微细水平层理、连续韵律发育,深湖浊积岩具复理石构造,槽模、沟模是其特征沉积标志,浅水地区层理多样,间断韵律发育,波痕、冲刷侵蚀现象发育,干裂、雨痕、细流痕等层面构造是反映沉积物露出水面的标志^[32];具有一定水深意义的特征生物如介形虫的分异度与丰度在近岸浅水区最高、在远岸深水区最低^[33],有孔虫动物群的丰度和分异度随水深增加而增加^[34],颗石藻的丰度随水深的增加而增大^[35]。

湖水的密度分层,可以是热分层,也可以是盐度分层。热带地区的深水湖可以形成稳定的热分层,如坦噶尼喀湖,而温带湖的热分层往往具有季节性^[7];盐度分层比较稳定,介形虫等底栖生物化石组合及其壳体中氧同位素、微量元素比值、沉积物色泽、自生矿物、有机碳含量、变价铁元素指标、遗迹化石和生物扰动构造等均可指示底水含氧量与湖水分层^[23]。

1.3.2 化学古湖泊学

化学古湖泊学主要研究湖水的盐度、矿化度、化学成分、酸碱度、硬度和pH值等特征;通常,元素B、B/Ga、Sr/Ba、Mg/Ca、Sr/Ca、Na/Ca、MgO/Al₂O₃等含量及比值可以反映水体的盐度变化^[36];对于湖泊沉积和湖泊生物来说,湖水的化学成分比矿化度重要的多,通常,碱性湖对油气的生产最为有利;而pH值是影响湖泊沉积与生物的另一重要参数,一般可用地层中钙质壳体的类型及保存状况来推断古湖泊水的pH值。

1.3.3 生物古湖泊学

生物古湖泊学的研究重点是古湖泊生产力,通常所说的古湖泊生产力是指初级生产力,由具有光合作用的浮游藻类、细菌、大型水生植物产生。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,有机碳含量高。评价古生产力高低主

要依靠有机质来源、有机碳含量、有机质碳同位素等定性指标^[37-40]; 也有学者借鉴古海洋生产力的计算方法, 采用有机碳法对东营凹陷沙河街组古湖泊生产力进行了定量计算^[41-44]。

1.3.4 沉积地质学方法

沉积地质学方法是对古湖泊盆地构成要素的整体分析, 主要研究盆地充填物、形态、构造样式、演化及控制因素(形成机制)。它综合了地质、地球物理和地球化学等多学科交叉、渗透, 研究方法主要包括沉积学、岩相古地理、盆地分析和层序地层学等多种方法^[45-47]。

上述研究方法是综合了多家学者对不同湖盆的研究结果, 针对某一类型的单个湖盆特征和自身条件, 应选择不同的研究方法。

2 桦甸断陷湖盆古近纪古湖泊学研究

桦甸盆地是我国开采历史较早且正在进行油页岩地下开采的盆地之一, 含工业可采油页岩 13 层, 具有巨大的经济价值。同时, 油页岩又是一种高富含有机质的典型的细粒湖泊沉积物, 作为陆相沉积最细粒的部分, 是古气候、古环境、古生产力、沉积环境等变化的灵敏指示器和高分辨率的自然档案, 因此, 桦甸湖盆具有开展古湖泊学研究的得天独厚条件。

2.1 盆地构造对湖泊演化的控制作用

桦甸盆地位于我国东部郯庐断裂带北延分

支——敦密断裂带上, 盆地构造格架为近 EW 向展布的半地堑盆地(图 1), 地层走向 NW—NEE, 倾向 SE, 倾角 15°~20°, 盆地南缘断裂(F₁)为控盆同沉积边缘断裂。桦甸湖盆主要沉积古近纪桦甸组地层, F₁断裂控制了古近系地层的沉积及湖盆演化(图 2)。桦甸组时期, 湖盆演化可以分为三个阶段:

(1) 下部黄铁矿段沉积期: 盆地物源主要来自于东北方向, 发育大型的扇三角洲平原及前缘沉积, 其次为西南方向的两个小物源, 湖盆大部分为砂体充填, 湖泊分布面积较小, 盆地处于过补偿沉积状态。

(2) 中部含油页岩段沉积期: 盆地物源主要来自于东北方向的小型扇三角洲, 控盆断裂(F₁)一侧无物源供给, 盆地周缘物源供给很少, 湖泊分布面积较大, 由于湖盆处于较稳定欠补偿的沉积状态, 因此形成了具有工业价值的油页岩矿。

(3) 上部炭质页岩(含煤)段沉积期: 控盆断裂活动较强烈, 盆地物源方向转变为来自南缘控盆断裂(F₁)一侧, 主要发育大型的扇三角洲沉积, 物源供给较大, 湖盆面积缩小, 盆地处于过补偿状态, 而到盆地边缘, 物源供给逐渐较少, 局部地区发育泥炭沼泽, 发育局部可采煤层。

2.2 湖相油页岩的岩石学特征

本次研究对桦甸盆地 HDN-g1t003 井、HDN-dcz-001 井、ZK001 井等 6 口取心井段油页岩岩心进行了详细观察与描述。桦甸油页岩颜色为灰褐色、棕褐色

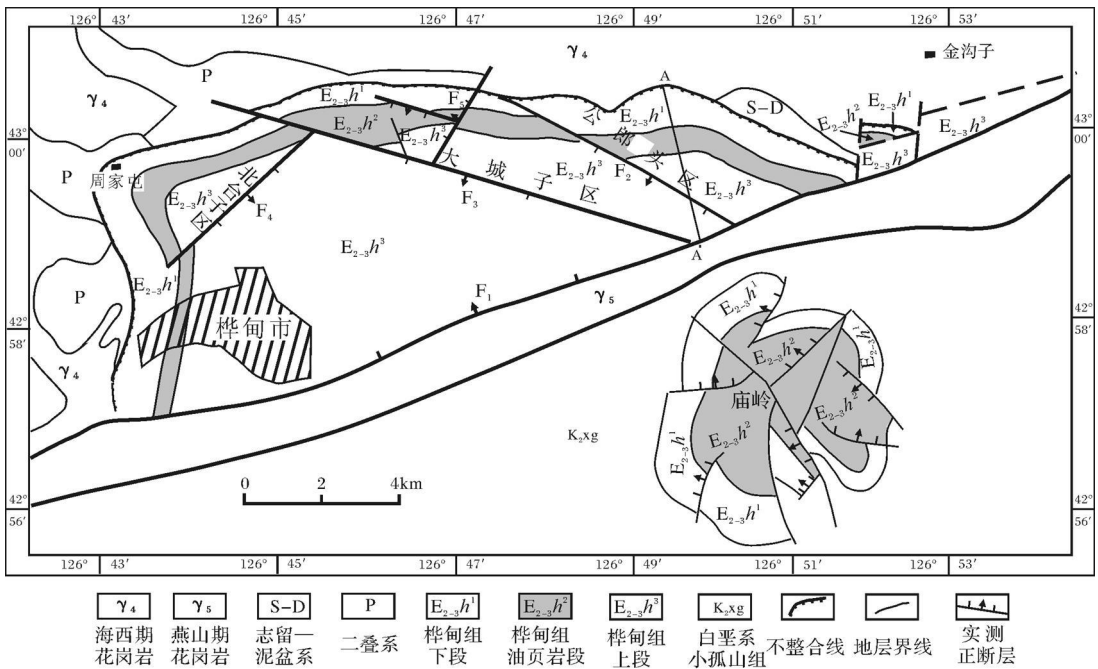


图 1 桦甸盆地地质图

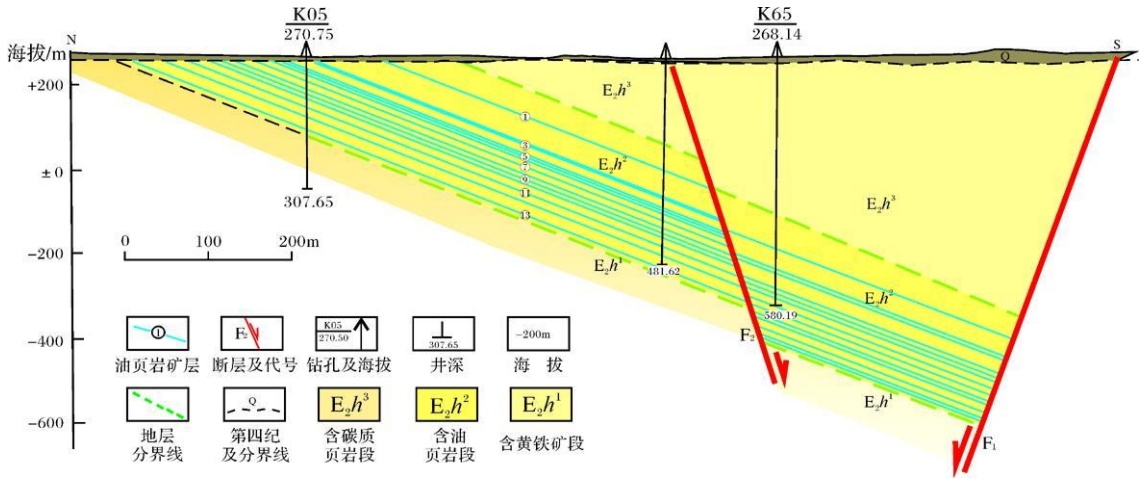


图 2 桦甸盆地 A - A' 勘探线剖面

Fig 2 Section of A - A' exploration line of Huadian Basin

和黑色, 页理较发育、贝壳状断口, 擦痕为棕色, 用指甲刻滑呈光滑条痕, 用明火可以点燃并具浓烈的沥青味, 含丰富的动植物化石及植物碎屑。含油率较高, 一般为 8% ~ 13%, 最高可达 24%。

本区油页岩最明显的结构特征是在透射光显微镜下具有黑白相间的双层结构, 油页岩中有机质条带和陆源碎屑颗粒呈现良好的韵律互层 (图 3 A)。贫矿油页岩中韵律不明显且有机质条带颜色较浅, 富矿油页岩中韵律明显且有机质条带较厚。在正交和偏光显微镜下有机质条带均呈现褐色或黑色条带, 而陆源碎屑层则主要由夹杂石英、长石颗粒的粘土矿物组成白色条带。油页岩中水平层理较发育 (图 3 B), 层面上多含介形虫、完整的软体动物等化石, 表明一种

比较稳定的低能水动力条件。

2.3 古湖泊生产力

一般认为, 湖泊沉积物中有机碳 (TOC) 含量与原始有机质生产力相一致, 低有机碳含量与低湖泊生产力相对应, 高有机碳含量与高湖泊生产力相对应^[48]。有机碳含量 (TOC) 在桦甸组各段地层中的情况如下 (表 1, 图 4): 上部含煤段 16.9 ~ 203.1 m, TOC 介于 0.089% ~ 10.9%, 平均值为 1.048%; 中部含油页岩段 203.1 ~ 371.3 m, TOC 介于 0.127% ~ 30.3%, 平均值为 3.601%; 下部含黄铁矿段 371.3 ~ 542.8 m, TOC 介于 0.009% ~ 24.8%, 平均值为 0.896%。根据有机碳含量, 桦甸组古湖泊生产力演化趋势为: 中部含油页岩段 > 上部含煤段 > 下部含黄铁矿段。

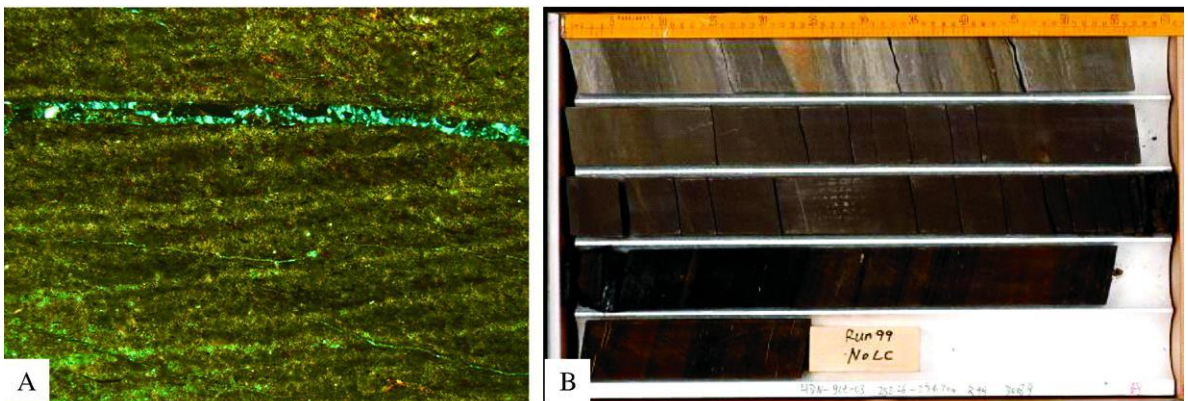


图 3 桦甸盆地油页岩结构与构造特征

A. 显微镜下桦甸富矿褐色油页岩韵律特征 (HDN-glt-003 井 255.7 m) 10×10 (—);
 B. 桦甸盆地黑色和棕色油页岩水平层理 (HDN-glt-003 井 252.26 ~ 254.70 m)

Fig 3 Structure and texture characteristics of oil shale in Huadian Basin

表 1 桦甸盆地桦甸组各段地球化学特征

Table 1 Geochemical characteristics of Huadian Formation in Huadian Basin

地层	上部含煤段	中部含油页岩段	下部黄铁矿段
深度 /m	16.9~203.1	203.1~371.3	371.3~542.8
TOC /%	0.089~10.9 (均值 1.048)	0.127~30.3 (均值 3.601)	0.009~24.8 (均值 0.896)
Ba /($\mu\text{g/g}$)	442.97~664.16 (均值 556.48)	336.05~859.35 (均值 557.60)	120.78~625.53 (均值 476.52)
Mn /($\mu\text{g/g}$)	73.14~497.84 (均值 241.56)	70.41~9494.24 (均值 969.54)	29.77~753.13 (均值 194.36)
Mo /($\mu\text{g/g}$)	0.37~2.57 (均值 1.18)	1.31~4.70 (均值 1.38)	0.58~5.69 (均值 1.26)

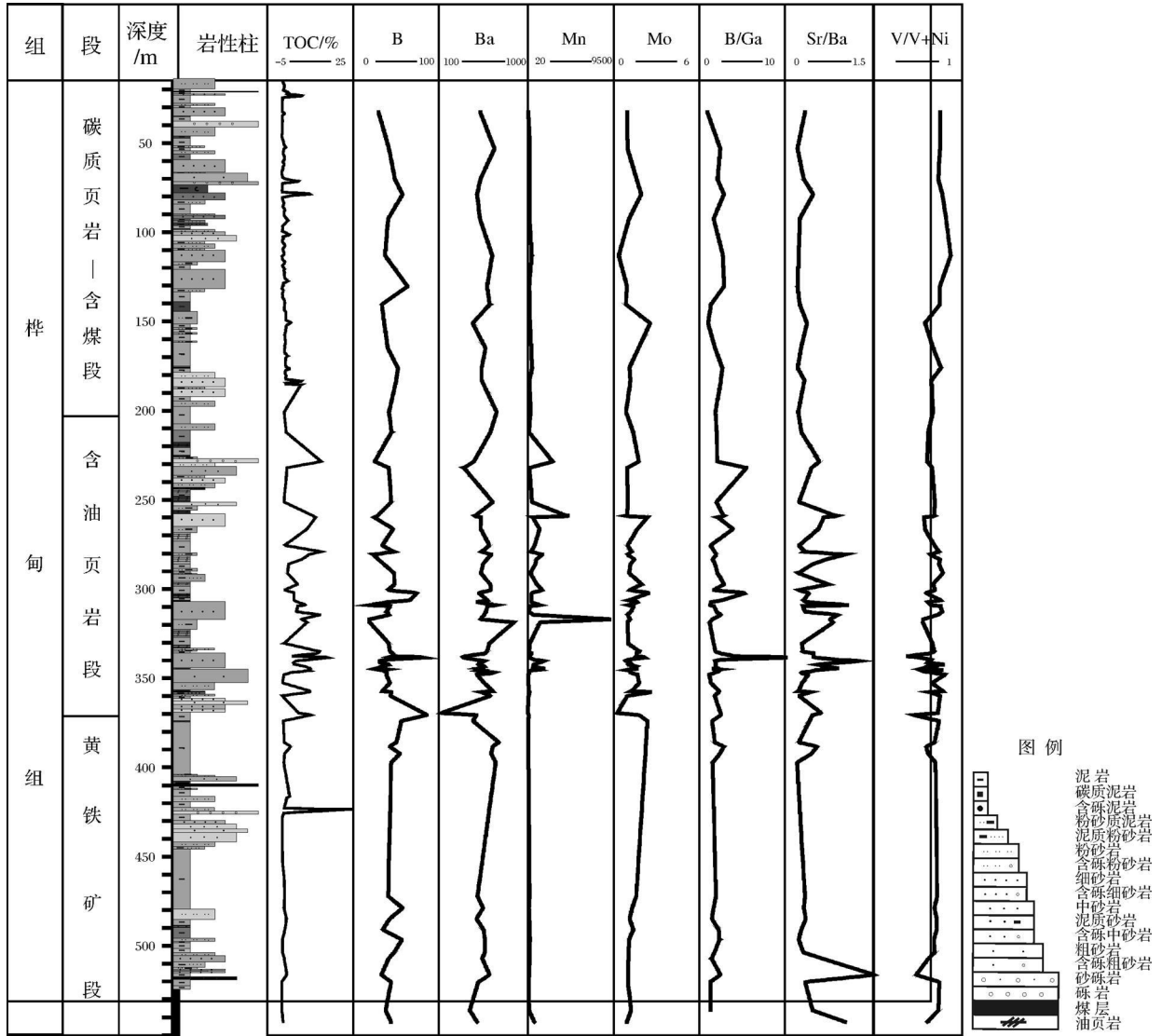


图 4 桦甸组油页岩和泥岩有机碳及微量元素垂向变化特征

Fig 4 Vertical variations on TOC and trace elements contents of oil shale and mudstone, Huadian Formation

Das 等最新的研究表明湖泊高的生产力伴随着浮游生物的碎片, 导致表层和较深沉积物中微量元素的富集。在湖泊底部水体极度还原的硫化条件下, Mo 元素易与硫离子结合进入沉积物^[49], 并且其通量与有机碳的堆积速度近似成正比, 因此 Mo 在缺氧的

硫化条件下可以作为生产力的指标^[39, 40]。Grapian 等研究指出, 低含量 Mn 主要来源于高的沉积速率的外源河流注入, 因此沉积物中的 Mn 含量变化既可以反映沉积速率的大小, 也可以标定湖泊内水生生物繁盛或衰退。水体和沉积物中高含量的 Ba 代表了高

生物生产率^[37,50]。

如表1图4所示, Ba元素含量在上部含煤段为442.97~664.16 $\mu\text{g/g}$ 平均值为556.48 $\mu\text{g/g}$ 中部含油页岩段为336.05~859.35 $\mu\text{g/g}$ 平均值为557.60 $\mu\text{g/g}$ 下部含黄铁矿段为120.78~625.53 $\mu\text{g/g}$ 平均值为476.52 $\mu\text{g/g}$ Mn元素含量在上部含煤段为73.14~497.84 $\mu\text{g/g}$ 平均值为241.56 $\mu\text{g/g}$ 中部含油页岩段为70.41~949.24 $\mu\text{g/g}$ 平均值为969.54 $\mu\text{g/g}$ 下部含黄铁矿段为29.77~753.13 $\mu\text{g/g}$ 平均值为194.36 $\mu\text{g/g}$ Mo元素含量在上部含煤段为0.37~2.57 $\mu\text{g/g}$ 平均值为1.18 $\mu\text{g/g}$ 中部含油页岩段为1.31~4.70 $\mu\text{g/g}$ 平均值为1.38 $\mu\text{g/g}$ 下部含黄铁矿段为0.58~5.69 $\mu\text{g/g}$ 平均值为1.26 $\mu\text{g/g}$ (表1)。

从图4中可以看出, 随着地层时代的更新, 各元素含量从下部 \rightarrow 中部 \rightarrow 上部具有由低 \rightarrow 高 \rightarrow 低的总体变化趋势。其中Ba和Mn元素含量表现为中部含油页岩段 $>$ 上部含煤段 $>$ 下部含黄铁矿段, Mo元素含量表现为中部含油页岩段 $>$ 下部含黄铁矿段 $>$ 上部含煤段。但是, 由于所使用的Mg, Ba等指标主要是基于海洋沉积物的研究而得出的, 在应用到湖相沉积时, 应结合湖泊沉积演化和有机质来源等综合考虑。

因此, 综合湖泊沉积演化、有机碳含量及微量元素Ba, Mn, Mo的相对丰度变化规律, 桦甸组古湖泊生产力的演化趋势也为: 中部含油页岩段 $>$ 上部含煤段 $>$ 下部含黄铁矿段, 这也进一步表明了高湖泊生产力是湖相油页岩形成的一个重要条件。

2.4 湖水含氧量与水体分层

湖盆底部水体的含氧量与水体分层之间关系密切, 底部水体的缺氧环境往往是分层湖的标志之一, 封闭缺氧环境是有机质保存与转化的关键因素。以桦甸组含油页岩段沉积时期为例, 从微量元素地球化学指标分析, 桦甸油页岩的 $V/(V+Ni)$ 比值为0.45~0.81, 平均为0.63, δC_{org} 值为0.86~1.02, 平均值为0.96, 具有弱的负Ce异常, 均反映当时沉积环境为还原的缺氧沉积环境。此外, 从岩心观察描述中, 桦甸油页岩颜色较深, 多为黑褐色及灰黑色, 水平层理发育, 表明当时湖泊水体较深, 不存在生物扰动, 同时也不利于底栖生物的生存, 目前还未观察到底栖生物和遗迹化石, 表现为典型的半深湖相缺氧环境。

从Sr/Ba和B/Ga等元素比值分析, 桦甸组含油页岩段Sr/Ba和B/Ga比值分布范围较广, 曲线上下

波动较大(图4), Sr/Ba最小值为0.22, 最大值为1.29, 平均值为0.53, B/Ga比值介于1.09~11.07, 平均比值为2.41, 表现出一种淡水与半咸水 \rightarrow 咸水交替变化的沉积演变过程。这种水体盐度由淡水 \rightarrow 半咸水 \rightarrow 淡水 \rightarrow 半咸水的交替变换, 可以形成一定程度的水体盐度分层, 使底层水处于缺氧环境, 有利于油页岩中有机质的保存。

3 讨论

本文主要应用古湖泊学方法对东北地区桦甸断陷含油页岩湖盆开展了一些研究, 取得了以下主要认识:

(1) 桦甸盆地为陆相小型半地堑盆地, 盆地南缘 F_1 控盆断裂控制了古近系湖盆的沉积演化; (2) 湖相油页岩是高富含有机质的细粒沉积物, 是开展古湖泊学研究的良好介质。桦甸油页岩具明显的黑白相间的双层结构特征, 有机质条带和陆源碎屑颗粒呈现良好的韵律互层, 有机质呈现褐色或黑色条带, 夹杂石英、长石颗粒的粘土矿物呈白色条带; (3) 桦甸组泥岩和油页岩的TOC, Ba, Mg, Mn等元素含量垂向变化特征表明, 桦甸组古湖泊生产力演化趋势为: 中部含油页岩段 $>$ 上部含煤段 $>$ 下部含黄铁矿段, 反映了中部含油页岩段时期, 湖盆为富营养湖, 古湖泊生产力最高; (4) 根据桦甸油页岩岩石学特征、 $V/(V+Ni)$ 、Sr/Ba和B/Ga等元素比值分析, 桦甸组中部含油页岩段时期, 表现出一种淡水与半咸水 \rightarrow 咸水交替变化的沉积演变过程, 可以形成一定程度的盐度分层, 使底层水处于缺氧环境, 有利于有机质的保存。

随着古湖泊学研究的不断深入, 尤其是古湖泊地质学的逐渐发展, 它已经在油气资源勘探与开发及全球环境与气候变化等领域发挥了重要的作用。但从笔者近年来对断陷湖盆的研究中发现, 在应用到陆相断陷含油页岩和含油气盆地时, 古湖泊学研究仍存在若干不足及需要解决的问题, 如: 应进一步加强湖泊沉积中沉积韵律和环境指标研究, 推动高分辨率的全球气候旋回变化研究; 应充分利用油页岩、煤、蒸发岩等特殊湖泊沉积物研究。此外, 对于陆相断陷湖盆, 尤其是新生代湖盆的精确定年是目前还未能解决的问题, 尽管古地磁方法是长时间尺度湖泊沉积岩心的定年的有效方法, 但该方法要求的精度与应用难度较大, 这对于恢复湖盆的构造演化史、湖相泥岩(油页岩)沉积速率及定量古湖泊生产力计算带来了一定困难。对于湖泊水体分层研究, 除了指示底部水体缺

氧的系列指标外,是否存在直接指示标志及定量判断方法? 在一些缺乏自生碳酸盐矿物和介形虫的淡水断陷湖盆中,古水温和古水深的定量估算是否存在更有效的方法? 等等,这些问题都需要今后古湖泊地质工作者不断探索与研究。

参考文献 (References)

- Lindeman R L. The trophic-dynamic aspect of ecology [J]. *Ecology* 1942, 23: 399-418
- Deevey E S Jr. The obliteration of the hypolimnion [J]. *Mem. Ist Ital. Idrobiol.*, 1955, 8(Suppl): 9-38
- Walker JC, Camoilla R. Sequence stratigraphic and stable isotopic expressions of over-filled and balanced-filled transition swith in the Tipton Member of the Green River Formation, WY [C] // 28th Oil Shale Symposium, 2008: 39
- Frey D G. what is paleolimnology? [J]. *Journal of Paleolimnology*, 1988, 1: 5-8
- Hakanson L, Jansson M. 湖泊沉积学原理 [J]. 北京: 科学出版社, 1992: 1-27 [Hakanson L, Jansson M. Principles of Lake Sedimentology [J]. Beijing: Science Press, 1992: 1-27]
- 汪品先, 陈嘉树, 刘传联, 等. 古湖泊学译文集 [M]. 北京: 海洋出版社, 1991: 1-134 [Wang Pinxian, Chen Jiashu, Liu Chuanlian, et al. Translation Collection on Paleolimnology [M]. Beijing: Oceanic Press, 1991: 1-134]
- 汪品先, 刘传联. 含油盆地古湖泊学研究方法 [M]. 北京: 海洋出版社, 1993: 1-15 [Wang Pinxian, Liu Chuanlian. Paleolimnological Research Methods on Oil-bearing Basins [M]. Beijing: Oceanic Press, 1993: 1-15]
- Hutchinson G E. A Treatise on Limnology. I. Geography, physics and chemistry [M]. New York: John Wiley & Sons, 1957
- Surdan R C, Wolfbauer. Depositional environment of the Green river Formation of Wyoming: A preliminary report [J]. *Geological Society of American Bulletin*, 1973, 84: 1115-1120
- Desborough G A. A biogenic-chemical stratified lake model for the origin of oil shale of the Green river Formation: An alternative to the playa-lake model [J]. *Geological Society of American Bulletin*, 1978, 89: 961-971
- Smith M A. Lacustrine oil shale in the geological record [C] // Katz B J, ed. Lacustrine Basin Exploration. AAPG Memoir 50, 1990: 4-60
- Katz B J. Controls on distribution of lacustrine source rocks through time and space [C] // Katz B J, ed. Lacustrine Basin Exploration. AAPG Memoir 50, 1990: 61-76
- Katz B J. Factors controlling the development of the lacustrine petroleum source rocks—an update [C] // Huo A Y, ed. Paleogeography, paleoclimate and source rocks. The American Association of Petroleum Geologists, Tulsa, Oklahoma, USA, 1995: 61-79
- 周书欣, 赖特 V P, 普拉特 N H, 等. 湖泊沉积体系与油气 [M]. 北京: 科学出版社, 1991: 1-219 [Zhou Shuxin, Wright V P, Pratt N H, et al. Lake Depositional System and Oil and Gas [M]. Beijing: Science Press, 1991: 1-219]
- 孙镇城, 杨藩, 张枝焕, 等. 中国新生代咸化湖泊沉积环境与油气生成 [M]. 北京: 石油工业出版社, 1997: 1-307 [Sun Zhencheng, Yang Fan, Zhang Zhichuan, et al. Depositional Environment and Generation of Oil and Gas of Cenozoic Salinity Lakes [M]. Beijing: Petroleum Industry Press, 1997: 1-307]
- 朱伟林, 黎明碧. 珠江口盆地珠三坳陷古湖泊与油气 [J]. *中国海上油气*, 1997, 11(1): 13-18 [Zhu Weilin, Li Mingbi. Palaeolimnology and hydrocarbon potential in Zhu III depression, Pearl River Mouth Basin [J]. *China Offshore Oil & Gas*, 1997, 11(1): 13-18]
- 濮培民, 屠清瑛, 王苏民. 中国湖泊科学研究进展 [J]. *湖泊科学*, 1989, 1(1): 1-11 [Pu Peimin, Tu Qingying, Wang Sumin. Research progress of Limnology in China [J]. *Scientia Limnologica Sinica*, 1989, 1(1): 1-11]
- 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 [Zhang Pengxi, Zhang Baozhen, Yang Wenbo. On the model of post-glacial paleoclimatic fluctuation in Qinghai Lake Region [J]. *Quaternary Sciences*, 1989, 1: 66-77]
- 孙顺才, 王苏民, 郑长苏. 中国湖泊地貌与湖泊沉积学研究概况 [J]. *湖泊科学*, 1989, 1(1): 12-20 [Sun Shuncai, Wang Sumin, Zheng Changsu. The geomorphology and sedimentology of lake in China [J]. *Scientia Limnologica Sinica*, 1989, 1(1): 12-20]
- 王苏民, 张振克. 中国湖泊沉积与环境演变研究的新进展 [J]. *科学通报*, 1999, 44(6): 579-587 [Wang Sumin, Zhang Zhenke. New progress on depositional environment and environment evolution of lakes in China [J]. *Chinese Science Bulletin*, 1999, 44(6): 579-587]
- Yu L Z, Oldfield F, Wu F, et al. Paleoenvironmental implications of magnetic measurements on sediment core from Kumling Basin, Southwest China [J]. *Journal of Paleolimnology*, 1990, 3: 95-111
- 邓宏文, 钱凯. 深湖相泥岩的成因类型和组合演化 [J]. *沉积学报*, 1990, 8(3): 1-20 [Deng Hongwen, Qian Kai. The genetic types and association evolution of deep lacustrine facies mudstones [J]. *Acta Sedimentologica Sinica*, 1990, 8(3): 1-20]
- 王慧中, 梅洪明. 东营凹陷沙三下亚段油页岩中古湖泊学信息 [J]. *同济大学学报*, 1998, 26(3): 315-319 [Wang Huizhong, Mei Hongming. Paleolimnological Information from the Oil Shale in the Lower Part of Sha 3 Formation in Dongying Depression [J]. *Journal of Tongji University*, 1998, 26(3): 315-319]
- 尹秀珍. 松辽盆地中部晚白垩世早期古湖泊生产力研究 [D]. 北京: 中国地质大学 (北京), 2008 [Yin Xiuzhen. Palaeolacustrine Productivity Study of Early Late Cretaceous in the Central Area of Songliao Basin [D]. Beijing: China University of Geoscience, 2008]
- 尹秀珍, 万晓樵, 司家亮. 松辽盆地 G-12 井晚白垩世青山口组沉积时期古湖泊学替代指标分析 [J]. *地质学报*, 2008, 82(5): 676-682 [Yin Xiuzhen, Wan Xiaojiao, Si Jialiang. Paleolimnological proxies of Late Cretaceous Qingshankou sedimentary period from Well G12 in Songliao Basin, NE China [J]. *Acta Geologica Sinica*, 2008, 82(5): 676-682]
- 黄清华, 陈春瑞, 王平在, 等. 松辽盆地晚白垩世生物演化与古湖泊缺氧事件 [J]. *微体古生物学报*, 1998, 15(4): 417-425

- [Huang Qinghua, Chen Chunhui, Wang Pingzai, *et al.* The late Cretaceous bioturbation and anoxic events in the ancient lake in the Songliao Basin [J]. *Acta Micropaleontologica Sinica* 1998, 15(4): 417-425]
- 27 侯读杰, 冯子辉, 黄清华. 松辽盆地白垩纪缺氧地质事件的地质地球化学特征 [J]. *现代地质*, 2003, 17(3): 311-317 [Hou Dujie, Feng Zihui, Huang Qinghua. Geological and geochemical evidences of anoxic event in the Songliao Basin, China [J]. *Geoscience* 2003, 17(3): 311-317]
- 28 De Deckker P, Colin J P, Peypouquet J P, *et al.* Ostracoda in the earth sciences [J]. *Elsevier Amsterdam*, 1988 175-195
- 29 蓝先洪. 地球化学记录在古温度定量恢复研究中的应用 [J]. *海洋地质动态*, 2003, 19(2): 9-13 [Lan Xianhong. Applications of geochemical records in quantitatively constructing paleotemperature [J]. *Marine Geology Letters* 2003, 19(2): 9-13]
- 30 刘宝珺, 曾允孚. 岩相古地理基础和工作方法 [M]. 北京: 地质出版社, 1985 85-96 [Liu Baojun, Zeng Yunfu. Principles and Work Methods for Rock Facies Paleogeography [M]. Beijing: Geological Publishing House, 1985 85-96]
- 31 张世奇, 任延广. 松辽盆地中生代沉积基准面变化研究 [J]. *长安大学学报: 地球科学版*, 2003, 25(2): 1-5 [Zhang Shiqi, Ren Yanguang. The study of base level changes of the Songliao Basin in Mesozoic [J]. *Journal of Chang'an University: Earth Science Edition* 2003, 25(2): 1-5]
- 32 纪友亮, 张世奇. 陆相断陷湖盆层序地层学 [M]. 北京: 石油工业出版社, 1996 [Ji Youliang, Zhang Shiqi. Sequences Stratigraphy for Terrestrial Fault Depression Lake Basins [M]. Beijing: Petroleum Industry Press, 1996]
- 33 郭麒麟, 倪丙荣. 利用化石群分异度探讨古水深 [J]. *石油大学学报: 自然科学版*, 1990, 14(2): 1-7 [Guo Qilin, Ni Bingrong. Determination of paleodepth with diversity of fossil community [J]. *Journal of the University of Petroleum, China* 1990, 14(2): 1-7]
- 34 董军社, 陈平富, 万晓樵. 南海北部崖19-1井晚第三纪有孔虫动物群演替与古水深变化 [J]. *现代地质*, 2000, 14(3): 291-294 [Dong Junshe, Chen Pingfu, Wan Xiaojiao. Evolution of late Tertiary foraminifera and paleowater depth of Core Y19-1 from the northern part of South China Sea [J]. *Geoscience* 2000, 14(3): 291-294]
- 35 邹欣庆, 葛晨东. 海岸水体中卵石在古水深定量研究中的运用——以黄海辐射沙洲海区为例 [J]. *现代地质*, 2000, 14(5): 263-266 [Zou Xinqing, Ge Chendong. Coccolith method for the quantitative study of former water depth: submarine sand ridges of the Yellow Sea as an example [J]. *Geoscience* 2000, 14(5): 263-266]
- 36 邓宏文, 钱凯. 沉积地球化学与环境分析 [M]. 甘肃兰州: 科学技术出版社, 1993 1-154 [Deng Hongwen and Qian Kai. Analysis on Sedimentary Geochemistry and Environment [M]. Lanzhou: Gansu Science Technology Press, 1993 1-154]
- 37 Dymond J, Suess E, Lyle M. Barium in deep sea sediments: a geochemical proxy for paleoproductivity [J]. *Paleoceanography*, 1992, 7: 163-181
- 38 Ganeshram R S, Pedersen T F, Calvert S E, *et al.* Large changes in oceanic nutrient inventories from glacial to interglacial periods [J]. *Nature*, 1995, 376: 755-758
- 39 Wille P, Quinby-Hunt M S, Erdmann B D. The whole-rock cerium anomaly: a potential indicator of eustatic sea-level changes in shales of anoxic facies [J]. *Sedimentary Geology*, 1996, 101: 43-53
- 40 Lyons T W, Wenne J P, Hollander D J, *et al.* Contrasting sulfur geochemistry and Fe/Al and Mo/Al ratios across the last oxic-anoxic transition in the Cariaco Basin, Venezuela [J]. *Chemical Geology*, 2003, 195: 131-157
- 41 李守军, 郑德顺, 耿福兰. 定量再造古湖泊生产力的尝试 [J]. *高校地质学报*, 2002, 8(2): 215-219 [Li Shoujun, Zheng Deshun, Geng Fulan. An attempt on quantitative calculation of lake palaeoproductivity [J]. *Geological Journal of China Universities* 2002, 8(2): 215-219]
- 42 李守军, 王纪存, 郑德顺, 等. 东营凹陷沙河街组一段沉积时期的湖泊生产力 [J]. *石油与天然气地质*, 2004, 25(6): 656-658 [Li Shoujun, Wang Jicun, Zheng Shunde, *et al.* Study on palaeoproductivity of the lake during the deposition of the 1st member of Shahejie Formation in Dongying Sag [J]. *Oil & Gas Geology* 2004, 25(6): 656-658]
- 43 刘传联, 徐金鲤. 生油古湖泊生产力的估算方法及应用实例 [J]. *沉积学报*, 2002, 20(1): 144-150 [Liu Chuanlian, Xu Jinli. Estimation method on productivity of oil-producing lake and a case study [J]. *Acta Sedimentologica Sinica* 2002, 20(1): 144-150]
- 44 刘惠民, 李守军, 郑德顺, 等. 东营凹陷沙三段沉积期湖泊生产力研究 [J]. *石油勘探与开发*, 2003, 30(3): 65-67 [Liu Huimin, Li Shoujun, Zheng Deshun, *et al.* Lacustrine palaeoproductivity in the Third Member of the Shahejie Formation in Dongying Sag [J]. *Petroleum Exploration and Development* 2003, 30(3): 65-67]
- 45 刘招君, 董清水, 王嗣敏, 等. 陆相层序地层学导论与应用 [M]. 北京: 石油工业出版社, 2002 1-91 [Liu Zhaojun, Dong Qingshui, Wang Sinin, *et al.* Introduction to Continental Sequence Stratigraphy and Application [M]. Beijing: Petroleum Industry Press, 2002: 1-91]
- 46 王成善, 李祥辉. 沉积盆地分析原理与方法 [M]. 北京: 高等教育出版社, 2003 59-246 [Wang Chengshan, Li Xianghui. Sedimentary Basin From Principles to Analyses [M]. Beijing: Higher Education Press, 2003: 59-246]
- 47 李思田, 解习农, 王华, 等. 沉积盆地分析基础与应用 [M]. 北京: 高等教育出版社, 2004 1-227 [Li Sitian, Xie Xinong, Wang Hua, *et al.* Sedimentary Basin Analysis: Principle and Application [M]. Beijing: Higher Education Press, 2004: 1-227]
- 48 Wignall P B. Black Shales [M]. Oxford: Clarendon Press, 1994
- 49 Crusius J, Calvert S, Pedersen T, *et al.* Rhenium and molybdenum enrichments in sediments as indications of oxic, suboxic and sulfidic conditions of deposition [J]. *Earth and Planetary Science Letters* 1996, 145: 65-78
- 50 Ganeshram R S, Pedersen T F, Calvert S E, *et al.* Large changes in oceanic nutrient inventories from glacial to interglacial periods [J]. *Nature*, 1995, 376: 755-758

Paleolimnology Study: Taking Huadian Fault Basin as an example

LIU Zhao-jun MENG Qing-tao LIU Rong HU Fei ZHOU Ren-jie

(College of Earth Sciences, Jilin University, Changchun 130061)

Abstract Paleolimnology is a science to study the historical evolution of lake systems, which belongs to highly comprehensive geosciences. This paper presents a review on the definitions, research status and commonly-used research methods in paleolimnology, and takes the Paleogene oil shale bearing lake in Huadian basin, Jilin Province, as a case study. Huadian Basin is a small-scale half-graben basin, and F₁ fault in the southern margin of the basin controls the Paleogene lake evolution. Huadian Basin that is rich in oil shale resources has unique advantages for paleolimnological studies. Huadian oil shale shows characteristics of double-layered structure, which consists of alternatively white and black thin layers. The organic and terrestrial mineral detritus layers rhythmically alternate each other—the organic layers show black or brown, while the other ones of quartz, feldspar and clay minerals show white. According to the vertical variations of TOC content, we interpret that the paleoproductivity of Huadian Basin varies as Middle Member (oil-bearing) > Upper Member (coal-bearing) > Lower Member (pyrite-bearing). Such a variation indicates that paleoproductivity was the highest when the oil shale was forming. From the petrography and mineral features of oil shale, the ratios of V/(V+N), Sr/Ba and B/Ga, we conclude that the paleo-water characterizes as alternatively variation of fresh to brackish-saline water, which was a preferred environment for the lake stratified. The organism was well preserved because of the stratifying-caused anoxic in the bottom water. With the development of paleolimnology, it is acting as an important role in the fields of hydrocarbon exploration and the studies for global environment and climate changes. However, challenges in theories and methods show up in front of paleolimnologists which are waiting for continuous endeavor and exploration.

Key words fault basin, paleolimnology, Huadian Basin, oil shale