

潘文静,刘士磊,田德瑞,等. 渤海海域新近纪湖盆萎缩期古水深恢复——以渤东低凸起南端为例[J]. 海洋地质前沿, 2019,35(4):18-25.

渤海海域新近纪湖盆萎缩期古水深恢复 ——以渤东低凸起南端为例

潘文静¹,刘士磊¹,田德瑞¹,郭龙龙¹,王晓玲¹,王立红²

(1 中海石油(中国)有限公司天津分公司,天津 300459;2 中海油能源发展股份有限公司,天津 300459)

摘 要:探井揭示渤海海域东南部地区新近系发育高频河湖交互相沉积体系,砂体预测难度大,其中古湖盆水体深度是影响该区砂体展布的重要因素之一。通过元素地球化学、地层频谱属性趋势分析技术、古生物等多种技术方法对新近纪古湖盆水体特征进行恢复,结合古生物的古水深指示意义完成了新近纪湖泊萎缩期古湖盆水体深度的定量研究。研究表明:蓬莱 7 地区新近系发育缓坡沉积的淡水湖泊湖平面波动频繁,馆陶组沉积早期古水深较浅约 3 m 左右,馆陶组中后期古水深开始增加,并且呈现出从南向北逐渐加深的趋势。明化镇组下段中上部沉积时期古水深达最大,但明化镇组下段沉积时期水体深度主要在 4~6 m 范围内波动。

关键词:渤海海域;新近纪;古生物;古湖盆;古水深

中图分类号:P736.22⁺1

文献标识码:A

DOI:10.16028/j.1009-2722.2019.04003

0 引言

近年研究显示渤海海域东南部新近系广泛发育古湖泊及浅水三角洲沉积^[1-5],古湖盆具有规模小、水体浅、变化快的特征^[6],砂体展布预测难度大。因此开展新近系古湖盆水体深度研究对渤海海域东南部新近系储层预测具有重要意义。

含油气断陷湖盆古水深研究是古湖泊演化、沉积环境及沉积学研究的重要内容^[7-8],对烃源岩、储层、盖层条件的评价及预测均具有重要意义。古水深恢复的常用方法有古生物、地球化学、岩石物理、地震学及数学模拟等。古生物用于古水深研究的主要依据是生物与环境的协同演化作

用,通过借助具有水深指示意义的生物类型来确定对应地层的古水深范围。例如李守军等^[9]、苏新等^[10]分别应用介形虫、沟鞭藻以及疑源类化石对东营凹陷沙河街组三段及沙河街组四段沉积时期的古水深进行恢复,并且初步建立了化石群与古水深的关系。地球化学用于古水深研究最常用的方法是根据各种元素的离岸分布规律以及迁移能力的差异来展开定性判别,如 Fe 的高含量指示离岸近的浅水环境,Mn 的高含量指示离岸远的相对深水环境^[11]。魏亚琼等^[12]研究发现青海湖布哈河口区湖岸线之下的表层沉积物样品中 TOC 含量与水深之间存在良好的相关性($R=0.92$)。并拟合了有机碳 TOC 含量与湖泊古水深之间的换算公式。此外,某些能指示古水深的沉积结构构造、泥岩颜色、自生矿物等岩石物理的方法也被广泛应用于古水深恢复研究中^[13]。而在沉积学领域地震三角洲前积层反演古水深被广泛应用,这种方法主要通过在地震剖面上识别出

收稿日期:2018-10-16

基金项目:国家科技重大专项(2016ZX05024-003)

作者简介:潘文静(1988—),女,硕士,工程师,主要从事古生物及石油地质学方面的研究工作。E-mail:panwj@cnooc.com.cn

较好的三角洲前缘反射沉积,通过反射轴的双曲面高度来推测古水深^[7]。但是这种方法需要考虑地层的压实作用引起的误差,这种误差导致实测的双曲面高度比真实古水深普遍偏小。

前人从古生物、沉积特征等角度对渤海海域东南部新近系古湖盆水体深度做过定性的探讨,明确该区新近系古湖泊为浅水湖盆^[2,14],但没有开展定量研究。笔者结合渤海海域东南部蓬莱 7 构造大量探井证实钻遇新近系古湖泊地层的有利研究条件,通过古生物、元素地球化学、地层的频谱属性趋势分析技术等资料对古湖盆的古水深变化进行定性恢复,在此基础上结合水生植物的分带性分布特征,对古水深开展定量研究。这项工作对渤海海域新近系隐蔽油气藏勘探研究具有现实意义。

1 地质概况

渤海海域东部由“三凹两凸”构成,包括渤中凹陷、渤东凹陷、庙西凹陷、渤东低凸起、庙西北凸(图 1)。蓬莱 7 构造位于渤东低凸起南段,紧邻渤东凹陷和渤中凹陷,成藏条件优越。

研究区新近系钻遇馆陶组与明化镇组。馆陶组为厚层粗砂岩或含砾砂岩夹薄层泥岩,纵向表现出三角洲相与河流相交互沉积的特征。明化镇组划分为明化镇组上段(以下简称“明上段”),明化镇组下段(以下简称“明下段”)两部分。其中明上段主要以粗砂岩与泥岩互层沉积为主,明下段岩性显著变细,呈现出厚层泥岩夹不等厚砂岩的岩性组合特征,浅水三角洲十分发育。

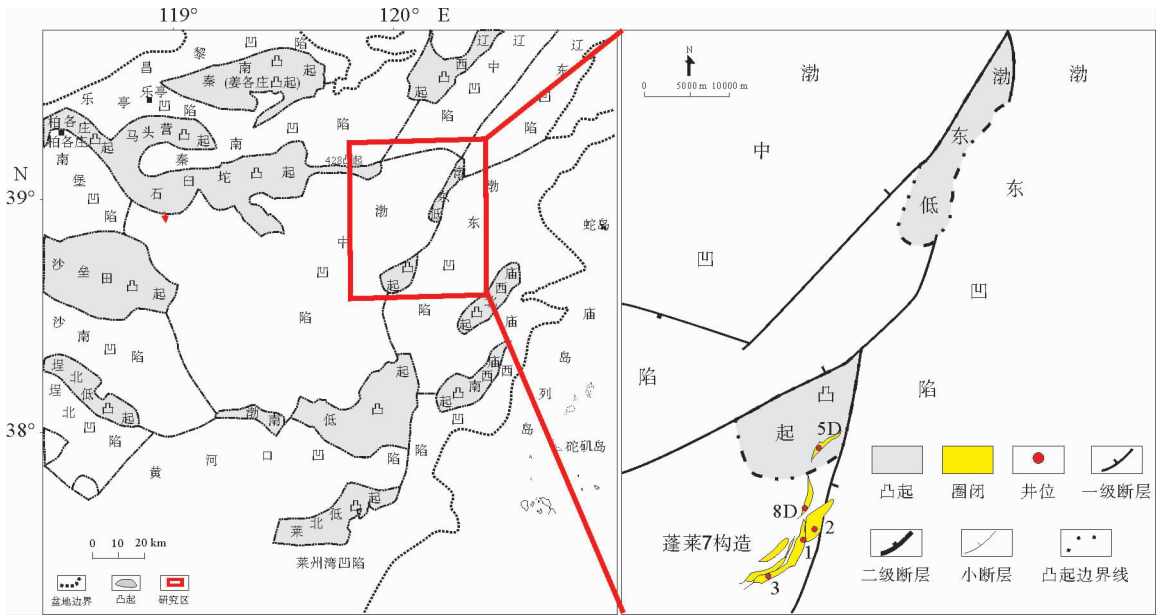


图 1 研究区构造位置

Fig.1 Structural location of the interested area

2 古水深

古水深恢复包括相对古水深定性分析和定量判别。其中,定性分析通过元素地球化学、地层频谱属性趋势分析和微体古生物等方法来展开,古水深的定量恢复通过部分具有古水深指示意义的水生植物的孢粉分布特征分析来实现。

2.1 元素地球化学特征

洞庭湖的东湖地势平缓,水体较浅,平均水深为 6.39 m,并且在洞庭湖的东部河流入湖处发育有浅水三角洲,其特征形态与渤海海域东南部新近纪浅水三角洲具有极强的相似性,为类比研究打下扎实基础。通过对洞庭湖湖底质 33 个取样点元素测试分析显示 V、Al、Ni、Ga 与

实测水深相关性较好。现代介形虫与介形虫化石的形态及生态习性具有较强的继承性,广泛的应用于湖盆水深研究工作中。为了进一步验证地球化学元素在地质历史时期判别古水深的可行性,对洞庭湖的介形虫属种类型及丰度与古水深的关系开展沉积调查,发现洞庭湖中介形虫优势种为纯净小玻璃介 *Candoniella albicans* 和明亮丽星介 *Cypria luminosa*,并且介形虫丰度与湖盆水深具有较强相关性,在水深 0~5.1 m 处丰度较高。与此同时对渤海海域东南部典型探井开展元素地球化学和介形虫分析,发现了丰富的纯净小玻璃介 *Candoniella albicans* 化石,指示渤海海域东南部新近系古湖盆沉积特征与洞庭湖较为相似,并且通过地球化学元素对古水深进行判别具有可行性。

此外,大量研究证实 Rb 元素和 K 元素在水中的迁移和富集均与黏土密切相关,且 Rb 元素比 K 元素更易被黏土吸附而远移。Rb/K 比值常用来指示水深的变化,值越大,揭示水体加深^[15-17]。而离岸距离与古水深的关系又可以判别古湖盆是陡坡沉积还是缓坡沉积特征。

通过对渤海海域东部蓬莱 7 构造 1 井系统的元素地球化学分析,显示 V、Al、Ni、Ga 整体呈现出明下段值普遍高于馆陶组的特征,波动频率较高,反映古水体波动频繁。并且馆陶组沉积时期可以识别出 3 次明显的水进过程,明下段沉积时期水深逐渐增大,在 1 870~1 900 m 井段古水深达最大。Rb/K 比值与水深指标 V、Al、Ni、Ga 基本保持一致的变化趋势,反映缓坡沉积特征(图 2)。

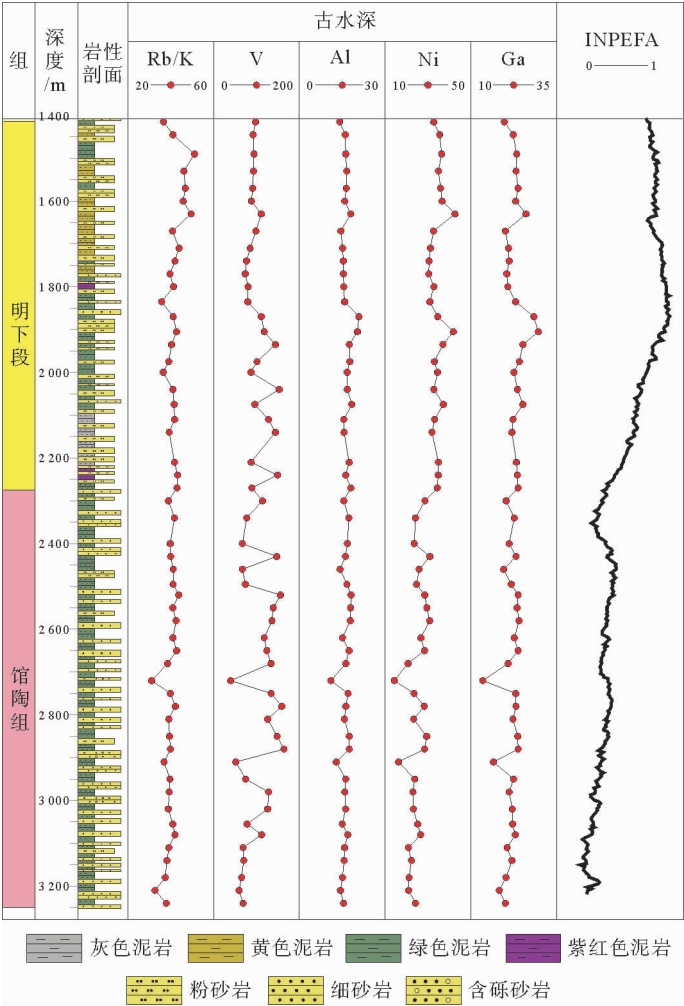


图 2 PL7-1 井元素地球化学柱状图

Fig. 2 Elemental geochemistry columnar of Well PL7-1

2.2 地层频谱属性趋势分析

地层频谱属性趋势分析技术(INPEFA)是一种对测井曲线 GR 积分处理得到的更有环境指示意义的曲线,在层序地层分析中应用得较多,一个负趋势代表水退的过程,一个正趋势代表一个水

进过程^[18]。对蓬莱 7 构造钻探的 3 口探井新近系测井曲线开展频谱属性趋势分析发现,从馆陶组到明化镇组古水深逐渐增大,到明下段的中上部达最大,然后再逐渐降低(图 3)。与元素指标指示的古水深变化具有相似性(图 2),并且更能反映区域古水深变化的宏观规律。

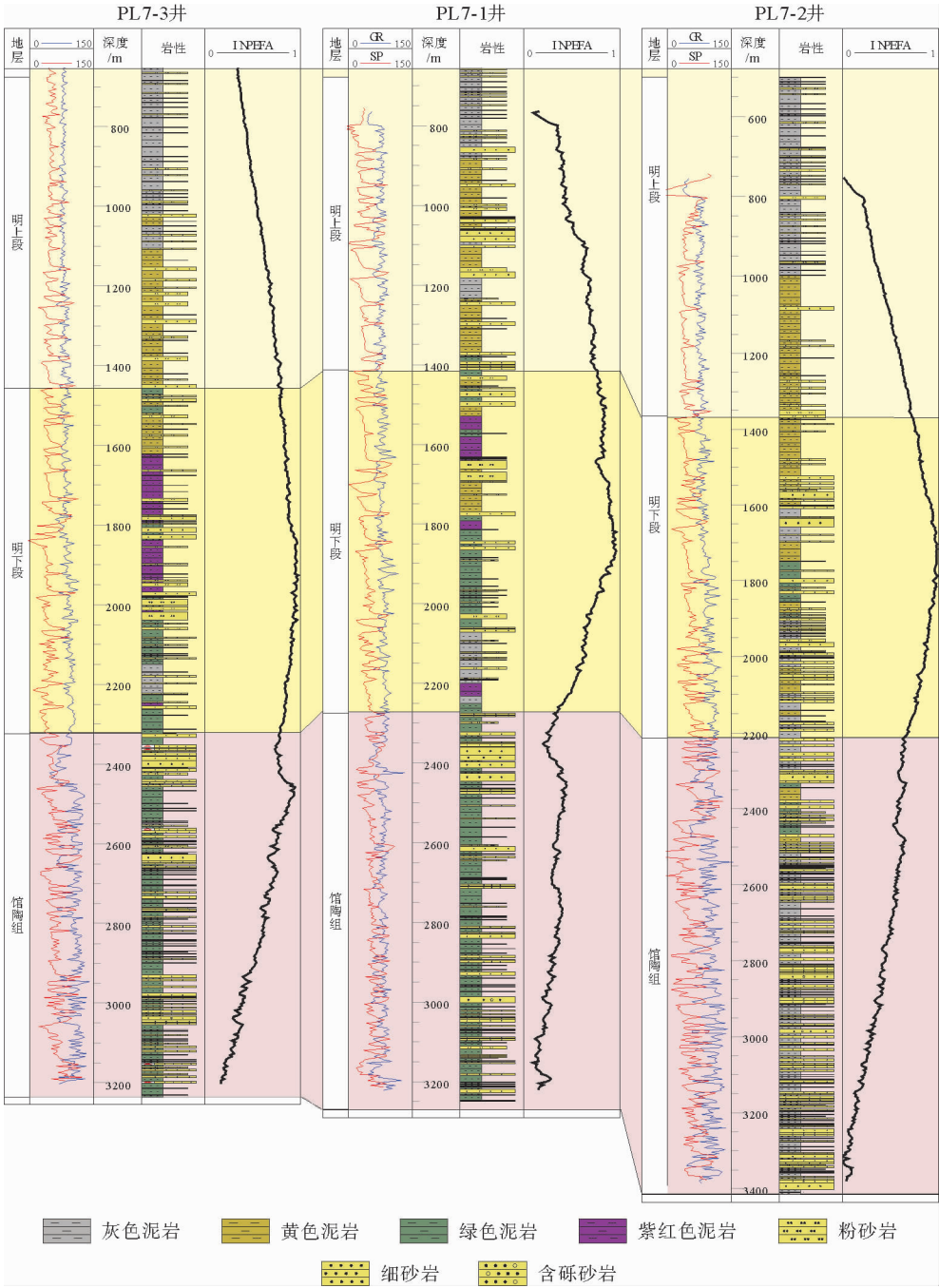


图 3 蓬莱 7 地区地层频谱属性趋势曲线特征
Fig. 3 INPEFA characteristics of Penglai 7 area

2.3 古生物特征

由于新近系古湖盆规模小,水深变化快,水体环境较为动荡,古生物属种丰度及分异度均明显低于古近系稳定湖相地层。蓬莱 7 地区新近纪球形疑源类光面球藻 *Leiosphaeridia*, 粒面球藻 *Granodiscus*, 穴面球藻 *Hungarodiscus* 等具有一定含量,反映三角洲相到湖相沉积特征。指示淡水环境的绿藻类盘星藻化石在部分探井连续稳定出现,反映蓬莱 7 地区新近纪发育淡水湖泊。结合渤海海域新近纪草本植物大量繁盛,并且部分水生草本植物具有按照古水深分带性分布的特征,选取这类具有古水深指示意义的植物孢粉作为古水深恢复的重要依据。

为了进一步确认古水深的值,运用将今论古的思想,对现代亚热带淡水湖盆鄱阳湖、洪湖、洪泽湖等的水生植物的水深分布特征进行统计,发

现挺水植物主要分布在岸边水深 1.5 m 左右的区域内,浮水植物分布在 1.5~3 m 的区域,沉水植物可以广泛分布在 3~5 m 的水深中,局部地区 7 m 以内水深均能见到沉水植物^[19,20]。渤海海域新近纪常见的水生植物属种类型主要包括黑三菱 *Sparganium stoloniferum*、毛茛属 *Ranunculus*、满江红 *Azolla*、菱 *Sporotrapoidites*、眼子菜 *Potamogeton*、盘星藻 *Pediastrum*、轮藻等,其对应的古水深关系见表 1。结合蓬莱 7 构造的 3 井区来看,馆陶组时期以 1.5~3 m 范围内广泛分布的浮水植物带为主,明下段井深约 1 600 m 处古水深达最大,沟鞭藻出现,指示水深 5~20 m^[21],最大古水深的上部地层及下部地层主要以 4~6 m 的植物带分布为特征,反映古水深主体可能主要集中在这个区域,再往上对应 3~7 m 的沉水植物,古水深整体变化趋势与频谱曲线保持一致(图 4)。

表 1 渤海海域新近纪常见水生植物与古水深指示关系

Table 1 The relationship between typical aquatic plant and paleo-water depth in Neogene of Bohai Sea						
植物类型	挺水植物带	浮水植物带	沉水植物带	无水底植物带	浮游植物带	轮藻植物带
水深/m	<1.5	1.5~3	多 3~5,局部到 7	>7	4~6	2.5
属种类型	<i>Sparganium stoloniferum</i> <i>Ranunculus</i>	<i>Azolla</i> <i>Sporotrapoidites</i>	<i>Potamogeton</i>		<i>Pediastrum</i>	轮藻

3 古水深结果和讨论

通过以上分析反映,元素地球化学、地层频谱属性趋势曲线以及古生物 3 种方法,均反映从馆陶组沉积初期开始蓬莱 7 构造古水深逐渐加深,馆陶组沉积末期有一次明显的古水深波动,在明下段沉积中晚期达到最大古水深。元素地球化学参数反映的古水深变化精度较高,较小的古水深幅度变化在纵向上也可以反映出波动,如图 2 可见馆陶组沉积时期古水深波动较为频繁,可以识别出三期明显的古水深波动现象,而在馆陶组沉积末期有一期明显的古水深大幅上涨的变化。明下段沉积时期古水深变化次数显著减少,在 1 870~1 902 m 之间古水深达最大,但是中间有明显的古水深变浅的区间。这一方法的主要弊端是受样品质量以及采样间隔影响较大。地层频谱属性

趋势曲线反映的 1 井区的最大古水深基本也在 1 630~1 900 m 的区间范围内,但是中间没有古水深变浅的趋势变化。造成这一差异的主要原因可能是地层频谱属性趋势曲线反映的古水深变化的尺度相对较大,对应地层层序的三级层序变化,所以区域性的大规模水深变化在曲线上才会有明显反映。古生物指标在反映的古水深变化趋势的同时,结合水生生物分布的分带性可以推测古水深的具体数值,完成古水深的定量预测,主要局限性体现在受样品密度影响大。而以上 3 种方法的综合运用能够有效的从各个尺度相互检验,控制研究精度。

研究表明,渤海海域东南部蓬莱 7 地区新近纪湖平面波动频繁,浅水三角洲广泛发育,明下段沉积时期古水深达最大,主体水深集中在 4~6 m 左右,而馆陶组沉积时期水体普遍较浅,主体在 3 m 左右。为了验证关于古水深的认识,对蓬莱 7

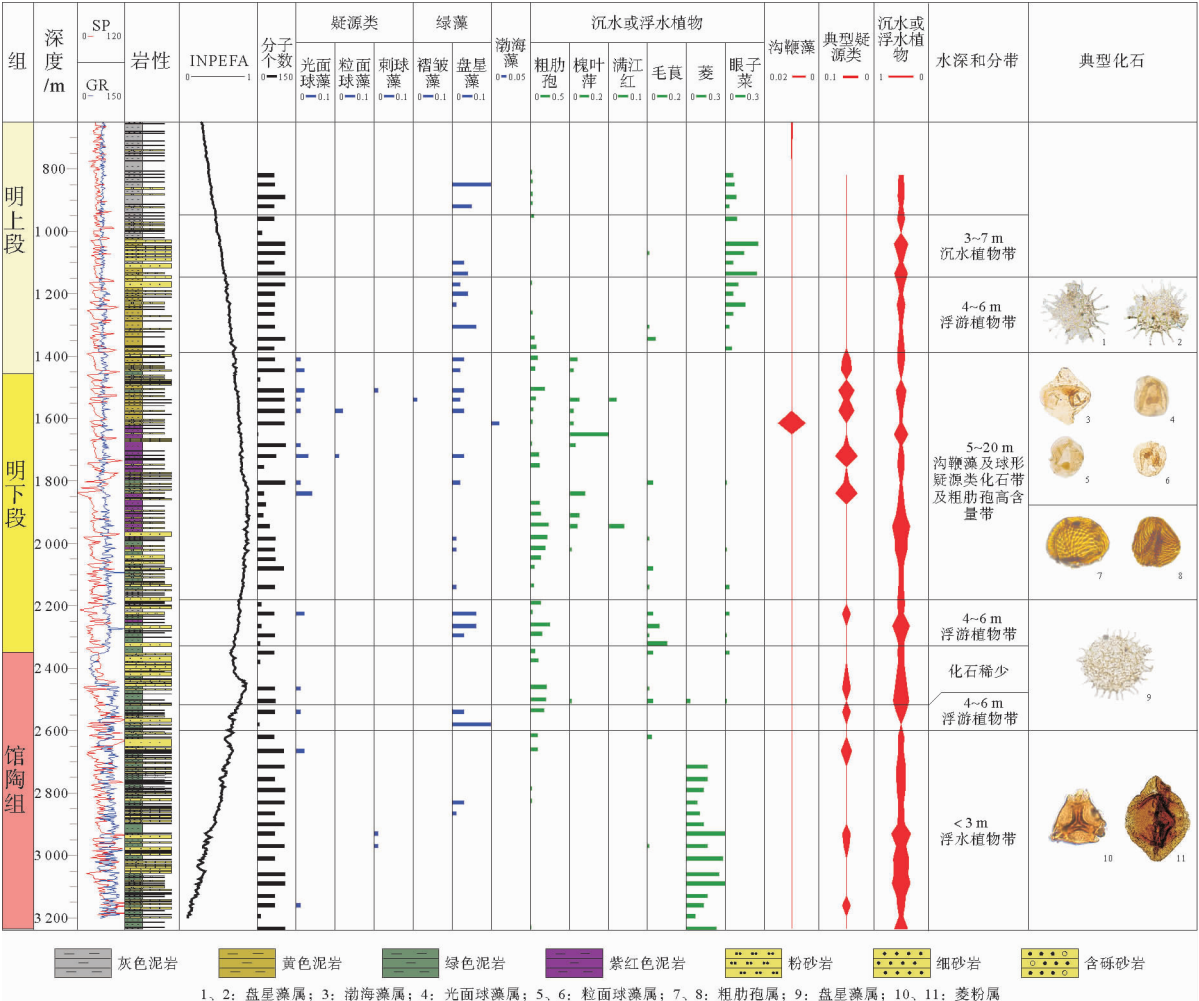


图 4 PL7-3 井古生物综合柱状图

Fig. 4 Integrated paleontological column of Well PL7-3

地区馆陶组以及明下段单层砂岩厚度进行统计发现,馆陶组单层砂岩厚度 3 m 以内的占到了统计的单层砂岩样本的 68.40%,而明下段单层砂岩厚度 6 m 以内的达到 80.33%(图 5),与前面关于古水深的认识相符合。说明利用水生植物分带性分布的特征来恢复新近系浅水湖泊的水体深度具可行性。

4 古湖盆演化

在古水深定量预测的基础之上,发现蓬莱 7 地区古汇水中心在平面上发生明显迁移。馆陶组沉积早中期该地区水生植物主要以<3 m 的浮水植物类型为主,并且南侧的 2、3、1 井区浮水植物含量较高。仅 1 井区在馆陶组早期就连续稳定出

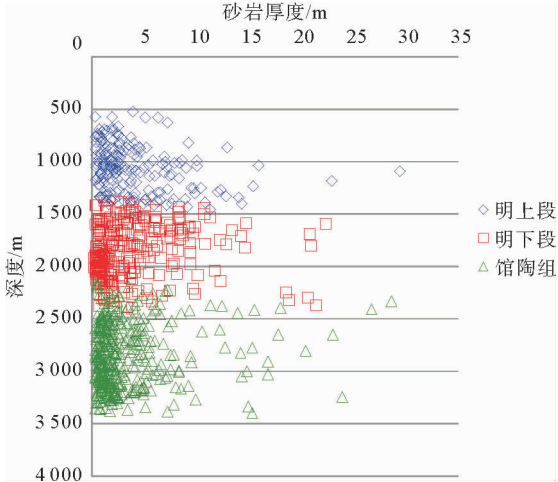


图 5 蓬莱 7 构造新近纪单层砂体厚度统计

Fig. 5 Thickness of single layer sand body of Penglai 7

现指示 4~6 m 的浮游生物类,其他井区浮游生物类主要在馆陶组中晚期以后才开始出现,并且 4D 和 5D 井区含量相对较高(图 6),反映馆陶组沉积时期古汇水中心有从南向北的迁移的趋势。

明下段沉积时期早期 4D 井和 5D 井区相对深水的浮游生物类含量较高,中晚期含量逐渐下降而 1 井区仍然保持稳定含量,反映明下段沉积时期古水体由北向南加深。

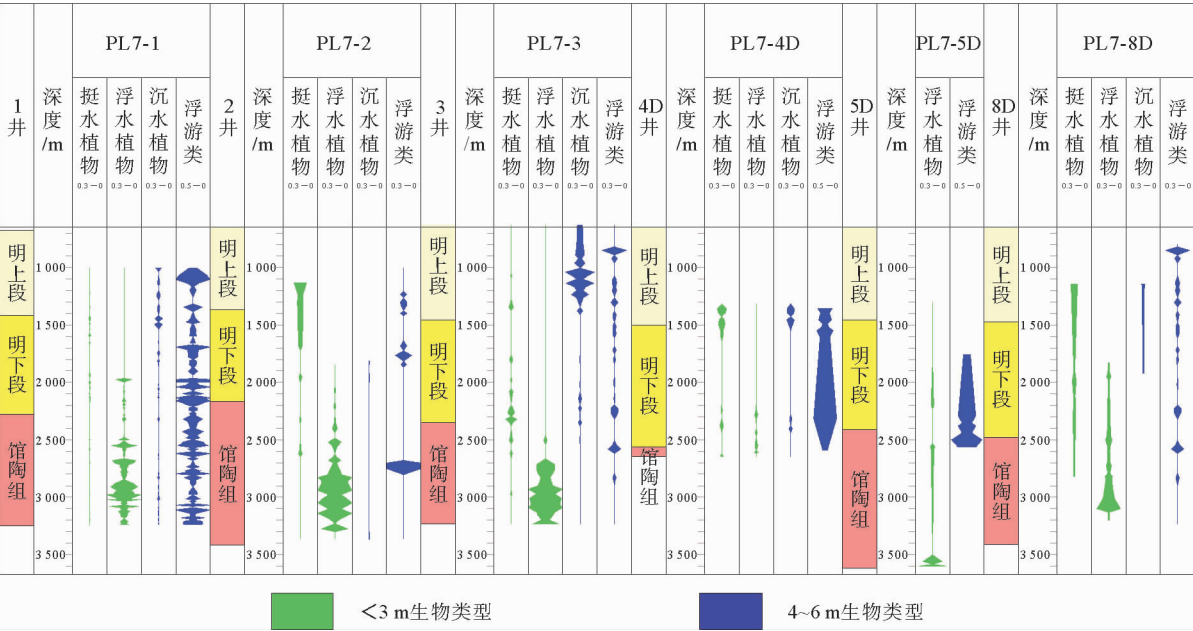


图 6 渤海海域蓬莱 7 地区新近纪古水深对比图

Fig. 6 Comparison of paleo water depth of Penglai 7 area in Neogene, Bohai Sea

5 结论

- (1)渤海海域东南部蓬莱 7 构造新近纪馆陶组中上段到明下段沉积时期发育缓坡沉积的淡水湖泊,湖平面波动频繁。
- (2)结合元素地球化学分析显示馆陶组沉积时期到明下段沉积时期蓬莱 7 地区古水体波动频繁,地层频谱属性趋势分析反映区域内古水体呈现规律性的变化,从馆陶组沉积时期到明下段沉积时期古水深逐渐增大,全区在明下段中后期古水深达最大,结合水生植物分析指示馆陶组沉积时期古水体较浅,约 3 m。馆陶组中后期古水深开始逐渐升高,到了明下段沉积时期古水深达最大,但明下段沉积时期古湖盆的主体古水深约 4~6 m。

参考文献:

[1] 毕力刚, 李建平, 齐玉民, 等. 渤海青东凹陷垦利构造新生

代微体古生物群特征及古环境分析[J]. 古生物学报, 2009, 48(2):155-162.

[2] 米立军, 毕力刚, 龚胜利, 等. 渤海新近纪古湖发育的直接证据[J]. 海洋地质与第四纪地质, 2004, 24(2): 37-42.

[3] 龚胜利, 毕力刚. 孢粉沉积作用与 PL19-3 地区晚第三纪沉积环境的关系[J]. 中国海上油气, 2001, 15(6): 388-392.

[4] 朱伟林, 李建平, 周心怀, 等. 渤海新近系浅水三角洲沉积体系与大型油气田勘探[J]. 沉积学报, 2008, 26(4): 575-582.

[5] 邓运华, 李秀芬. 蓬莱 19-3 油田的地质特征及启示[J]. 中国石油勘探, 2001, 6(1):68-71.

[6] 张新涛, 周心怀, 李建平, 等. 敞流沉积环境中"浅水三角洲前缘砂体体系"研究[C]// 全国沉积学大会论文集, 2013.

[7] 钟建华, 倪良田, 邵珠福, 等. 渤海湾盆地古近纪超深水与极超深水沉积及油气地质意义[J]. 高校地质学报, 2017, 23(3):521-532.

[8] Pekar S F, Kominz M A. Two-Dimensional Paleoslope Modeling: A New Method for Estimating Water Depths of Benthic Foraminiferal Biofacies and Paleoshelf Margins[J]. Journal of Sedimentary Research, 2001, 71(4): 608-620.

[9] 李守军, 郑德顺, 姜在兴, 等. 用介形类优势分异度恢复古湖盆的水深——以山东东营凹陷古近系沙河街组沙三段湖

盆为例[J]. 古地理学报, 2005, 7(3):399-404.

[10] 苏 新, 丁 旋, 姜在兴, 等. 用微体古生物定量水深法对东营凹陷沙四上亚段沉积早期湖泊水深再造[J]. 地学前缘, 2012, 19(1):188-199.

[11] 冯杨伟, 姜 亭, 宋 博, 等. 中哈边境伊犁地区中二叠统沉积环境的地球化学判别[J]. 地质学报, 2017, 91(4):942-953.

[12] 魏亚琼, 王昌勇, 孟祥豪, 等. 青海湖布哈河口区表层沉积物有机质分析及其比较沉积学意义[J]. 湖泊科学, 2017, 29(5):1254-1264.

[13] 杜庆祥, 郭少斌, 沈晓丽, 等. 渤海湾盆地南堡凹陷南部古近系沙河街组一段古水体特征[J]. 古地理学报, 2016, 18(2):173-183.

[14] 龚胜利, 毕力刚. 孢粉沉积作用与 PL19-3 地区晚第三纪沉积环境的关系[J]. 中国海上油气(地质), 2001(6): 20-24.

[15] 郑一丁, 雷裕红, 张立强, 等. 鄂尔多斯盆地东南部张家滩页岩元素地球化学、古沉积环境演化特征及油气地质意义[J]. 天然气地球科学, 2015, 26(7): 1395-1404.

[16] Das B K, Haake B G. Geochemistry of Rewalsar Lake sediment, Lesser Himalaya, India: implications for source-area weathering, provenance and tectonic setting[J]. Geosciences Journal, 2003, 7(4): 299-312.

[17] Jin Z D, Li F C, Cao J J, et al. Geochemistry of Daihai Lake sediments, Inner Mongolia, north China: Implications for provenance, sedimentary sorting, and catchment weathering[J]. Geomorphology, 2006, 80(3/4): 147-163.

[18] 路顺行, 张红贞, 孟 恩, 等. 运用 INPEFA 技术开展层序地层研究[J]. 石油地球物理勘探, 2007, 42(6):703-708.

[19] 陈耀东. 中国水生植物[M]. 郑州:河南科学技术出版社, 2012.

[20] 葛 刚, 陈少凤. 鄱阳湖湿地植物[M]. 北京:科学出版社, 2015.

[21] 徐金鲤, 潘照仁, 杨育梅, 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, 1997.

RECONSTRUCTION OF PALAEO-WATER DEPTH OF NEOCENE SHRINKING LAKE: AN EXAMPLE FROM THE SOUTH OF BODONG LOW UPLIFT, BOHAI SEA

PAN Wenjing¹, LIU Shilei¹, TIAN Derui¹, GUO Longlong¹, WANG Xiaoling¹, WANG Lihong²
(1 CNOOC Tianjin Company, Tianjin 300459, China; 2 CNOOC Energy Technology & Services Limited, Tianjin 300459, China)

Abstract: The Neocene in the southeast Bohai Sea consists mainly of lacustrine, shallow water deltaic and fluvial facies. Drastic facies changes have made sandbody prediction very difficult. Palaeo-water depth of a lake is one of the key factors to sandbody distribution pattern. Based on geochemical data, INPEFA, paleontological and lithological data, the Neogene palaeo-water depth in the Penglai 7 area is investigated. The study area is located on the South of Bodong Low Uplift of the Bohai Sea. Results show that the area surrounding the Penglai 7 area was a fresh water lake with gentle slopes in Neogene. Lake level fluctuated frequently. The average depth of the area was around 3 m when the Guantao Formation was deposited. By the end of Guantao Formation, the lake level started rising. In the beginning, the water depth is deeper in south. However, it was reversed by the end of Guantao Formation and it became deeper in north. Water depth reached its peak in Late Minghuazhen Formation. The average depth of Penglai 7 area was around 4-6 m in the time when the Lower Member of Minghuazhen Formation was deposited.

Key words: Bohai Sea; Neocene; palaeontology; palaeo-lacustrine basin; palaeo-water depth