

银额盆地哈日凹陷 YHC1 井高产油气层时代归属及油气地质意义

陈志鹏,任战利,崔军平,祁凯,张园园,于春勇,任文波,杨桂林,刘润川

(西北大学地质学系大陆动力学国家重点实验室,陕西西安 710069)

摘要:针对银额盆地哈日凹陷 YHC1 井高产油气层时代归属及白垩系与二叠系界线位置争议问题,文章在前人研究的基础上,结合微古生物化石、火山岩同位素测年、岩石矿物组成及地震反射响应特征等开展了层位归属与不整合界面位置确定研究。研究表明, YHC1 井高产油气层段及其上部地层的孢粉组合与哈 1 井、查参 1 井下白垩统可以进行较好对比;高产油气层下部的火山岩锆石 U-Pb 年龄为 131.8~132.6 Ma,指示早白垩世早期;高产油气层的矿物组成与下白垩统一致,而与二叠系有较大区别;高产油气层和火山岩在地震反射剖面中均位于断层内。综上所述,哈日凹陷 YHC1 井新发现的高产油气层应归属下白垩统,白垩系与二叠系的不整合界面则位于巴音戈壁组火山岩底部。高产油气层时代的确定对研究区油气资源评价及勘探方向选择具有重要意义,也指示银额盆地地下白垩统具有良好的油气勘探潜力。

关键词:锆石 U-Pb 年龄;孢粉组合;勘探潜力;高产油气层;下白垩统;银额盆地

中图分类号:TE121.3

文献标识码:A

Age and petroleum geological implications of prolific formations in Ha'ri Depression Well YHC1, Yin'e Basin

Chen Zhipeng, Ren Zhanli, Cui Junping, Qi Kai, Zhang Yuanyuan, Yu Chunyong, Ren Wenbo,

Yang Guiling, Liu Runchuan

(State Key Laboratory of Continental Dynamics, Department of Geology, Northwest University, Xi'an, Shaanxi 710069, China)

Abstract: There have always been controversial opinions about the age of prolific formations in Ha'ri Depression Well YHC1, Yin'e Basin and the location of unconformity surface between the Cretaceous and Permian. To sort out such controversies, we studied the age of prolific formations in the region and the exact location of the boundary line, based on previous research. The micro-fossils, U-Pb zircon dating of volcanic rocks, mineral compositions and seismic reflection characteristics were analyzed for this purpose. Results show that the sporopollen assemblages of the prolific formations and layers above Well YHC1 can be compared with those of the Lower Cretaceous in Wells Ha1 and Chacan1. The U-Pb zircon ages of the volcanic rocks under the prolific formations are ranging from 131.8 Ma to 132.6 Ma, indicating that the volcanic rocks are products of Early Cretaceous eruptions. The mineral compositions of prolific formations are consistent with those of the Lower Cretaceous, but very different from those of the Permian. In addition, both the prolific formations and the volcanic rocks are located within the faulted depression, which is seen from the seismic reflection profile. To sum up, the prolific formations discovered in Ha'ri Depression Well YHC1 should fall in the category of the Lower Cretaceous, and the unconformity surface between the Cretaceous and Permian should be located at the bottom of the Bayingebi Formation volcanic rocks. This study is of great significance to hydrocarbon evaluation and exploration in the research zones, and marks bright prospects for oil/gas exploration in the Lower Cretaceous Yin'e Basin.

Key words: U-Pb zircon dating, sporopollen assemblage, exploration potential, prolific formation, Lower Cretaceous, Yin'e Basin

收稿日期:2018-05-11;修订日期:2018-11-28。

第一作者简介:陈志鹏(1987—),男,博士研究生,盆地沉积与构造演化。E-mail:chenzhipeng305@163.com。

通讯作者简介:任战利(1961—),男,研究员,博士生导师,盆地构造-热演化史和油气地质。E-mail:renzhanli@nwwu.edu.cn。

基金项目:国家自然科学基金重点项目(41630312);国家科技重大专项(2017ZX05005002-008)。

银额盆地地处内蒙古自治区中西部阿拉善盟境内,是目前中国陆上地区油气勘探程度相对较低的大中型沉积盆地,一直是油气资源评价勘探的重要区域^[1-6]。在区域构造上,银额盆地位于塔里木、哈萨克斯坦、西伯利亚和华北四大板块结合部位,是发育在前寒武结晶地块及早古生界褶皱基底上,由晚古生代海相和新生代陆相地层组成的叠合盆地,经历了石炭纪—二叠纪裂谷、晚二叠世—三叠纪挤压隆升、侏罗纪—早白垩世断陷和晚白垩世—第三纪拗陷4个构造演化阶段^[7]。特殊的大地构造位置、多期次的构造运动及复杂的沉积体系决定了油气勘探的复杂性。对处于勘探早期的含油气盆地而言,科学评价油气资源潜力和优选勘探方向是降低钻探风险、加快评价进程,提高开发效益的关键。其中,地层划分及含油气层位归属是评价油气勘探潜力、指导油气勘探方向选择的重要问题,也是处于勘探早期银额盆地油气勘探关注的热点和焦点;吸引了众多学者的关注和讨论^[8-10]。

YHC1 井是 2015 年延长石油集团在银额盆地哈日凹陷钻探的一口区域探井,在多个井段见到良好油气显示。其中,2 946.0 ~ 2 951.0 m 井段压裂试气获得 $9.15 \times 10^4 \text{ m}^3/\text{d}$ (无阻流量)的高产气流和少量凝析油的重大勘探突破,展示了该区良好的油气勘探前景,具有里程碑意义^[11]。但由于研究区周边钻井较少、叠合盆地地层改造强烈且相邻构造单元地层岩性差异较大,对 YHC1 井含油气地层的时代归属和地层划分存在较大争议,不同学者分别将其划归二叠系或下白垩统^[11-15]。地层划分的不统一导致该含油气层出现“同层不同时代”的现象,影响了该区含油气地层资源潜力评价和勘探开发部署。笔者研究团队 2016 年在收集大量区域地质、钻井、测井和地震资料的基础上,对孢粉化石、火山岩锆石 U-Pb 同位素年龄、岩石矿物及地震层序等特征开展深入研究^{①②},提出了相应地层划分的方案和依据,明确了高产油气段的时代归属,相关研究对区内资源评价及油气勘探方向选择具有重要意义。

1 区域地质概况

YHC1 井位于内蒙古自治区阿拉善右旗塔木素布拉克镇北部,构造上位于银额盆地苏红图坳陷哈日凹陷中央深凹带。苏红图坳陷是位于银额盆地中部的一

个二级构造单元,主体由哈日凹陷、巴北凹陷、艾西凹陷和艾东凹陷组成,凹陷间为凸起所隔,呈现“凹凸相间”的构造格局。哈日凹陷为苏红图坳陷西部的二级构造单元,东部与巴布拉海凸起相接,南部与宗乃山隆起相邻,西部与洪吉尔凸起相邻,北部为中蒙边界,为一东断西超、近“S”形展布的箕状断陷,可划分为东部陡坡带、中央深凹带和西部斜坡带三个次级构造单元(图 1)。

区域地质研究表明,盆地主要沉积盖层为晚古生界石炭系、二叠系、中生界侏罗系、白垩系和新生界。受印支运动影响,盆地三叠纪主要处于热拱隆张状态,导致普遍缺失三叠系。早侏罗世的燕山运动使盆地进入初始裂谷阶段,由于断陷受早期断裂带控制,侏罗系仅分布在盆地西部^[3-4]。研究区由于同时缺失三叠系和侏罗系,白垩系直接不整合于二叠系之上^[12-13]。前人研究表明^[16],阿拉善中东部石炭系—二叠系以浅海相砂泥岩、台地相碳酸盐岩为主夹少量火山岩或火山碎屑岩,局部存在构造或岩浆作用形成的板岩化、千枚岩化砂泥岩和大理岩化碳酸盐岩。综合钻井和剖面的岩相及古生物特征研究,银额盆地白垩系可划分为下统巴音戈壁组(K_1b)、苏红图组(K_1s)、银根组(K_1y)和上统乌兰苏海组(K_2w),但盆地内不同地区下白垩统岩性特征差异较大^[17]。巴音戈壁组(K_1b)在西部务桃亥坳陷务参 1 井为大套杂色砂砾岩和暗紫色泥岩、泥质砂砾岩,而在东部查干德勒苏坳陷查参 1 井则主要为深灰色砾岩、灰色—灰黑色砂岩、粉砂质泥页岩、白云质泥岩。在巴 1 井还见到多套玄武岩。苏红图组(K_1s)在西部务参 1 井为暗紫色泥岩、钙质泥岩、灰色泥岩,夹少量煤层;而在东部查参 1 井以灰黑色—深灰色—棕褐色泥岩、粉砂质泥岩和浅灰色砂岩、含砾砂岩为主,并见多套绿灰色—灰黑色玄武岩和杂色火山角砾岩。银根组(K_1y)在西部务参 1 井为大套棕红色—暗紫色泥岩、泥质粉砂岩、杂色砂砾岩、细砾岩;而在东部查参 1 井以深灰色—暗褐色—灰色—灰绿色泥岩、砂质泥岩为主。

2 油气显示及地层划分

YHC1 井高产油气层段岩性主要为黑色—深灰色粉砂质泥岩、灰质泥岩和泥岩,碳酸盐含量为 1.9% ~ 34%,平均为 19.30%;钻井过程中气测显示强烈,全烃最高达 10.68%;电性上具有中—高 GR(102 ~

①任战利,杨鹏,曹展鹏,等. 银额盆地哈日凹陷延哈参 1 井单井综合评价,陕西延长石油(集团)有限责任公司,2016.

②任战利,潘宾锋,陈志鹏,等. 银额盆地延长探区勘探潜力研究及目标优选,陕西延长石油(集团)有限责任公司,2017.

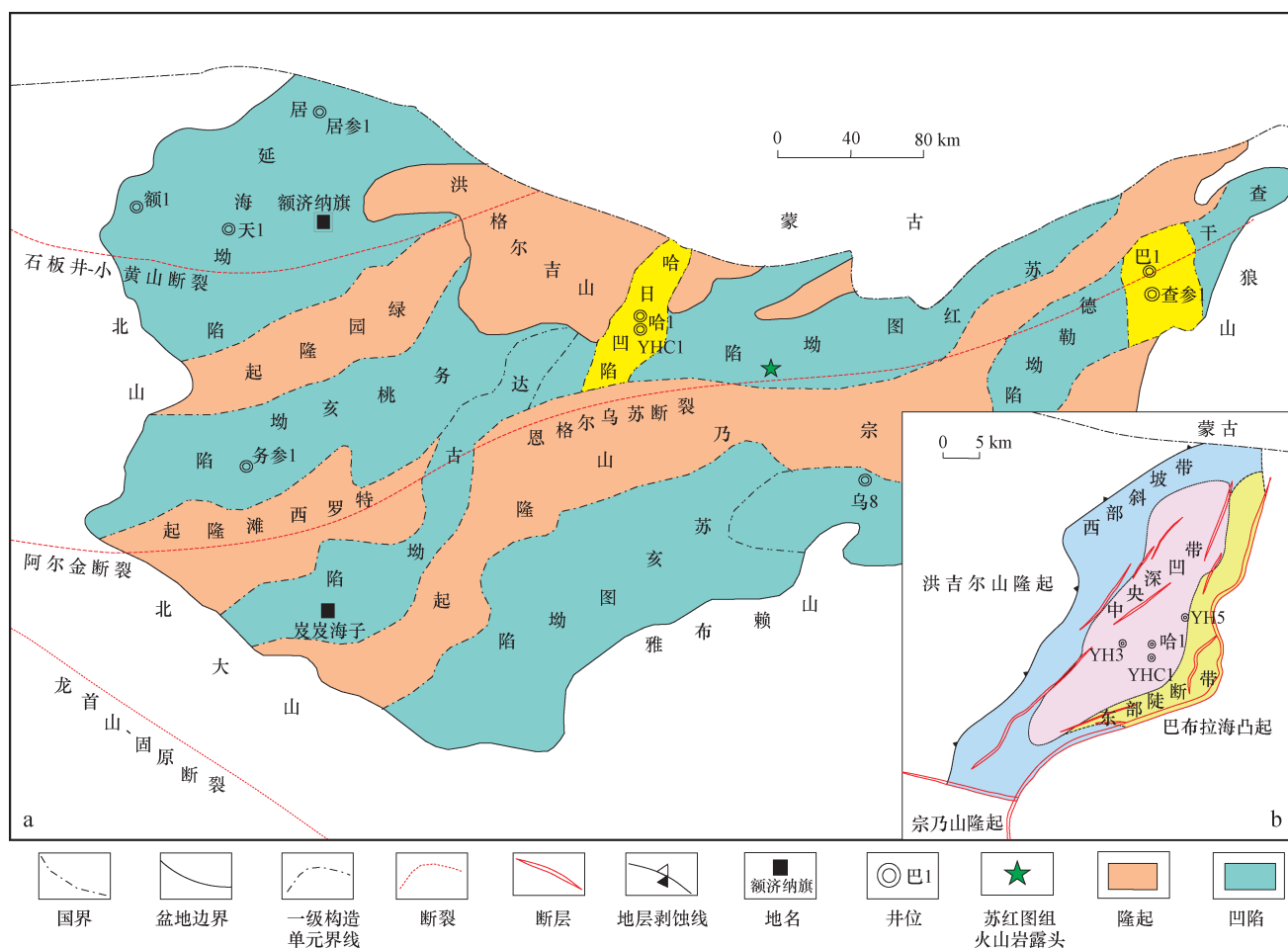


图1 银额盆地构造单元(a)及哈日凹陷位置(b)

Fig. 1 Structural units of Yin'e Basin (a) and the location of Ha'ri Depression (b)

126 API, 平均为 113 API)、高密度($2.62 \sim 2.76 \text{ g/cm}^3$, 平均为 2.66 g/cm^3)、低声波($188 \sim 265 \mu\text{s/m}$, 平均为 $220 \mu\text{s/m}$)的特征;地球化学分析有机碳含量(TOC)分布在 $0.4\% \sim 1.52\%$, 平均为 0.85% , 有机质成熟度(R_o)分布在 $1.06\% \sim 1.35\%$, 平均为 1.24% 。

由于 YHC1 井发育厚层的火山岩、高伽马层及高电阻层等,其地层岩性和电性特征与邻区存在较大差异,因此前人提出了多个不同的地层划分方案(图2),争论的核心在于高产油气层的时代归属和白垩系与二叠系间不整合面的位置。卢进才等根据镜质体反射率、岩石地球化学特征、物源分析和测井响应电性曲线突变特征,认为不整合面位于 2792.0 m 深度,高产油气层段和火山岩均属于二叠系^[11]。赵春晨等根据岩心、测井、地震及古生物等资料分析,认为不整合面位于 3158.0 m ,高产油气层段属于下白垩统,火山岩属于二叠系^[12]。在前人研究的基础上,本文结合孢粉化石组合、火山岩锆石 U-Pb 年龄、岩石矿物特征及地震层序分析等,认为不整合面应划分在井深 3471.0 m ,高产油气层段和火山

岩均属于下白垩统,该套火山岩是银额盆地早白垩世断陷形成初期(即巴音戈壁期)深大断裂强烈活动的产物。

3 白垩系与二叠系界线的确定

3.1 孢粉化石特征

孢粉化石样品采自 YHC1 井(埋深 $426.58 \sim 3386.00 \text{ m}$)岩心中的暗色泥质岩类,共计分析样品 17 块,识别蕨类孢子 25 种、裸子类花粉 30 种、被子类花粉 3 种(图3)。根据孢粉类型对孢粉化石粒数超过 50 以上的样品进行分类百分比统计,确定其孢粉组合。孢粉室内分析处理在吉林大学古生物学与地层学研究中心孢粉实验室进行,采用常规酸碱法处理、重液浮选法富集。孢粉的统计、鉴定工作在 Olympus BX51 生物显微镜下完成,具体分析方法与万传彪等(2014)相同^[18]。孢粉化石特征纵向上可划分为以下 5 个孢粉层段(图4)。

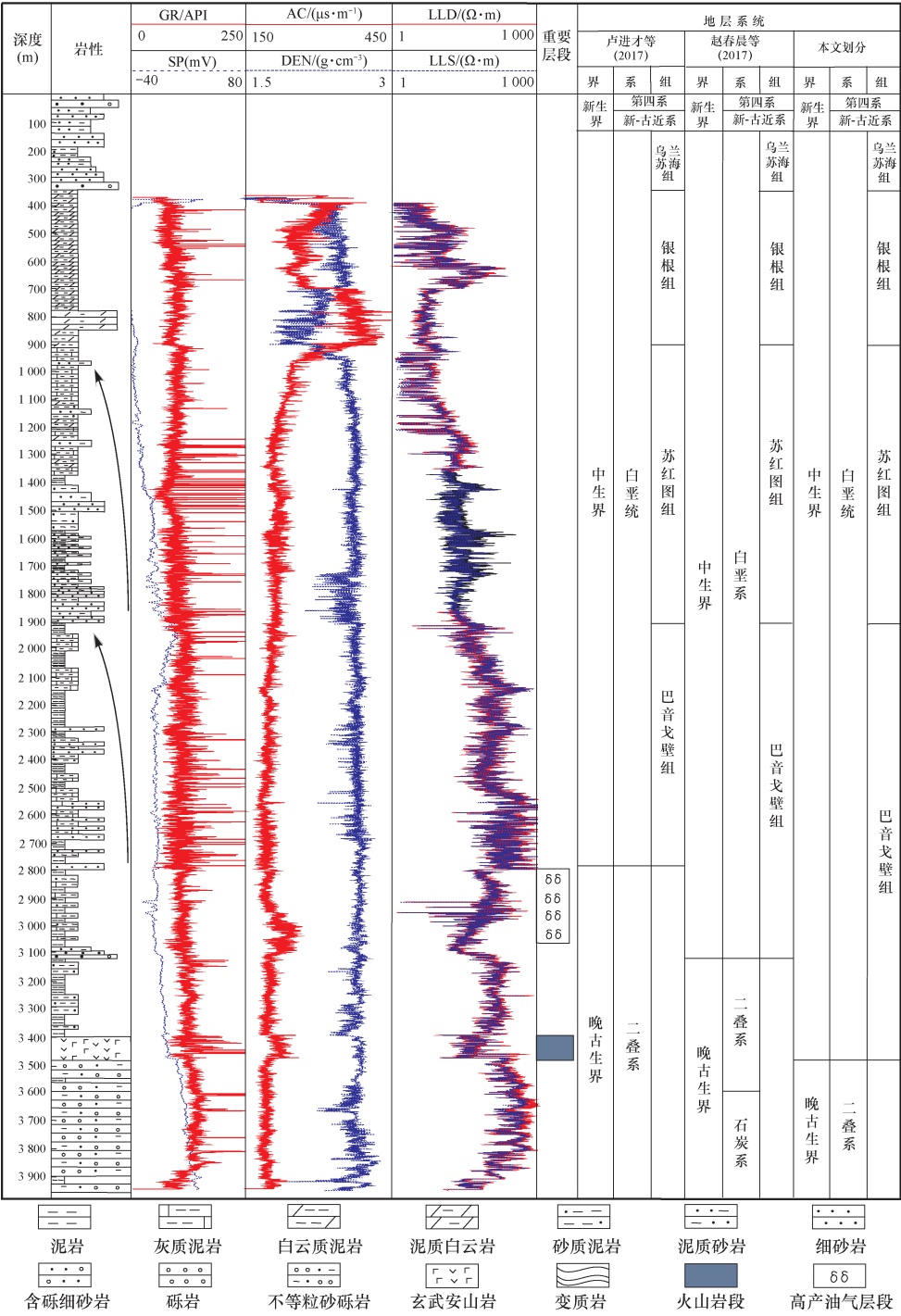


图 2 银额盆地哈日凹陷 YHC1 井地层综合柱状图^[11-12]

Fig. 2 Stratigraphic column of Well YHC1 in Ha'ri Depression, Yin'e Basin

第一层段(埋深 426.58 ~ 930.47 m),分析样品 3 个,划分为有突肋纹孢 *Appendicisporites* - 云杉粉 *Piceapollenites* - 扁三沟粉 *Tricolpites* 组合。该组合裸子类花粉占优势(84.91%),蕨类孢子含量低(11.32%),见有少量被子类花粉(3.77%)。裸子类花粉中皱球粉 *Psophosphaera* (15.09%) 和双束松粉 *Pinuspollenites* (13.21%) 含量最高,原始松柏粉 *Protoconiferus* (11.32%) 和单束松粉 *Abietinaepollenites* (9.43%) 也

具有一定含量,并见有云杉粉 *Piceapollenite*、古松柏类 *Paleoconifer* 花粉和克拉梭粉 *Classopollis*。蕨类孢子中仅见有突肋纹孢 *Appendicisporites*、无突肋纹孢 *Cicatricosisporites* 和层环孢 *Densoisporites* 等。

第二层段(埋深 930.47 ~ 1 509.00 m),分析样品 2 个,划分为蛟河粉 *Jiaohepollis* - 克拉梭粉 *Classopollis* - 双束松粉 *Pinuspollenites* 组合。该组合裸子类花粉占绝对优势(93.18% ~ 97.94%),蕨类孢子含量极低

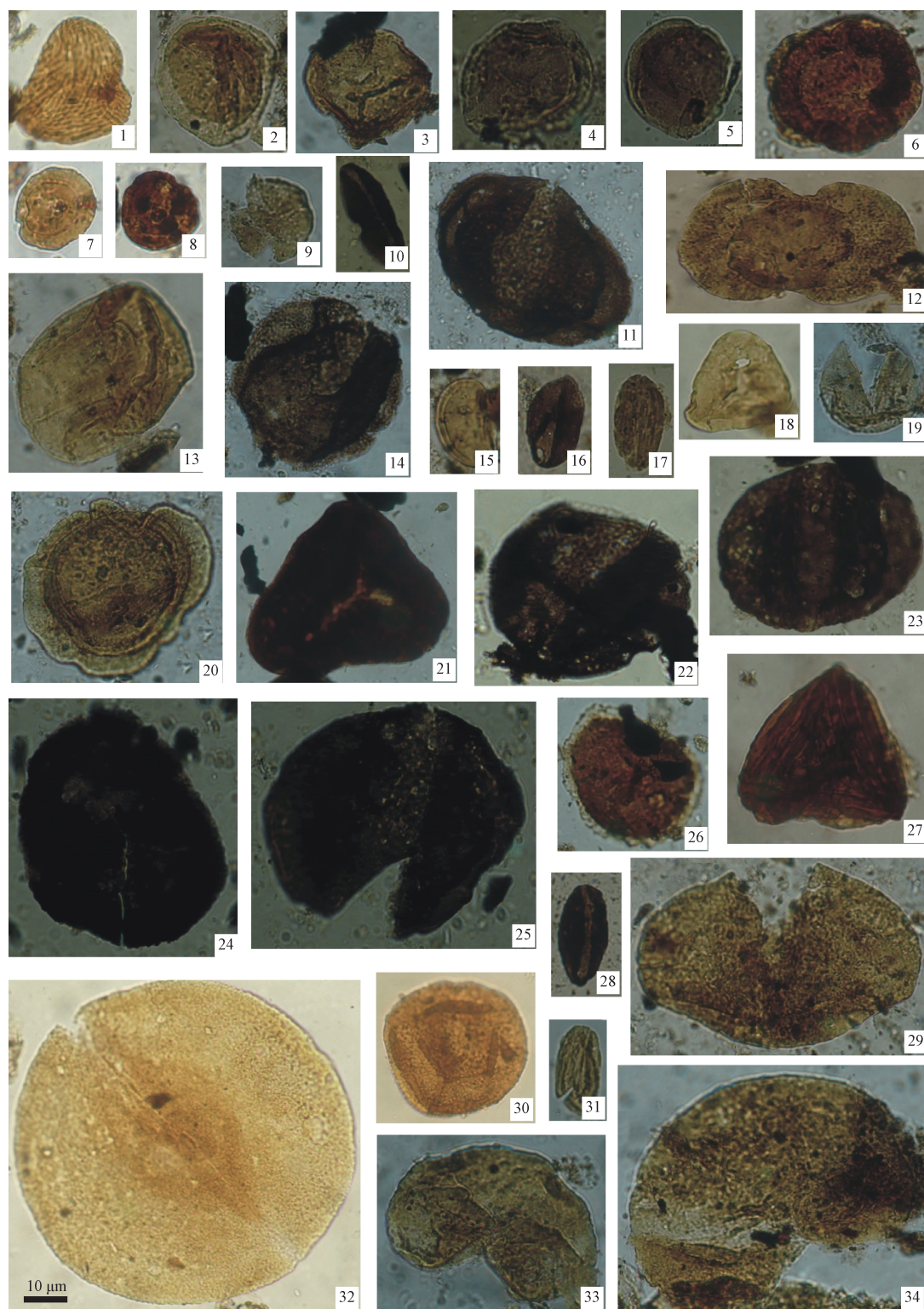
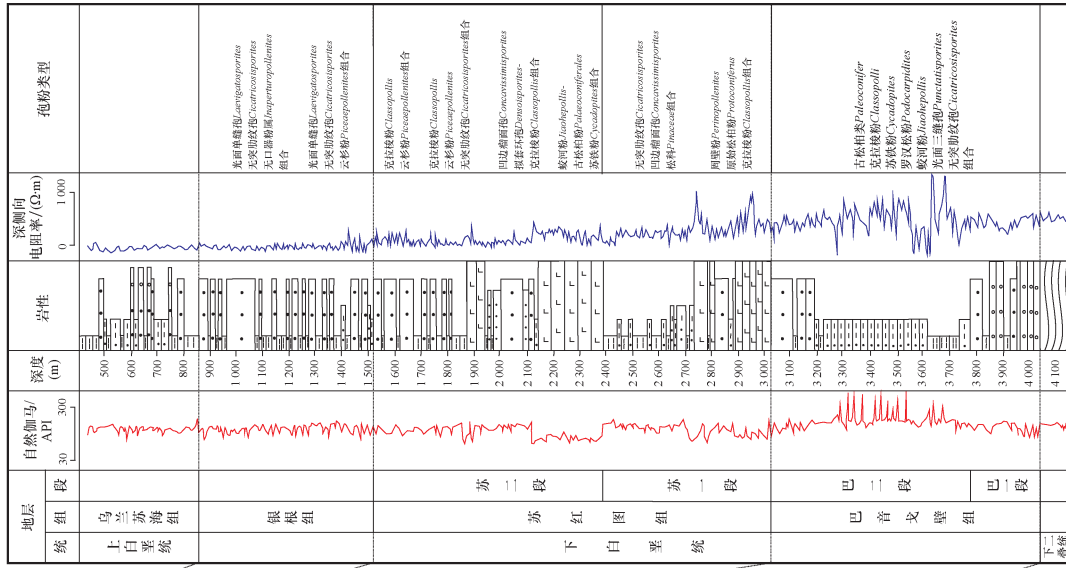


图3 银额盆地哈日凹陷下白垩统代表性孢粉化石

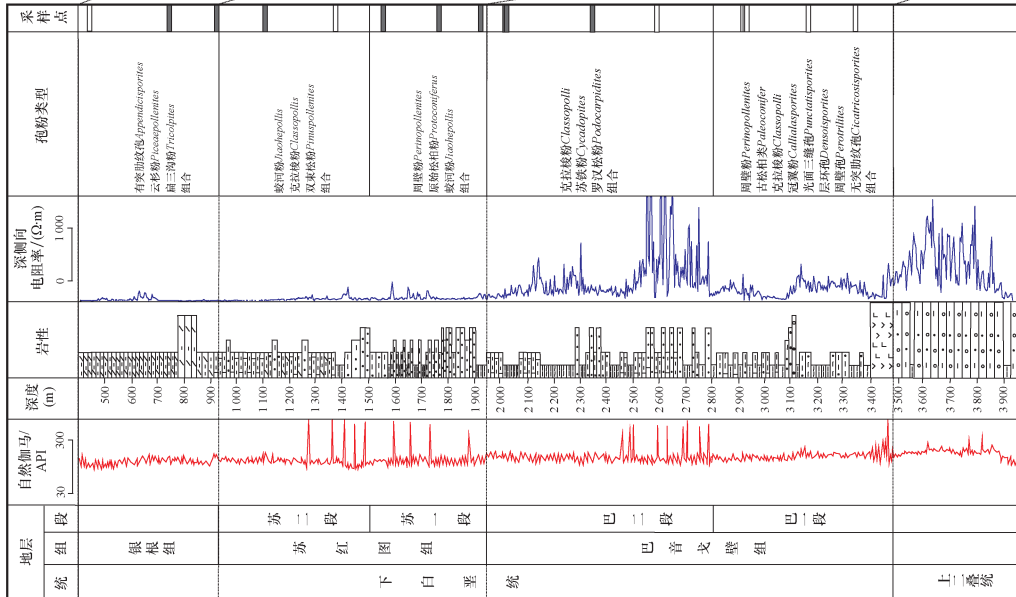
Fig. 3 Representative palynological fossil of the Lower Cretaceous in Ha'ri Depression, Yin'e Basin

1. 无突肋纹孢 *Cicatricosisporites*; 2, 5. 周壁粉 *Perinopollenites*; 3. 层环孢 *Densoisporites*; 4. 周壁孢 *Perotrilites*; 6, 20. 蛟河粉 *Jiaohepollis*; 7, 8. 克拉梭粉 *Classopollis*; 9. 扁三沟粉属 *Tricolpites*; 10, 16, 28. 苏铁粉 *Cycadopites*; 11. 单束松粉 *Abietinaepollenites*; 12. 罗汉松粉 *Podocarpidites*; 13. 皱球粉 *Psophosphaera*; 14. 古松柏粉 *Paleoconiferus*; 15. 光面水龙骨单缝孢 *Polypodiaceasporites*; 17, 31. 希指蕨孢 *Schizaeoisporites*; 18. 桫欏孢 *Cyathidites*; 19. 杉科粉 *Taxodiaceapollenites*; 21. 瘤面海金沙孢 *Lygodioisporites*; 22. 假二肋粉 *Gardenasporites*; 23. 原始松粉 *Protopinus*; 24. 科达粉 *Cordaitina*; 25. 克氏粉 *Klauipollenites*; 26. 膜环弱缝孢 *Aequitriradites*; 27. 有突肋纹孢 *Appendicisporites*; 29. 拟云杉粉 *Piceites*; 30. 棒瘤孢 *Baculatisporites*; 32. 原始松柏粉 *Protocniferus*; 33. 双束松粉 *Pinuspollenites*; 34. 冷杉粉 *Abiespollenites*

c. 查干凹陷查参1井古生物地层柱状图



b. 哈日凹陷YHC1井古生物地层柱状图



a. 哈日凹陷哈1井古生物地层柱状图

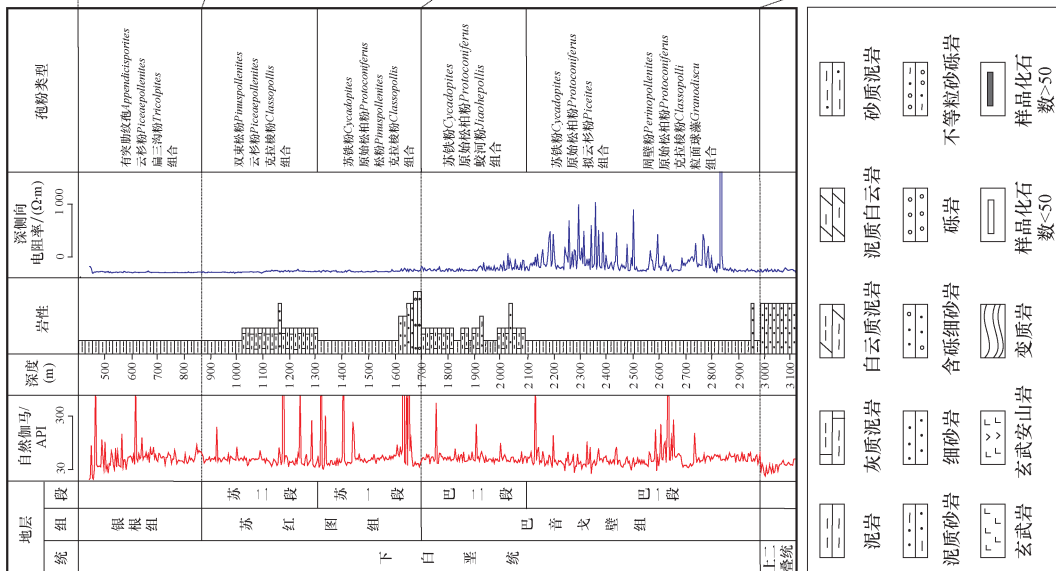


图4 银额盆地YHC1井、哈1井和查参1井孢粉组合对比

Fig. 4 Comparison of sporopollen assemblages from Wells YHC1, Haili and Chacanshan 1, Yin'e Basin

(2.06%~4.55%),见有少量被子类花粉(0~2.27%)。裸子类花粉中原始松柏粉 *Protoconiferus* (15.91%~30.93%) 和双束松粉 *Pinuspollenites* (16.49%~20.45%) 含量最高,克拉梭粉 *Classopollis* (4.12%~12.50%)、单束松粉 *Abietinaepollenites* (9.09%~9.28%) 和罗汉松粉 *Podocarpidites* (4.12%~9.09%) 也具有一定含量,并见有古松柏粉 *Paleoconifer*、微囊粉 *Parvisaccites* 和蛟河粉 *Jiaohepollis* 等。蕨类孢子类型少含量低,零星见有多环孢 *Polycingulatisporites*、膜环弱缝孢 *Aequitiradites*、瘤面海金沙孢 *Lygodioisporites* 和层环孢 *Densoisporites* 等。被子类花粉见有时代意义的星粉 *Asteropollis* 和棒纹粉 *Clavatipollenites*。

第三层段(埋深 1 509.00~1 938.25 m),分析样品 3 个,划分为周壁粉 *Perinopollenites* - 原始松柏粉 *Protoconiferus* - 蛟河粉 *Jiaohepollis* 组合。该组合中裸子类花粉占绝对优势(91.38%~95.28%),蕨类孢子含量低(4.72%~8.62%),被子类花粉(0~1.05%)零星出现。裸子类花粉中,原始松柏粉 *Protoconiferus* (12.26%~22.11%) 含量最高,其次为双束松粉 *Pinuspollenites* (8.49%~18.95%),周壁粉 *Perinopollenites* (6.03%~14.15%)、克拉梭粉 *Classopollis* (0~15.09%)、皱球粉 *Psophosphaera* (4.72%~11.58%) 和云杉粉 *Piceapollenites* (3.45%~11.32%),见少量古松柏类 *Paleoconifer* 花粉、蛟河粉 *Jiaohepollis* 等。蕨类孢子中,桫欏孢 *Cyathidites* (0~2.59%) 和层环孢 *Densoisporites* (0~2.59%) 含量最高,其次是无突肋纹孢 *Cicatricosisporites* (0~2.11%),还见有希指蕨孢 *Schizaeoisporites*、有孔孢 *Foraminisporis*、凹边瘤面孢 *Concavissimisporites* 等。

第四层段(埋深 1 938.25~2 789.27 m),分析样品 4 个,划分为克拉梭粉 *Classopollis* - 苏铁粉 *Cycadopites* - 罗汉松粉 *Podocarpidites* 组合。该组合以裸子类花粉占优势(93.64%~95.40%),蕨类孢子含量较低(4.60%~6.36%),未见到被子类花粉。裸子类花粉中除了原始松柏粉 *Protoconiferus* (5.75%~20.91%) 和双束松粉 *Pinuspollenites* (10.34%~14.55%) 含量较高外,克拉梭粉 *Classopollis* (3.64%~27.59%)、苏铁粉 *Cycadopites* (8.05%~10.00%) 和罗汉松粉 *Podocarpidites* (2.86%~8.40%) 也具有一定含量,还见有古松柏类 *Paleoconifer* 花粉、微囊粉 *Parvisaccites* 和冠翼粉 *Callialasporites* 等。蕨类孢子中桫欏孢 *Cyathidites* (0~2.30%) 含量相对较多,亦见希指蕨孢 *Schizaeoisporites*、无突肋纹孢 *Cicatricosisporites* 等。

第五层段(埋深 2 789.27~3 386.00 m),分析样

品 5 个,由于样品中化石数小于 50,因此未对该层段划分孢粉组合。样品中发现裸子类花粉 36 个,蕨类孢子 6 个,缺乏被子类花粉。裸子花粉类见周壁粉 *Perinopollenites* (8 个),克拉梭粉 *Classopollis* (5 个),古松柏粉 *Paleoconiferus* (3 个),冠翼粉 *Callialasporites* (2 个);蕨类孢子见圆形光面三缝孢 *Punctatisporites*、无突肋纹孢 *Cicatricosisporites*、层环孢 *Densoisporites*、周壁孢 *Perotrilites* 等。

综上所述,5 个孢粉层段具有良好的继承性,裸子类花粉中古松柏类 *Paleoconifer*、微囊粉 *Parvisaccites*、冠翼粉 *Callialasporites* 和克拉梭粉 *Classopollis* 均为繁盛于早白垩世的典型分子;蕨类孢子含量虽然不高,但类型多样,含量较多的无突肋纹孢 *Cicatricosisporites* 和凹边瘤面孢 *Concavissimisporites* 是早白垩世的常见分子;被子类花粉棒纹粉 *Clavatipollenites* 和星粉 *Asteropollis* 也是该地区早白垩世孢粉组合重要特点^[19],大致可以推断其沉积时代为早白垩世凡兰期(Valanginian) - 欧特里夫期(Hauterivian) (136.4~99.6 Ma)。整体上 YHC1 井与哈日凹陷哈 1 井^①及查干凹陷的查参 1 井^[8]早白垩世孢粉组合可进行较好类比(图 4),仅部分孢粉含量略有区别,分析认为是由于所处古地理位置或沉积环境不同所致。高产油气段(埋深 2 946.0~2 951.0 m)所在的第五层段(埋深 2 910.37~3 362.00 m)虽未能划分孢粉组合,但见到了具有时代意义的古松柏类 *Paleoconifer*、克拉梭粉 *Classopollis*、冠翼粉 *Callialasporites* 和无突肋纹孢 *Cicatricosisporites* 等,指示其沉积年代为早白垩世。

3.2 火山岩锆石 U - Pb 年龄

同位素地质学是利用放射性同位素的衰变规律,稳定同位素的丰度变化,来研究地壳发展和地质体形成的历史,以及在不同地质作用下地球物质的迁移过程,被广泛用于确定地质体形成时间和地质事件发生时代^[20]。锆石是自然界中常见的副矿物,由于其相对富含 U 和 Th 等放射性元素而贫普通 Pb,且具有较高的封闭温度和优越的物理化学稳定性,因此锆石 U - Pb 同位素定年成为探讨岩浆结晶年龄的重要方法之一^[21]。本文采用 LA - ICP - MS 锆石 U - Pb 同位素测年技术对哈日凹陷 YHC1 井(埋深 3 386.0~3 471.0 m)的火山岩进行分析,利用测得岩浆锆石结晶年龄对其上覆地层的沉积时代进行约束。火山岩样品在河北省廊坊区域地质调查研究所进行样品粉碎和锆石挑选,锆石制样、阴极发光(CL)图像采集和 LA - ICP - MS

^① 秦云龙. 银根 - 额济纳旗盆地哈日凹陷哈 1 井单井综合评价. 中国石油华北油气分公司勘探开发研究院, 1998.

U-Pb 同位素分析在西北大学大陆动力学国家重点实验室完成,实验原理及步骤参见刘晔等^[22]。测试结果通过 GLITTER 软件计算得出,实验获得的数据采用 Andersen 的方法进行同位素比值校正以扣除普通 Pb 的影响^[20],谐和图采用 ISOPLOT 4.0 绘制完成,单个分析点的同位素比值和同位素年龄误差(标准偏差)为 1σ 。

火山岩样品采自 YHC1 井第 12 筒岩心 3 394.4 m 深度,颜色以深灰色、灰色为主,发育块状构造、斑状结构。岩石表面可见丰富的气孔杏仁(图 5a),形态不规则,孔隙壁见隐晶硅质,孔隙内充填伊利石。斑晶以透长石和斜长石为主,含量为 10%~20%,多呈自形,粒径介于 0.15~0.40 mm;基质主要表现为交织结构,由微晶针状斜长石构成(图 5b)。主量元素分析显示火山岩的 SiO_2 含量为 55.97%~56.37%,平均为 56.11%; K_2O 含量介于 0.101%~4.39%,平均为 1.81%; Na_2O 含量介于 2.10%~3.24%,平均为 2.88%。TAS 图解

和 AFM 图解显示该火山岩为拉斑性玄武安山岩,属于中性喷出岩(图 5c,d)。

火山岩锆石呈灰色-灰黑色;颗粒形状不规则,见椭圆形、半月形及短柱形;粒径较小,通常为 50~150 μm ,长宽比在 1.5:1~2.5:1。CL 图像显示大多数锆石的震荡环带清晰(图 6),Th 和 U 含量分别为 $(60\sim4\,343)\times 10^{-6}$ 和 $(62\sim2\,232)\times 10^{-6}$,Th/U 比为 0.29~2.99,平均为 0.96,远大于变质锆石的 Th/U 比值(<0.1),反映其岩浆成因^[23]。分析结果显示从该火山岩获得锆石 U-Pb 谐和年龄 12 个,根据锆石年龄分布可分为两组(表 1)。第一组年龄相对年轻, $^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$ 表面年龄为 120~135 Ma($n=6$),加权平均年龄为 $131.8\text{ Ma}\pm 5.9\text{ Ma}$, $MSWD=15$;第二组年龄相对较老, $^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$ 表面年龄为 197~320 Ma($n=6$)。在 LA-ICP-MS 锆石 $^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$ 和 $^{207}\text{Pb}/^{235}\text{U}$ 年龄谐和图上,12 个点均落在谐和曲线附近,体现出较好的谐和性(图 7a)。

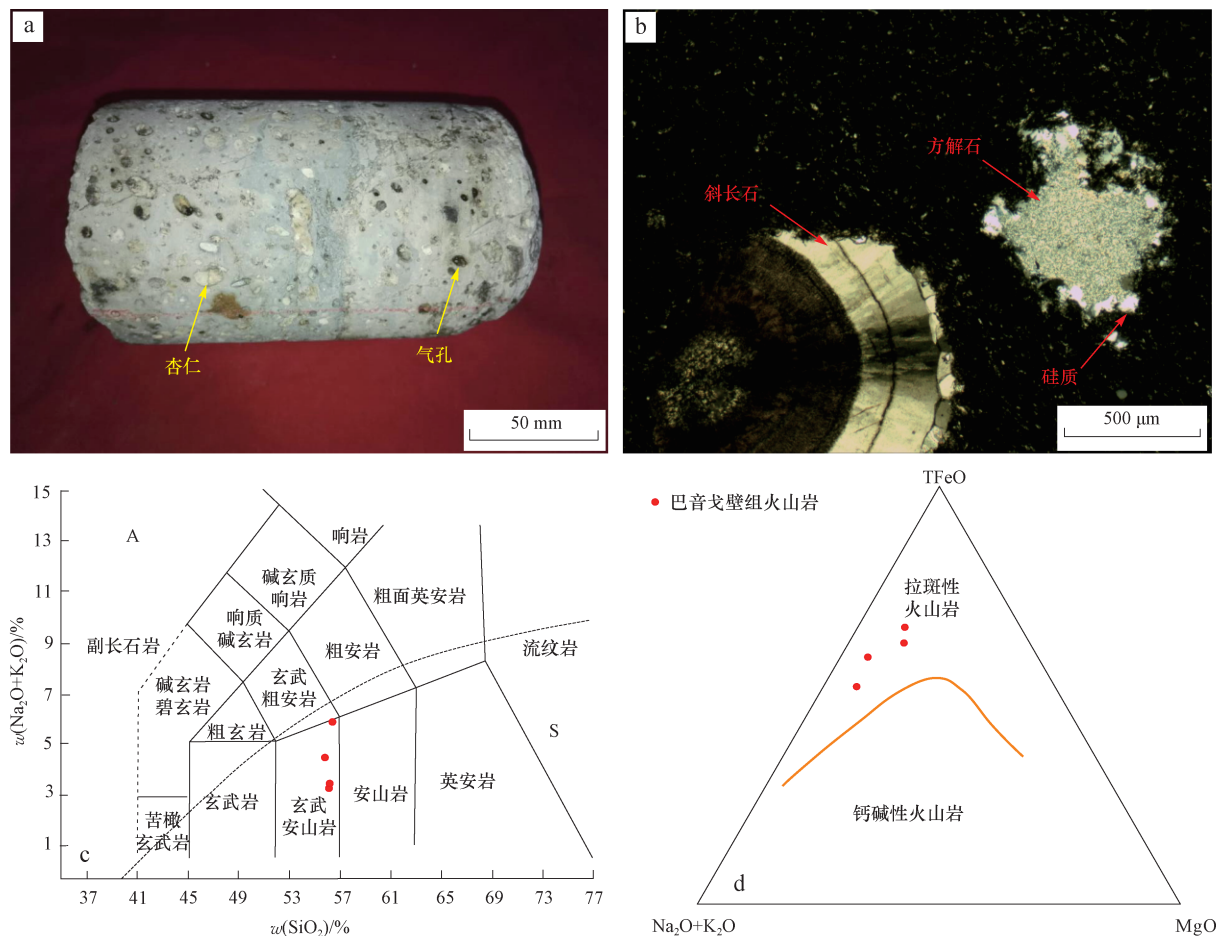


图 5 银额盆地哈日凹陷 YHC1 井 3 386~3 471 m 深度段火山岩岩石特征

Fig. 5 Petrologic features of volcanic rocks in 3386~3471m interval of Well YHC1 in Ha'ri Depression, Yin'e Basin

- a. YHC1 井,埋深 3 394 m,灰白色玄武安山岩,见气孔和杏仁构造;b. 为 a 图火山岩的镜下照片,见由斜长石、方解石及硅质充填的杏仁体;
c. 为 a 图火山岩的 TAS 分类图解;d. 为 a 图火山岩的 AFM 分类图解

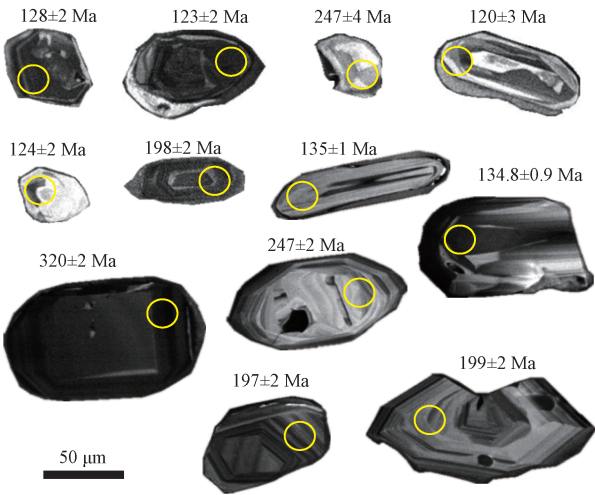


图 6 银额盆地哈日凹陷 YHC1 井火山岩(3 394.4 m) 锆石阴极发光图像及 U - Pb 年龄

Fig. 6 Cathodoluminescence images and U - Pb isotopic ages of zircons from volcanic rocks of Well YHC1 (3 394.4 m) in Ha'ri Depression, Yin'e Basin

根据火山岩锆石 U - Pb 年龄分布特征,较年轻的岩浆成因锆石所对应年龄为 131.8 ± 5.9 Ma, 指示该火山岩的形成年龄;其他较老的锆石年龄很可能是岩浆上升过程中从围岩中捕获的锆石。本次锆石测年结果与王香增等对哈日凹陷内该套火山岩锆石测年分析结果($132.6 \text{ Ma} \pm 0.7 \text{ Ma}$) (图 7b) 接近^[14];明显区别于艾西凹陷的苏红图组火山岩⁴⁰Ar - ³⁹Ar 年龄($105.55 \pm 4.03 \sim 112.71 \pm 2.06 \text{ Ma}$)^[24]。火山岩锆石同位素年龄指示该火山岩的喷发时期约为早白垩世 Hauterivian 欧特里夫期,表明 YHC1 井火山岩上覆地层(埋深 < 3 386 m) 沉积时间应晚于该时期。

3.3 地层岩性矿物特征

岩心及镜下观察表明,YHC1 井下白垩统巴音戈 U - Pb 理、交错层理及包卷层理等小型沉积构造,碎屑主要为石英、长石和岩屑,粒度分布在 0.04 ~ 0.08 mm, 接触关系主要为点 - 线接触(图 8a,b),反映沉积时水动力较弱的沉积环境和相对较弱的成岩作用。下覆二叠系(埋深 3 658 m) 主要为砂质砾岩,块状构造,碎屑以变质岩和岩浆岩岩屑为主,主要粒度区间在 0.12 ~ 12 mm,接触关系主要为线接触 - 凹凸接触,碎屑颗粒内见较多微裂隙(图 8c,d),反映沉积时期高能的水动力环境和强烈的压实压溶作用。前人研究表明,研究区石炭系 - 二叠系以裂谷海盆沉积为主,二叠纪末期,该地区经历了塔里木板块和华北板块碰撞拼接及古亚洲洋消亡闭合^[24-25],白垩系主要表现为陆相湖盆沉积,因此两套地层岩性及结构理应存在明显的差异。

为了对地层的岩石矿物组成有更清楚的认识,研究区 YH5 井进行了全井段岩屑 X 衍射全岩矿物分析(图 9)。YH5 井地层特征与 YHC1 井对应性较好,同样发育火山岩层、高伽马层和高阻层。X - 衍射全岩分析采样密度为每米一个样,共识别出 17 种矿物,为了便于分析,将其简化为以下 8 类:粘土矿物、石英、长石(斜长石、钾长石)、方解石、白云石(铁白云石)、铁矿物(磁铁矿、黄铁矿、菱铁矿、钛铁矿)、硫酸盐(石膏、硬石膏、芒硝)、硅酸盐(云母、方沸石、绿辉石、透辉石)。根据 X - 衍射全岩矿物分析结果(表 2),下白垩统以富含白云石和方解石为显著特征,其碳酸盐平

表 1 银额盆地哈日凹陷 YHC1 井火山岩(埋深 3 394.4 m) 锆石 U - Pb 同位素数据
Table 1 Statistics of U - Pb zircon isotopic dating from volcanic rocks of Well YHC1 (3 394.4 m) in Ha'ri Depression, Yin'e Basin

测点 编号	Th/U	同位素比值						表面年龄/Ma					
		²⁰⁷ Pb/ ²⁰⁶ Pb	1σ _s	²⁰⁷ Pb/ ²³⁵ U	1σ _s	²⁰⁶ Pb/ ²³⁸ U	1σ	²⁰⁷ Pb/ ²⁰⁶ Pb	1σ	²⁰⁷ Pb/ ²³⁵ U	1σ	²⁰⁶ Pb/ ²³⁸ U	1σ
1	1.12	0.051 84	0.008 15	0.134 43	0.020 91	0.018 81	0.000 43	278	325	128	19	120	3
2	1.19	0.059 05	0.006 22	0.156 71	0.016 25	0.019 25	0.000 36	569	239	148	14	123	2
3	0.71	0.047 18	0.003 34	0.126 72	0.008 75	0.019 48	0.000 30	58	157	121	8	124	2
4	2.99	0.055 61	0.001 52	0.153 46	0.003 39	0.020 02	0.000 25	437	28	145	3	128	2
5	0.24	0.050 13	0.000 65	0.146 42	0.002 10	0.021 13	0.000 14	201	21	139	2	134.8	0.9
6	1.97	0.046 40	0.002 94	0.134 91	0.008 44	0.021 08	0.000 21	19	139	128	8	135	1
7	0.28	0.050 34	0.001 00	0.215 29	0.004 20	0.031 08	0.000 27	211	29	198	4	197	2
8	0.74	0.059 01	0.001 39	0.253 41	0.004 18	0.031 14	0.000 37	567	17	229	3	198	2
9	0.56	0.050 59	0.001 22	0.217 73	0.005 31	0.031 37	0.000 34	222	36	200	4	199	2
10	0.29	0.051 41	0.000 86	0.276 09	0.004 75	0.038 99	0.000 32	259	24	248	4	247	2
11	0.78	0.051 52	0.004 18	0.277 54	0.022 08	0.039 07	0.000 63	264	186	249	18	247	4
12	0.64	0.052 85	0.000 5	0.371 12	0.004 09	0.050 82	0.000 35	322	13	320	3	320	2

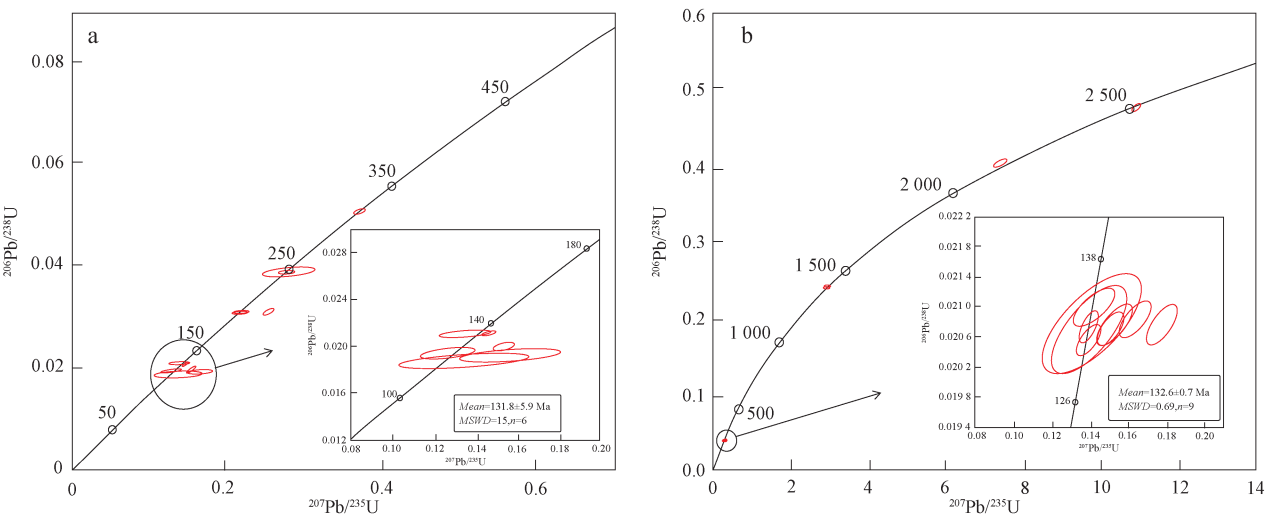


图7 银额盆地哈日凹陷 YHC1 井火山岩锆石 U - Pb 年龄谱和图

Fig. 7 U - Pb concordia diagram for zircons from volcanic rocks of Well YHC1 in Ha'ri Depression, Yin'e Basin

a. YHC1 井,埋深 3 394.4 m,火山岩锆石年龄谱和图,为本文数据;b. YHC1 井,埋深 3 393.1 m,火山岩锆石年龄谱和图,引自王香增^[14]



图8 银额盆地哈日凹陷下白垩统巴音戈壁组及二叠系沉积构造及显微特征对比

Fig. 8 Comparison of sedimentary structures and microscopic characteristics between the Lower Cretaceous Bayingebi Formation and the Permian in Ha'ri Depression, Yin'e Basin

a. YHC1 井,埋深 3 072 m,下白垩统巴音戈壁组,泥质粉砂岩,见泥质条带和波状层理;b. 为 a 图的镜下照片,碎屑以石英、长石和岩屑为主,粒度在 0.04 ~ 0.08 mm,为点 - 线接触;c. YHC1 井,埋深 3 658 m,二叠系,砂质砾岩,块状构造;d. 为 c 图的镜下照片,碎屑以变质岩和岩浆岩岩屑为主,粒度在 0.12 ~ 12 mm,为线接触 - 凹凸接触

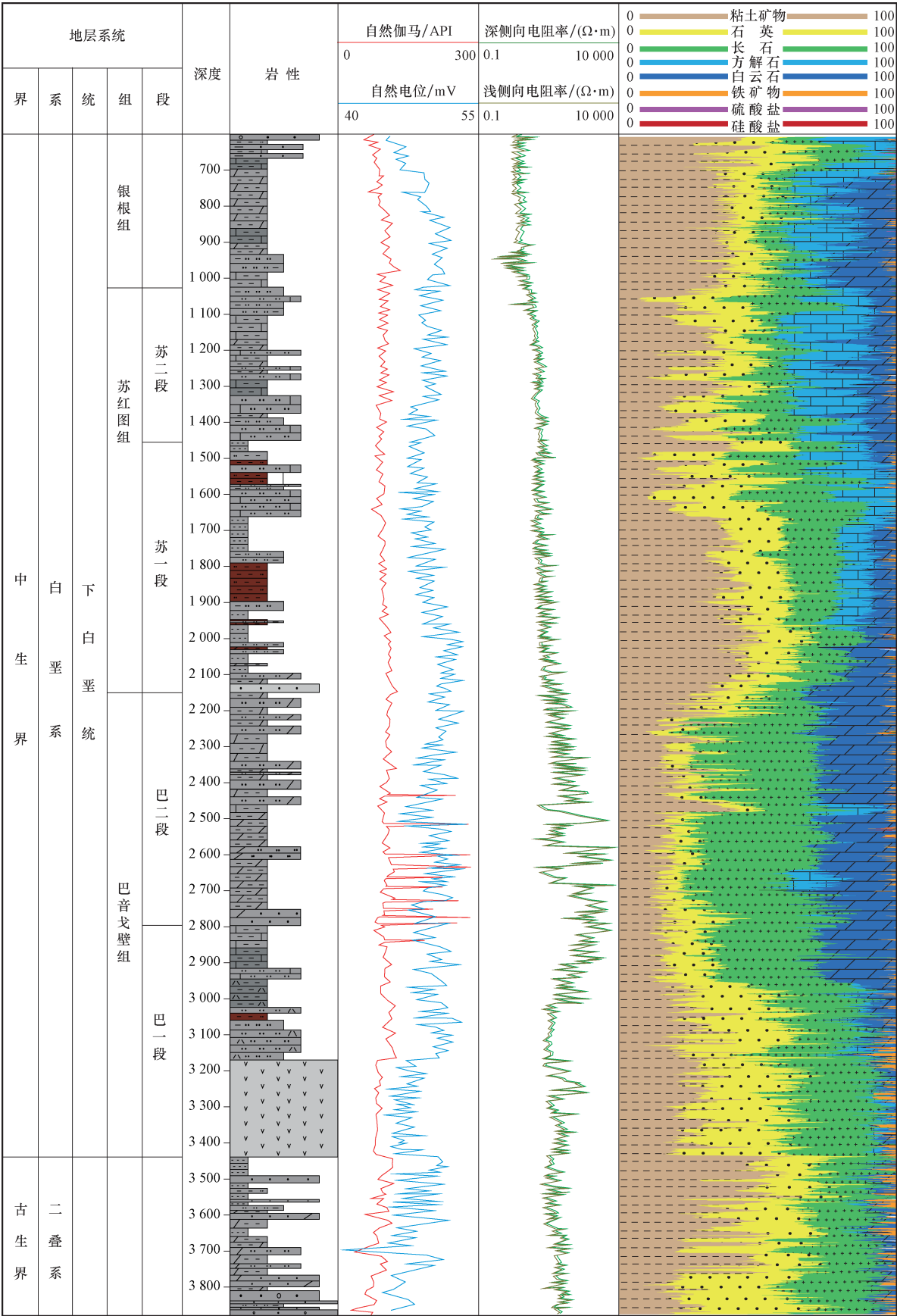


图 9 银额盆地哈日凹陷 YH5 井 X - 衍射矿物柱状图

Fig. 9 Column of X-ray diffraction minerals from Well YH5 in Ha'ri Depression, Yin'e Basin

表 2 银额盆地哈日凹陷 YH5 井各层段 X-衍射矿物组成对比

Table 2 Comparison of X-ray diffraction mineral compositions from the formations of Well YH5 in Ha'ri depression, Yin'e Basin

地层	矿物成分含量/%							
	粘土矿物	石英	长石	方解石	白云石	铁矿物	硫酸盐	硅酸盐
银根组	38.97	14.74	12.62	16.07	16.50	0.55	0.52	—
苏红图组	苏二段	28.95	18.83	18.18	21.48	11.71	0.71	0.13
	苏一段	35.90	21.58	22.73	10.99	7.86	0.74	0.08
巴音戈壁组	巴二段	21.53	12.25	38.19	2.41	24.71	0.81	—
	巴一段	25.23	28.57	32.03	2.26	11.07	0.78	0.06
	火山岩	28.34	31.52	31.97	1.97	3.79	2.19	0.15
晚古界	38.14	26.00	29.32	0.67	3.68	2.04	0.037	—

均含量为 24.81%，而粘土矿物、石英和长石等常见陆源碎屑矿物相对较少(平均为 74.06%)；二叠系碳酸盐矿物相对较少(平均为 4.35%)，粘土矿物、石英和长石等矿物占比较高(平均为 93.46%)，且含有更多的铁矿物(平均为 2.04%)，上下两套地层表现出截然不同的矿物组成特征，也指示研究区白垩系和二叠系形成环境大不相同。根据上下两套地层岩性和矿物的差异，结合其间火山岩年龄测定，认为巴音戈壁组火山岩底面为白垩系与二叠系之间的不整合面，对应 YHC1 井 3 471 m 深度，即断陷初期的拉伸沉降伴随着强烈的火山活动，导致火山岩直接覆盖二叠系剥蚀地层之上。

3.4 地震响应特征

地震反射产生于岩石中具有速度-密度差的物性界面，如地层界面和不整合面等。根据地震反射界面

横向变化、地震反射几何形态和内部结构等可以较好地进行地层划分对比，确定地层界面^[10]。本文在古生物、火山岩锆石年龄和岩石矿物分析基础上，通过 YHC1 井、YH3 井和哈 1 井的合成地震记录标定和 VSP 时深校正，对白垩系与二叠系之间的地震界面进行了识别。从地震剖面看，YHC1 井的高产油气层和火山岩层之下的 SB1 界面(埋深 3 471.0 m)表现出重要地质界面的特征。SB1 界面之上主要表现为湖相泥岩沉积的中强振幅、中连续、平行-亚平行席状地震反射和火山岩相的丘形地震反射，而界面之下主要表现为河流相砂砾岩沉积的高能杂乱地震反射，指示该界面可能是上覆白垩系与下伏二叠系之间的不整合界面。同时，地震反射响应反映出研究区二元结构的地层特征，其上部主要表现为白垩系断陷构造，其下部则表现为石炭系-二叠系逆冲推覆褶皱，这与国内大多数新生代陆内裂陷盆地特征较为相似。

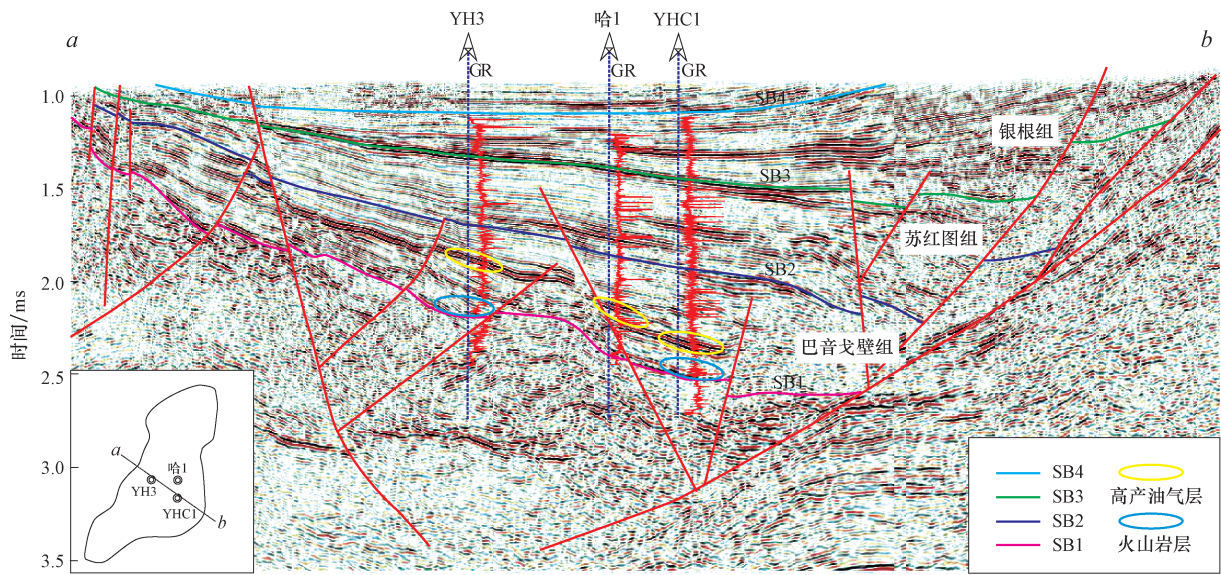


图 10 银额盆地哈日凹陷过井地震剖面

Fig. 10 Through-well seismic profile in Ha'ri Depression, Yin'e Basin

4 油气地质意义

上述研究表明哈日凹陷 YHC1 井新发现的高产油气层应归属下白垩统。这也指示研究区中生界含油气系统在地质历史时期曾发生过油气生成和运聚。银额盆地与相邻的二连盆地^[6]、酒泉盆地^[26]处于相同的大地构造背景,具有类似的油气地质条件,目前在这些盆地内均已发现丰富的中生界油气资源。结合银额盆地已取得的油气勘探成果,笔者认为其下白垩统也同样具有良好的油气勘探潜力。

首先,研究区下白垩统的沉积厚度和分布面积远大于早期勘探认识,因此有利勘探层系将更多,其油气资源量也将更大。YHC1 井与哈日凹陷早期钻探的哈1井^①相比(图4),下白垩统的沉积厚度明显更大。结合三维地震精细解释可知,哈日凹陷下白垩统的地层展布整体呈楔形,向断陷深凹带地层厚度逐渐增加,这修订了前人对该凹陷下白垩统沉积厚度薄,埋藏深度浅的认识。目前研究区深凹带的多口井均获得较好的油气产量,指示凹陷的沉积中心具有良好的油气勘探前景,可作为银额盆地中生界油气勘探的重要方向。

其次,研究区特殊的构造演化与沉积特征有利于油气的生成。研究区下白垩统巴音戈壁组及苏红图组发现的火山岩指示断陷形成时期存在多期次的火山活动。任战利等(2000,2001)根据中国北方中生代沉积盆地的古地温场研究认为阿尔金断裂以西盆地地热梯度较低,阿尔金断裂以东的河西走廊地区、华北地区及东北区盆地地热梯度普遍高于现今地热梯度,该区域中生代晚期地壳深部热活动性较强,存在明显的构造热事件作用^[27-28]。较高的古地温背景及火成岩对加速烃源岩的生烃过程、提高生烃量和生烃速率都具有促进作用。例如,研究区有机地化分析显示距离火山岩较近的层段的泥页岩有机质成熟度(镜质体反射率 R_o)明显偏高^[29-30]。

研究区下白垩统普遍富含方解石、铁白云石等碳酸盐矿物,具有高伽马和高电阻率的电性特征,指示该地区早白垩世发育特殊的断陷湖盆沉积环境。已有研究表明银额盆地地下白垩统富碳酸盐特征可能与断陷期的深部热液活动密切相关,热液携带的热能和大量 Ca^{2+} 、 Mg^{2+} 和 Fe^{2+} 等成矿离子为热水沉积岩的形成提供了有利条件^[31-32]。目前,国内已在酒西盆地、三塘湖盆地、准噶尔盆地、二连盆地以及鄂尔

多斯盆地等多个重要含油气盆地中发现了与热水沉积有关的致密油气储层^[33]。大量研究表明,热液活动不仅对有机质富集和生烃有促进作用,对溶蚀孔洞发育、提高储层物性也有重要影响,热水沉积岩代表一类新型的致密油气层,展示了良好的油气勘探开发潜力。

综上所述,银额盆地哈日凹陷下白垩统是研究区主要勘探目的层,在油气地质评价及有利勘探区带优选时,应重点分析湖相热水沉积的特点和岩浆活动对烃源岩演化及油气成藏的影响。

5 结论

1) 银额盆地哈日凹陷 YHC1 井高产油气段发育早白垩世的孢粉组合,具有与下白垩统一致的矿物组成,而其下部玄武安山岩的锆石 U-Pb 年龄指示火山喷发于早白垩世早期,且地震剖面显示高产油气层段与玄武安山岩均处于断陷构造层内。

2) 古生物化石、火山岩同位素测年、岩石矿物组成及地震反射响应特征等研究表明 YHC1 井新发现的高产油气层段归属于下白垩统,巴音戈壁组火山岩底面即为白垩系与二叠系之间的不整合面。

3) 银额盆地哈日凹陷 YHC1 井高产油气段时代归属的确定对区内资源评价及油气勘探方向选择具有重要意义,表明银额盆地地下白垩统具有良好的油气勘探潜力。

参考文献

- [1] 郭彦如,王新民,刘文岭. 银根—额济纳旗盆地含油气系统特征与油气勘探前景[J]. 大庆石油地质与开发,2000,19(6):4-8.
Guo Yanru, Wang Xinmin, Liu Wenling. Characteristic of hydrocarbon system and exploration prospect of Yingen-Ejina banner basin [J]. Petroleum Geology & Oilfield Development in Daqing, 2000, 19(6):4-8.
- [2] 吴茂炳,王新民. 银根—额济纳旗盆地油气地质特征及油气勘探方向[J]. 中国石油勘探,2003,8(4):45-49.
Wu Maobing, Wang Xinmin. Petroleum geological characteristics and prospecting directions for oil and gas in Yingen-Ejinaqi Basin [J]. China Petroleum Exploration, 2003, 8(4):45-49.
- [3] 陈启林,卫平生,杨占龙. 银根—额济纳盆地构造演化与油气勘探方向[J]. 石油实验地质,2006,28(4):311-315.
Chen Qilin, Wei Pingsheng, Yang Zhanlong. Tectonic evolution and petroleum prospect in the Yingen-Ejina Basin [J]. Petroleum Geology & Experiment, 2006, 28(4):311-315.

① 秦云龙. 银根—额济纳旗盆地哈日凹陷哈1单井综合评价. 中国石油华北油气分公司勘探开发研究院,1998.

- [4] 刘春燕,林畅松,吴茂炳,等. 银根—额济纳旗中生代盆地构造演化及油气勘探前景[J]. 中国地质,2006,33(6):1328–1335.
Liu Chunyan, Lin Changsong, Wu Maobin, et al. Tectonic evolution and petroleum prospects of the Mesozoic Inggeng-Ejin Qi basin, Inner Mongolia[J]. Geology in China, 2006, 33(6):1328–1335.
- [5] 卫平生. 银根—额济纳旗盆地油气地质特征及勘探前景[M]. 石油工业出版社, 2006.
Wei Pinsheng. Hydrocarbon geological characteristics and exploration prospect of Yingen-Ejina Basin[M]. Petroleum Industry Press, 2006.
- [6] 卫平生,张虎权,陈启林,等. 银根—额济纳旗盆地与二连盆地石油地质特征比较分析[J]. 中国石油勘探,2007,12(1):33–37.
Wei Pinsheng, Zhang Huquan, Chen Qilin, et al. Comparative analysis of petroleum geological features between Yingen-Ejinaqi Basin and Erlian Basin[J]. China Petroleum Exploration, 2007, 12(1):33–37.
- [7] 李明杰,郑孟林,曹春潮,等. 北山—阿拉善地区侏罗—白垩纪盆地的叠合演化[J]. 石油与天然气地质,2004,25(1):54–57.
Li Mingjie, Zheng Menglin, Cao Chunchao, et al. Evolution of superposed Jurassic and Cretaceous basins in Beishan-Alxa area[J]. Oil & Gas Geology, 2004, 25(1):54–57.
- [8] 卫平生,姚清洲,吴时国. 银根—额济纳旗盆地白垩纪地层、古生物群和古环境研究[J]. 西安石油大学学报(自然科学版),2005,20(2):17–21.
Wei Pinsheng, Yao Qingzhou, Wu Shiguo. Study on Cretaceous stratum, Palaeobiota and Palaeoclimate of Yin'gen-Ejinaqi Basin[J]. Journal of Xi'an Shiyou University (Natural Science Edition), 2005, 20(2):17–21.
- [9] 史冀忠,陈高潮,姜亭,等. 内蒙古西部银额盆地及邻区二叠系隆林阶—冷坞阶层序地层格架[J]. 地质通报,2012,31(10):1657–1668.
Shi Jizhong, Chen Gaochao, Jiang Tin, et al. The sequence stratigraphic framework of Permian Longlinian-Lengwan Stage in Yingen-Ejin Banner basin and its adjacent areas, western Inner Mongolia[J]. Geological Bulletin of China, 2012, 31(10):1657–1668.
- [10] 魏仙样,卢进才,魏建设,等. 内蒙古银额盆地居延海拗陷 X 井地层划分修正及其油气地质意义[J]. 地质通报,2014,33(9):1409–1416.
Wei Xianyang, Lu Jincai, Wei Jianshe, et al. The revision of stratigraphic division of X well in Juyanhai depression, Yingen-Ejin Banner basin, Inner Mongolia, and its geological significance[J]. Geological Bulletin of China, 2014, 33(9):1409–1416.
- [11] 卢进才,宋博,牛亚卓,等. 银额盆地哈日凹陷 Y 井天然气产层时代厘定及其意义[J]. 地质通报,2018,37(1):93–99.
Lu Jincai, Song Bo, Niu Yazhuo, et al. The age constraints on natural gas strata and its geological significance of Well Y in Hari depression, Yingen-Ejin basin[J]. Geological Bulletin of China, 2018, 37(1):93–99.
- [12] 赵春晨,刘护创,任来义,等. 银额盆地 YHC1 井白垩系气藏形成的地质环境及其远景意义[J]. 天然气地球科学,2017,28(3):439–451.
Zhao Chunchen, Liu Huchuang, Ren Laiyi, et al. Geological environment and prospective significance of Cretaceous gas reservoir in Well YHC1 of Yin E Basin[J]. Natural Gas Geoscience, 2017, 28(3):439–451.
- [13] 陈治军,高怡文,刘护创,等. 银根—额济纳旗盆地哈日凹陷下白垩统烃源岩地球化学特征与油源对比[J]. 石油学报,2018,39(1):69–81.
Chen Zhijun, Gao Yiwen, Liu Huchuang, et al. Geochemical characteristics of Lower Cretaceous source rocks and oil-source correlation in Hari sag, Yingen–Ejinaqi Basin[J]. Acta Petrolei Sinica, 2018, 39(1):69–81.
- [14] 王香增,陈治军,任来义,等. 银根—额济纳旗盆地苏红图坳陷 H 井锆石 LA–ICP–MSU–Pb 定年及其地质意义[J]. 沉积学报,2016,34(5):853–867.
Wang Xiangzeng, Chen Zhijun, Ren Laiyi, et al. U–Pb age of zircon and its geological significance in Suhongtu Depression, Yingen-Ejinaqi Basin[J]. Acta Sedimentologica Sinica, 2016, 34(5):853–867.
- [15] 卢进才,张洪安,牛亚卓,等. 内蒙古西部银额盆地石炭系—二叠系油气地质条件与勘探发现[J]. 中国地质,2017,44(1):13–32.
Lu Jincai, Zhang Hongan, Niu Yazhuo, et al. Carboniferous-Permian petroleum conditions and exploration breakthrough in the Yingen-Ejin Basin in Inner Mongolia[J]. Geology in China, 2017, 44(1):13–32.
- [16] 赵省民,陈登超,邓坚. 银根—额济纳旗及邻区石炭系—二叠系的沉积特征及石油地质意义[J]. 地质学报,2010,84(8):1183–1194.
Zhao Xingmin, Chen Dengchao, Deng Jian. Depositional characteristic of Permo-Carboniferous System from Yingen-Ejinaqi and their surrounding areas, Inner Mongolia, China and its implications for petroleum[J]. Acta Geologica Sinica, 2010, 84(8):1183–1194.
- [17] 郭彦如,于均民,樊太亮. 查干凹陷下白垩统层序地层格架与演化[J]. 石油与天然气地质,2002,23(2):166–169.
Guo Yanru, Yu Junmin, Fan Tailiang. Evolution and sequence stratigraphic framework of lower Cretaceous in Chagan depression[J]. Oil & Gas Geology, 2002, 23(2):166–169.
- [18] 万传彪,孙跃武,薛云飞,等. 松辽盆地西部斜坡区新近纪孢粉组合及其地质意义[J]. 中国科学:地球科学,2014,44(7):1429–1442.
Wan Chuanbiao, Sun Yuewu, Xue Yunfei, et al. Neogene palynological assemblages in the west slope of Songliao Basin and their geological implications[J]. Science China: Earth Sciences, 2014, 44(7):1429–1442.
- [19] Yi S, Yi S, Batten D J, et al. Cretaceous and Cenozoic non-marine deposits of the Northern South Yellow Sea Basin, offshore western Korea: Palynostratigraphy and Palaeoenvironments[J]. Palaeogeography Palaeoclimatology Palaeoecology, 2003, 191(1):15–44.
- [20] Andersen T. Correction of common lead in U–Pb analyses that do

- not report 204 Pb[J]. *Chemical Geology*, 2002, 192(1): 59–79.
- [21] 李瑞磊, 朱建峰, 刘玮, 等. 松辽盆地长岭断陷火山岩锆石 U–Pb 测年及其地质意义[J]. *石油与天然气地质*, 2015, 36(5): 736–744.
- Li Ruilei, Zhu Jianfeng, Liu Wei, et al. Zircon U–Pb dating of volcanic rocks of Changling Fault Depression in the southern Songliao Basin and its geological significance[J]. *Oil & Gas Geology*, 2015, 36(5): 736–744.
- [22] 刘晔, 柳小明, 胡兆初, 等. ICP–MS 测定地质样品中 37 个元素的准确度和长期稳定性分析[J]. *岩石学报*, 2007, 23(5): 1203–1210.
- Liu Ye, Liu Xiaoming, Hu Zhaochu, et al. Evaluation of accuracy and long-term stability of determination of 37 trace elements in geological samples by ICP-MS[J]. *Acta Petrologica Sinica*, 2007, 23(5): 1203–1210.
- [23] Hoskin P O W. The composition of zircon and igneous and metamorphic petrogenesis[J]. *Rev. Miner Geochem*, 2003, 53(1): 27–62.
- [24] 钟福平, 钟建华, 王毅, 等. 银根—额济纳旗盆地苏红图坳陷早白垩世火山岩对阿尔金断裂研究的科学意义[J]. *地学前缘*, 2011, 18(3): 233–240.
- Zhong Fuping, Zhong Jianhua, Wang Yi, et al. The early Cretaceous volcanic rocks in Suhongtu depression in Yingen-Ejina qi basin: its scientific significance to the research of Altun fault[J]. *Earth Science Frontiers*, 2011, 18(3): 233–240.
- [25] 郑荣国, 李锦轶, 肖文交, 等. 阿拉善地块北缘恩格尔乌苏地区发现志留纪侵入体[J]. *地质学报*, 2016, 90(8): 1725–1736.
- Zheng Rongguo, Li Jinyi, Xiao Wenjiao, et al. Discovery of silurian pluton in the Enger Us region in the northern margin of Alxa block [J]. *Acta Geologica Sinica*, 2016, 90(8): 1725–1736.
- [26] 郭迎春, 宋岩, 方欣欣, 等. 酒泉盆地青西凹陷下沟组混积层系致密油成藏机理与富集影响因素[J]. *石油与天然气地质*, 2018, 39(4): 766–777.
- Guo Yingchun, Song Yan, Fang Xinxin, et al. Tight oil accumulation mechanism and controlling factors for enrichment in mixed siliciclastic and carbonate sequences in the Xiagou Formation of Qingxi Sag, Jiuquan Basin[J]. *Oil & Gas Geology*, 2018, 39(4): 766–777.
- [27] 任战利. 中国北方沉积盆地热演化史的对比[J]. *石油与天然气地质*, 2000, 21(1): 33–37.
- Ren Zhanli. Comparison of Thermal Evolution History in Sedimentary Basins, North China[J]. *Oil & Gas Geology*, 2000, 21(1): 33–37.
- [28] 任战利, 赵重远. 中生代晚期中国北方沉积盆地地热梯度恢复及对比[J]. *石油勘探与开发*, 2001, 28(6): 1–4.
- Ren Zhanli, Zhao Zhongyuan. Recovery and comparison of geothermal gradient for the Late Mesozoic sedimentary basins in the Northern part of China[J]. *Petroleum Exploration & Development*, 2001, 28(6): 1–4.
- [29] Yang P, Ren Z, Xia B, et al. The Lower Cretaceous source rocks geochemical characteristics and thermal evolution history in the HaRi Sag, Yin-E Basin [J]. *Petroleum Science and Technology*, 2017, 35(12): 1304–1313.
- [30] 祁凯, 任战利, 崔军平, 等. 银额盆地苏红图坳陷西部中生界烃源岩热演化史恢复[J]. *地球科学*, 2018, 43(6): 1957–1971.
- Qi Kai, Ren Zhanli, Cui Junping, et al. Mesozoic and Cenozoic thermal history and source rocks modeling for Mesozoic in the western of Suhongdu Depression, Inner Mongolia, Northern China [J]. *Earth Science*. 2018, 43(6): 1957–1971.
- [31] 陈志鹏, 任战利, 于春勇, 等. 银额盆地哈日凹陷下白垩统热水沉积岩特征及成因[J]. *地球科学*, 2018, 43(6): 1941–1956.
- Chen Zhipeng, Ren Zhanli, Yu Chunyong, et al. Characteristics and genetic analysis of hydrothermal sediment of Lower Cretaceous in Hari depression, Yin'E Basin [J]. *Earth Science*. 2018, 6: 1941–1956.
- [32] 魏巍, 朱筱敏, 谈明轩, 等. 查干凹陷早白垩世热流体活动的证据及其对巴音戈壁组碎屑岩储层的影响[J]. *石油与天然气地质*, 2017, 38(2): 270–280.
- Wei Wei, Zhu Xiaomin, Tan Mingxuan, et al. The Early Cretaceous thermal fluid activities and their impacts on clastic reservoir rocks in the Bayingebi Formation of Chagan Sag [J]. *Oil & Gas Geology*, 2017, 38(2): 270–280.
- [33] 钟大康, 姜振昌, 郭强, 等. 热水沉积作用的研究历史、现状及展望[J]. *古地理学报*, 2015, 17(3): 285–296.
- Zhong Dakang, Jiang Zhenchang, Guo Qiang, et al. A review about research history, situation and prospects of hydrothermal sedimentation [J]. *Journal of Palaeogeography*, 2015, 17(3): 285–296.

(编辑 董立)