

doi: 10.12029/gc20160417

王艳清, 张永庶, 夏志远, 等. 柴达木盆地一里坪坳陷新生界咸化特征及生烃潜力分析[J]. 中国地质, 2016, 43(4): 1317-1330.

Wang Yanqing, Zhang Yongshu, Yang Zhiyuan, et al. An analysis of Cenozoic hydrocarbon generation potential and salty characteristics of Yiliping depression in Qaidam basin[J]. Geology in China, 2016, 43(4): 1317-1330(in Chinese with English abstract).

## 柴达木盆地一里坪坳陷新生界咸化特征及 生烃潜力分析

王艳清<sup>1</sup> 张永庶<sup>2</sup> 夏志远<sup>1</sup> 杨体源<sup>2</sup> 宋光永<sup>1</sup> 徐 峰<sup>2</sup> 刘占国<sup>1</sup>

(1. 中国石油杭州地质研究院, 浙江 杭州 310023; 2. 中国石油青海油田勘探开发研究院, 甘肃 敦煌 736202)

**摘要:**柴达木盆地目前所发现的油气都围绕着侏罗系、古近—新近系及第四系富烃洼陷区分布。近年来,围绕“富烃洼陷”油气勘探,发现了昆北和英东两个“亿吨级”油田、阿尔金山前东段“千亿方”天然气及扎哈泉“亿吨级”致密油勘探区,勘探成效显著。随着柴达木盆地建设千万吨高原油气田及新区、新领域勘探的迫切需求,借助于中国石油重大科技专项,利用硼元素及黏土矿物资料,引用科奇公式开展古水体盐度恢复,明确柴达木盆地新生界为咸化湖盆沉积。从柴达木盆地新生界咸化特征及与已知富烃洼陷进行类比,结合一里坪坳陷周缘有机地球化学测试资料,提出一里坪坳陷为潜在的生烃洼陷,可能为新的富烃洼陷,围绕该洼陷进行油气勘探将是一个新的接替领域,对柴达木盆地油气勘探具有重大战略意义。

**关键词:**一里坪坳陷; 新生界; 咸化特征; 生烃潜力

中图分类号:P618.130.1 文献标志码:A 文章编号:1000-3657(2016)04-1317-14

### An analysis of Cenozoic hydrocarbon generation potential and salty characteristics of Yiliping depression in Qaidam basin

WANG Yan-qing<sup>1</sup>, ZHANG Yong-shu<sup>2</sup>, XIA Zhi-yuan<sup>1</sup>, YANG Ti-yuan<sup>2</sup>,  
SONG Guang-yong<sup>1</sup>, XU Feng<sup>2</sup>, LIU Zhan-guo<sup>1</sup>

(1. PetroChina Hangzhou Research Institute of Geology, Hangzhou 310023, Zhejiang, China; 2. PetroChina Qinghai Oilfield Company, Dunhuang 736202, Ganshu, China)

**Abstract:** So far, both oil and gas found in Qaidam Basin are distributed around the Jurassic, Tertiary and Quaternary hydrocarbon-rich sub-sag areas. In recent years, surrounding hydrocarbon-rich depression in petroleum exploration, Kunbei and Yingdong, the two “hundred million tons grade” oilfields, “hundred billion cubic meters” gas in the eastern front part of Altun Mountain and “hundred million tons grade” tight oil in Zhahaquan exploration area have been discovered, and the exploration has made great success. Along with the construction of ten million tons of plateau oil and gas fields in Qaidam Basin and the urgent need of finding

收稿日期:2015-07-21; 改回日期:2015-11-05

基金项目:中国石油天然气股份有限公司重大科技专项“柴达木盆地建设千万吨油气田综合配套技术研究”(编号2011E-03)资助。

作者简介:王艳清,男,1973年生,高级工程师,主要从事沉积学研究;wangyq\_hz@petrochina.com.cn。

new fields and new exploration areas and with the aid of major science and technology projects of Petro China, the authors used the data of boron element and clay minerals and employed Couch formula to carry out paleosalinity recovery, and finally confirmed that the Cenozoic sediment is salty lake deposition in Qaidam Basin. Comparing the Cenozoic salty characteristics of Qaidam basin with those of known hydrocarbon-rich depression in combination with organic geochemical test data of Yiliping depression, the authors hold that Yiliping depression is a potential hydrocarbon generation depression and is probably a new hydrocarbon-rich one. The oil and gas exploration surrounding the depression will be a new successive field and should have important strategic significance in oil and gas exploration in Qaidam Basin.

**Key words:** Yiliping depression; Cenozoic; salty characteristics; hydrocarbon potential

**Fund support:** Supported by the Major Science and Technology Project of Petro China, "Comprehensive Technology Research on Constructing Ten Million Tons of Oil and Gas Fields in Qaidam Basin" (No. 2011E-03).

## 1 引 言

一里坪坳陷位于柴达木盆地中部地区(图1),隶属于盆地内的一级构造单元,向东与柴北缘隆起带相接,向南与三湖坳陷相连,向西则为柴西隆起区,分布面积7552 km<sup>2</sup>,沉降中心的最达厚度可达17000 m,为柴达木盆地新生界沉积最厚区。

一里坪坳陷为一长期继承性发育的沉降中心和可能的沉积中心,发育有中下侏罗统和古近系—新近系等多套烃源岩,洼陷区沉积厚度巨大,地

球物理方法解释最大沉积厚度上万米,本区没有探井揭示深层(本文指新生界古近系及其以下地层)特征,区内最深的探井早2井深度达6000 m,钻达层位为新近系下油砂山组,一里坪坳陷深层是否为沉积中心仍然是未知,但这决定着该洼陷是否为富烃中心。中国石油杭州地质研究院以寿建峰教授为首的科研团队(1998—2015年)在柴达木盆地长期从事沉积储层研究工作,综合研究认为一里坪坳陷为生烃洼陷,并从古近纪—新近纪湖平面的变化和陆源碎屑的供给量与沉降—沉积中心关系、沉积速

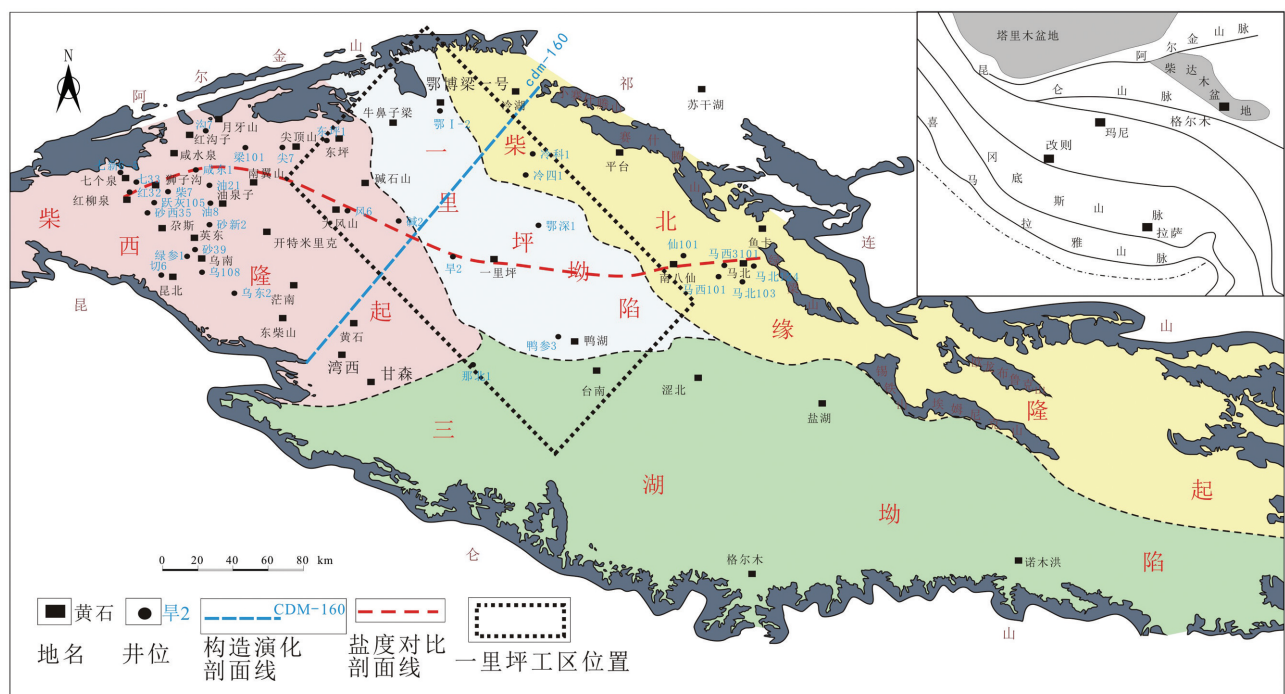


图1 一里坪坳陷工区位置图

Fig.1 Location of the working area in Yiliping depression

率与深水沉积环境关系以及盆地深部结构和基底性质与构造沉降量关系等多方面进行了论证。本文从柴达木盆地新生界湖盆咸化特征角度论证其为沉积中心(富烃中心),并结合有机地球化学测试资料分析其具备一定的生烃潜力。

古盐度是古代沉积物中水体盐度的记录,可作为分析地质历史中沉积环境特征的一个重要信息。在 Walker<sup>[1-2]</sup>等将古盐度从定性分析转为定量计算后,Adams<sup>[3]</sup>等和 Couch<sup>[4]</sup>通过经验公式进一步提高了古盐度的定量计算精度。

古盐度判别和测定方法众多<sup>[5-7]</sup>,如应用古生物、岩矿和古地理资料定性描述水体盐度;应用常量和微量元素地球化学方法半定量划分水体盐度;应用间隙流体或液相包裹体直接测量盐度;应用沉积磷酸盐<sup>[8]</sup>或硼和黏土矿物资料定量计算古盐度等方法<sup>[8-10]</sup>。在微量元素中,硼元素对于盐度反映比较敏感,硼元素在各种地球化学分析中是比较容易测定的元素<sup>[11-13]</sup>,应用硼和黏土矿物资料定量计算古盐度的方法以亚当斯和科奇两公式的应用最为广泛。

## 2 一里坪坳陷咸化程度及沉积特征

### 2.1 一里坪坳陷咸化程度

众多研究学者都对柴达木盆地新生界湖盆沉积特征及水体特征进行过研究<sup>[14-16]</sup>,但根据所发表的文献及前人的研究成果报告调研,未查到具体的古盐度数据及恢复方法。因此,本文系统开展了古盐度定量化恢复、古盐度变化特征等研究。

#### 2.1.1 古盐度恢复

厚层泥岩段反映了水体相对稳定、受物源供给影响相对较弱,能较好地真实反映水体环境。本次对厚层泥岩段进行了系统取样,共对165口井采取了699块泥岩,进行了黏土矿物相对含量、微量元素的测试。其中,黏土矿物相对含量测试在中国石化江苏油田分公司地质科学研究院勘探开发实验中心完成,测试仪器为X射线衍射仪Ultima IV(G03333-1),检测依据:SY/T 5163-2010《沉积岩中黏土矿物和常见非黏土矿物X衍射分析方法》,环境条件为温度25℃、湿度50%;微量元素在国土资源部杭州矿产资源监督检测中心完成,测试仪器为Thermi X Series II 电感耦合等离子体质谱联用仪(SN01426C),检测依据DZ/T 0223-2001《电感耦

合等离子体质谱(ICP-MS)方法通则》,环境条件为温度20℃、湿度45%。

柴达木盆地新生界地层中黏土矿物类型比较多,伊利石、蒙脱石、高岭石、伊蒙混层、绿蒙混层均有,不同类型的黏土矿物对硼元素吸附性有一定差异性,因此在进行古盐度恢复之前,首先要对硼含量进行校正。对样品硼含量校正是基于各类黏土矿物所吸附硼的总含量与样品硼含量的比值关系,根据不同黏土矿物的含量及其对硼吸收强度的差异性,利用科奇校正公式:

$$B' = B_{\text{样品}} / (4X_i + 2X_m + X_k)$$

式中 $B'$ 指“校正硼”含量, $X_i$ 、 $X_m$ 、 $X_k$ 分别代表样品中实测伊利石、蒙脱石和高岭石的重量百分数,系数代表各类黏土矿物对硼的吸收强度,以系数越大为越强。

根据实测黏土矿物、微量元素数据进行硼含量校正后,利用科奇公式进行古盐度恢复(表1),科奇公式:

$$Sp = (\lg B' - 0.11) / 1.28$$

式中: $Sp$ 为古盐度; $B'$ 为校正硼。

另外,本次研究还对其中的46口井87块样品进行了碳-氧同位素测试,利用Keith和Weber提出的同位素系数( $Z$ )经验公式: $Z = 2.048(^{13}\text{C} + 50) + 0.498(^{18}\text{O} + 50)$ ,其中 $^{13}\text{C}$ 和 $^{18}\text{O}$ 均为PDB标准,认为大于120时为海相灰岩,小于120时为淡水灰岩(湖相碳酸岩)。

根据恢复的古盐度与同位素计算的“ $Z$ ”值(表1)进行拟合,二者有较好的线性相关性(图2),相关公式为 $Sp = 0.7516 Z - 73.548$ ,相关系数 $R^2$ 为0.68,可以利用“ $Z$ ”值定量化地计算古盐度。

根据科奇公式恢复的古盐度来看,古盐度( $Sp$ )>6‰,对应于利用碳-氧同位素法计算出的 $Z$ 值为110~130,说明柴达木盆地新生界为陆相咸化湖盆的沉积。

#### 2.1.2 一里坪坳陷咸化特征

由于一里坪坳陷没有钻探资料提示实际地质特征,依靠地震资料确定其新生界地层最大沉积厚度上万米,但其内部充填物特征不清。本文依据不同层位的古盐度变化趋势特征(图3,剖面位置见图1),认为其属于咸化中心,证据如下:

首先,虽然一里坪坳陷深层没有钻探资料,但

表1 柴达木盆地新生代碳氧同位素恢复的“Z”值与古盐度对比数据(部分数据)

Table 1 The contrast data of paleosalinity with “Z” value recovered from the Cenozoic carbon and oxygen isotopes in Qaidam Basin (partial data)

井号	层位	Z值	古盐度/‰	井号	层位	Z值	古盐度/‰
柴7	N <sub>2</sub> <sup>1</sup>	118.80	18.9	马北103	E <sub>3</sub> <sup>1</sup>	111.17	9.6
柴7	N <sub>1</sub>	117.27	17.9	马北124	E <sub>3</sub> <sup>1</sup>	112.24	11.6
东坪1	N <sub>2</sub> <sup>1</sup>	123.37	21.4	马西101	E <sub>3</sub> <sup>1</sup>	114.54	14.3
东坪1	E <sub>3</sub> <sup>2</sup>	114.80	14.5	马西3	E <sub>3</sub> <sup>1</sup>	114.27	12.4
东坪1	E <sub>3</sub> <sup>1</sup>	110.23	6.7	那北1	N <sub>2</sub> <sup>1</sup>	117.28	14.5
鄂深1	N <sub>2</sub> <sup>1</sup>	116.46	16.1	七33	E <sub>3</sub> <sup>1</sup>	122.54	21.9
风6	N <sub>2</sub> <sup>1</sup>	125.92	18.5	七新5-7	E <sub>3</sub> <sup>2</sup>	119.11	11.8
风6	N <sub>2</sub> <sup>1</sup>	123.71	18.5	切6	E <sub>3</sub> <sup>1</sup>	116.56	9.6
沟6	N <sub>2</sub> <sup>1</sup>	120.56	20.3	砂39	N <sub>1</sub>	119.04	18.9
沟6	N <sub>1</sub>	124.05	16.6	砂西35	E <sub>3</sub> <sup>1</sup>	115.18	14.7
沟7	E <sub>3</sub> <sup>2</sup>	116.56	15.6	砂新2	N <sub>1</sub>	119.15	19.4
红32	E <sub>3</sub> <sup>1</sup>	114.28	13.5	砂新2	E <sub>3</sub> <sup>2</sup>	117.85	17.5
尖7	E <sub>3</sub> <sup>2</sup>	116.84	17.4	乌108	N <sub>2</sub> <sup>1</sup>	124.93	19.9
碱2	N <sub>2</sub> <sup>1</sup>	121.30	16.2	乌东2	N <sub>1</sub>	125.79	18.7
碱2	N <sub>2</sub> <sup>1</sup>	119.28	16.2	仙101	N <sub>2</sub> <sup>1</sup>	116.69	12.8
碱2	N <sub>1</sub>	117.20	11.8	仙101	E <sub>3</sub> <sup>2</sup>	115.20	13.8
冷科1	N <sub>1</sub>	129.55	20.4	咸东1	N <sub>2</sub> <sup>1</sup>	121.55	17.8
冷四1	E <sub>3</sub> <sup>1</sup>	115.12	9.4	油21	N <sub>2</sub> <sup>1</sup>	119.68	17.4
梁101	N <sub>2</sub> <sup>1</sup>	128.35	25.9	油8	N <sub>2</sub> <sup>1</sup>	127.44	23.3
梁101	N <sub>2</sub> <sup>1</sup>	128.66	25.9	油8	E <sub>3</sub> <sup>2</sup>	117.52	12.8
绿参1	N <sub>1</sub>	120.42	19.9	跃灰105	E <sub>3</sub> <sup>2</sup>	124.88	17.6

注: N<sub>2</sub><sup>1</sup>-下油砂山组; N<sub>1</sub>-上干柴沟组; E<sub>3</sub><sup>2</sup>-下干柴沟组上段; E<sub>3</sub><sup>1</sup>-下干柴沟组下段(井位置见图1)。

是从下干柴沟组下段(图3-a)古盐度变化趋势来看,从大风山—碱山水下低隆起区向东到一里坪坳陷,古盐度有增大的趋势;从马北—南八仙斜坡区向西到一里坪坳陷,古盐度有增大的趋势,结合两侧古盐度数据来看,一里坪坳陷古盐度>10‰,在一里坪坳陷北侧的鄂I-2井实测古盐度为14.2‰。

其次,从有钻探资料的下油砂山组(图3-d)古盐度变化特征来看,一里坪坳陷古盐度大于15‰,为咸化中心。虽然下干柴沟组上段(图3-b)、上干柴沟组(图3-c)时期古盐度数据显示从大风山—碱山水下低隆起区向东至马北—南八仙斜坡区有增大趋势,但是从下干柴沟组下段到下油砂山组沉积时期,柴达木盆地处于湖盆的持续坳陷阶段,期间不

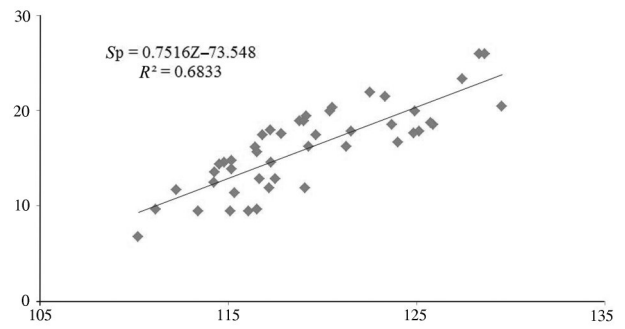


图2 古盐度与碳氧同位素Z值相关关系图  
Fig.2 The correlation relationship of paleosalinity and Z value of carbon and oxygen isotopes

存在盆地内部差异性隆升,以此判断这两个时期一里坪坳陷也应该为一个咸化中心。

通过对柴达木盆地新生代不同时期古盐度纵向、横向的变化特征对比分析,古近系沉积时期一里坪坳陷与红狮洼陷咸化中心相似,亦为咸化中心。结合盆地构造演化、湖盆演化特征及古气候变化特征,认为一里坪坳陷从早到晚,咸化程度逐渐加强,但一直为咸化中心。

### 2.1.3 柴达木盆地新生代湖盆咸化演化特征

根据柴达木盆地新生代165口井699块样品所进行的古盐度定量恢复数据,编制了下干柴沟组下段、下干柴沟组上段、上干柴沟组、下油砂山组和上油砂山组5个地层单元的古盐度平面图,各时期变化特征如下:

下干柴沟组下段沉积时期(图4),柴达木盆地存在东、西两个咸化湖盆中心,东部湖盆咸化中心位于鄂博梁一号附近(位于一里坪坳陷北侧),最高盐度值可达14‰左右,多数地区的古盐度在10‰~14‰,祁连山山前带古盐度较低,多低于8‰;西部咸化湖盆中心位于狮子沟、咸水泉、油泉子等地区,盐度多在16‰以上,多数地区的古盐度在10‰~16‰,阿尔金山山前带、昆仑山山前带古盐度多低于8‰。而两个咸化湖盆中心的分隔带位于碱石山—黄石等地区,呈北东—南西向展布,盐度在8‰~10‰。

下干柴沟组上段时期(图5),柴达木盆地仍存在东、西两个有别的咸化湖盆中心,东部咸化湖盆中心由鄂博梁一号向南迁移至一里坪地区,最达盐度值可达18‰左右,多数地区的古盐度在14‰~18‰,祁连山山前带古盐度较低,多低于10‰;西部

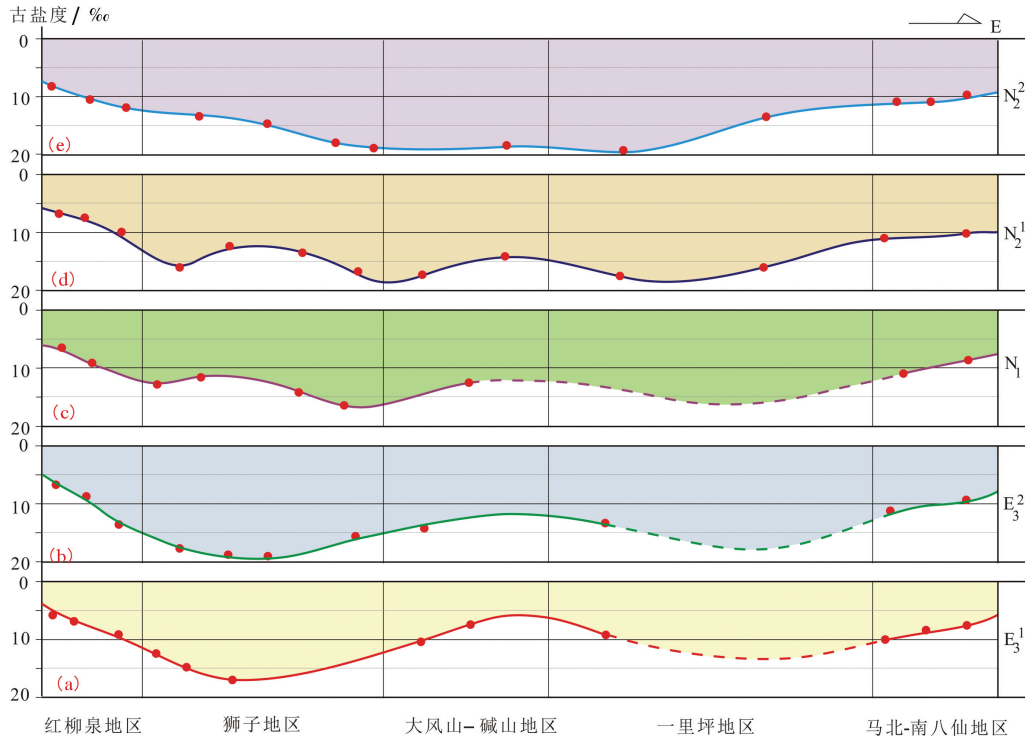


图3 柴达木盆地新生界古盐度变化对比图(剖面位置见图1;红色点为根据样品测试数据恢复的古盐度数值,蓝色箭头代表着古盐度变化趋势)

( $N_2^2$ —上油砂山组; $N_2^1$ —下油砂山组; $N_1$ —上干柴沟组; $E_3^2$ —下干柴沟组上段; $E_3^1$ —下干柴沟组下段)

Fig.3 The contrast diagram of variation of Cenozoic paleosalinity in Qaidam Basin

( $N_2^2$ —Upper youshashan Formation;  $N_2^1$ —Lower Youshashan Formation;  $N_1$ —Upper Ganchaigou Formation;  $E_3^2$ —The upside of Lower Ganchaigou Formation;  $E_3^1$ —The Lower segment of Ganchaigou Formation)

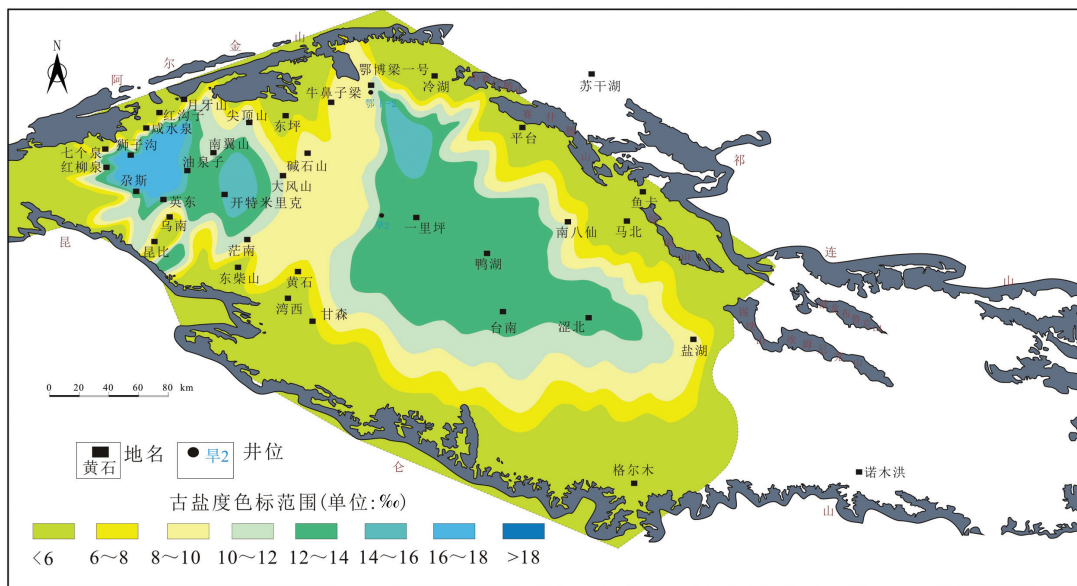


图4 柴达木盆地地下干柴沟组下段古盐度平面图

Fig.4 The plan view of paleosalinity in the lower segment of Ganchaigou Formation, Qaidam Basin

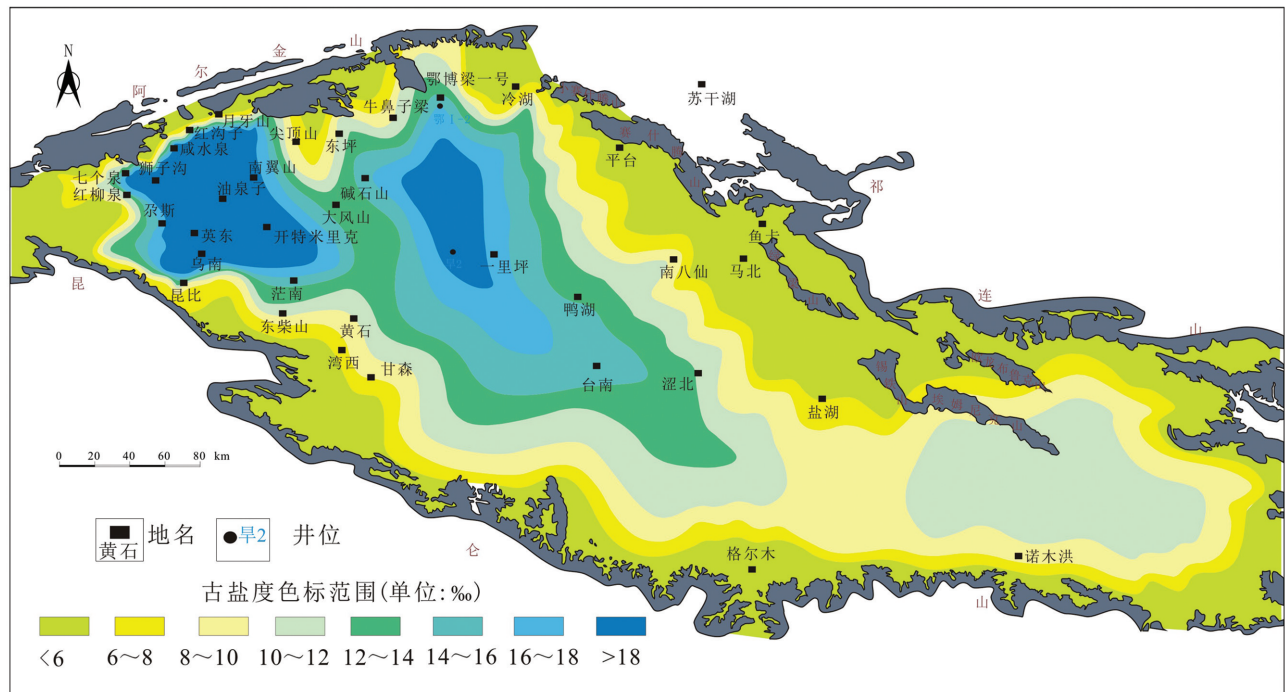


图5 柴达木盆地地下干柴沟组上段古盐度平面图

Fig.5 The plan view of paleosalinity in the upside of Lower Ganchaigou Formation, Qaidam Basin

咸化湖盆中心范围扩大,位于狮子沟、咸水泉、油泉子、乌南、茫南等地区,盐度多在18‰以上,阿尔金山山前带、昆仑山山前带古盐度多低于10‰。而两个咸化湖盆中心的分隔带仍位于碱石山以西及黄石以北等地区,呈北东—南西向展布,较 $E_3$ 时期范围有所减小,盐度在12‰~14‰,两个咸化湖盆中心在盐度达12‰左右时形成统一的咸化湖盆。

上干柴沟组沉积时期(图6),柴达木盆地仍存在东、西两个有别的咸化湖盆中心,东部咸化湖盆中心仍位于一里坪地区,最大盐度值可达18‰左右,多数地区的古盐度在14‰~18‰,祁连山山前带古盐度较低,多低于10‰;但西部咸化湖盆中心较下干柴沟组上段时期有一定的变化,分成两个次一级的咸化湖盆中心,北面的咸化湖盆中心位于狮子沟—咸水泉地区,盐度大于16‰,南面的咸化湖盆中心位于英东—油泉子—大风山等地区,盐度大于16‰,两个次级咸化湖盆中心的分隔带位于油泉子北—南翼山地区,盐度在12‰~14‰。东西两个咸化湖盆中心的分隔带仍位于碱石山以西及黄石以北等地区,呈北东—南西向展布,盐度在12‰~14‰,两个咸化湖盆中心在盐度达12‰左右时形成统一

的咸化湖盆。

下油砂山组沉积时期(图7),继承了 $N_1$ 的基本格局,柴达木盆地仍存在东、西两个有别的咸化湖盆中心,东部咸化湖盆中心位于一里坪地区,范围较上干柴沟组时期扩大,最大盐度值可达18‰左右,祁连山山前带古盐度较低,多低于12‰;西部咸化湖盆中心继承 $N_1$ 的特征,仍分成两个次一级的咸化湖盆中心,北面的咸化湖盆中心位于狮子沟—咸水泉地区,盐度大于16‰,南面的咸化湖盆中心位于英东—开特米里克—碱石山等地区,盐度大于16‰,两个次级咸化湖盆中心的分隔带位于油泉子北—南翼山地区,盐度在10‰~12‰。东西两个咸化湖盆中心的分隔带位于碱石山以东及黄石东北等地区,呈北东—南西向展布,分隔带的范围较 $N_1$ 时间有所减小,盐度在12‰~14‰,两个咸化湖盆中心在盐度达12‰左右时形成统一的咸化湖盆。

上油砂山组沉积时期(图8),较 $N_2$ 时期有明显变化,柴达木盆地形成了统一的咸化中心,位于开特米里克—碱石山—一里坪—台南—涩北等地区,盐度在18‰左右,大部分地区的古盐度在10‰~18‰,此时期中间分隔带已不存在,在三大山前带

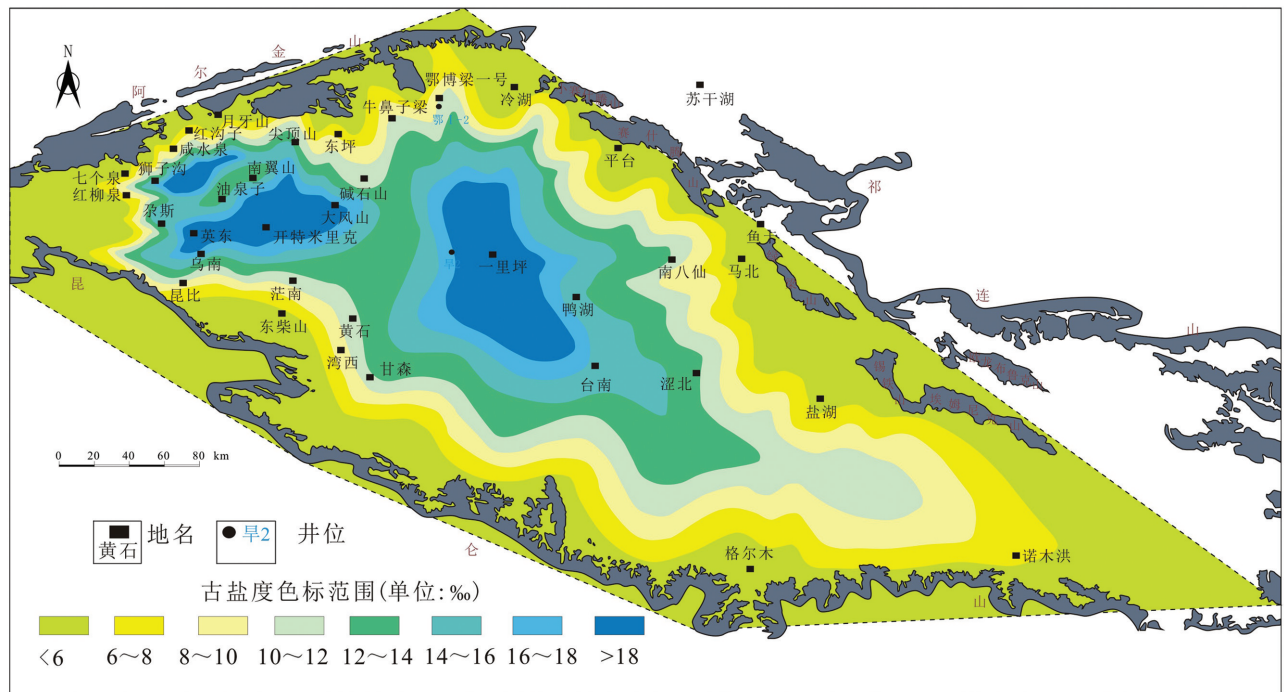


图6 柴达木盆地上干柴沟组古盐度平面图

Fig.6 The plan view of paleosalinity in the Upper Ganchaigou Formation, Qaidam Basin

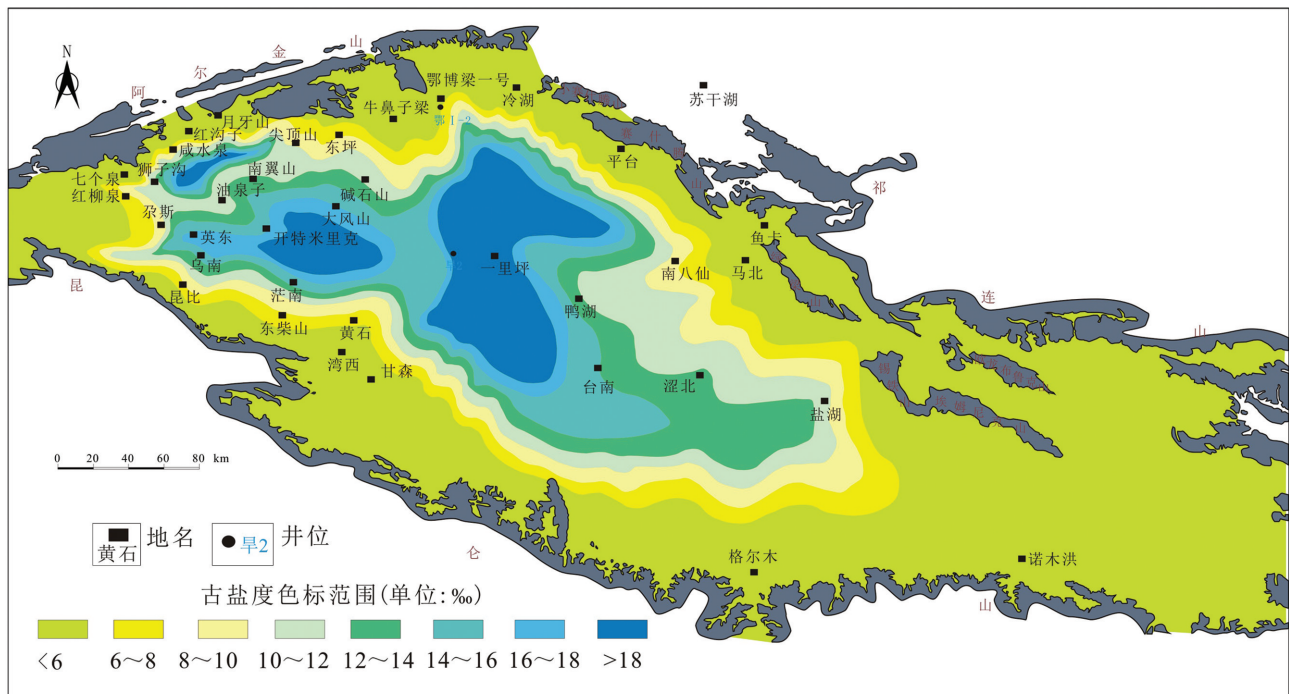


图7 柴达木盆地地下油砂山组古盐度平面图

Fig.7 The plan view of paleosalinity in the Lower Youshashan Formation, Qaidam Basin





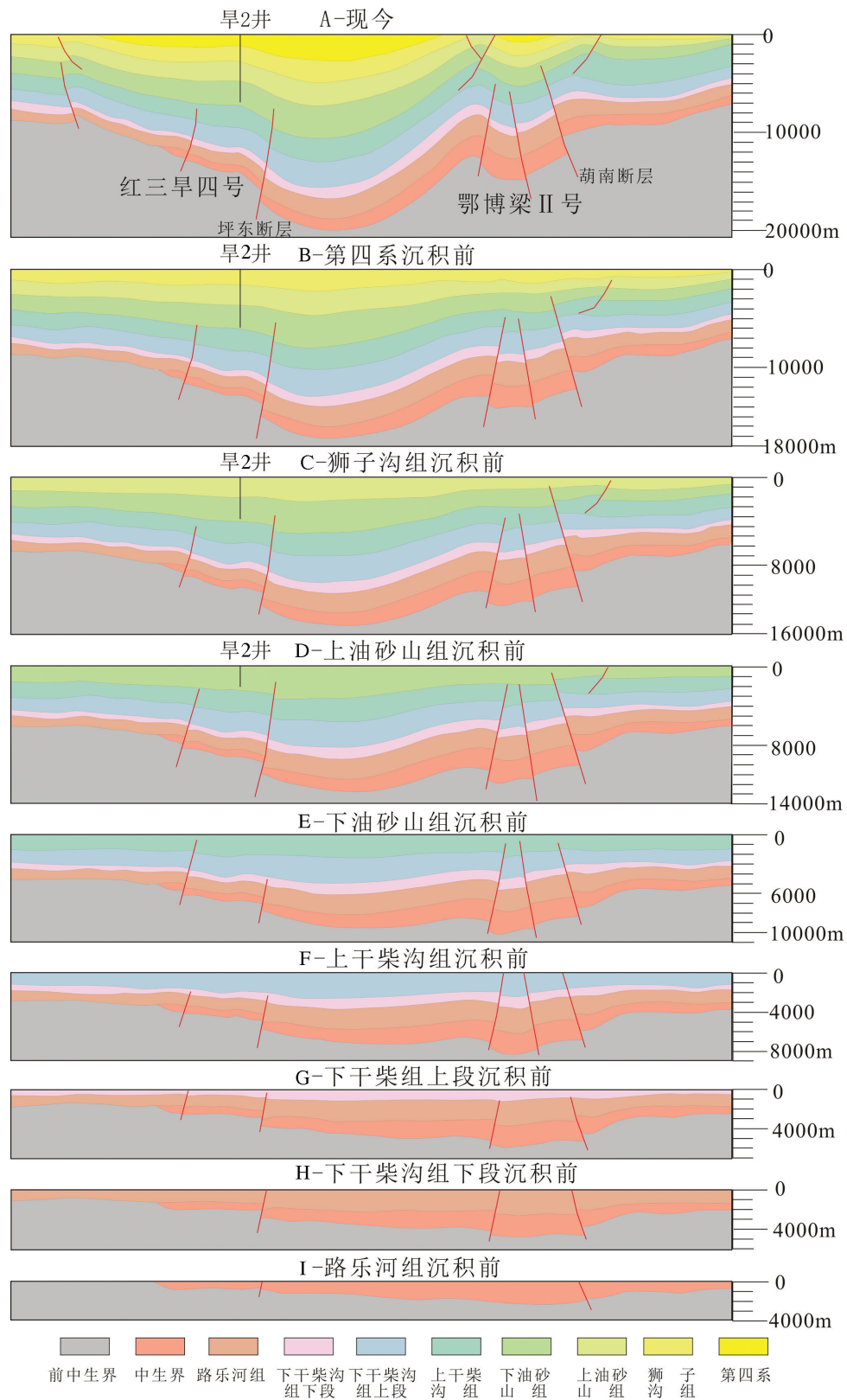


图9 柴达木盆地 CDM-160 测线构造演化剖面图(位置见图1)  
 Fig.9 The structure evolution section of CDM-160 line in Qaidam Basin



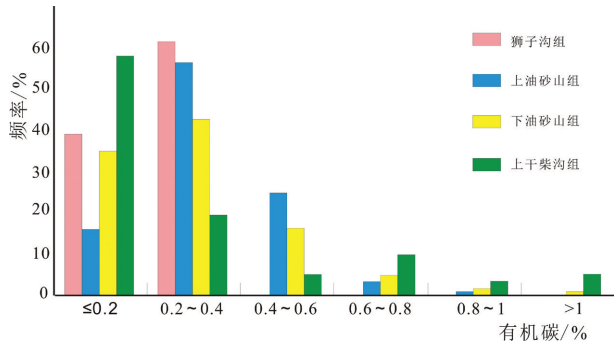


图11 一里坪地区各层段暗色泥质岩有机碳含量分布频率直方图

Fig. 11 The frequency distribution histogram of dark mud TOC of each formation in Yiliping area

分析结果一致。由于在古近-新近纪古湖盆特殊的演化过程中,气候日趋干燥,水质逐渐咸化,一方面咸度较高的水域环境对生物的繁殖有极大的抑制作用,从而造成区内有机质含量偏低,但另一方面这种环境有利于有机质的保存,且对有机质缓慢转化成烃较为有利。

### 3.2 有机质演化程度

烃类的形成不仅需要含有丰富的有机质,而且烃源岩必须达到一定的热演化,才具备生成大量烃类的能力,因而有机质成熟度及其热演化研究是生油岩评价中不可缺少的一项内容。根据早2井的埋藏-生烃史,分析一里坪凹陷烃源岩演化,并利用饱和和烃气相色谱、热解参数、相关井镜质体反射率等资料对该区的烃源岩演化进行综合评价。

#### 3.2.1 早2井埋藏-生烃史特征

一里坪坳陷区的早2井埋藏-生烃史(图12)分析表明,在2800 m左右进入生烃演化阶段,  $R_o$  为0.5%; 3700~5200 m为主要生油期,  $R_o$  为0.7%~1.3%; 在  $R_o$  为2.0%时,进入高温生干气阶段,深度约为5900 m。对于新近系的主力烃源岩层段——下油砂山组,地层分析表明,上油砂山组沉积早期,一里落坪凹陷下油山砂组下部埋深接近2800 m,进入生烃门限。上油砂山组沉积末期,一里坪凹陷下油山砂组层段中下部地层埋深达到4500 m,处于主要生烃期。在狮子沟组中晚期,下油山砂组层段顶部埋深大于3000 m,进入生烃期,而其下部地层埋深近5000 m。在狮子沟组末及第四系,下油山砂组层段下部接近6000 m,已进入高温生干气阶段。第

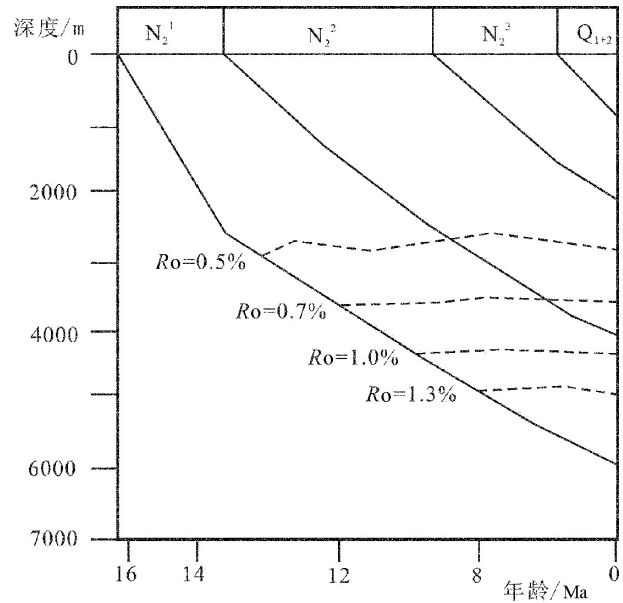


图12 早2井埋藏-生烃史

Fig.12 Burial - hydrocarbon generation history of Han 2 well

四纪中晚期,一里坪凹陷主体部位下油山砂组顶部埋深接近5000 m,也进入了成熟期。

因此,从埋藏-生烃史角度来看,一里坪坳陷下油山砂组地层已经具备了一定的生烃潜力,那么作为其下伏的下干柴沟组上段、下干柴沟组下段地层中所发育的暗色泥岩来说,可推测出已经达到成熟至高成熟阶段。

#### 3.2.2 早2井饱和和烃气相色谱特征

利用饱和和烃气相色谱参数对早2井有机质演化阶段进行划分为:未成熟阶段(3200 m以上),成熟阶段(3200~5200 m),高成熟阶段(5200 m以下)。其具体特征(图13)为:未成熟阶段(3200 m以上):碳奇偶优势  $OEP$  不明显,其值多在0.9~1.2;碳优势指数  $CPI$  多大于1.25;轻烃/重烃值多在1.5左右波动;姥鲛烷/植烷值在0.8左右波动,为植烷优势。成熟阶段(3200~5200 m):碳奇偶优势  $OEP$  仍不明显,其值多在0.8~1.1;碳优势指数  $CPI$  多在1.0~1.3;轻烃/重烃值多在1.6左右;姥鲛烷/植烷值多大于1.0,表现出明显的姥鲛烷优势;4200 m左右碳优势指数  $CPI$ 、 $Pr/C17$  (姥鲛烷/十七烷)、 $Ph/C18$  (植烷/十八烷)存在明显的拐点,4200 m以下其值明显减小。高成熟阶段(5200 m以下):碳优势指数  $CPI$  小于1.0,已基本消失;轻烃/重烃值骤然增大; $Pr/C17$  (姥

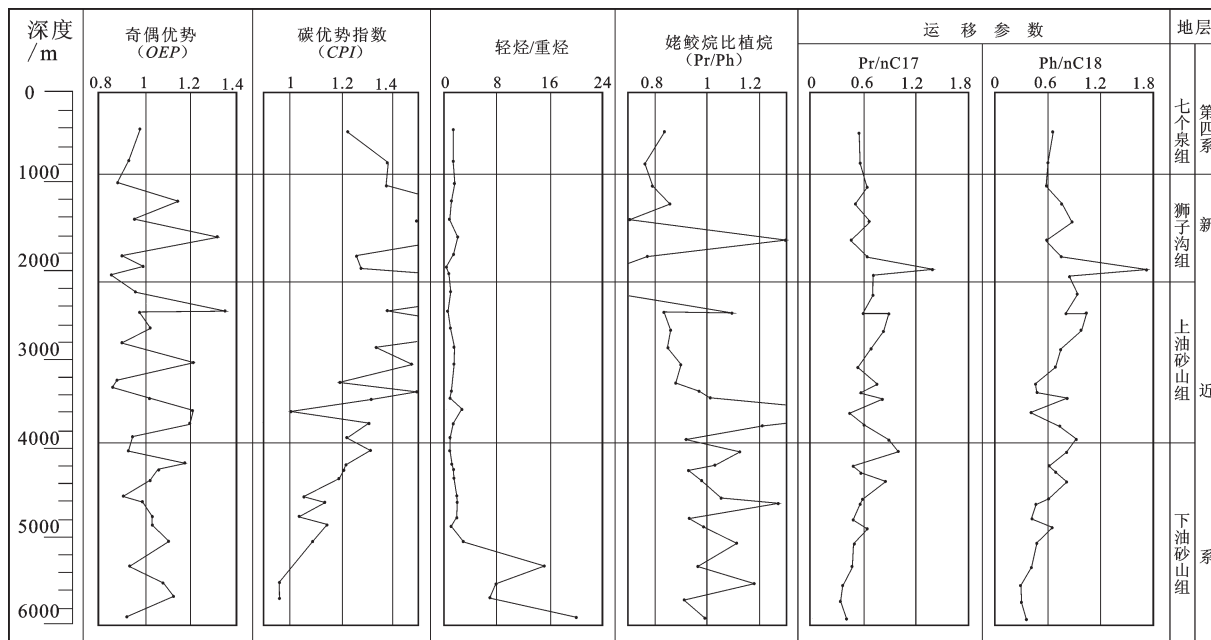


图13 早2井饱和烃气相色谱分析参数对比图

Fig.13 The comparison chart of gas chromatographic analysis parameters of saturated hydrocarbon in Han 2 well

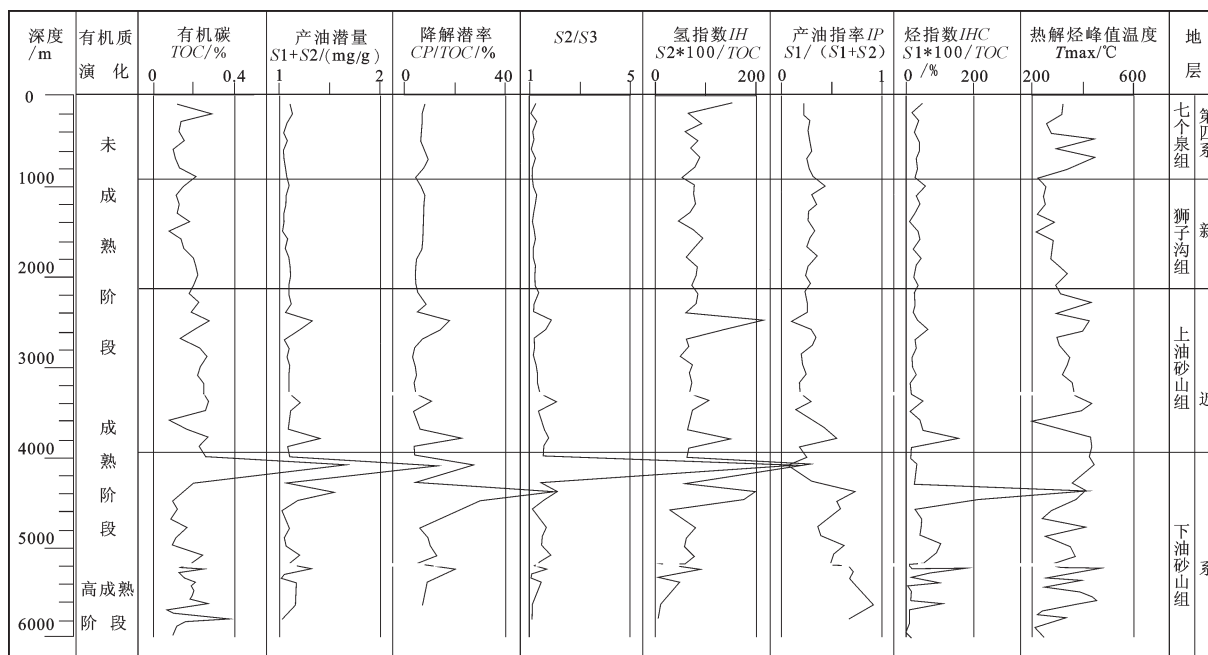


图14 早2井有机质热解参数曲线

Fig.14 The organic matter pyrolysis parameter curves of Han 2 well

烷/十七烷)、Ph/C18(植烷/十八烷)均接近于0.4。5475~5522 m(N21)原油样品CPI值为1.05,Pr/Ph(姥鲛烷/植烷)高达3.2,且异C13-C18/异C19+20达0.9~2.0,原油的 $\delta C_{13}$ 值相当低,仅为-29.5‰,可见其成熟度相当高,应为过成熟凝析油,显然该阶段已进入了高成熟阶段。

### 3.2.3 热解参数特征

利用产率指数( $S1/(S1+S2)$ )、烃指数(IHC),根据新近所作的早2井有机质热解分析,表明该井有机质在3300~5200 m产率指数与烃指数存在相对高值区,并且对应的 $T_{max}$ 值呈现增大趋势,推断该沉积段处于成熟阶段(图14)。

在常规评价某一地区的有机质演化程度时,由于地温梯度在一定区域较为稳定,有机质的各个演化阶段相对较为统一,因此早2井所确定的有机质演化阶段代表了一里坪坳陷有机质的演化特征。根据对该区埋藏-生烃史、气相色谱特征和热解分析,推断一里坪地区的生烃主要阶段为3000~5200 m,大于6000 m地层的有机质达到高成熟阶段。因此对于一里坪坳陷来看,洼陷边缘的早2井在6000 m才钻至下油砂山组地层,其下伏的上干柴沟组、下干柴沟组上段地层则远远大于6000 m,这两个层段是柴西地区烃源岩发育的主要时期,发育有半深湖沉积,下干柴沟组上段沉积时期半深湖面积可达2421 km<sup>2</sup>,参照早2井的有机质演化程度,一里坪坳陷深层有机质演化程度达到成熟-高成熟阶段,与已知生烃洼陷分布面积(红狮洼陷下干柴沟组上段半深湖面积为5344 km<sup>2</sup>)类比,一里坪坳陷具备较大的生烃潜力及资源潜力。

## 4 结 论

(1)柴达木盆地一里坪洼陷用科奇公式恢复的古盐度变化区间为2.9‰~33.7‰,平均古盐度变化区间为9.3‰~15.4‰,为咸化湖盆沉积。新生代古近纪、新近纪早期,柴达木盆地发育东、西两个咸化中心,新近纪晚期柴达木盆地发育统一的咸化中心。一里坪坳陷新生界咸化程度与红狮洼陷相近,构造演化特征表现出持续的沉降过程。与已知的红狮富烃洼陷相类比,认为一里坪坳陷新生界发育的半深湖相沉积,为潜在的生烃洼陷。

(2)一里坪坳陷中浅层在咸化湖盆水介质的控

制作用下,虽然对生物的繁殖有极大的抑制作用,但有利于有机质的保存,对有机质缓慢转化成烃较为有利。根据早2井埋藏-生烃史、饱和烃气相色谱及热解参数等资料,认为上油砂山组沉积早期,一里坪凹陷下油砂山组下部埋深接近2800 m,进入生烃门限;上油砂山组沉积末期,一里坪凹陷下油砂山组层段中下部埋深达到4500 m,处于主要生烃期;在狮子沟组沉积中晚期,下油砂山组层段顶部埋深大于3000 m,进入生烃期,而其下部地层埋深近5000 m;在狮子沟组沉积期末及第四纪沉积期初,下油砂山组层段下部接近6000 m,已进入高温生干气阶段;第四纪沉积中晚期,一里坪凹陷主体部位下油砂山组顶部埋深接近5000 m,也进入了成熟期。下干柴沟组下段沉积时期一里坪坳陷半深湖面积可达2421 km<sup>2</sup>,已知生烃洼陷的红狮洼陷下干柴沟组下段半深湖面积为5344 km<sup>2</sup>,说明一里坪坳陷具有较大的生烃潜力及资源潜力,围绕该洼陷进行油气勘探将是一个新的接替领域,对柴达木盆地油气勘探具有重大战略意义。

**致谢:** 本文的成果和认识为项目团队共同完成的,研究中得到青海油田相关专家的大力支持,审稿专家对本文提出了宝贵修改意见,文中引用了其他单位、专家的研究成果,在此深表谢意!

### 参考文献(References)

- [1] Walker C T, Price N B. Departure curves for computing paleosalinity from boron in illites and shales[J]. AAPG Bull., 1963, 47(5): 833-841.
- [2] Walker C T. Evaluation of boron as a paleosalinity indicator and its application to offshore prospects[J]. AAPG Bull., 1968, 52(5): 751-766.
- [3] Adams T D, Haynes J R, Walker C T. Boron in Holocene illites of the dovey estuary, wales, and its relationship to palaeosalinity in cyclothem[J]. Sedimentology, 1965, 4: 189-195.
- [4] Couch E L. Calculation of paleosalinity from boron and clay mineral data [J]. AAPG Bulletin, 1971, 55(10): 1829-1837.
- [5] 李进龙, 陈东敬. 古盐度定量研究方法综述[J]. 油气地质与采收率, 2013, 10(5): 1-3.  
Li Jinlong, Chen Dongjing. Summary of quantified research method on paleosalinity [J]. Petroleum Geology and Recovery Efficiency, 2013, 10(5): 1-3 (in Chinese with English abstract).
- [6] 王敏芳, 焦养泉. 沉积环境中古盐度的恢复——以吐哈盆地西南缘水西沟群泥岩为例[J]. 新疆石油地质, 2005, 26(6): 719-722.  
Wang Minfang, Jiao Yangquan. Recovery paleosalinity in

- sedimentary environment—An example of mudstone in Shuixigou Group, southwestern margin of Turpan-Hami basin [J]. Xinjiang Petroleum Geology, 2005, 26(6): 719-722(in Chinese with English abstract).
- [7] 羊向东, 王苏民. 藏南沉错钻孔硅藻组合与湖水古盐度定量恢复[J]. 中国科学(D辑), 2003, 33(2): 163-169.  
Yang Xiangdong, Wang Sumin. Boring diatom combination in Chen Co, Southern Tibet and its relationship with quantified research method on paleosalinity[J]. Science in China (series D), 2003, 33(2): 163-169(in Chinese).
- [8] Nelson B. Sedimentary phosphate method for estimating paleosalinities[J]. Science, 1967, 158: 917-920.
- [9] 伊海生, 时志强, 朱迎堂, 等. 利用泥岩硼含量重建过去湖相古盐度和湖面变化历史[J]. 湖泊科学, 2009, 21(1): 77-83.  
Yi Haisheng, Shi Zhiqiang, Zhu Yingtang, et al. Reconstruction of paleo-salinity and lake-level fluctuation history by using boron concentration in lacustrine mudstones[J]. Journal of Lake Sciences, 2009, 21(1): 77-83(in Chinese with English abstract).
- [10] 李宝利. 硼元素古盐度计算方法的改进[J]. 复式油气田, 1995, 6(1): 55-58.  
Li Baoli. An improved boron method for estimating paleosalinities[J]. Multiple Oil and Gas Fields, 1995, 6(1): 55-58 (in Chinese with English abstract).
- [11] 魏继生, 文华国, 李建兵, 等. 古盐度计算与古地理在塔里木盆地钾盐勘探中的应用[J]. 成都理工大学学报(自然科学版), 2011, 38(2): 185-190.  
Wei Jisheng, Wen Huaguo, Li Jianbing, et al. Application of paleosalinity calculation and palaeogeographic reconstruction to exploring potash salt in Tarim Basin[J]. Journal of Chengdu University of Technology(Science & Technology), 2011, 38(2): 185-190(in Chinese with English abstract).
- [12] 郑荣才, 柳梅青. 鄂尔多斯盆地长6油层组古盐度研究[J]. 石油与天然气地质, 1999, 20(1): 20-25.  
Zheng Rongcai, Liu Meiqing. Study on palaeosalinity of Chang-6 oil reservoir set in Ordos basin[J]. Oil & Gas Geology, 1999, 20(1): 20-25(in Chinese with English abstract).
- [13] 文华国, 郑荣才, 唐飞, 等. 鄂尔多斯盆地耿湾地区长6段古盐度恢复与古环境分析[J]. 矿物岩石, 2008, 28(1): 114-120.  
Wen Huaguo, Zheng Rongcai, Tang Fei, et al. Reconstruction and analysis of paleosalinity and paleoenvironment of the Chang 6 member in the Gengwan region, Ordos basin[J]. Journal of Mineralogy and Petrology, 2008, 28(1): 114-120(in Chinese with English abstract).
- [14] 叶爱娟, 朱扬明. 柴达木盆地第三系咸水湖相生油岩古沉积环境地球化学特征[J]. 海洋与湖沼, 2006, 37(5): 472-480.  
Ye Aijuan, Zhu Yangming. Geochemical and sedimentary features of Tertiary saline lacustrine source rocks in Qaidam basin[J]. Oceanologia et Limnologia Sinica, 2006, 37(5): 472-480(in Chinese with English abstract).
- [15] 李浩, 徐艳萍, 黄海宁, 等. 柴达木盆地西部地区第三纪古湖泊研究[J]. 断块油气田, 2002, 9(2): 27-30.  
Li Hao, Xu Yanping, Huang Haining, et al. Study on evolution of paleo-lake of Tertiary in west Chadam Basin[J]. Fault-block Oil & Gas Field, 2002, 9(2): 27-30(in Chinese with English abstract).
- [16] 苗军. 柴达木盆地第三纪湖盆古水介质研究[J]. 西安石油学院学报(自然科学版), 2000, 15(4): 22-24.  
Miao Jun. A study on the paleowater media in Tertiary Period in Chaidamu Basin[J]. Journal of Xi'an Petroleum Institute, 2000, 15(4): 22-24(in Chinese with English abstract).