

柴达木盆地东部第四系低丰度高效 气源岩地球化学特征及成藏机理

陈中红, 吴孔友, 赵卫卫

(中国石油大学 地球资源与信息学院 山东 东营 257061)

摘要: 对柴达木盆地东部地区第四系鸭湖和盐湖剖面进行了露头取样, 并利用 Rock Eval 生油岩评价、色谱质谱等实验分析测试技术对样品进行了地球化学特征分析。实验结果表明, 样品有机碳含量变化不大, $w(\text{TOC})$ 为 $0.15\% \sim 0.75\%$, $w(\text{S}_1 + \text{S}_2)$ 为 $(0.24 \sim 2.5) \times 10^{-3}$ 。第四系气源岩中的有机质类型多以 III 型有机质为主, 少数为 II 型, 极少数为 I 型。有机质主要来源于陆源生物为主的腐殖型和含腐泥腐殖型, 是典型的低丰度有机质气源岩。 $\text{C}_{29}\alpha\beta\beta / (\alpha\beta\beta + \alpha\alpha\alpha)$ 、 $\text{C}_{29}\alpha\alpha / (20\text{S} + 20\text{R})$ 分布分别为 $0.34 \sim 0.38$ 、 $0.27 \sim 0.33$, C_{31} 升藿烷 $22\text{S} / (22\text{S} + 22\text{R})$ 分布为 $0.49 \sim 0.56$ 显示第四系样品多处于未熟状态。巨厚的气源岩沉积厚度、第四纪寒冷的气候和高盐度的水体环境及有效的生储盖组合是形成第四系大型生物气藏的有利条件。

关键词: 第四系; 气源岩; 地球化学; 生物标志化合物; 柴达木盆地

中图分类号: P618.130.1; TE122.113 **文献标志码:** A **文章编号:** 1672-6561(2007)01-0041-06

Characteristics and Hydrocarbon Accumulation Mechanism of Source Rocks with Low Abundance and High Efficiency in Quaternary Period of Eastern Qaidam Basin

CHEN Zhong hong, WU Kong you, ZHAO Wei wei

(School of Earth Resource and Information, China University of Petroleum, Dongying 257061, Shandong, China)

Abstract: In order to investigate the characteristics and hydrocarbon accumulation mechanism of source rocks with low abundance and high efficiency in the Quaternary in the eastern Qaidam basin, the rock samples selected from the outcrop of Quaternary were analyzed, including the organic carbon content, the parameters of pyrolysis and biomarker characters of saturated hydrocarbon by means of Rock Eval, GC MS and so on. The results show that the content of organic carbon ranges from 0.15% to 0.75% , and the value of $\text{S}_1 + \text{S}_2$ ranges from 0.25 mg/g to 2.5 mg/g , which displays its limited hydrocarbon generating potential. There were mainly type III of kerogen, a few of type II of kerogen, and few of type I of kerogen. There was predominance of phytane to pristane, and the ratio of pristane to phytane was lowerer than 0.5. The values of the parameters of $\text{C}_{29}\alpha\beta\beta / (\alpha\beta\beta + \alpha\alpha\alpha)$ and $\text{C}_{29}\alpha\alpha / (20\text{S} + 20\text{R})$ were $0.34 \sim 0.38$ and $0.27 \sim 0.33$, and the organic matter was being in the stage of low maturity. The water temperature of the depositional lake was low and its salinity was high. The unique depositional environments of this area in the Quaternary are the important conditions for forming the large scale biogenic gas pools. The water environment with a high salinity slowed down the degradation rate of the organic matter. The methane bacteria activity was restrained in cold environment for a long time and the generation peak of the biogenic gas was delayed. Moreover, the massive Quaternary dark mudstone and frequent developed

收稿日期: 2006 04 20

基金项目: 中国石油天然气集团公司九五重大科技攻关项目(960004 01)

作者简介: 陈中红(1976), 男, 安徽怀宁人, 讲师, 博士研究生, 从事油气地质与勘探研究。E-mail: hongczh@163.com

sandstone in Sanhu area provide abundant gas source and constitute a favorable combination of reservoir.

Key words: Quaternary System; gas source rocks; geochemistry; biomarker; Qaidam basin

0 引言

柴达木盆地第四系是目前中国发现的最大生物气区,也是国家西气东输工程的主力气区之一,其在国家的能源体系中占据重要地位,同时也引起了研究人员的广泛关注。研究工作集中在第四系的沉积环境^[1-6]、生物气成藏机理方面^[7-13],在对气源岩的地球化学特征方面仅有少量的研究^[14]。柴达木盆地东部地区勘探程度较低,所做的研究多从露头样品的测试分析入手。笔者对盆地东部东北缘第四系的鸭湖与盐湖剖面进行了露头取样及测试分析工作,并进行了较为详细的地球化学研究,为西部油田寻求新的勘探领域提供必要的信息。

1 区域地质概况

柴达木盆地处于古亚洲构造域南缘,西北与塔里木古地块接壤,其南紧邻特提斯—喜马拉雅山构造域。由于特提斯洋壳向北挤压和多次俯冲,盆地相对沉降而开始了第三系渐新统的拗陷性沉积。随着青藏高原的持续隆起和盆地隆升幅度西大、东小的差异,使第三纪不同时期的沉积中心由西向东逐渐转移。进入第四纪后,沉积中心已迁移至盆地东部现今的三湖地区,形成了第四系的拗陷性沉

积^[8]。在第四纪短短的 3.05 Ma 的地质历史中,快速沉积了巨厚的咸水湖相夹沼泽相的第四系,最大厚度超过 3 200 m,下部发育 1 500 m 大套生气岩,其中还夹有可作为较好储层的泥质细砂岩和粉砂岩,组成自生自储的成气组合^[11]。第四系暗色泥质岩、碳质泥岩及碳质页岩是本区的气源岩。气源岩有机质类型以陆源腐殖型为主,含腐泥腐殖型,仅含少量混合型^[15]。

本次第四系样品的取样位置为柴达木东部鸭湖及盐湖剖面(图 1)。

(1)鸭湖剖面第四系气源岩主要为灰白色泥岩,灰白色泥灰岩、粉砂质泥岩、厚层块状泥岩及含石膏晶体泥岩。鸭湖所测气源岩样特征包括灰白色泥岩、灰绿色泥岩、灰绿色粉砂质泥岩。

(2)盐湖剖面第四系气源岩主要由灰绿色泥岩组成,夹有灰绿色泥页岩、灰绿色油页岩、灰白色及棕红色泥岩。盐湖剖面所测气源岩样特征包括灰绿色泥岩,灰绿色粉砂质泥岩、灰白色粉砂质泥岩、灰绿色泥灰岩、灰绿色油页岩,其中的灰绿色泥岩为鸭湖和盐湖剖面的主要气源岩。

2 实验流程及条件

2.1 实验流程

(1)以氯仿为溶剂,70℃恒温下在索氏抽提器

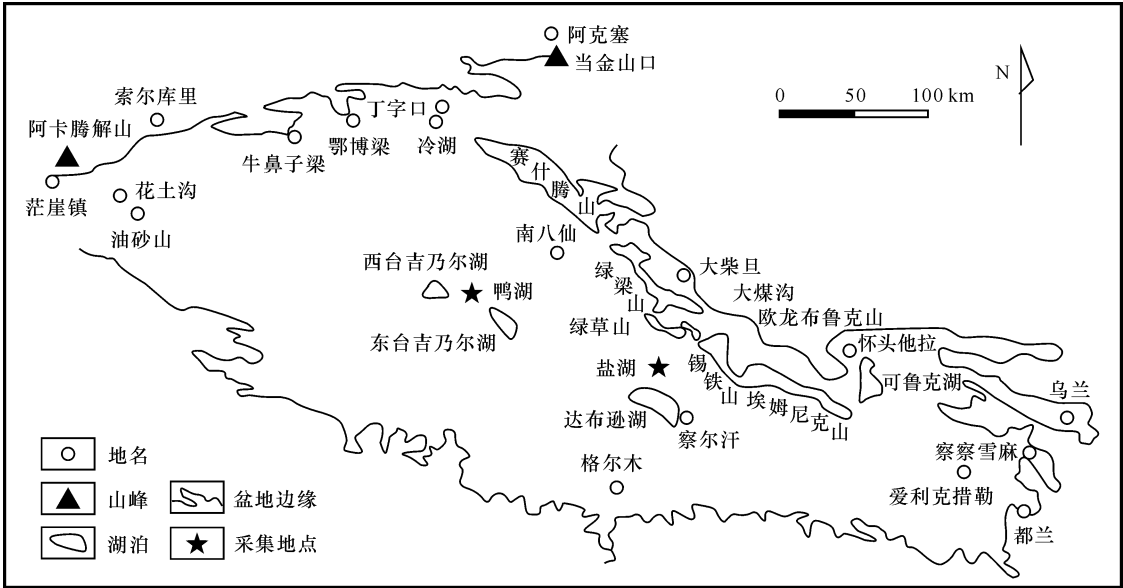


图 1 柴达木盆地东部地区样品采集点

Fig.1 Sampling Locations in Eastern Qaidam Basin

中连续抽提 72 h。

(2)取抽提物 10 ~ 15 mg, 加入石油醚溶解, 反复冲洗后移至烧瓶中, 静置 24 h (烧瓶中有石油醚 100 mL 左右), 过滤。不溶部分即为沥青质, 可溶部分为饱和烃、芳香烃和非烃的混合物。准备硅胶氧化铝充填柱, 氧化铝在 450 ℃恒温下连续活化 5 h, 硅胶在 150 ℃恒温下连续活化 8 h。硅胶和氧化铝以 3 : 1 的比例填入色层柱中(硅胶在上, 氧化铝在下)。用石油醚润湿柱子后, 倒入样品滤液, 加石油醚冲洗得到饱和烃, 二氯甲烷冲洗得到芳烃, 乙醚冲洗得到非烃。

2.2 分析仪器及条件

- (1)抽提用索氏抽提器。
- (2)有机碳分析用 LECWR 112 型仪器。
- (3)热解用 Rock Eval II 型生油岩分析仪。
- (4)GG MS 分析采用美国 HP 公司生产的 HP Chemistation 色质连用仪。色谱为 HP 5890 II 型, 质谱为 HP 5890A 型, 色谱柱为 DB5 MS, 柱长 60 m, 内径 0.25 mm。起始温度 100 ℃, 升温速率 4.0 ℃/min, 温度终点 320 ℃, 终点时间 20.00 min,

气化室及传输管线温度 310 ℃, 离子源温度 250 ℃, 柱前压为 170 kPa, 分流比为 20 : 1, 载气为氦气, 电子能量 70 eV, 扫描速率为 0.46 can/s, 离化方式为电子轰击。

3 地球化学参数评价

首先对 TOC 及 S₁、S₂ 进行了风化校正(TOC 校正系数为 3.0, S₁、S₂ 校正系数为 5.0), 校正后的结果见表 1。从表 1 可以看出, 样品有机碳含量变化不大, w(TOC) 0.15% ~ 0.75%; w(S₁ + S₂) (0.24 ~ 2.5) × 10⁻³, 多数样品大于 1.0 × 10⁻³; 氢指数 I_H 变化为 (75.5 ~ 418.5) × 10⁻³, 基本小于 500 × 10⁻³, 部分样品氢指数值大于 200 × 10⁻³; 由参数 TOC、S₁、S₂ 等可计算有机质的降解潜率^[9], 降解率基本小于 40%。从氢指数值和降解率值与热解参数分布关系来看(图 2), 所分析的样品基本为 II 型和 II 型有机质, 极少数样品特征显示为 I 型有机质。对干酪根镜鉴可见大量的镜质体和角质体, 也可见一些无定型和藻质体。从统计结果看, 以 II 和 II₂ 干酪根为主, 占 70% 以上, II₁ 干酪

表 1 第四系样品有机碳含量及热解分析

Tab. 1 TOC and Result of Rock Eval Analysis of the Quaternary Samples									
位置	样品号	气源岩	w(TOC) / %	T _{max} / ℃	w(S ₁) / 10 ⁻³	w(S ₂) / 10 ⁻³	I _H / 10 ⁻³	I _P	D / %
盐湖	Y ₁	灰绿色泥岩	0.15	482	0.20	0.30	200.0	0.40	16.6
盐湖	Y ₂	灰绿色粉砂质泥岩	0.18	300	0.15	0.25	138.8	0.38	11.1
盐湖	Y ₃	灰绿色泥岩	0.21	447	0.15	0.25	119.0	0.38	9.5
盐湖	Y ₄	灰绿色粉砂质泥岩	0.21	519	0.15	0.25	138.8	0.38	11.1
盐湖	Y ₅	灰白色粉砂质泥岩	0.15	445	0.10	0.20	133.3	0.33	10.0
盐湖	Y ₆	灰绿色泥岩	0.24	372	0.55	0.55	229.2	0.50	22.8
盐湖	Y ₇	土黄色泥岩	0.15	302	0.25	0.30	200.0	0.45	18.3
盐湖	Y ₈	灰绿色泥岩	0.21	352	0.45	0.35	170.0	0.56	19.0
盐湖	Y ₉	灰绿色泥页岩	0.75	427	0.35	0.10	306.0	0.26	9.0
盐湖	Y ₁₀	灰绿色泥岩	0.39	520	0.90	1.60	418.5	0.36	31.9
盐湖	Y ₁₁	灰绿色油页岩	0.33	366	1.15	0.65	200.6	0.64	27.2
盐湖	Y ₁₂	灰黑色油页岩	0.30	412	1.05	0.90	300.0	0.54	32.4
盐湖	Y ₁₃	灰绿色泥岩	0.27	513	0.40	0.90	188.7	0.44	16.6
盐湖	Y ₁₄	灰绿色泥岩	0.33	440	0.45	0.45	139.1	0.50	13.6
鸭湖	Y ₁₅	灰白色泥岩	0.33	390	0.40	0.35	108.0	0.36	8.3
鸭湖	Y ₁₆	灰白色灰岩	0.27	428	0.04	0.20	75.5	0.20	4.6
鸭湖	Y ₁₇	灰绿色粉砂质泥岩	0.39	342	0.64	0.70	170.0	0.53	17.8
鸭湖	Y ₁₈	灰白色泥岩	0.24	316	0.15	0.35	148.7	0.30	10.4
鸭湖	Y ₁₉	灰绿色泥岩	0.25	316	0.20	0.30	170.0	0.40	13.8
鸭湖	Y ₂₀	灰绿色泥岩	0.31	337	0.15	0.45	139.1	0.25	9.1
鸭湖	Y ₂₁	灰绿色粉砂质泥岩	0.30	435	0.20	0.55	187.0	0.27	12.5

注: S₁、S₂ 为每克岩石的烃含量; I_H 为每克有机碳热解烃含量

根占 20%左右,很少发现 I 型干酪根,表明区内有机质主要是以陆源为主的腐殖型和含腐泥腐殖型。从归一化组成来看,绝大多数样品的组成以非烃为主,所有样品的非烃与沥青质含量之和都超过了烷烃与芳烃,并且具有较高碳同位素值特征($-19.52 \sim -27.35) \times 10^{-3}[14]$,成熟度小于 0.5%,有机质基本未进入成熟状态。

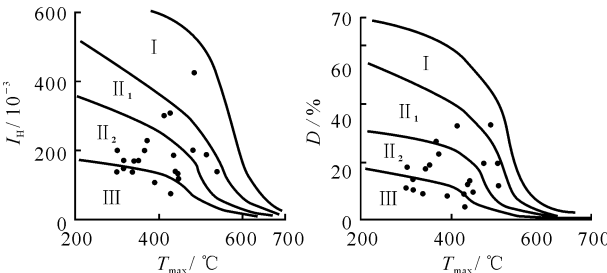


图 2 柴达木第四系露头样品 I_H 、 D 与 T_{max} 分布关系
Fig. 2 Distribution of I_H 、 D with T_{max} of Outcrop Samples of the Quaternary System in the Eastern Qaidam

4 色谱质谱特征

第四系气源岩样色谱质谱检测结果显示了一定的盐湖或咸水湖相有机质特征(表 2、表 3)。主峰碳多为 C_{23} ,少数为 C_{22} 、 C_{25} ,多数样品表现为单峰形分布,部分样品表现为双峰分布,个别样品齿化程度严重(图 3)。植烷优势明显($Pr/Ph < 0.5$, $Ph/n C_{18} > 1.5$), C_{30} 藿烷与莫烷相比较,具有较强的藿烷优势, C_{30} Mor/hop 分布范围为 0.15~0.2。在谱图中,伽玛蜡烷含量较高,很容易识别(图 4), γ 蜡烷/ C_{31} 藿烷均在 0.5 左右, γ 蜡烷被认为是水体分层的地球化学标志^[17],通常被认为与具有盐跃层的分层水体环境有关^[18 19]。在长链藿烷系列中, C_{32} 藿烷、 C_{33} 藿烷、 C_{34} 藿烷、 C_{35} 藿烷含量以较低趋

表 2 第四系样品的色谱检测参数

Tab. 2 Parameters of the Chromatogram for the Samples of Quaternary System in the Qaidam

样品号	Y ₁	Y ₄	Y ₈	Y ₁₀	Y ₁₂	Y ₁₄
主峰碳	22	22	23	23	25	23
OEP	1.11	1.12	1.14	1.22	1.16	1.15
CPI	1.11	1.09	1.21	-	-	-
$C_{21} + C_{22} / C_{28} + C_{29}$	7.04	6.45	3.97	20.08	1.63	62.06
$\sum C_{21} + / \sum C_{22} -$	0.4	0.49	0.38	0.31	0.24	0.24
姥鲛烷/ $n C_{17}$	1.13	0.9	0.97	0.95	1.19	1.07
植烷/ $n C_{18}$	1.41	1.04	1.74	1.64	1.53	1.6
姥鲛烷/植烷	0.31	0.3	0.22	0.27	0.21	0.32

表 3 柴东地区第四系样品质谱特征
Tab. 3 Characteristics of Mass Spectrum of the Samples in the Quaternary of the Qaidam

样品号	气源岩	$w(\text{甾烷}) / \%$			a	b	c	d	e	f
		C_{27}	C_{28}	C_{29}						
Y ₁	灰绿色泥岩	45.9	23.0	31.1	0.36	0.33	1.36	0.16	0.56	0.43
Y ₄	灰白色泥岩	45.9	23.0	31.1	0.35	0.27	1.29	0.16	0.49	0.48
Y ₈	灰白色泥岩	46.6	23.3	30.1	0.38	0.3	1.54	0.15	0.56	0.44
Y ₁₀	棕色泥岩	45.9	23.0	31.1	0.34	0.29	1.55	0.18	0.56	0.46
Y ₁₂	灰黑色油页岩	46.1	21.1	32.9	0.35	0.29	1.78	0.20	0.55	0.38
Y ₁₄	灰绿色泥岩	45.2	21.9	32.9	0.37	0.31	1.61	0.17	0.54	0.46

注: a - $C_{29} \alpha \beta / (\alpha \beta + \alpha \alpha \alpha)$, b - $C_{29} \alpha \alpha \alpha 20S / (20S + 20R)$, c - $C_{27} \text{hop } Tm / Ts$, d - $C_{30} \text{Mor/hop}$, e - $C_{31} \text{升藿烷 } 22S / (22S + 22R)$, f - 伽马蜡烷/ C_{31} 藿烷

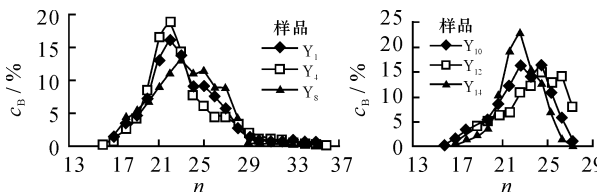


图 3 第四系样品正构烷烃分布特征
Fig. 3 Distribution of N Alkanes of the Samples in the Quaternary System of the Qaidam

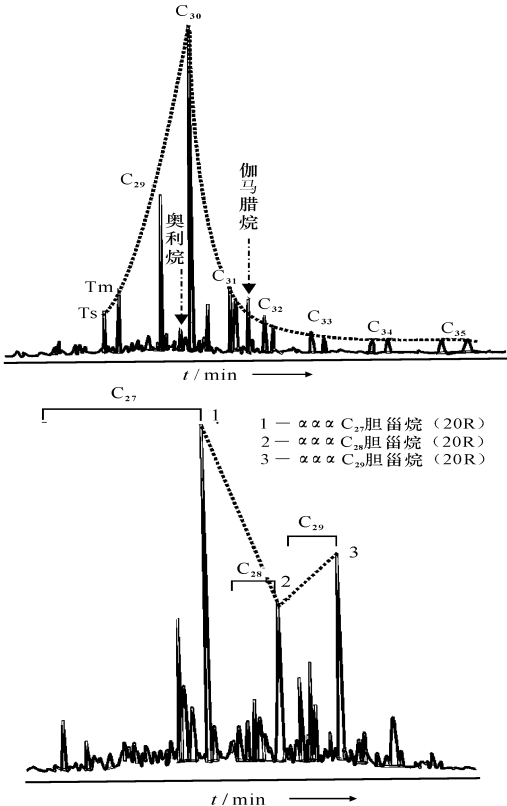


图 4 第四系泥岩藿烷、甾烷分布特征
Fig. 4 Distribution of N Alkanes of the Samples in the Quaternary System of the Qaidam

势稳定下降,并且 C_{34} 藿烷、 C_{35} 藿烷保存相对较完整,显示了半咸水沉积环境。长链三环二萜烷有一定的含量,在其质谱图中以 $\alpha\beta C_{30}$ 藿烷为主峰, $\alpha\beta C_{29}$ 降藿烷为次主峰。一般认为 C_{27} 甾烷来自水生生物, C_{29} 甾烷来自陆源高等植物。从样品检测特征显示,甾烷 C_{27} 、 C_{28} 、 C_{29} 呈不对称的“V”字型分布, C_{27} 甾烷优于 C_{29} 甾烷,反映出陆源水生生物输入特征。样品中检测到含有一定量的奥利烷,奥利烷由被子植物中的三萜类先质物,如香树精、羽扇醇演变而来^[20]。因此奥利烷代表了陆源输入^[21]。干酪根红外光谱的吸收峰主要有 $1\ 400$ 、 $1\ 450$ 、 $1\ 640$ 、 $1\ 710\ \text{cm}^{-1}$,而 $1\ 375\ \text{cm}^{-1}$ 很弱,多数样品不存在该吸收峰,显示出 II 型干酪根的特征^[14]。因此,柴东地区第四系有机质主要是以陆源生物为主的腐殖型和含腐泥腐殖型,含少量腐泥型和混合型,有机母质主要为草本植物、水生植物和藻类。

第四系岩样的正构烷烃 CPI 和 OEP 都大于 1.0,但变化幅度不大,显示出弱的奇碳优势, CPI $1.09 \sim 1.21$, OEP $1.11 \sim 1.22$, $\sum C_{21}^- / \sum C_{22}^+$ 普遍较低,为 $0.24 \sim 0.49$ 。三降藿烷 $C_{27}-T_m$ 代表易熟的化合物,而三降藿烷 $C_{27}-T_s$ 代表较稳定的化合物。随着成熟度增高, $C_{27}-T_m/T_s$ 降低,一般生油门限值为 1.5,在本次检测的 C_{27} 藿烷分布中, T_m 含量高, T_m/T_s $1.29 \sim 1.61$,多数样品 T_m/T_s 大于 1.5,并且孕甾烷、升孕甾烷、4 甲基甾烷含量低,显示未成熟特征。 C_{29} 甾烷异构化参数 $C_{29}\alpha\beta / (\alpha\beta + \alpha\alpha)$ 、 $C_{29}\alpha\alpha / (20S + 20R)$ 分布分别为 $0.34 \sim 0.38$ 、 $0.27 \sim 0.33$, C_{31} 升藿烷 $22S / (22S + 22R)$ 为 $0.49 \sim 0.56$,显示第四系样品未达到平衡演化的终点,尚处于未熟低熟阶段。

5 低丰度高效天然气藏成藏机理

根据研究结果和其他相关研究成果显示,柴达木第四系主要发育低丰度有机碳含量的气源岩,有机质通常被认为是生烃潜力有限的陆源生物为主的腐殖型和含腐泥腐殖型。然而,这样一个低丰度的生烃系统却形成了世界上著名的大型生物气藏(探明储量达到 $2\ 770.98 \times 10^8\ \text{m}^3$)^[13]。这与柴达木第四系特殊的地质背景有关。从低丰度气源岩生烃效果看,虽单位体积气源岩的生气量并不大,但巨大的沉积厚度(最大气源岩厚度超过 $1\ 600\ \text{m}$),对气源岩质量形成是一个有力的补偿。由于沉积厚度大,尽管本区第四系气源岩质量较差,仍能形

成巨大的生气量(有利生气区气量可达 $6 \times 10^9\ \text{m}^3/\text{km}^2$),充足的气源为本区生物气田的形成奠定了丰厚的物质基础^[3]。

第四系旋回式沉积充填过程形成了有利的生储盖组合。第四纪更新世早期是三湖的形成期,此时盆地三湖地区早期湖泊分布面积相对较小,河流、三角洲分布范围较大,陆源碎屑丰富,沉积物相对较粗。到更新世中期,三湖地区断陷加剧,河流、三角洲开始萎缩,湖泊不断扩展,处于分布最广、水深最大的湖泊鼎盛期。湖盆充填了细粒沉积物,即形成了气源岩,也成为有效盖层。到更新世中晚期,三湖凹陷不断下降沉积,湖盆处于稳定发展时期,湖盆范围较大,形成了半深水湖相沉积。此时可容空间的变化大约等于沉积物+水的供给速率,形成了平衡充填过程,此时湖底形成较强还原环境,十分有利于有机质的保存,加上气候适宜植物的生长,所以该期沉积的暗色泥岩中有机质丰度相对较高。更新世晚期,由于受到第四纪新构造运动的影响,柴达木盆地逐步抬升,伴随着气候的进一步干旱,湖泊收缩并逐渐消亡,局部水体短暂的干化浓缩过程和半干旱环境使水体逐渐变咸。这样一个旋回式沉积过程造成柴东第四系为典型的砂、泥间互沉积。砂岩多为细砂岩、粉砂岩、泥质粉砂岩,局部发育鲕粒砂岩。泥质岩以泥岩、含砂泥岩和砂质泥岩为主,其中的砂岩具有高孔高渗特征,而湖相暗色泥岩层,既是上覆储层的气源岩层,又是下伏储层的直接盖层。砂泥岩沉积的频繁间互,形成了 $3:1 \sim 5:1$ 的最佳生储配置,构成了良好的生储盖组合^[3],对天然气成藏十分有利。

柴达木盆地寒冷的气候和咸水环境形成了第四系有机质的有利保存环境。第四纪冰川的广泛分布,表明第四纪在全球范围内出现了前所未有的寒冷气候,这种干燥寒冷的气候条件,使得沉积湖泊水体偏咸,有效地抑制了甲烷菌对沉积有机质的分解作用,减缓了沉积有机质向生物气的转化进程,有利于有机质的保存。根据碳、硫、铁的分析资料,柴达木盆地东部半深湖、浅湖相的深灰、灰、浅灰及灰绿色泥质岩,甚至一些灰黄色泥质岩的铁氧化还原系数平均值都大于 0.2,达到了弱还原相、还原相^[14],而其中发育的一些碳质泥岩一般都处在还原相至强还原相,表明湖泊底层水具备缺氧的强还原条件,底层水循环作用十分微弱或完全停止而处于封闭状态,使沉积有机质能很好地保存,并有利

于厌氧微生物活动,从而使有机质保持较高的生气潜力。生物模拟实验证明,形成于咸化水体的第四系岩心样品产气潜力高于同期淡化水体的岩心样品^[10]。同时,柴东地区第四系沉积物中检测出长链脂肪酸盐和乙酯,反映了产甲烷菌大量繁殖的介质条件,有利于生物气的产生^[22]。而对柴达木盆地东部第四系某钻孔沉积物中检测出产甲烷过程各种类型菌群的存在,表明在柴达木盆地东部第四系的产甲烷过程可能仍在缓慢进行,为生物气藏形成的动态平衡创造了良好条件^[23]。

6 结语

柴达木盆地东部地区第四系气源岩为典型的低丰度气源岩。有机质丰度基本小于 0.4%, $w(S_1+S_2)$ 多小于 1.0×10^{-3} ,有机质类型多以 II 型有机质为主,少数为 II 型有机质,极少数为 I 型有机质,主要来源于陆源生物为主的腐殖型和含腐泥腐殖型。

柴达木盆地东部地区第四系气源岩地球化学特征显示半咸水湖相地球化学特征,植烷优势明显($Pr/Ph<0.5$, $Ph/nC_{18}>1.5$), C_{30} 藿烷与莫烷相比较,具有较强的藿烷优势,伽玛蜡烷含量较高,很容易识别。

柴达木盆地东部地区第四系气源岩基本未进入成熟状态, C_{29} 甾烷异构化参数 $C_{29}\alpha\beta\beta/(\alpha\beta\beta + \alpha\alpha\alpha)$ 、 $C_{29}\alpha\alpha\alpha/20S/(20S+20R)$ 分布分别为 0.34~0.38、0.27~0.33, C_{31} 升藿烷 $22S/(22S+22R)$ 分布为 0.49~0.56。

巨厚的气源岩沉积厚度、第四纪寒冷的气候和高盐度的水体环境及有效的生储盖组合是形成第四系低丰度高效大型生物气藏的有利条件。

参考文献:

[1] 杨 藩,孙镇城,马志强,等.柴达木盆地第四系介形类化石带与磁性柱[J].微体古生物学报,1997,14(4):378-390.
[2] 陈 晔,袁林旺,周春林,等.柴达木盆地第四纪古气候变化在自然伽马测井曲线上的记录[J].古地理学报,2001,3(2):29-37.
[3] 党玉琪,张道伟,徐子远,等.柴达木盆地三湖地区第四系沉积相与生物气成藏[J].古地理学报,2004,6(1):110-118.
[4] 景民昌,杨革联,孙乃达.末次间冰期—末次冰期柴达木盆地

东部气候演化形式[J].地球科学与环境学报,2004,26(3):83-87.
[5] 易 秀,李 侠.西北地区土壤资源特征及其开发利用与保护[J].地球科学与环境学报,2004,26(4):85-89.
[6] 谢 娟,张 骏,杨 军,等.柴达木盆地矿产开发中环境地质问题及防治对策[J].地球科学与环境学报,2005,27(4):79-82.
[7] 吴光大.柴达木盆地东部第四系典型气藏特征[J].石油学报,1995,16(1):10-16.
[8] 顾树松.柴达木盆地第四系生物气藏的形成与模式[J].天然气工业,1996,16(5):6-9.
[9] 张 祥,纪宗兰.柴达木盆地第四系泥岩盖层的封盖机理[J].天然气工业,1997,17(5):75-76.
[10] 管志强,徐子远,周瑞年,等.柴达木盆地第四系生物气的成藏条件及控制因素[J].天然气工业,2001,21(6):1-5.
[11] 张晓宝,徐自远,段 毅,等.柴达木盆地三湖地区第四系生物气的形成途径与运聚方式[J].地质论评,2003,49(2):168-174.
[12] 王明明,李本亮,魏国齐,等.柴达木盆地东部第四纪水文地质条件与生物气成藏[J].石油与天然气地质,2003,24(4):341-345.
[13] 魏国齐,刘德来,张 英,等.柴达木盆地第四系生物气形成机理分布规律与勘探前景[J].石油勘探与开发,2005,32(4):84-89.
[14] 周鑫虹,周瑞年,管志强.柴达木盆地东部第四系气源岩地化特征与生物气前景[J].石油勘探与开发,1994,21(2):30-36.
[15] 戴金星,裴锡占,戚厚发.中国天然气地质学:第 2 卷[M].北京:石油工业出版社,1996.
[16] 陈中红,查 明,王 克,等.烃源岩生排烃研究方法进展[J].地学前缘,2003,10(3):86-92.
[17] 张立平,黄第藩,廖志勤.伽马蜡烷——水体分层的地球化学标志[J].沉积学报,1999,17(1):136-140.
[18] 王铁冠.论分子有机地球化学若干名词与术语的辨析和厘定[J].地质论评,2002,48(3):284-289.
[19] 李任伟,林大兴,王志珍,等.判断高盐度环境的新标准[J].科学通报,1986,31(8):604-607.
[20] Ekweozor C M, Udo O T. The Oleananes: Origin, Maturation and Limits of Occurrence in Southern Nigeria Sedimentary Basins[J]. Organic Geochemistry, 1988, 13(2): 131-140.
[21] 朱光有,金 强,王 锐.有效烃源岩的识别方法[J].石油大学学报:自然科学版,2003,27(2):6-10.
[22] 徐雁前,刘生梅,段 毅.柴达木盆地第四系沉积物中长链脂肪酸乙酯化合物的检出及意义[J].沉积学报,1994,12(3):99-105.
[23] 邓 宇,张 辉,钱贻伯,等.柴达木盆地东部第四系某钻孔沉积物中厌氧细菌的组成与分布[J].沉积学报,1996,14(增刊):220-226.