

渤海湾盆地歧口凹陷沙河街组 天然气赋存状态及其勘探意义

龙华山^{1,2,3}, 向才富^{2,3}, 牛嘉玉¹, 李洪香⁴, 魏立春^{2,3}, 韩国猛⁴, 姜福杰^{2,3}

(1. 中国石油勘探开发研究院, 北京 100083;

2. 中国石油大学油气资源与探测国家重点试验室, 北京 102249;

3. 中国石油大学地球科学学院, 北京 102249; 4. 中国石油大港油田分公司勘探开发研究院, 天津 300280)

摘要:近年来,随着歧口凹陷深层油气的勘探,在深层(>3 500m)沙河街组发现了大量的天然气藏,这些天然气藏主要沿深大断裂分布,垂向上具有下气上油、浅层为气的分布特征。为了解天然气在油水中的赋存状态,指导油气勘探,依据天然气各组分在油水中的溶解性的影响因素(温度、压力、油密度、水矿化度等),计算出地层条件下天然气在原油和水中的溶解量,并与实际油气产量进行了对比分析。沙河街组天然气在油水中大多数达到饱和—过饱和,垂向上形成了深层游离气为主,向中深层逐渐过渡为油溶气及少量的游离气,临近沟通气源的深大断裂浅层因气源充足可形成游离气。据此探讨了研究区内油气运聚成藏模式,认为沟通油气源的深大断裂浅层是寻找凝析气藏和纯气藏的有利区域,中深层因生油窗内有大量原油的存在是寻找油藏、油溶气藏或轻质油藏的有利靶区,深层断裂相伴生的圈闭有利于凝析气藏及纯气藏的富集。

关键词:深层天然气;赋存状态;沙河街组;歧口凹陷;渤海湾盆地

中图分类号:TE122

文献标志码:A

文章编号:1672-1926(2014)05-0665-14

引用格式:Long Huashan, Xiang Caifu, Niu Jiayu, *et al.* Occurrences of the natural gas in Shahejie Formation of Qikou Depression in Bohai Bay Basin and its exploration significance[J]. Natural Gas Geoscience, 2014, 25(5): 665-678. [龙华山, 向才富, 牛嘉玉, 等. 渤海湾盆地歧口凹陷沙河街组天然气赋存状态及其勘探意义[J]. 天然气地球科学, 2014, 25(5): 665-678.]

0 引言

近年来,随着渤海湾盆地中浅层进入高勘探程度阶段,深层油气的勘探越来越受到重视,成为储量增长的重要领域^[1-3]。中国石油大港油田也加强了深层(埋深>3 500m)的勘探,滨海地区深层天然气作为重要的潜力增储区成为歧口凹陷勘探的重点。在滨海地区重点部署 10 多口深井和超深井,在沙一段、沙二段和沙三段中均获得了工业油气流,展示了良好的勘探潜力。本文基于歧口凹陷探井的试油、完井等资料,分析天然气在地层中的赋存状态,从另

一个角度来探讨研究区内油气藏的分布富集规律,进一步指导油气的勘探。

1 地质背景

歧口凹陷位于渤海湾盆地中北部黄骅拗陷中部,是新生代陆内伸展盆地,以伸展构造为主^[4-5]。由于多期构造运动的影响,歧口凹陷地质构造复杂,断裂发育,该区被分割成许多小的构造单元,形成了“东西分带、南北分块”构造格局。歧口凹陷由歧口主凹、板桥次凹、歧北次凹、歧南次凹和其间的北大港、南大港半地垒突起组成(图 1)。

收稿日期:2013-05-02;修回日期:2013-06-20.

基金项目:国家重大专项(编号:2011ZX05006-005 和 2011ZX05006-006);自然科学基金项目(编号:40872097 和 41272161)联合资助.

作者简介:龙华山(1985-),男,湖北荆门人,博士研究生,主要从事油气地质综合研究. E-mail: longhuashan1111@yahoo. cn.

通讯作者:向才富(1975-),男,湖北宜昌人,副教授,博士,主要从事地质流体及其成矿与成藏作用研究. E-mail: xcf@cup. edu. cn.

歧口凹陷为黄骅拗陷最富油气的生油凹陷, 新生代发育古近系沙河街组和东营组、新近系馆陶组和明化镇组及第四系平原组(图 1)。沙河街组自下而上可分为 3 段: 沙三段、沙二段和沙一段。沙三段以巨厚的深湖相富含有机质的泥岩、薄层细砂岩、粉砂岩为主; 沙二段为一套以砂岩、夹少量灰色泥岩为主的沉积; 沙一段沉积了浅湖一半深湖相的灰黑色泥岩、油页岩及含生物灰岩、鲕粒灰岩。东营组为一套砂泥岩互层的河流三角洲沉积。馆陶组、明化镇组为巨厚的含砾砂岩、砂岩的平原—河流相沉积, 也

含少量的泥岩。第四系平原组为以砂砾岩为主的河流沼泽相、冲积平原相沉积。

歧口凹陷在新生代经历了早期构造沉降为主的裂陷阶段, 以及晚期热沉降为主的拗陷阶段, 共发育了沙三段、沙二段、沙一段及东营组 4 套生油层系, 其中沙三段和沙一段为有利的烃源岩, 具有有机质类型好、丰度高、生烃潜力大的特点。这些烃源岩与前古近系、古近系的沙河街组和东营组、新近系的馆陶组和明化镇组等储集层在垂向上形成了多套生储盖组合^[6-8]。

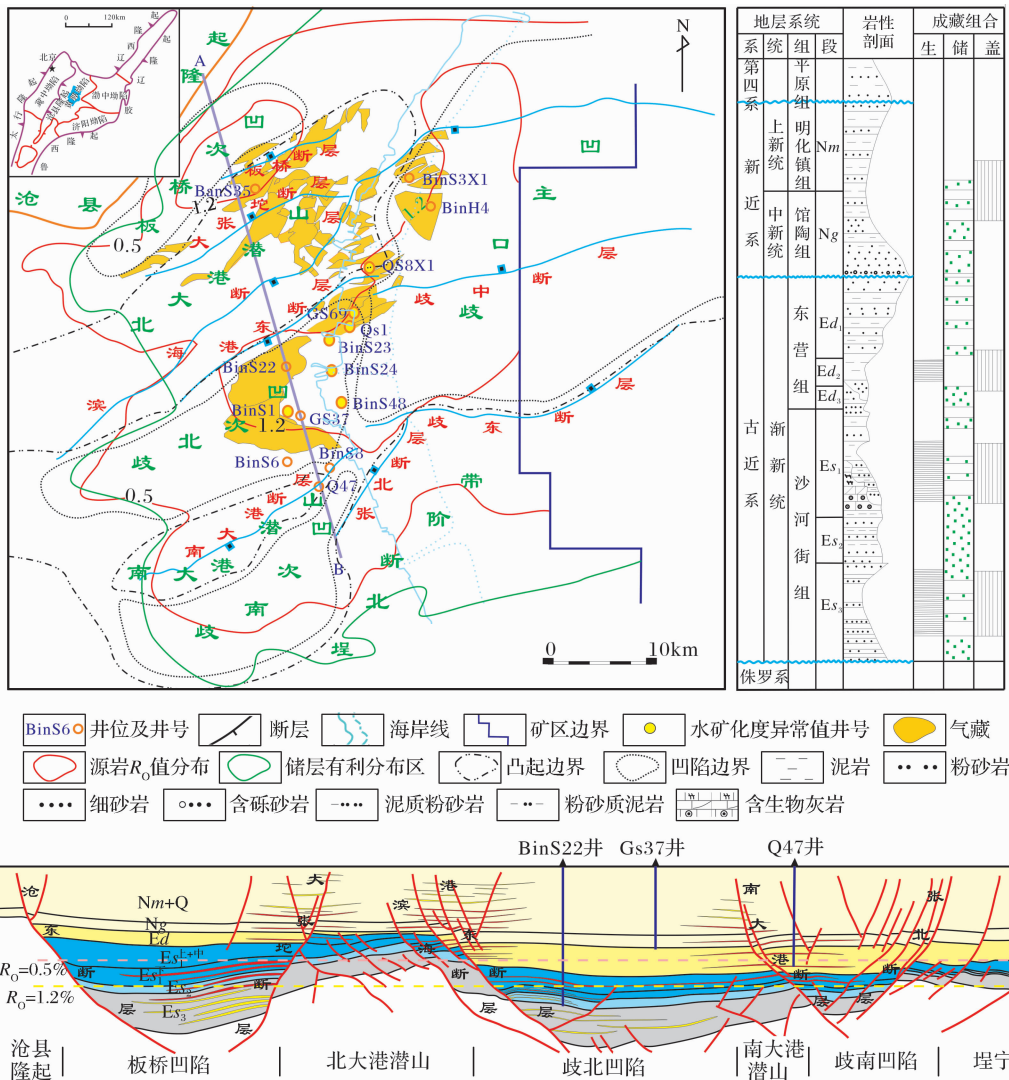


图 1 歧口凹陷构造平面图、柱状图和剖面图

Fig. 1 Petroleum geologic setting of the Qikou Depression, Bohai Bay Basin

2 天然气地下赋存状态恢复方法

经采出到地面的天然气因温度、压力的降低表现为游离态的天然气, 然而其有可能在地层中以溶解

态、游离态或其他形态存在。在不考虑其他因素的情况下, 地下天然气主要由以下几部分组成: 油溶气、水溶气和游离气。本文以沙河街组沙一段、沙二段、沙三段的油、气、水性质作为研究对象, 依据天然气与油

水的共存状态,判断天然气在储层中受温度、压力、原油物性、水矿化度等因素的影响下可能的赋存状态。

2.1 溶解气量的恢复方法及原理

溶解气在地层中主要分为2种类型:即油溶气和气溶水。水溶气在地层水的溶解度不仅与天然气本身的组分有关^[9],还与地层的温度、压力和地层水矿化度有关^[10-15]。不同的天然气组分在水中的溶解度为:甲烷>乙烷>丙烷^[11,13]。地层水矿化度越高,天然气在水中的溶解量越少^[12-13]。

如果不考虑其他地质条件,油溶气在油中的溶解度主要与天然气组分、原油温度、地层压力和油密度有关^[15-22]。在温度、压力和原油密度相同的情况

下,天然气中分子量越大的重烃组分在油中的溶解度最高,而油密度越大,天然气在油中的溶解度越小。薛海涛等^[23]认为天然气在原油中的溶解度受压力的影响远远大于其受温度和油密度的影响。本文研究天然气在油水中的溶解量主要依据天然气各组分在单位体积地层水和油中溶解量的理论公式计算所得,公式见文献^[24]。

2.2 基础数据

根据天然气在油和水中的溶解量主要受水矿化度、温度、压力和油密度等的影响,统计了歧口地区各探井的试油温度、压力、水矿化度、油密度、油气水日产量等数据(表1)。

表1 歧口凹陷各探井基础数据

Table 1 Basic geological data from the exploratory wells in the Qikou Depression

钻井	深度/m	层位	温度/℃	压力/MPa	油密度 /(g/cm ³)	矿化度 /(g/L)	油气水日产量/m ³		
							油	气	水
Bai10-1	3 741.9	Es ₂	141	44.2	0.862 9	17.262	0.15	0	6.95
Bai10-1	3 583.8	Es ₁	135.5	43.7	0.789 7	—	58.38	160 000	0
Bai10-3	3 709.4	Es ₁	137.1	43.8	0.853 7	10.299	22.960	8 782	33
Bai10-3	3 752.65	Es ₁	133.1	43.9	0.812 3	—	0.17	0	0
Bai10-3	3 995.9	Es ₁	143.1	49	—	29.458	0	0	53.5
Bai14-1	3 568.4	Es ₁	127	35.7	0.845 3	—	3.67	0	0
Bai15-1	3 201.6	Es ₁	123	40.2	0.856 9	—	54.62	13 639	0
Bai15-1	3 209.95	Es ₁	123.2	39.8	0.810 6	—	34.05	36 818	0
Bai15-1	3 569.8	Es ₂	131	43	—	28.194	0	0	8.8
Bai15-1	3 657.45	Es ₂	128	43.6	0.847 6	28.068	1.42	744	55.9
Bai20-4	3 639.35	Es ₁	141.5	42.4	0.831 8	13.637	4.6	0	8.87
Bai20-4	3 729	Es ₁	131.5	42.6	0.829 8	14.711	24.58	17 220	11.7
Bai20-4	3 831.65	Es ₁	143.5	39.2	0.845 2	—	1.01	0	0
Ban19	3 024.7	Es ₁	100.5	34.3	0.795 1	—	157.21	0	0
Ban19	3 049.5	Es ₁	114.3	32.3	0.800 5	—	37.48	18 023	0
Ban19	2 375.5	Es ₁	97	25.2	—	5.536	0	0	119
Ban19-1	2 949.05	Es ₁	113.2	32.1	0.921	—	44.73	1 867	0
Ban19-1	3 129.3	Es ₁	112	33	0.799 6	10.133	30.27	11 725	39.9
Ban19-2	3 116.25	Es ₁	119.2	28	0.824 3	—	59.44	16 876	0
Ban24-1	3 340.05	Es ₁	118.6	32.4	0.771 5	—	69.99	69 698	0
Ban24-1	3 470.3	Es ₁	123.4	38.4	—	9.251	0	0	54.3
Ban24-1	3 168.45	Es ₁	108.6	20.7	—	8.555	0	0	15.6
Ban24-1	3 230.2	Es ₁	115.5	32.1	—	9.476	0	0	65.5
Ban24-1	2 679.55	Es ₁	97.7	24.3	—	6.173	0	0	6.77
Ban24-1	3 138.85	Es ₁	112.6	28.7	0.766 4	7.493	21.27	4 022	7.37
Ban24-2	3 517.3	Es ₁	129.3	37.7	0.820 7	—	51.91	20 042	0
Ban43-5	3 112.7	Es ₁	118.5	33.3	0.797 8	—	73.45	39 086	0
Ban59	2 535.7	Es ₁	110.2	28.2	—	7.935	0	0	125
Ban59	2 918.05	Es ₁	121.3	26.7	0.797 5	7.161	0.33	0	6.26
Ban59	2 939.1	Es ₁	120	31.2	0.773 8	8.005	5.63	14 475	26.8
Ban65	3 307.45	Es ₃	134	39.7	0.814 2	—	18.46	0	0
Ban65	3 222.85	Es ₃	123	31.1	0.803 6	—	30.11	2 706	0

表 1 歧口凹陷各探井基础数据(续)

Table 1 Basic geological data from the exploratory wells in the Qikou Depression(continous)

钻井	深度/m	层位	温度/℃	压力/MPa	油密度 /(g/cm ³)	矿化度 /(g/L)	油气水日产量/m ³		
							油	气	水
Ban876	2 543	E _{s1}	97.3	27.9	0.855 5	15.960	28.25	3 666	137.5
Ban876	2 232.5	E _{s1}	87	21.7	0.726 3	—	56.18	14 3952	0
Ban876-3	2 951.85	E _{s2}	110	31.5	0.713 7	10.161	5.46	19 245	32.6
Ban880-2	3 023.3	E _{s2}	114.2	28.2	0.747 3	—	23.76	25 029	0
Ban884	2 512	E _{s1}	93.6	29.7	0.825 3	16.036	51.25	13 647	5.64
Ban904	2 915.75	E _{s1}	115.2	31.9	0.807 8	17.321	5.2	0	12.2
Ban904	3 377.35	E _{s1}	123.2	36	—	8.105	0	0	15.7
Ban904	2 837.8	E _{s1}	114.3	29.9	0.907 6	—	35.59	1 396	0
Ban904	3 483	E _{s1}	127.3	39.8	0.831 4	—	13.35	0	0
BanG10	2 817.3	E _{s1}	106.3	22.5	0.858 7	4.995	20.73	0	0
BanS15	3 676	E _{s1}	119.47	44	0.795 2	—	81.87	126.449	0
BanS17	2 875.7	E _{s1}	116.6	28.1	0.736 9	9.298	0.46	1 953	3.86
BanS17	3 266.6	E _{s1}	123.1	33.7	0.806 4	7.605	0.91	0	3.31
BanS17	3 497.6	E _{s1}	130.7	41.3	0.82	6.642	18.17	19 896	46.9
BanS31	3 219.65	E _{s1}	131.3	46.2	0.853 6	—	62.2	9 489	0
BanS35	4 544.35	E _{s3}	163.7	81.5	0.789 9	—	0.77	0	0
BanS35	4 126.9	E _{s3}	146.7	52.9	0.823 7	—	0.32	0	0
BanS35	3 972.95	E _{s3}	145.2	41.5	0.845 9	—	0.63	0	0
BanS35	3 462.2	E _{s1}	134.5	41.2	0.775 8	—	20.88	52 591	0
BanS35	3 291.7	E _{s1}	123.3	38.4	0.803 9	8.284	12.94	8 715	11.2
BanS35	3 287.25	E _{s1}	123.1	38.4	0.804 7	8.912	25.48	32 167	7.17
BanS47	3 980.35	E _{s2}	128	44.4	—	6.396	0	0	10
BanS47	3 875.7	E _{s1}	161	37.6	—	5.767	0	0	4.13
BanS47	3 282.5	E _{s1}	116	32.3	—	7.145	0	0	15.9
BanS47	3 131.4	E _{s1}	100	32.3	—	6.021	0	0	0.47
BanS49	2 816.9	E _{s1}	87	26.2	—	4.145	0	0	28.2
BanS701	3 321.95	E _{s2}	133.1	20.5	0.811 5	7.909	30.68	37 067	9.29
BanS76	3 107	E _{s3}	124.4	35.6	—	8.583	0	0	1.7
BanS76	3 040	E _{s2}	121.7	37.6	0.779	—	11.75	21 972	0
BanS76	2 889.7	E _{s2}	99.3	31	—	9.971	0	0	29.88
BanS76	3 008.05	E _{s2}	116	32.2	0.750 6	—	37.84	59 200	0
BanS78-1	3 507.6	E _{s3}	133.3	39.2	0.818 5	—	0.43	0	0
BanS78-1	3 702.65	E _{s3}	140.6	43.2	0.842 5	—	7.75	0	0
BanS78-1	4 287.1	E _{s3}	163.2	41.6	0.807 9	—	0.78	0	0
BanS78-1	2 669.85	E _{s1}	107.5	29.1	—	15.009	0	0	4.16
BanS82	4 133.2	E _{s1}	137.3	46.9	0.825 5	2.890	22.9	0	45.35
BanS82	4 203.05	E _{s1}	129.3	48.1	0.821	7.063	3.62	0	13.5
BanS82	4 194.25	E _{s1}	127.3	44	0.823	6.120	12.15	0	1.4
BanS82	4 212.05	E _{s1}	144.1	41.7	0.82 65	6.528	0.92	0	11.84
BanS82	2 741.75	E _{s1}	101.3	28	—	8.395	0	0	19
BanS82-1	4 190.26	E _{s1}	140.7	39.7	0.826 2	—	1.05	0	0
BanS82-1	4 131.7	E _{s1}	143.3	39.2	—	5.82 0	0	0	15.9
BanS82-1	4 002.25	E _{s1}	140.2	45.8	0.799 5	—	21.45	3 064	0
BanS82-1	3 920.9	E _{s1}	146.3	43.7	—	8.549	0	0	2.02
BanS82-1	2 729.2	E _{s1}	92.3	27	0.763 7	—	13.09	13 009	0
BanS88-1	3 925.7	E _{s3}	135.3	47.6	—	6.540	0	0	7.05
BinS1	4 412.95	E _{s2}	151	49.2	0.806 3	186.781	7.86	4 216	58.64
BinS1	4 016.9	E _{s1}	145.2	59.4	0.850 1	27.400	8.1	0	12.2
BinS13x1	4 917.2	E _{s1}	156.4	48.5	0.844 3	—	14.28	0	0

表 1 歧口凹陷各探井基础数据(续)

Table 1 Basic geological data from the exploratory wells in the Qikou Depression(continous)

钻井	深度/m	层位	温度/℃	压力/MPa	油密度 /(g/cm ³)	矿化度 /(g/L)	油气水日产量/m ³		
							油	气	水
BinS13x1	4 812.4	E _{s1}	153.4	57.1	0.861 7	—	31.8	0	0
BinS16x1	4 788.75	E _{s1}	161.3	48.7	0.834 5	—	34.51	0	0
BinS20x1	3 632.6	E _{s3}	141.9	51.4	0.863 1	14.761	0	0	43.8
BinS22	4 639.25	E _{s2}	170.3	61	0.783 5	—	4.31	40 020	0
BinS22	4 463.05	E _{s2}	158.8	55.9	0.801 7	29.437	14.72	20 255	47.3
BinS24	4 321.05	E _{s1}	158.9	59.3	0.822 7	53.706	6.45	0	27.9
BinS6	3 871.65	E _{s3}	139.5	37.8	0.820 2	—	0.86	0	0
BinS6	3 560.6	E _{s2}	122.6	34.8	0.859 3	—	40.85	12 692	0
G80-1	3 894.7	E _{s1}	142.3	34.6	0.801 6	14.035	26.07	4 044	3.05
G80-1	4 210.75	E _{s3}	152.5	41.6	0.826 3	—	18.15	2 803	0
G80-1	3 687.5	E _{s1}	134	32.8	0.844 7	—	2.78	0	0
G80-1	4 008.4	E _{s2}	146.3	42.1	0.831	—	23.1	5 429	0
G801	3 295.85	E _{s1}	133.3	45.9	0.833 8	—	68.84	74 827	0
G801	3 385.45	E _{s1}	142.3	47.3	0.809 6	13.497	27.05	41 516	9.02
G801	3 244.4	E _{s1}	122	45.2	0.830 4	12.456	1.69	14 594	37.17
G801	3 251.1	E _{s1}	136.3	45.2	0.831	12.294	9.39	28 976	76.8
G801	2 910.85	E _{s1}	117	39.4	0.883	—	0.33	0	0
G86-1	3 592.25	E _{s1}	137.3	39.5	0.843 1	—	2.28	0	0
G86-1	3 705.375	E _{s3}	136.3	34.7	0.835 7	—	1.15	0	0
G95-2	3 406.65	E _{s2}	135.2	27.9	0.855 8	—	21.38	17 986	0
G95-3	3 378.42	E _{s2}	120.3	29.5	0.827 9	—	2.28	0	0
G95-3	3 429.77	E _{s2}	129.3	38.6	—	10.850	0	0	7.73
G95-4	3 379.95	E _{s1}	132.8	44.2	0.794 2	—	5.31	16 791	0
G95-8	3 451.4	E _{s1}	133.3	43.2	0.860 2	16.682	51.73	7 579	12.5
G95-9	3 397.9	E _{s1}	125.2	37.8	0.857 7	—	137.58	22 121	0
GS10	3 756.2	E _{s2}	138.3	57.8	0.856 3	9.639	18.45	6 806	46.7
GS10	3 782.5	E _{s2}	140.5	53.6	0.842 5	9.450	8.88	2 306	9.4
GS10	3 659.8	E _{s2}	125.8	40.7	0.840 3	8.709	14.88	9 154	51.2
GS10	3 333	E _{s1}	114.6	44.4	0.855 3	8.653	18.64	3 730	14.26
GS10	3 368.5	E _{s1}	132.6	41.9	0.846 9	—	3.42	0	0
GS11	3 904.3	E _{s1}	139.6	61.5	0.831 3	—	101.15	21 146	0
GS13	3 959.5	E _{s1}	134.8	62.4	0.835 3	—	142.46	49 585	0
GS13	3 944.2	E _{s1}	145.6	62.2	0.836 3	—	253.5	120 368	0
GS14	3 944.2	E _{s1}	150	51.2	0.844 9	11.666	3.09	0	24
Gs23	4 173.9	E _{s2}	150.6	67.3	0.845 8	84.017	7.58	6	12.5
GS23	3 889.5	E _{s1}	125.9	59	0.839 4	16.750	18.6	5 111	3.87
GS29	3 989.7	E _{s2}	142	43.4	0.829 5	—	52.49	32 888	0
GS3	3 569.2	E _{s1}	123.1	45.3	0.855 8	—	43	12 628	0
GS3-1	4 016.1	E _{s1}	136.5	47.5	0.866 2	—	7.97	0	2.26
GS3-1	4 020.15	E _{s1}	135.3	47.5	0.867	—	7.5	0	5.5
GS3-1	4 031.05	E _{s1}	136.9	45.2	0.868 2	—	4.2	0	1.05
GS3-1	3 942.69	E _{s1}	134.3	46.6	0.837 3	—	15.41	0	0
GS3-1	3 978.25	E _{s1}	135.3	44.6	0.860 6	—	0.95	0	0
GS33	4 223	E _{s1}	151.1	52.2	0.833 5	—	0.67	0	0
GS33	4 169.5	E _{s1}	132	51.6	0.834 9	—	1.95	0	0
GS42x1	3 631.2	E _{s1}	133.3	48.4	0.852	5.009	41.67	11 062	24.4
GS42x1	3 187.15	E _{s1}	118.8	44.4	0.871 5	7.867	0	0	5.41
GS42x1	3 390.5	E _{s1}	135.6	47.3	0.868 1	—	91.58	9 304	0
GS46	3 960.5	E _{s3}	151.3	55.8	0.845 7	—	0.99	149	0

表 1 歧口凹陷各探井基础数据(续)

Table 1 Basic geological data from the exploratory wells in the Qikou Depression(continous)

钻井	深度/m	层位	温度/℃	压力/MPa	油密度 /(g/cm ³)	矿化度 /(g/L)	油气水日产量/m ³		
							油	气	水
GS47	4 073.4	E _{s1}	144.3	55.8	0.862 6	—	0.9	0	0
GS48	4 649.9	E _{s2}	168.9	58	0.816 8	220.078	0.16	0	6.67
GS48	4 200.45	E _{s1}	147.3	59.7	0.845 5	—	0.58	0	0
GS48	4 222.7	E _{s1}	152.5	53.9	0.836 3	19.973	2.94	0	0.29
GS48	3 660.75	E _{s1}	137.3	57	0.865 9	10.839	4.99	0	4.43
GS64	3 178.59	E _{s1}	111.4	32.2	0.864 9	7.591	0.61	0	0.8
GS64	3 198.81	E _{s1}	113.3	32.4	0.864 2	—	2.78	0	0
GS64	3 209.93	E _{s1}	123.2	31.2	0.855 4	8.768	5.73	0	2.55
GS64	3 702.65	E _{s1}	139.3	48.3	0.818 1	—	22.37	30 529	0
GS64	3 818.75	E _{s1}	141.5	63.1	0.822 1	—	1.63	0	0
GS65-1	3 417.7	E _{s1}	124	36.3	0.845 5	14.814	21.29	12 368	1.05
GS66	3 446.1	E _{s1}	130	47.5	—	8.376	0	0	1.8
GS66	3 492.9	E _{s1}	136	48.4	0.858 8	29.036	0	0	5.18
GS66	3 570	E _{s1}	134	48.4	0.850 4	15.313	15.87	5311	6.29
GS66	3 246.15	E _{s1}	129	39.8	0.846 9	11.722	10.75	0	12.7
GS67	3 460.25	E _{s1}	129.7	42.4	0.866 3	—	2.83	0	0
GS68x1	3 698	E _{s1}	132	36.5	0.839 6	—	14.65	0	0
GS69	3 927.45	E _{s1}	145.2	37.8	0.857	62.197	0	0	1.26
GS69	3 324.05	E _{s1}	120.4	45.9	—	9.098	0	0	19.7
GS7	3 504.7	E _{s1}	120.9	40.3	0.791 5	—	11.75	88 152	0
GS7	3 564.95	E _{s1}	126	46.3	0.797 5	—	2.76	5 531	0
GS7	3 243.65	E _{s1}	113.3	43.1	0.828	—	22.34	18 917	0
GS7	3 290.5	E _{s1}	114.7	43.8	0.836 5	5.832	1.97	0	22.2
GS7	3 299.5	E _{s1}	115	43.9	0.836	6.080	1.12	0	14.96
GS7—1	3 741.75	E _{s1}	179	22.3	0.833 1	4.389	0.64	0	1.12
GS7—1	3 596.43	E _{s1}	123.9	21.4	0.855 2	—	0.3	0	0
GS78	3 916.45	E _{s1}	141.1	66.5	0.827 5	—	219.8	79 984	0
GS78	4 226.6	E _{s1}	152.1	73.1	0.866 6	—	542.58	90 500	0
GS9	3 484.2	E _{s1}	120.5	38.3	0.848 5	24.069	0.39	0	2.2
GS9	3 731.1	E _{s1}	127.9	41	0.843 2	20.883	0.23	0	1.66
GS9	3 176.05	E _{s1}	112.3	34.9	0.856 4	—	103.11	12 530	0
QS1	4 375.2	E _{s2}	147.1	55.8	0.872 9	11.219	0	0	1.65
QS1	4 223.4	E _{s2}	142.5	63.2	0.848 2	175.655	0	0	30.39
QS1	3 929.2	E _{s1}	133.5	58.8	0.843 7	24.848	0	2 561	28.56
QS1	4 955.95	E _{s3}	162.5	79.3	—	—	0	55 008	0
QS1	5 056	E _{s3}	167.6	81.6	—	—	0	1 239	0
QS1	4 975.4	E _{s3}	165	61.6	—	—	0	1 938	0
QS1	4 873.35	E _{s3}	161.6	60.3	—	—	0	6 576	0
QS6	4 463.55	E _{s3}	165.3	33.2	0.796 7	—	6.35	12 831	0
QS6	4 375	E _{s3}	156	32.5	0.798 5	—	19.79	22 204	0
QS8x1	4 737.6	E _{s3}	158	45.5	—	49.378	0	10 100	28.8
QS8x1	4 694.3	E _{s3}	156.6	45.	—	12.391	0	4 667	82
QS8x1	5 044.5	E _{s3}	166.8	68.7	0.7987	39.404	0	51 179	0

3 地质特征及流体性质分析

3.1 地层温压特征

地层温度和压力对天然气的溶解量影响较大,将

进一步影响天然气在地层中的赋存状态以及油气藏的类型。随着埋深的增加,天然气在油水中的溶解度因为温度升高、压力增大而大幅度增加^[10-14]。沙河街组现今地温梯度为 3.1℃/100m[图 2(a)],地层存在 3

套压力系统:常压、高压和超高压[图 2(b)]. 深度小于 2 800m,压力系数小于 1.2,以常压为主. 深度大于 3 500m,压力系数大于 1.4,达到了超高压的级别.

在 2 800~3 500m 之间为高压,压力系数为 1.2~1.4. 目前研究区内板桥和北大港地区已发现的大量凝析油气藏主要富集于该高压高温的层段内.

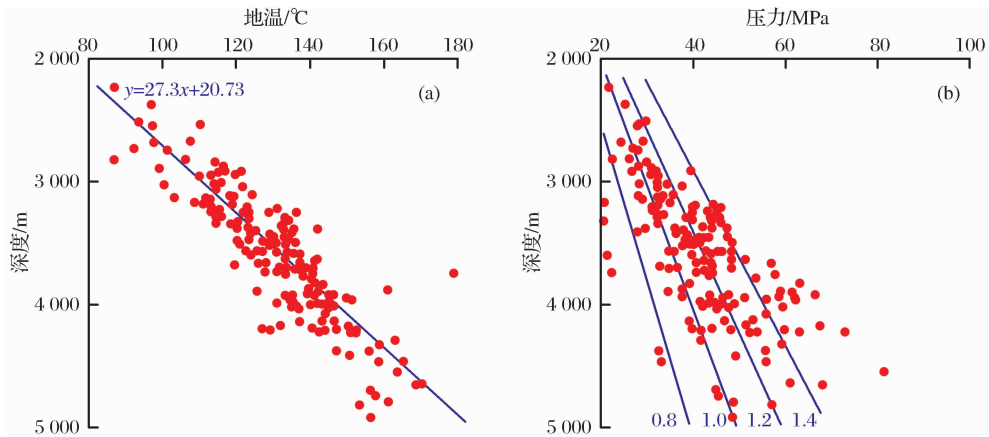


图 2 歧口凹陷沙河街组地层温度(a)和压力(b)随深度变化特征

Fig. 2 Formation temperature(a) and pressure(b) of Shahejie Formation vs depth

3.2 地层水特征

沙河街组地层水矿化度主要分布在 2.89~29.458g/L 之间,部分井如 BinS24、GS69、BinS1、GS23、GS48、QS1 和 QS8X1 等井的地层水矿化度大于海水的矿化度(35g/L)(图 3)。水矿化度异常高的井在平面上主要沿港东断层分布(图 1),这部分具有异常高矿化度的地层水可能来源于沿深大断裂运移上来的深部高矿化度的卤水。从矿化度随深

度的变化特征上来看(图 3),埋深小于 3 500m,矿化度主要为 5~15g/L,可能受浅层地表水的淡化作用矿化度相对较低;深度大于 3 500m,矿化度具有随深度增加而增大的趋势。一方面反映出深度大于 3 500m 的深层,存在一个有利于油气成藏的封存体系;另一方面高水矿化度的地层水,大大降低了天然气的溶解量,通过计算发现天然气在地层水中的溶解量要远远低于在油中的溶解量。

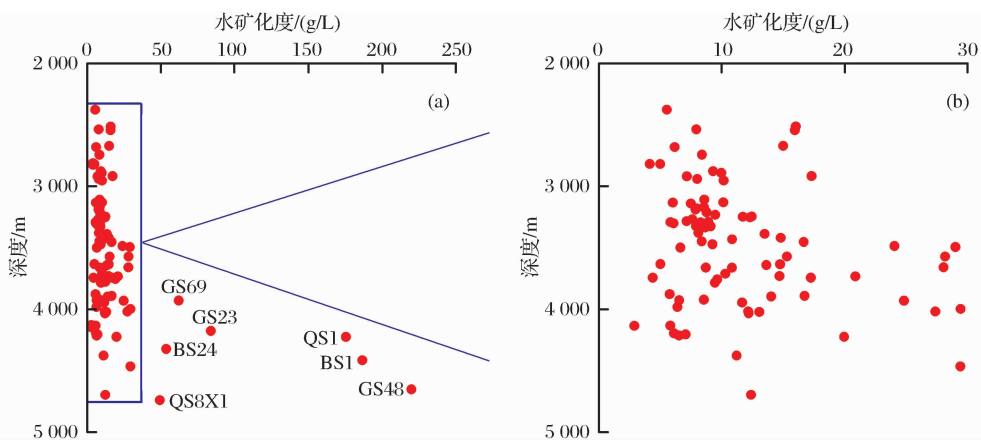


图 3 沙河街组水矿化度随深度分布特征

Fig. 3 Vertical formation water salinity distribution of the Shahejie Formation

3.3 原油物性特征

歧口凹陷沙河街组原油存在 3 种类型:即低密度低黏度的轻质油、正常原油和高密度高黏度的稠油(图 4)。原油的黏度与密度具有很好的相关性:当原油密度大于 0.85g/cm³ 时,随原油密度的增大黏度

迅速增大且具有线性特征,反映出油气运移过程原油组分的分馏效应;油密度介于 0.7~0.85g/cm³ 时黏度呈缓慢增加的趋势,其主要与富轻烃组分的含量有关,气源充足,溶解于原油中的天然气含量增多,原油的黏度与密度就越小,越有利于向轻质油转变。

沙河街组的原油在垂向上的分布存在差异:埋深小于 3 000m 时,轻质原油、正常原油和稠油共存;深度介于 3 000~4 500m 之间时主要为正常原油;深度大于 4 500m 时则以偏轻质原油为主(图 5)。深层因气源充足,油层中溶解了大量的气导致油密度降低。中深层为原油富集层段,原油富余而气溶解量不足,以正常原油为主,但向深层逐渐过渡为轻质油气;浅层则存在因深大断裂的沟通作用而形成的深部来源的气溶于油中的低密度低黏度的轻质油、生油窗内运移上来的正常原油以及遭受水洗氧化的稠油三者共存的现象。

4 地下天然气的赋存状态

4.1 沙河街组天然气在油水中的溶解特征

假定地下天然气的赋存仅受温度、压力、油水性质及其组分的影响,将歧口凹陷沙河街组天然气的

溶解量与其实际产量作对比,存在以下 3 种类型:①天然气的实际产量大于其在油和水中的溶解量,说明天然气在油水中达到了饱和可以形成游离气;②两者近似相等,地层中天然气则以溶解态为主,即油溶气或水溶气,在开采的过程中随着温度、压力的下降,天然气从油水中脱出,并在地表表现出高的气油比特征;③天然气的实际产量远远小于其在油和水中的溶解量,即天然气在油水中的溶解量未能达到饱和,仅在地质条件发生改变如构造活动或采取降温降压等措施的情况下,打破在油水中的动态平衡产生微量的气。

从图 6 中可以看出,沙河街组天然气的产量大多数大于其在油水中的溶解量(斜率 $K > 1$),即天然气在油水中的溶解量达到饱和一过饱和,可形成游离态赋存的气类型。在斜率 $K = 1$ 的附近分布着部分点,天然气的产量与其在油水的溶解量近似相

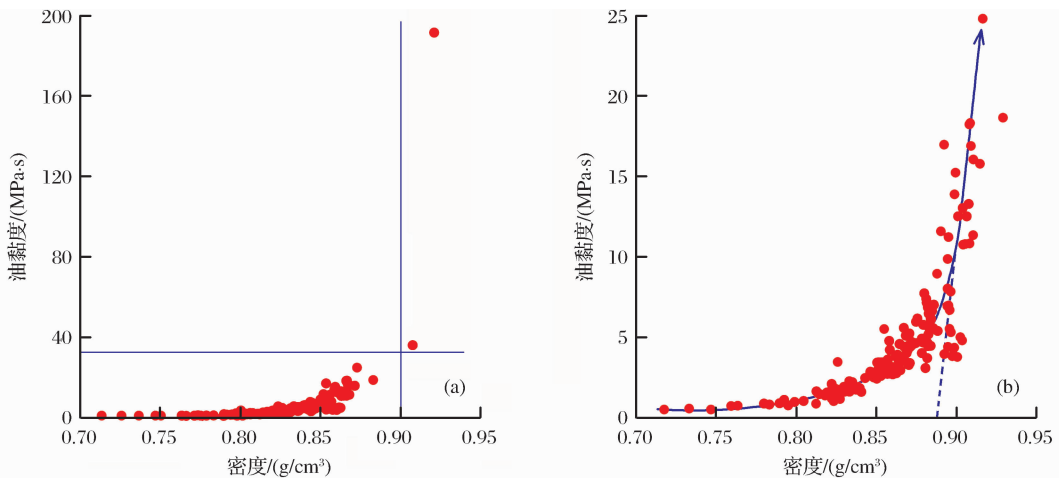


图 4 歧口凹陷沙河街组原油密度和黏度关系

Fig. 4 The relation between the density and viscosity of the crude oil found in the Shahejie Formation in the Qikou Depression

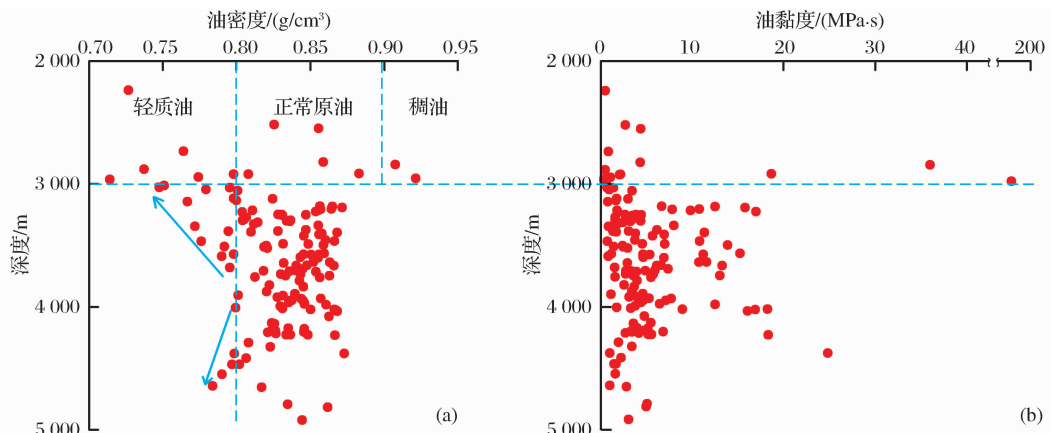


图 5 歧口凹陷原油物性随深度变化特征

Fig. 5 Vertical physical properties of the crude oil found in the Shahejie Formation in the Qikou Depression

等,即地层中天然气在油水中达到近似饱和并以油溶气或水溶气的方式赋存。少量样品点位于斜率 $K=1$ 之下,因受气源条件或其他因素的限制导致天然气在油和水中的未能达到饱和,这部分天然气随油水层产出地表时因温度压力的降低可能会有微量气出现,但不具有很好的工业价值。

4.2 各层位天然气的赋存类型

根据前面假设的地表产出的天然气主要来自地层中的油溶气、水溶气和游离气 3 部分组成,利用游离气量来表示天然气产气量与油水溶气量之间的差值,以此反映地层中天然气呈游离态的可能性大小,并探讨其在地下的油气赋存类型。

沙一段地层中的天然气在油水中的溶解量总体上达到饱和—过饱和,过饱和集中分布在 3 000~4 000m 的深度段上(图 7)。沙二段和沙三段的天然气均达到了饱和—过饱和,但沙二段的过饱和和天然气主要分布在 3 000~3 600m 和大于 4 500m 的 2 个深度段,沙三段的过饱和和天然气主要分布在深度大于 4 500m 的范围内(图 8,图 9)。歧口凹陷存在

中深层成藏体系和深层成藏体系,现今已发现的油气均处于生烃主带范围内^[25-29]。中深层成藏体系深度范围位于 2 000~3 600m,烃源岩大量生烃有充足的油源,储层孔隙度大、物性好,有利于油气聚集藏。深层沙三段的烃源岩已经达到成熟—高成熟阶段,有利于形成游离气藏^[3,30-34],且沙河街组深层储层发育次生孔隙带^[28,35]。

沙一段地层以 3 500m 左右为界,浅部主要为游离气和油溶气,深部以油溶气为主(图 7)。深度大于 3 500m,天然气在油水中达到饱和,油产量高的同时气产量也高,因此该深度段内的天然气主要来自油溶气。埋深小于 3 500m 深度范围内,天然气在油水中的溶解量因温度压力等的影响,以饱和—过饱和为主,油产量不高,气产量具有随深度增加而增大的趋势,根据这一特征可以判定该深度段内天然气来源于油溶气,部分来自游离气,在深度接近 3 500m 时表现的最为明显。在深度相对较浅的浅层也存在天然气主要来自游离气,以 Ban867 井为例,在 2 200m 左右的深度日产气量大于 $14 \times 10^4 \text{ m}^3$,

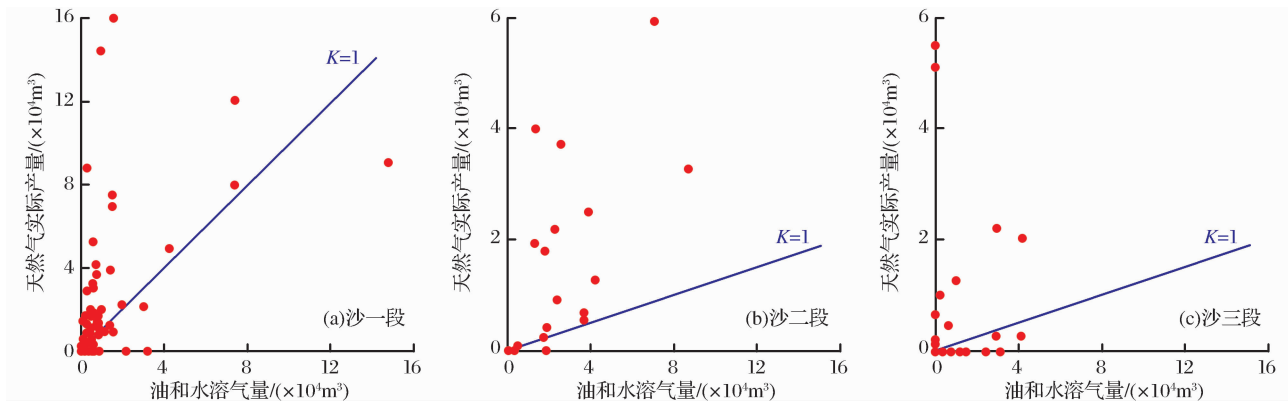


图 6 天然气产出量与其在原油和水中的溶解量关系

Fig. 6 The relation between natural gas output and dissolved gas content in oil and formation water

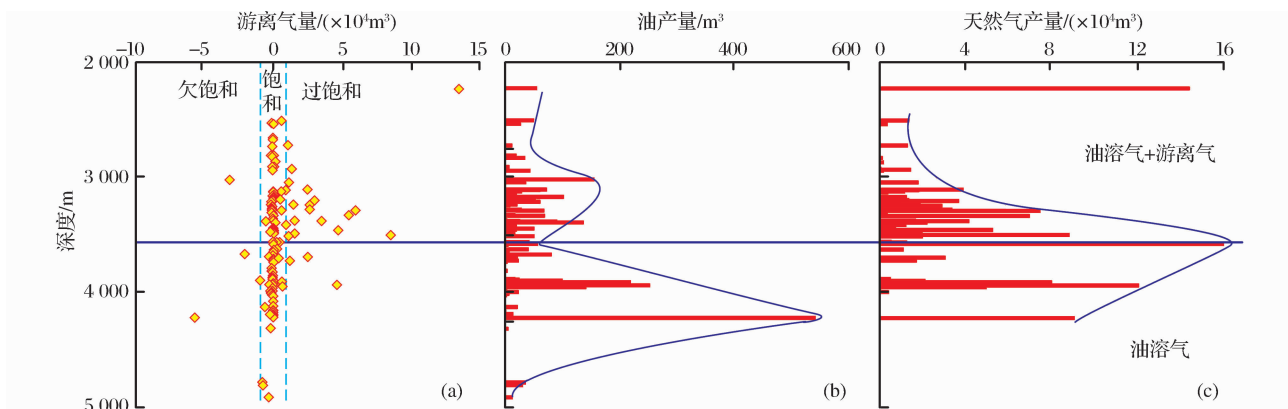


图 7 歧口凹陷沙一段游离气量(a)、油产量(b)和天然气产量(c)随深度分布特征

Fig. 7 Vertical distribution of the free gas content(a), oil production(b), and natural gas output(c) of E_2s_1

为一个具有大量游离气的凝析油藏(油密度为 0.7263g/cm^3)。通过分析,该井位于大张坨断裂与滨海断裂带的交会处,其游离气的来源主要与深大断裂沟通下伏的气源有关。

沙二段地层中天然气的赋存特征具有三段式的特征:深度大于 4200m ,以游离气为主,也含有部分油溶气; $3800\sim 4200\text{m}$,以油溶气为主;深度小于 3800m ,油溶气和游离气均存在(图8)。深度大于 4200m ,因气源充足并在油水中的溶解量达到了饱和一过饱和状态,具有油产量低而气产量高的特征。在 $3800\sim 4200\text{m}$ 深度段,油气均高产,天然气主要来源于油溶气。深度小于 3800m ,油产量较为复杂,同时油水中的溶解气量均处于饱和一过饱和状态,气

产量具有随深度变浅而产量变高的趋势,因而该深度段内深层以油溶气为主,向浅层逐渐过渡为游离气。

沙三段地层中的天然气在深度小于 4200m 表现为近似饱和的状态,在大于 4500m 达到了过饱和,位于两者之间为饱和一过饱和的状态。从图9中可以看出,深度大于 4500m ,几乎不产油,天然气产量高,天然气在地层水中溶解量少,因而该深度段上的天然气以游离气为主。在 $4200\sim 4500\text{m}$ 深度段,油气产量均高,该深度段上主要以油溶气的形式存在。在小于 4200m ,几乎不产气或产微量的气,即该部分天然气主要为油溶气。由于在原油中的溶解量不高产出地表时气量少而不具有很好的工业价值,仅在一定程度上改善了原油的物性。

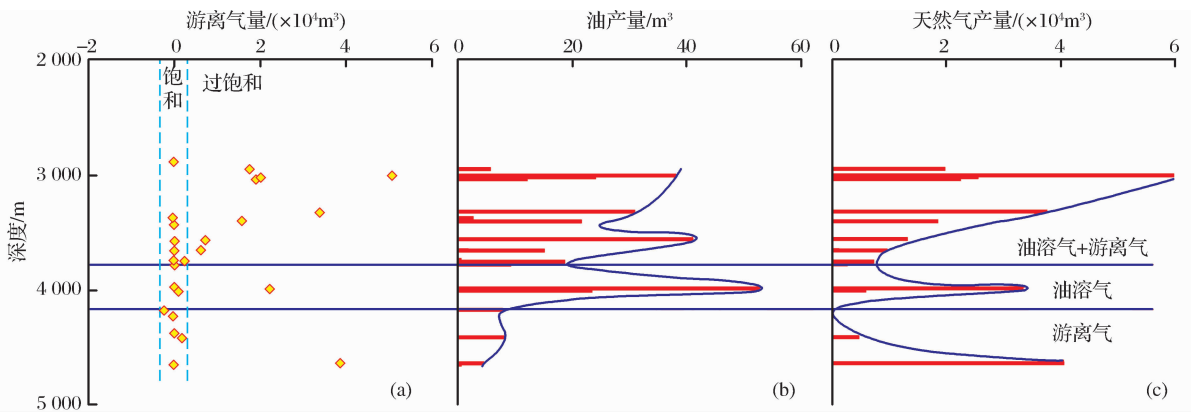


图8 歧口凹陷沙二段游离气量(a)、油产量(b)和天然气产量(c)随深度分布特征

Fig. 8 Vertical distribution of the free gas content (a), oil production (b), and natural gas output (c) of E_2s_2

通过对沙河街组天然气在地下的赋存状态分析,天然气在 $3000\sim 4200\text{m}$ 深度段以油溶气和游离气为主,并有向浅层过渡为以游离气为主和向深层过渡为以油溶气为主的特征。在 $4200\sim 4500\text{m}$ 之间受源岩供油气量的影响,在沙二段内表现为以游离气为主,而沙三段地层中存在油溶气和游离气,并以油溶气为主。深度大于 4500m ,沙河街组源岩处于生气窗内,气源充足,以游离气为主。

5 讨论

5.1 天然气产状的地下赋存特征反映了垂向上油气藏的类型

天然气在地层中的赋存类型在垂向上具有一定的规律:深层以游离气为主,向上过渡为油溶气和游离气并存并逐渐以油溶气为主,至浅层为油溶微量气和游离气,其中游离气主要分布于深大断裂附近。天然气的赋存特征造就了油气藏类型在垂向上的分布:深层因游离气存在形成了气藏或凝析气藏;中深

层处于生油主带内,油源丰富,主要形成含大量油溶气的油藏或油溶气藏;浅层受气源的影响,远层沟通气源断裂的主要为油藏或因温度压力降低形成了具有气顶气的油藏,靠近气源断裂附近则因气源充足形成了气藏或改造早期的油藏形成凝析气藏。油气藏垂向上的分布特征在原油物性随深度的变化上得以体现(图5)。

以BS22井区剖面为例,在 $2800\sim 4200\text{m}$ 深度段内为主生油窗,当深度大于 4200m 时开始大量生气。因生烃作用、压实作用等的影响,凹陷中超压或超高压普遍发育。深层因源岩达到高成熟提供了充足的气源,大量的天然气改造早期的油藏,并在高温高压条件下形成了凝析气藏,或直接改造为纯气藏,如井BS22在 $4400\sim 4700\text{m}$ 的沙二段发现凝析气藏,日产气高达 40020m^3 ,天然气相对密度为 $0.6263\sim 0.6918$,甲烷含量为 $82.19\%\sim 88.49\%$,油密度为 $0.7835\sim 0.8144\text{g/cm}^3$,具有典型凝析油或轻质油的特征。中深层因位于生油窗内以正常原

油为主,部分因断裂的沟通深部高成熟的气,导致部分气溶解油中,形成向深度增加的方向油密度和黏度有减小的趋势。浅层低密度低黏度的原油、正常原油及稠油三者并存,低密度低黏度的轻质原油来

源于晚期高成熟的气对早期油藏的改造形成。因此,在油源断裂的沟通作用下,形成了沿断裂由深至浅凝析气藏、轻质油藏、油藏、浅层气藏或带气顶气的油藏的分布(图10)。

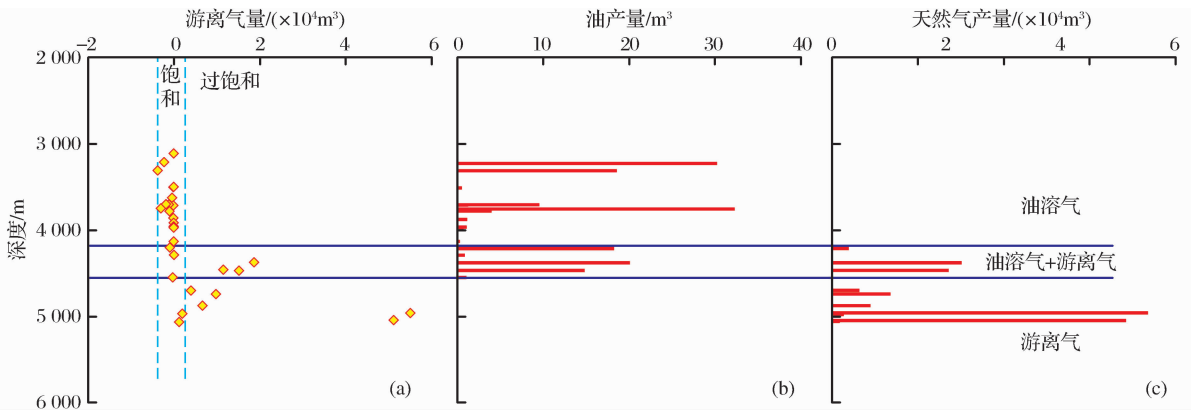


图9 歧口凹陷沙三段游离气量(a)、油产量(b)和天然气产量(c)随深度分布

Fig. 9 Vertical distribution of the free gas content (a), oil production (b), and natural gas output (c) of E₂s₃

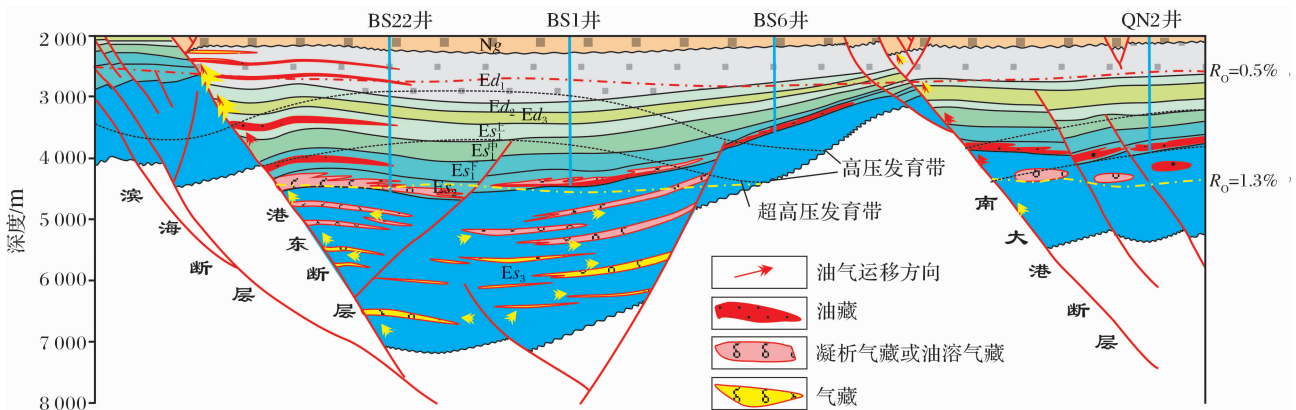


图10 歧口凹陷BS22井区油气藏沿断裂分布示意

Fig. 10 The distribution of the oil and gas reservoirs along the faults in well BS22 area

5.2 天然气垂向的赋存状态指示了油气垂向运移特征

苗顺德等^[36]对油气沿断裂运聚的物理模拟表明油气沿断层运移存在2种方式:浮力主导的从上向下的油气聚集和异常压力主导的由深至浅的油气聚集。研究区内断裂发育,成为油气垂向运移的主要通道,同时沙河街组大于3500m的深层普遍发育超压—超高压。深部来源的油气向浅层运移的过程中,因温度、压力、水矿化度及油气组分等因素的影响,天然气各组分在油和水中的溶解量会发生相应的变化。因而根据天然气在油水中的赋存特征和油气藏沿断裂的分布类型来探讨油气沿断裂的垂向运移方式。

现今浅层为气藏或带气顶气的油藏,向深层逐

渐变油溶气藏、凝析气藏及油藏的分布模式,深大断裂作为油气连续型聚集成藏的垂向运移通道,油气水在浮力的主导下向浅层运移过程中因温度压力的降低、水矿化度的减小,油气水及油气组分发生分离形成了气在上而油在下的分布格局[图11(a)]。但在油气的运聚过程中异常压力常常作为油气运移的主要驱动力,超压的幕式排放导致油气沿断裂的运聚也具有幕式的特征,这一油气运移方式与邓运华^[37]提出的油气运移“中转站”模式相一致。油气由深至浅的运移过程中,最先在深层聚集晚期高成熟的气或改造早期的油藏形成凝析气藏,向浅层变为油溶气藏、轻质油藏至油藏[图11(b)]。研究区内深度大于3500m,沙河街组均位于烃源岩的主生油窗内,生油窗内的大量油气受浮力及异常压力的

综合作用,以断裂作为油气的主运移通道,向浅层运移的过程中,上述2种运移模式可能均存在但因起主导驱动力的类型不同而存在差异,并有可能在某

一时期具有周期性。研究区现今已发现的油气垂向上的分布格局就是上述2种运移方式均存在的最好的佐证。

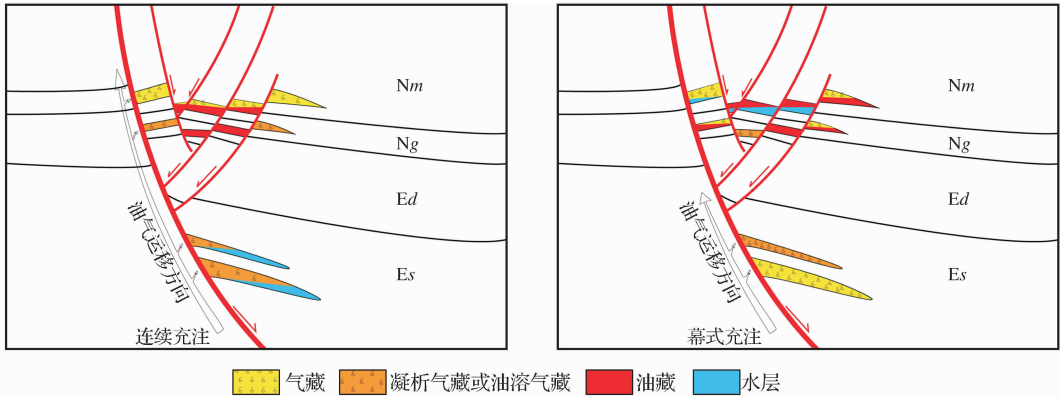


图 11 油气沿断裂运移聚集的模式

Fig. 11 The pattern of the oil and gas migration along the faults

5.3 勘探潜力预测

通过分析天然气在地层中的赋存特征,歧口凹陷天然气藏主要分为中深层气藏和深层气藏。中深层气藏以沙一段、沙二段为主,大多为次生气藏或带有气顶的油藏,且现今在歧口凹陷中深层发现的气藏主要沿断裂分布。沟通气源的断裂附近,埋深浅、地层温压低,断层活动易打破天然气在油水中溶解量的动态平衡,因而临近深大断裂的浅层圈闭是寻找浅层油气藏的有力区域。中深层发育高温—超高压,且主要位于生油窗内,是油溶气和油藏的主要富集层段。深层油气藏主要分布在沙二段和沙三段地层中,深层源岩已进入大量生气,在沟通源岩的断裂附近是天然气垂向运移的通道,断裂附近相比深凹地区因流体及断层的活动频繁、压力低等,天然气易于从油水中脱出形成游离气,因而断裂相伴生的圈闭是寻找深层轻质油藏、凝析气藏以及气藏的有力区域。

6 结论

(1) 研究区地温梯度高,深层普遍发育高压—超高压,水矿化度高,原油向深层逐渐过渡为轻质原油;浅层为常压体系,因受地表水的影响水矿化度低且原油具有轻质原油、正常原油和稠油共存的特征。

(2) 沙河街组天然气在油水中总体上达到饱和—过饱和。不同层段在不同深度上天然气在油水中的赋存状态存在差异,总体上深层以游离气为主,向浅层过渡为油溶气,位于有沟通气源的深大断裂浅层可形成游离气。

(3) 天然气在油水中的赋存状态反映出油气沿

断裂带的运聚特征。深层以气藏或凝析气藏为主,逐渐过渡为含大量油溶气的轻质油藏,至浅层为油藏或含气顶气的油藏。受同沉积断裂活动的影响,在临近沟通油气源断裂的浅层圈闭中聚集形成气藏或凝析气藏。这一油气藏分布模式指示了研究区油气勘探潜力巨大。

参考文献(References):

- [1] Kang Zhulin. Exploration potential for deep hydrocarbon zones in Bohai Bay Basin[J]. Petroleum Exploration and Development, 1996, 23(6): 20-22. [康竹林. 渤海湾盆地深层油气勘探前景[J]. 石油勘探与开发, 1996, 23(6): 20-22.]
- [2] Li Chunguang. Hydrocarbon accumulation and exploration of deep zones in Bohai Bay Basin[J]. Marine Origin Petroleum Geology, 2005, 10(2): 17-21. [李春光. 论渤海湾盆地深层油气勘探[J]. 海相油气地质, 2005, 10(2): 17-21.]
- [3] Wang Shuxiang, He Yongmei, Liu Qingxin, et al. Exploration potential of deep natural gas of Qikou Depression[J]. Petroleum Geology and Recovery Efficiency, 2009, 16(6): 49-52. [王书香, 何咏梅, 刘庆新, 等. 歧口凹陷深层天然气勘探潜力[J]. 油气地质与采收率, 2009, 16(6): 49-52.]
- [4] Wang Ziyu, Qi Jiafu, Lu Kezheng. Analysis of Cenozoic tectonic subsidence history of the east tectonic belts in Huanghua Depression[J]. Oil and Gas Geology, 2000, 21(2): 127-129. [王子煜, 漆家福, 陆克政. 黄骅拗陷东部构造带新生代构造沉降史分析[J]. 石油与天然气地质, 2000, 21(2): 127-129.]
- [5] Ai Nengping, Ren Jianye, Qi Peng, et al. The redefinition and geological significance of extensional decollement structure systems in the Qikou Depression[J]. Geotectonica et Metallogenia, 2009, 33(3): 343-351. [艾能平, 任建业, 祁鹏, 等. 歧口凹陷伸展滑脱构造系统的厘定及其地质意义[J]. 大地构造与成矿学, 2009, 33(3): 343-351.]

- [6] Li Desheng. Prospect of the composite megastructural oil and gas field in Bohai Bay of China[J]. *Acta Petrolei Sinica*, 1986, 7(1):46-50. [李德生. 渤海湾盆地复合油气田的开发前景[J]. *石油学报*, 1986, 7(1):46-50.]
- [7] Wu Yuanyan, Zhou Jiansheng. Evaluation of hydrocarbon system in Qikou Sag[J]. *Acta Petrolei Sinica*, 2000, 21(6):18-22. [吴元燕, 周建生. 歧口凹陷含油气系统及其评价[J]. *石油学报*, 2000, 21(6):18-22.]
- [8] Yang Chiyin, Zhou Zongliang, Zhou Jiansheng. Petroleum system and petroleum exploration in Qikou Sag[J]. *Petroleum Explorationist*, 2000, 5(3):64-70. [杨池银, 周宗良, 周建生. 歧口凹陷含油气系统与油气勘探[J]. *勘探家*, 2000, 5(3):64-70.]
- [9] McAuliffe C D. Solubility in water of C₁-C₉ hydrocarbons[J]. *Nature*, 1963, 200:1092-1093.
- [10] Bonham L C. Solubility of methane in water at elevated temperatures and pressure[J]. *AAPG Bulletin*, 1978, 62(12):2478-2481.
- [11] McAuliffe C D. Oil and gas migration-Chemical and physical constraints[J]. *AAPG Bulletin*, 1979, 63(5):761-781.
- [12] Barker C. Development of abnormal and subnormal pressures in reservoirs containing bacterially generated gas[J]. *AAPG Bulletin*, 1987, 71(11):1404-1413.
- [13] Hao Shisheng, Zhang Zhenying. The characteristic of the solubility of natural gas in formation waters and its geological significance[J]. *Acta Petrolei Sinica*, 1993, 14(2):12-22. [郝石生, 张振英. 天然气在地层水中的溶解度变化特征及地质意义[J]. *石油学报*, 1993, 14(2):12-22.]
- [14] Fu Xiaotai, Lu Shuangfang, Wang Zhengping, *et al.* Dissolving character for the components of natural gas and its significance[J]. *Geochimica*, 1997, 16(3):60-66. [付晓泰, 卢双舫, 王振平, 等. 天然气组分的溶解特征及其意义[J]. *地球化学*, 1997, 16(3):60-66.]
- [15] Tian Jun, Chen Junqing, Jiao Jiao, *et al.* Comparison of the surface and underground natural gas occurrences in the Tazhong uplift of the Tarim Basin[J]. *Acta Geologica Sinica; English Edition*, 2010, 84(5):1097-1115.
- [16] Aziz K, Settari A. *Petroleum Reservoir Simulation*[M]. London: Applied Science Publishers, 1979:1-449.
- [17] Luo Zhitan. *Petrophysics*[M]. Beijing: The Geological Publishing House, 1985:1-178. [罗蜚潭. *油层物理*[M]. 北京:地质出版社, 1985:1-178.]
- [18] Welte D H, Horsfield B, Baker D R. *Petroleum and Basin Evolution*[M]. Berlin, Heidelberg: Springer-Verlag, 1997:3-70.
- [19] Song Guoqi, Mu Xing, Che Yan, *et al.* The mechanism and model of accumulation and migration and release of dissolved gas in Jiyang Depression[J]. *Earth Science Frontiers; China University of Geosciences*, 2000, 7(4):555-560. [宋国齐, 穆星, 车燕, 等. 济阳凹陷溶解气运移释放成藏机理与模式[J]. *地质前缘:中国地质大学*, 2000, 7(4):555-560.]
- [20] Mu Xing, Che Yan, Jiang Huichao. Release of Dissolved-gas and potential of gas bearing zones in Jiyang Sag[J]. *Natural Gas Exploration and Development*, 2001, 24(1):9-15. [穆星, 车燕, 姜慧超. 济阳凹陷溶解气的释放规律与有利含气区带预测[J]. *天然气勘探与开发*, 2001, 24(1):9-15.]
- [21] Fu Guang, Xue Yongchao, Fang Chunchao. The released amount of dissolved gas in oil and its research significance[J]. *Petroleum Geology and Recovery Efficiency*, 2001, 8(3):18-20. [付广, 薛永超, 方纯超. 油溶解气量及其研究意义[J]. *油气地质与采收率*, 2001, 8(3):18-20.]
- [22] Wang Yanying, Li Yongjun. Analysis on accumulation conditions and characteristics of gas released from oil in western slope[J]. *Petroleum Geology and Oilfield Development in Daqing*, 2007, 26(2):5-8, 24. [王言英, 李永军. 西斜坡地区油溶解气成藏条件及特征分析[J]. *大庆石油地质与开发*, 2007, 26(2):5-8, 24.]
- [23] Xue Haitao, Liu Lingzhi, Zhou Lihua, *et al.* Solubility of natural gas in Daqing crude oil[J]. *Journal of Daqing Petroleum Institute*, 2001, 25(2):12-15. [薛海涛, 刘灵芝, 周丽华, 等. 天然气在大庆原油中的溶解度[J]. *大庆石油学院学报*, 2001, 25(2):12-15.]
- [24] Pang Xiongqi. *The Hydrocarbon Expulsion Threshold Control Theory and Application of Oil and Gas*[M]. Beijing: Petroleum Industry Press, 1995:1-297. [庞雄奇. *排烃门限控油气理论与应用*[M]. 北京:石油工业出版社, 1995:1-297.]
- [25] Zhang Jie, Qiu Nansheng, Wang Xin, *et al.* Thermal evolution and reservoiring history in Qikou Sag, Huanghua Depression[J]. *Oil and Gas Geology*, 2005, 26(4):505-511. [张杰, 邱楠生, 王昕, 等. 黄骅坳陷歧口凹陷热史和油气成藏史[J]. *石油与天然气地质*, 2005, 26(4):505-511.]
- [26] Li Dawei, Li Mingcheng, Wang Xiaolian. Petroleum accumulation simulating of Qikou Sag, Huanghua Depression[J]. *Petroleum Exploration and Development*, 2006, 33(2):167-171. [李大伟, 李明诚, 王晓莲. 歧口凹陷油气聚集量模拟[J]. *石油勘探与开发*, 2006, 33(2):167-171.]
- [27] Fan Meiyong. Characteristics of Eocene deep sedimentary facies and reservoir in the north of Qikou Sag[J]. *Inner Mongolia Petrochemical Industry*, 2006, 11:85-87. [范梅英. 歧北凹陷下第三系深层沉积相及储层特征研究[J]. *内蒙古石油化工*, 2006, 11:85-87.]
- [28] Wang Shuxiang, Yu Xueming, He Yongmei, *et al.* Characteristics and formation deep clastic reservoir in Binhai area of Qikou Sag[J]. *Natural Gas Geoscience*, 2010, 21(4):566-571. [王书香, 于学敏, 何咏梅, 等. 歧口凹陷滨海地区沙河街组深层碎屑岩储层特征及主控因素[J]. *天然气地球科学*, 2010, 21(4):566-571.]
- [29] Xie Ruijie, Zhang Xi, Qi Jiafu. Characteristics of deep reservoirs in northern Qikou region and their influential factors[J]. *Journal of Oil and Gas Technology; Journal of Jiangnan Petroleum Institute*, 2010, 32(3):47-50. [谢锐杰, 张喜, 漆家福. 歧北地区深层储层特征及影响因素分析[J]. *石油天然气学报:江汉石油学院学报*, 2010, 32(3):47-50.]
- [30] Chen Chunfang, Zheng Junmao, Wang Defa. Depositional systems and source provenance of the third member of Shahejie Formation in Banqiao Sag[J]. *Journal of Palaeogeograph*,

- 2001,3(1):55-62. [陈纯芳,郑浚茂,王德发. 板桥凹陷沙三段沉积体系与物源分析[J]. 古地学报,2001,3(1):55-62.]
- [31] Yang Chiyin. Natural gas source correlation and its genesis analysis for the deep gas pool in Banqiao Sag[J]. Natural Gas Geoscience,2003,14(1):47-52. [杨池银. 板桥凹陷深层天然气气源对比与成因分析[J]. 天然气地球科学,2003,14(1):47-52.]
- [32] Li Jun, Li Fengxia, Zhou Liying, *et al.* Types of condensated gas reservoir with oil rim and exploration target in Banqiao Sag[J]. Natural Gas Geoscience,2003,14(4):271-274. [李军,李凤霞,周立英,等. 板桥凹陷带油环凝析气藏类型和成藏条件分析[J]. 天然气地球科学,2003,14(4):271-274.]
- [33] Guo Jianyin, Yu Xuemin, Li Jian, *et al.* Gas source of Qishen-1 well in Qikou Sag[J]. Natural Gas Geoscience,2009,21(4):683-691. [国建英,于学敏,李剑,等. 歧口凹陷歧深1井气源综合对比[J]. 天然气地球科学,2009,21(4):683-691.]
- [34] Guo Xiaowen, He Sheng, Hou Yuguang. Numerical simulation of petroleum generation, migration and accumulation of the E_{s3} formation in Banqiao Depression[J]. Earth Science: Journal of China University of Geosciences,2010,35(1):115-124. [郭小文,何生,侯宇光. 板桥凹陷沙三段油气生成、运移和聚集数值模拟[J]. 地球科学:中国地质大学学报,2010,35(1):115-124.]
- [35] Xu Hui, He Youbin. Study on characteristics and causes of the forming of secondary pores in Shahejie Formation of Qikou Depression[J]. Offshore Oil,2006,26(2):7-12. [徐徽,何幼斌. 歧口凹陷沙河街组次生孔隙特征及成因研究[J]. 海洋石油,2006,26(2):7-12.]
- [36] Miao Shunde, Zeng Jianhui, Li Qiufen. Physical simulation of secondary petroleum migration and accumulation process in complicated reserve Y-type structures; By taking Gangdong tectonic belt in Huanghua Depression for example[J]. Journal of Oil and Gas Technology,2007,29(6):18-20. [苗顺德,曾澍辉,李秋芬. 复合反“Y”字型构造中油气二次运移与聚集过程物理模拟研究——以黄骅坳陷港东构造带为例[J]. 石油天然气学报 2007,29(6):18-20.]
- [37] Deng Yunhua. Transfer station model of oil-gas migration formed by fault-sand body[J]. China Petroleum Exploration,2005,(6):14-17. [邓运华. 断裂—砂体形成油气运移的“中转站”模式[J]. 中国石油勘探,2005,(6):14-17.]

Occurrences of the Natural Gas in Shahejie Formation of Qikou Depression in Bohai Bay Basin and Its Exploration Significance

LONG Hua-shan^{1,2,3}, XIANG Cai-fu^{2,3}, NIU Jia-yu¹, LI Hong-xiang⁴,
WEI Li-chun^{2,3}, HAN Guo-meng⁴, JIANG Fu-jie^{2,3}

(1. Research Institute of Petroleum Exploration and Development, Beijing 100083, China;

2. State Key Laboratory of Petroleum Resource and Prospecting, China University of Petroleum,

Beijing 102249, China; 3. College of Earth Sciences, China University of Petroleum, Beijing 102249, China;

4. Research Institute of Exploration and Development, Dagang Oilfield Company, PetroChina, Tianjin 300280, China)

Abstract: Abundant natural gas reservoirs with burial depth $>3\ 500$ m have been found recently in the Shahejie Formation of the Qikou Depression. The natural gas reservoirs were distributed linearly along the faults and were featured by hybrid gas-oil-water relationships, which were widely recognized in unconventional hydrocarbon reservoirs. In order to understand the occurrence of natural gas in geological conditions for guiding further exploration, this paper calculated the content of gas component dissolved in the crude oil and formation water, affected by temperature, pressure, crude oil property, water salinity, and then compared with the oil production and natural gas output. Most natural gases of Shahejie reservoirs dissolved in the oil and water have been saturated to supersaturation, which formed the hybrid gas-oil-water relationship of free gas in deep transition to shallow of dissolved gas in oil reservoirs or a small amount of free gas, and those reservoirs linearly along those fault which connect with the gas source can be rich in free gas. Meanwhile, the paper discussed the pattern of the oil and gas migration and accumulation after analysis of the occurrences of the natural gas and the distribution of the gas and oil reservoirs. The areas in shallow linearly along those deep faults connecting oil and gas source are benefit to search of condensate gas reservoirs or pure gas reservoirs, in the middle-deep layers for the existence of oil-generating window with the huge quantities of crude oil being better to look for oil reservoirs or dissolved gas-oil reservoirs or light oil reservoirs, and in deep the concomitant fracture traps are easy to enrich the free gas and form the condensate gas reservoirs and the pure gas reservoirs.

Key words: Deep natural gas; Occurrence features; Shahejie Formation; Qikou Depression; Bohai Bay Basin