

松辽盆地大庆长垣南部浅层气富集规律及潜力评价

刘宗堡^{1,2}, 索 苏¹, 潘 龙³, 付晓飞¹, 申家年¹

(1. 东北石油大学 地球科学学院, 黑龙江 大庆 163318; 2. 非常规油气成藏与开发省部共建国家重点实验室培育基地, 黑龙江 大庆 163318; 3. 中海石油 渤海石油装备中成机械制造有限公司, 天津 300280)

摘要:浅层气作为我国非常规油气勘探与开发的新领域,具有极大的资源潜力。利用岩心、测井、三维地震和室内分析化验等资料,对松辽盆地大庆长垣南部黑帝庙油层浅层气气藏类型、分布特征、成因机制及富集主控因素进行研究,结果表明:受背斜构造背景与多方位断层分割,气藏圈闭主要有背斜、断背斜、断块和断鼻4种类型;气藏平面上受正向构造影响,主要分布在背斜和鼻状构造高点,垂向上受储盖组合特征影响,主要分布在中、下部 $H_1^5-H_{II}^1$ 小层;葡萄花构造天然气成因为生物气,主要来自嫩江组一段、二段,葡西鼻状构造天然气成因为生物气、油型气和无机成因气组成的混合气,分别来自嫩江组一段、二段、青山口组和深部。进而总结出黑帝庙油层浅层气富集主控因素:①多套优质烃源岩构成了浅层气富集基础;②气源断层与有效盖层匹配控制浅层气富集层位;③河控三角洲前缘亚相砂体构成了浅层气富集优质储层;④断层侧向封闭性决定浅层气富集规模。最终建立了浅层气成藏模式:明水组沉积末期构造反转定型,断层密集带边界断层复活开启,下伏烃源岩生成的天然气沿着气源断层上运,然后进入与气源断层沟通的水下分流河道、河口坝和远砂坝优质储层砂体短距离侧向运移,最终在背斜、断背斜、断块和断鼻圈闭中聚集成藏。在气测解释基础上采用容积法计算浅层气累计地质储量 $86.8 \times 10^8 \text{ m}^3$,并刻画出7个浅层气富集区块。

关键词:油气富集规律;资源潜力评价;非常规油气;浅层气;大庆长垣南部;松辽盆地

中图分类号:TE122.3

文献标识码:A

Shallow gas accumulation pattern and potential evaluation
in southern Daqing placanticline, Songliao BasinLiu Zongbao^{1,2}, Suo Su¹, Pan Long³, Fu Xiaofei¹, Shen Jianian¹

(1. School of Geosciences, Northeast Petroleum University, Daqing, Heilongjiang 163318, China; 2. Accumulation and Development of Unconventional Oil and Gas, State Key Laboratory Cultivation Base Jointly-constructed by Heilongjiang Province and the Ministry of Science and Technology, Daqing, Heilongjiang 163318, China; 3. Bohai Petroleum Equipment Zhongcheng Machinery Manufacturing Limited Company, CNOOC, Tianjin 300280, China)

Abstract: As a new field of unconventional oil and gas exploration and development in China, shallow gas is large in resource potential. Various data including core, well logging, 3D seismic and laboratory test data were integrated to study the shallow gas reservoir types, distribution characteristics, genetic mechanism and main controlling factors of shallow gas enrichment. The following results were obtained. The gas traps are controlled by anticline structure background and segmentation of multiple faults and there are mainly 4 types of gas reservoir traps, including anticline, faulted-anticline, fault-block and fault-nose. And the areal distribution of gas reservoirs is controlled by the positive structures and they mainly occur at the high positions of anticline and nose structures. Vertically, the single layer $H_1^5-H_{II}^1$, which is in the middle and lower parts of formation, is the main gas bearing interval affected by reservoir-cap assemblages. Gas in the Putaohua structure is mainly of biological genesis and is sourced from the first and second members of the Nenjiang Formation. In contrast, gas in the Puxi nosing structure is generated from the first and second members of the Nenjiang Formation, Qing-shankou Formation and deeper formations, and is a mixture of biological gas, oil-type gas and abiogenetic gas. On this basis, the main controlling factors of shallow gas enrichment in Heidimiao reservoirs are summarized as follows: ① multiple sets of good hydrocarbon source rocks offer a material basis for shallow gas; ② reasonable timing of gas source faults and effective cap rock controls the horizons of shallow gas accumulation; ③ sandbodies of fluvial-dominated delta front act as high quality reservoirs; ④ lateral sealing capacity of fault determines enrichment scale of shallow gas. Finally, the shallow gas accumulation pattern is established and showed as follows: tectonic reverse happened at the end of the Mingshui For-

收稿日期:2013-10-15;修订日期:2014-03-20。

第一作者简介:刘宗堡(1982—),男,副教授、博士生导师,油气成藏机理与储层沉积学。E-mail: lzbqpi@163.com。

基金项目:中国博士后科学基金项目(2014M551214);黑龙江省青年科学基金项目(QC2014C039);东北石油大学青年科学基金项目(KY120203)。

mation stage, and the boundary faults in the areas with densely distributed faults were activated and opened, so that gas generated by the underlying source rocks migrated upward along the source rock-rooted faults into the high quality reservoirs connected well with the source rock-rooted faults, such as under water distributary channel, mouth bars and distal bars. After a short distance lateral migration in the high quality reservoirs, the shallow gas accumulated in anticlinal traps, fault-anticline, fault-block and fault-nose traps. The cumulative geological reserve of shallow gas was calculated to be 8.68 BCM by using volumetric methods on the basis of gas logging interpretation and 7 potential target areas were identified.

Key words: hydrocarbon accumulation pattern, hydrocarbon potential evaluation, unconventional oil and gas, shallow gas, southern Daqing placantiline, Songliao Basin

浅层气是指埋藏深度小于1 500 m的气藏,通常认为其成因机制为细菌还原作用和有机质热分解作用^[1]。世界范围内浅层气资源丰富,截止2005年底,浅层气占世界气田总数的20%和世界气藏探明可采储量的23%,其具有储量规模大、分布面积广、埋藏深度浅、垂向易散失、富集范围小和甜点预测难的特点^[2-3]。目前我国发现的浅层气主要分布在柴达木盆地、松辽盆地、四川盆地、渤海湾盆地、塔里木盆地和鄂尔多斯盆地等^[4-7],如柴达木盆地的浅层生物气探明储量超过 $3\,000 \times 10^8 \text{ m}^3$ ^[8],因此浅层气是我国非常规能源勘探与开发的新领域^[9]。松辽盆地具有较大的浅层气资源潜力,截止2012年在大庆长垣南部黑帝庙油层发现了多口工业气流井(如葡浅701井累计产气大于 $1 \times 10^8 \text{ m}^3$,葡194-16井最高日产气 $9.16 \times 10^4 \text{ m}^3$)和见气显示井,且在生产钻井过程中发生多起漏气井喷事故,以往针对该区浅层气的研究主要集中在构造特征和储层沉积特征等方面^[10],但一直未进行过系统的浅层气富集规律研究和资源潜力评价,严重制约了该区浅层气的开发利用。笔者拟通过对大庆长垣南部黑帝庙油层浅层气的成因机制、分布特征和成藏主控因素综合分析,旨在搞清其富集规律并指出有利开发区块,为类似盆地浅层气的高效勘探与开发提供指导。

1 区域地质概况

大庆长垣东邻三肇凹陷,西接古龙凹陷,北连黑鱼泡凹陷,为松辽盆地北部油气最富集的二级正向构造单元,中、新生代地层自下而上沉积了火石岭组、沙河子组、营城组、登娄库组、泉头组、青山口组、姚家组、嫩江组和第四系地层,缺失四方台组、明水组、依安组、大安组和泰康组地层,盆地垂向上共经历了断陷期、拗陷期和反转期3期构造演化阶段^[11],受拗陷期东西向拉张和反转期左旋压扭作用影响自南向北形成了敖包塔构造、葡萄花构造、太平屯构造、高台子构造、杏树岗构造、萨尔图构造和喇嘛甸构造7个三级正向构造单元,其中大庆长垣南部主要由葡萄花构造、敖包塔构造和

葡西鼻状构造组成^[12]。目前研究区已经发现了下部扶杨油层、中部葡萄花油层和上部黑帝庙油层3个含油层系,其中浅层气主要分布在上部嫩江组三段、四段的黑帝庙油层;黑帝庙油层整体上表现为东陡西缓和北高南低的构造格局,顶面海拔深度介于100~400 m,为盆地北部继承性物源影响下形成的一套反旋回三角洲沉积体系,垂向上共发育2个油层组10个小层,其中上部 H_I 油层组(嫩四段)细分为6个小层,主要发育三角洲内前缘亚相沉积,下部 H_{II} 油层组(嫩三段)细分为4个小层,主要发育三角洲外前缘亚相沉积。

2 浅层气分布特征及来源

2.1 气藏类型及分布特征

通过对大庆长垣南部黑帝庙油层气井动态资料和气藏剖面分析,得出受背斜构造背景和多方位断层分割影响,气藏圈闭主要有发育背斜、断背斜、断块和断鼻4种类型,其中葡萄花构造和葡西鼻状构造为东陡西缓和北高南低的宽缓背斜,因此气藏类型主要发育断背斜和断鼻,而敖包塔构造为受南北向断层分割的背斜,因此气藏类型主要为背斜和断块(图1)。进而对区内已经发现的气井产气层位、构造位置和试气结果进行分析,结果表明工业气流井7口,其中5口分布在葡萄花构造上,葡西鼻状构造和敖包塔构造各有1口;气显示井19口,其在葡萄花构造、葡西鼻状构造和敖包塔构造上分布较集中,其它地区零星分布;气水显示井7口,其中有6口分布在葡萄花构造上,有1口在敖包塔构造上,即气藏平面分布受控于正向构造特征。通过对黑帝庙油层见气显示层位和动态产气资料分析,工业气流井出气层位主要分布在 $H_I^5-H_{II}^1$ 小层,这些小层砂体厚度大,且顶部盖层封挡好;气显示井出气层位除 H_{II}^2, H_{II}^3 和 H_{II}^4 小层外,其余各小层均有分布,但以 H_I^4 小层最多;气水显示井出气层位主要分布在 H_I^5 小层,然后依次为 $H_{II}^1, H_I^6, H_I^1, H_I^3$ 和 H_I^4 小层,即气藏垂向分布受控于储盖组合特征(表1)。

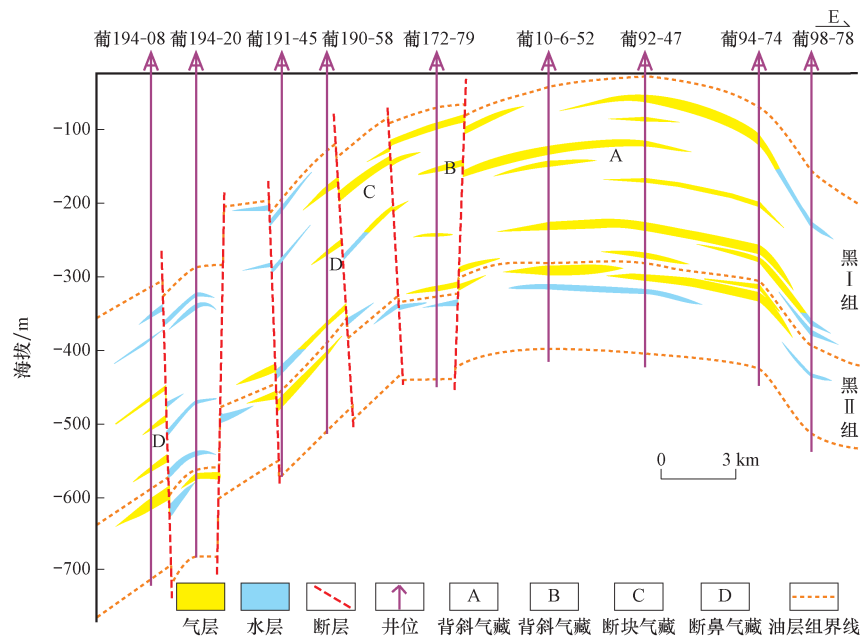


图 1 大庆长垣南部黑帝庙油层气藏剖面

Fig. 1 Gas reservoir profile of the Heidimiao reservoir in southern Daqing placantiline

表 1 大庆长垣南部黑帝庙油层气井数据

Table 1 Gas well data of the Heidimiao reservoir in southern Daqing placantiline

井号	井别	深度/m	层位	构造位置	特征
敖 268 - 66	工业气流	492.0 ~ 500.4	H ⁵ _I	敖包塔构造	最高日产气 4.1 × 10 ⁴ m ³ /d
敖 270 - 斜 70	气水显示	322.0 ~ 334.0	H ¹ _I	敖包塔构造	气喷
敖 280 - 70	气显示	320.0 ~ 500.0	H ¹ _I — H ⁴ _I	敖包塔构造	气喷
敖 904	气显示	650.0 ~ 700.0	H ¹ _I — H ⁶ _I	敖包塔构造	气喷
葡 10 - 3 - 48	气显示	< 200.0	H ¹ _{II}	葡萄花构造	井喷高达 24 m
葡 10 - 4 - 46	工业气流	403.2 ~ 405.2	H ¹ _{II}	葡萄花构造	测试量 0.694.1 × 10 ⁴ m ³ /d
浅 01	工业气流	213.5 ~ 234.2	H ¹ _{II}	葡萄花构造	测试量 1.03 × 10 ⁴ m ³ /d
浅 06	气水显示	337.8 ~ 429.4	H ⁵ _I — H ¹ _{II}	葡萄花构造	测试量 0.01 × 10 ⁴ m ³ /d
浅 07	工业气流	404.0 ~ 409.6	H ¹ _{II}	葡萄花构造	测试量 1.64 × 10 ⁴ m ³ /d
浅 09	气水显示	263.8 ~ 272.8	H ³ _I — H ⁴ _I	葡萄花构造	测试少量气
浅 10	工业气流	423.4 ~ 424.8	H ¹ _{II}	葡萄花构造	测试量 0.15 × 10 ⁴ m ³ /d
浅 5	气水显示	266.4 ~ 344.4	H ⁵ _I — H ¹ _{II}	葡萄花构造	测试少量气
浅 701	工业气流	270.0 ~ 400.0	H ⁴ _I — H ² _{II}	葡萄花构造	气喷
浅 8	气水显示	295.0 ~ 299.0	H ⁵ _I	葡萄花构造	测试量 0.01 × 10 ⁴ m ³ /d
葡 164	气水显示	< 250.0	H _I	葡萄花构造	井喷高达 15 m
葡 9 - 8 - 48	气显示	< 180.0	H _I	葡萄花构造	井喷
葡 154	气水显示	150.2	H _I	葡萄花构造	产气 0.01 × 10 ⁴ m ³ /d
葡 162 - 74	气显示		H _{II}	葡西鼻状构造	气喷
葡 174 - 68	气显示		H _{II}	葡西鼻状构造	气喷
葡 180 - 56	气显示		H _I	葡西鼻状构造	气喷
葡 174 - 76	气显示		H _I	葡西鼻状构造	强烈气喷高 15 m
葡 172 - 70	气显示	< 660.0	H ⁴ _{II}	葡西鼻状构造	井喷
葡 172 - 76	气显示	< 300.0	H ⁴ _I	葡西鼻状构造	气喷高过转盘面 3 m
葡 172 - 84	气显示	< 420.0	H ⁶ _I	葡西鼻状构造	强烈气喷
葡 178 - 78	气显示	< 420.0	H ⁶ _I	葡西鼻状构造	气喷高 5 ~ 6 m
葡 194 - 16	工业气流	653.8 ~ 704.7	H ⁵ _I — H ¹ _{II}	葡西鼻状构造	最高日产气 9.17 × 10 ⁴ m ³ /d
葡 196 - 20	气显示	< 800.0	H ⁴ _{II}	葡西鼻状构造	强烈井喷, 钻机塌陷
葡 196 - 78	气显示		H ⁴ _{II}	葡西鼻状构造	气喷
葡 332	气显示		H ⁴ _I	葡西鼻状构造	气喷
葡 333	气显示		H ⁶ _I	葡西鼻状构造	气喷
葡 46	气显示		H ¹ _{II}	葡西鼻状构造	气喷
葡 461	气显示		H ⁶ _I	葡西鼻状构造	气喷
葡 9 - 4 - 46	气显示	< 300.0	H ³ _I	葡西鼻状构造	强烈井喷, 钻机陷落

2.2 天然气组分及来源层位

天然气组分分析是厘定天然气成因的有效方法,近年来国内外学者通常采用甲烷及其同系物稳定碳同位素组分特征确定天然气成因类型^[13]。大庆长垣南部黑帝庙油层葡萄花构造天然气组分以甲烷为主,同时氮气含量偏高,重烃含量低,干燥系数大,属于典型干气,总体表现为生物气特征;葡西鼻状构造天然气甲烷含量低,而 CO₂ 气含量偏高,重烃含量较高,干燥系数

较低,总体为混合气特征(表 2),如甲烷碳同位素值($\delta^{13}\text{C}_1$)在 $-67.9\text{‰} \sim -60.03\text{‰}$,显示生物成因气特征,乙烷碳同位素值($\delta^{13}\text{C}_2$)在 $-37.42\text{‰} \sim -34.52\text{‰}$,显示油型气特征,CO₂ 碳同位素值在 $2.74\text{‰} \sim 4.63\text{‰}$,显示无机成因气特征(表 3),因此,该区浅层气具有大部分生物气、小部分油型气和极少量无机成因气的混源特征(图 2)^[15]。通过对嫩江组不同层段深度范围与对应的 R_o 值分析^[14],嫩江组各段都具有生成生物气的能

表 2 大庆长垣南部黑帝庙油层天然气组分特征
Table 2 Natural gas components of the Heidimiao reservoir in southern Daqing placantiline

构造单元	井号	深度/m	天然气组分含量/%						
			CH ₄	C ₂₊	CO ₂	N ₂	He	H ₂	干燥系数/%
葡萄花构造	葡浅 701	276.4 ~ 288.6	75.13	0.73	0.320	23.820	0.000	0.000	99.03
	葡浅 701	357.3 ~ 400.0	94.39	1.70	1.500	2.880	0.000	0.000	98.23
	葡浅 801	372.4 ~ 373.8	73.10	1.92	1.510	23.480	0.000	0.000	97.44
	葡浅 801	318.2 ~ 325.2	94.29	0.39	0.730	4.580	0.000	0.000	99.59
葡西鼻状构造	葡浅 4-更 41	255.6 ~ 264.5	65.21	4.19	29.102	1.190	0.098	0.000	93.96
	葡浅 3-6	254.2 ~ 261.8	85.72	4.08	9.057	1.131	0.000	0.024	95.45
	葡浅 3-更 31	284.5 ~ 291.1	59.92	3.52	35.261	0.901	0.000	0.226	95.45
	葡浅 5-61	251.3 ~ 260.3	45.00	1.72	51.898	1.227	0.000	0.152	96.32
	葡浅 6-更 31	264.2 ~ 275.2	63.80	1.16	31.361	3.273	0.000	0.352	98.21

表 3 大庆长垣南部黑帝庙油层天然气碳同位素特征
Table 3 Natural gas carbon isotope ratio of the Heidimiao reservoir in southern Daqing placantiline

井号	深度/m	$\delta^{13}\text{C}_1$ (PDB)/‰	$\delta^{13}\text{C}_2$ (PDB)/‰	$\delta^{13}\text{C}_3$ (PDB)/‰	$\delta^{13}\text{C}_{\text{CO}_2}$ (PDB)/‰
葡浅 4-更 41	255.55 ~ 264.45	-65.05	-34.76	-30.01	4.63
葡浅 3-6	254.20 ~ 261.80	-67.90	-34.52	-29.72	3.71
葡浅 3-更 31	284.50 ~ 291.10	-62.77	-34.77	-29.77	4.31
葡浅 5-61	251.30 ~ 260.30	-61.74	-35.58	-30.10	3.16
葡浅 6-更 61	264.20 ~ 275.20	-60.03	-37.42	-31.21	2.74

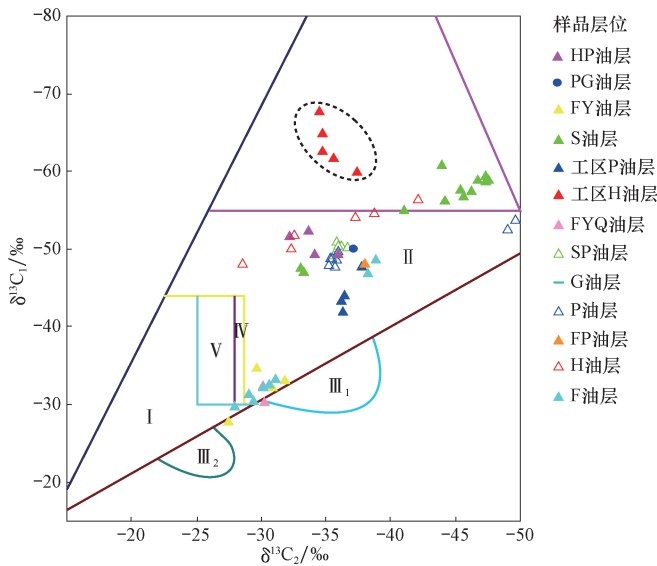


图 2 松辽盆地天然气成因判别图版^[14]

Fig. 2 Chart boards for gas genesis identification in Songliao Basin^[14]

I. 煤成气区; II. 油型气区; III₁. 煤成气和油型气形成混合气的碳同位素系列倒转区; III₂. 不同期的煤成气形成混合气的碳同位素系列倒转区;
IV. 煤成气和油型共存区; V. 煤成气、油型气和混合气共存区

内部及下部嫩江组一段、二段,依据生气物质基础及其对应的温度条件进行烃源岩评价,本次计算生物气主要来源于嫩江组一段、二段(容积法计算生气资源量总和为 $135.24 \times 10^8 \text{ m}^3$,约占嫩江组总生气量的90%),油型气主要来源于青山口组,无机成因气主要来源于深部。

3 浅层气富集成藏主控因素

3.1 多套优质烃源岩构成了浅层气富集基础

气源岩评价是浅层气成藏的前提条件,气源岩的类型、有机质成熟度和分布范围是影响天然气成藏的关键。由于大庆长垣南部浅层气主要成因类型为生物气,因此重点对源岩生成生物气量进行了评价。统计表明:嫩一段暗色泥岩厚度为100 m,嫩二段为150~200 m,嫩三段为50~100 m,嫩四+嫩五段为150~200 m,多层位发育的厚层暗色泥岩构成了生物气生成的物质基础。有机碳含量、氯仿沥青“A”含量和生烃潜量($S_1 + S_2$)分析表明:嫩一段为极好源岩,嫩二、嫩三段为好源岩或中等源岩,嫩四、嫩五段为中等源岩或非源岩^[16]。从各层位生成生物气的强度计算结果看,嫩一段最高($15 \times 10^8 \sim 30 \times 10^8 \text{ m}^3/\text{km}^2$),然后依次为嫩二段($6 \times 10^8 \sim 20 \times 10^8 \text{ m}^3/\text{km}^2$)、青二+青三段($5 \times 10^8 \sim 18 \times 10^8 \text{ m}^3/\text{km}^2$)、青一段($1 \times 10^8 \sim 15 \times 10^8 \text{ m}^3/\text{km}^2$)和嫩三段($0.8 \times 10^8 \sim 10 \times 10^8 \text{ m}^3/\text{km}^2$),其他层位忽略不计。在生气期和气藏聚集系数分析基础上,采用元素平衡法计算各套源岩生成生物气资源量之和介于 204.6×10^8 (下凹法)~ $438.6 \times 10^8 \text{ m}^3$ (上凸法),巨大的生气量为黑帝庙油层浅层气富集提供了前提保障。

3.2 气源断层与有效盖层匹配控制浅层气富集层位

圈闭位置和有效源岩空间配置关系决定断层为黑帝庙油层浅层气成藏主要输导通道。区域构造演化史分析表明葡萄花构造和敖包塔构造为明水组末期形成的反转构造^[11],并受多方位断层分割形成多种类型的正向构造圈闭。研究区断层普遍表现为张扭机制,平面上侧列叠覆呈“雁行式”排列密集成带,剖面上呈“似花状”组合,其中长期活动的基底断裂为“花茎”,拗陷期和反转期断裂为“花瓣”,受对倾断层密集带边界断层附近地层“下落”影响,断裂密集带内及两侧多发育地层倾向与断层倾向相反的反向断层圈闭,这种宽缓背斜构造控制下的断层相关圈闭为浅层气富集提供了良好场所。嫩江组一段、二段和青山口组烃源岩大量生成生物气时间为嫩江组末期,大量排烃时间为明水组末期^[15],即构成黑帝庙油层垂向运移的“气源断裂”为:拗陷期形成反转期持续活动的断裂、断陷期

形成拗陷期-反转期持续活动的断裂,其中前者是青山口组油型气和嫩江组生物气上运的主要通道,后者是深部 CO_2 、油型气和生物气上运的共同通道,这些断层多为继承性活动的断裂密集带边界断层(图3),且在成藏期生长指数普遍大于1.1,活动速率较强。

气藏保存条件同油藏相比,要求更加苛刻,且浅层气由于埋藏浅、成岩弱,必须具备良好的盖层。大庆长垣南部黑帝庙油层上部嫩五段为区域盖层,厚度较大,一般为100~250 m,泥地比值普遍大于80%,同时由于埋藏浅泥岩盖层含水率高,导致排替压力增大^[17],因此浅层气垂向上受嫩五段区域性盖层封挡而聚集在黑帝庙油层,但油层内部气藏富集小层则取决于盖储组合特征(盖层性质和储层发育特征及二者垂向匹配关系)和断接厚度(断面滑动后盖层的有效衔接厚度)^[18]。依据小层对比结果和岩性发育特征,认为黑帝庙油层垂向上共发育9套盖层,这些盖层是三角洲短期湖侵作用形成的泥岩,其中 H_1^4 底、 H_1^6 底、 H_2^2 底、 H_3^3 中和 H_4^4 为5套区域性盖层, H_1^1 底、 H_1^5 底、 H_3^1 顶和 H_1^1 底为4套局部性盖层,据此,垂向上将黑帝庙油层划分为8套储盖组合单元(图4)。由于黑帝庙油层内部发育最靠上的区域盖层位于 H_1^4 底,同时 $H_1^4-H_1^1$ 小层发育中厚层砂泥互层断接厚度大有利于封盖气藏,而 H_1 组中上部多发育薄层砂泥互层断接厚度小气藏容易渗漏,且三角洲反旋回的沉积演化序列造成 H_1 组中上部砂地比高不利于气藏保存,因此气藏垂向“互补式”富集在储盖组合单元Ⅲ、Ⅳ和Ⅴ中,如目前发现的工业气层都集中分布在 $H_1^5-H_1^1$ 小层中。

3.3 河控三角洲前缘亚相砂体构成了浅层气富集优质储层

大庆长垣南部黑帝庙油层主要发育三角洲前缘亚相沉积,应用高分辨率层序地层学理论,选取全区稳定发育的9套湖侵泥岩标准层(区域盖层/局部盖层)做控制,采用标准井(葡浅701井)和沉积旋回控制下的逐级优先逼近综合对比方法,建立了黑帝庙油层2个油层组10个小层25个沉积时间单元的单砂体级等时地层格架(图4),利用6口井岩心和1164口测井曲线绘制了黑帝庙油层单砂体级沉积微相:1)黑帝庙油层下部沉积时期湖盆水体较深,物源供给较强,微相类型主要为顺源宽带状河口坝、浪控垂源远砂坝和坳状席状砂;2)黑帝庙油层中部沉积时期湖盆逐渐萎缩,物源供给间歇性变弱,微相类型主要为水下分流河道、末端河控河口坝和浪控坳状席状砂;3)黑帝庙油层上部沉积时期湖盆萎缩到最小,水体较浅,物源供给范围最大,微相类型主要发育连续型水下分流河道和河控河口坝,席状砂等微相不发育(图5)。

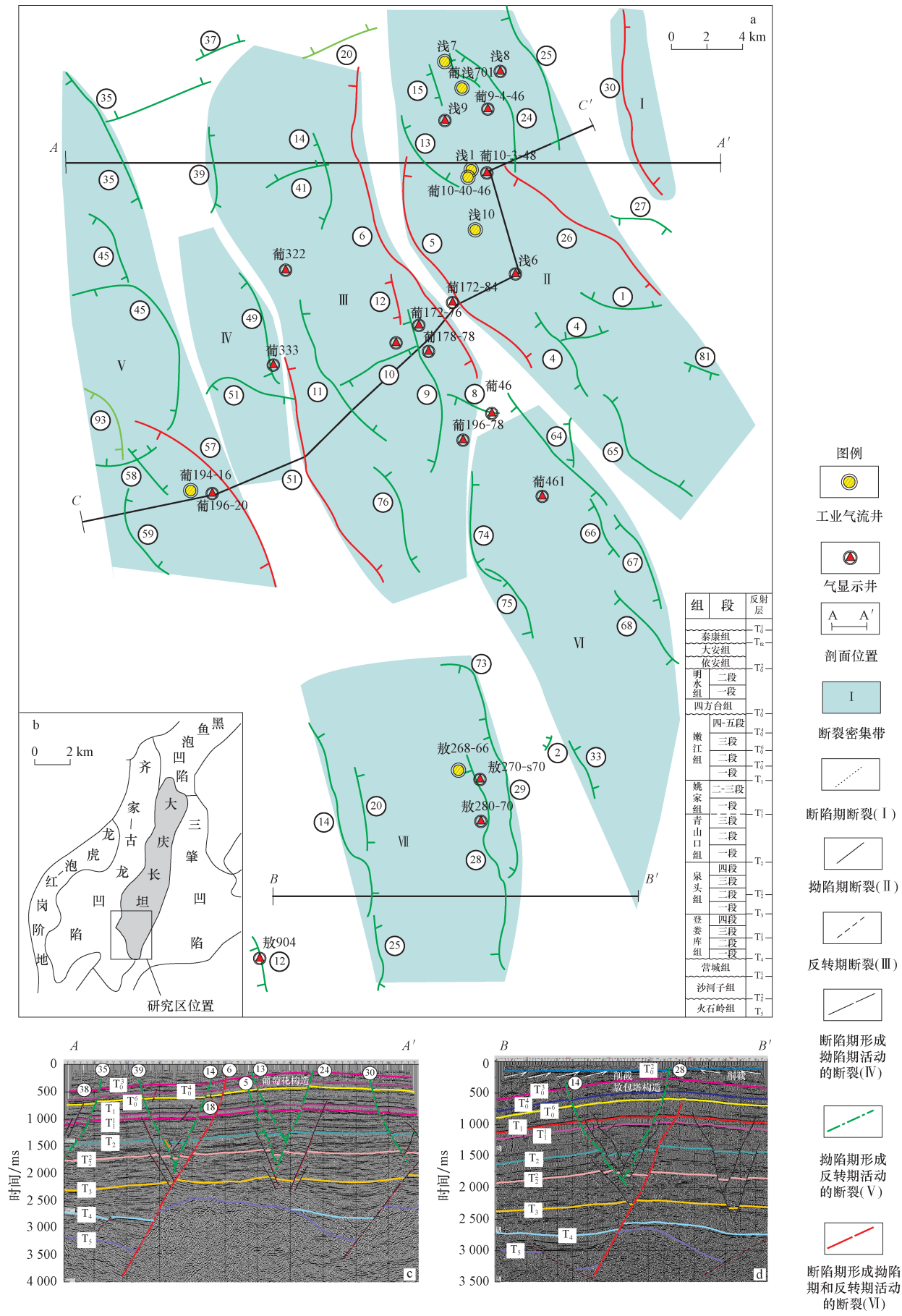


图3 大庆长垣南部黑帝庙油层断层发育特征

Fig. 3 Fault development in the Heidimiao reservoir in southern Daqing placantiline

a. 断层平面分布; b. 研究区位置; c. 葡萄花构造地震反射特征; d. 敖包塔构造地震反射特征

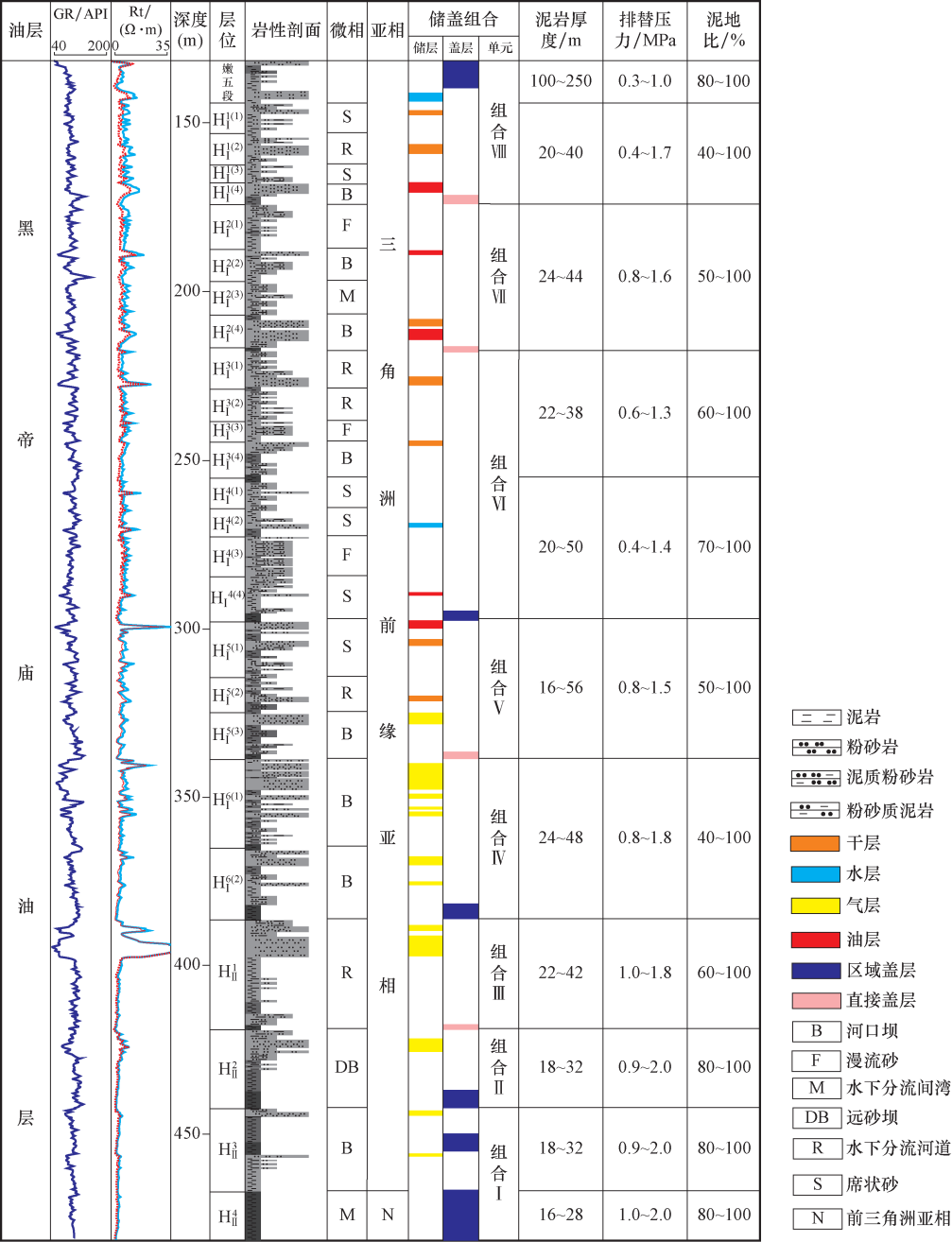


图 4 大庆长垣南部黑帝庙油层气藏储盖组合特征

Fig.4 Reservoir-cap assemblages of the Heidimiao reservoir in southern Daqing placantiline

密井网沉积微相揭示黑帝庙油层为典型的河控缓坡三角洲沉积体系,近岸区河控特征明显,砂体平面展布呈现顺源条带状,远岸区波浪改造强,砂体呈现平面展布垂源和坳状,油层垂向上表现为三角洲逐渐水退的反旋回沉积演化序列,其中水下分流河道、河口坝和远砂坝微相砂体发育、厚度大、物性好且平面连续,构成了浅层气富集的优质储层^[19],如区内 48 口气井试气层位和 1 875 个砂层静态解释表明有效厚度大于2 m的气层均为水下分流河道、河口坝和远砂坝微相。

3.4 断层侧向封闭性决定浅层气富集规模

断层侧向封闭性是指由于断层侧向封挡形成的断

层圈闭一盘或两盘油气聚集的能力^[20]。大庆长垣南部黑帝庙油层断层走向以近南北向为主,断层分割背斜和鼻状构造形成大量断层圈闭,因此断层侧向封闭性决定了黑帝庙油层断圈的有效性天然气富集的储量规模。黑帝庙油层为一套典型的三角洲前缘亚相稳定砂泥岩薄互储层,且由于油层总体厚度大(340 ~ 380 m)、断距规模小(10 ~ 80 m)和单砂层厚度薄(2 ~ 6 m),断层封闭类型主要为对接封闭、层状硅酸盐-框架封闭和泥岩涂抹封闭,其封闭的气柱高度大小取决于断裂带内卷入的泥质含量(SGR)^[21],根据已知气水界面的断层圈闭封闭属性值计算,确定黑帝庙油层断层封闭SGR 临界值为 0.375^[22],当断层 SGR 小于临界值时断

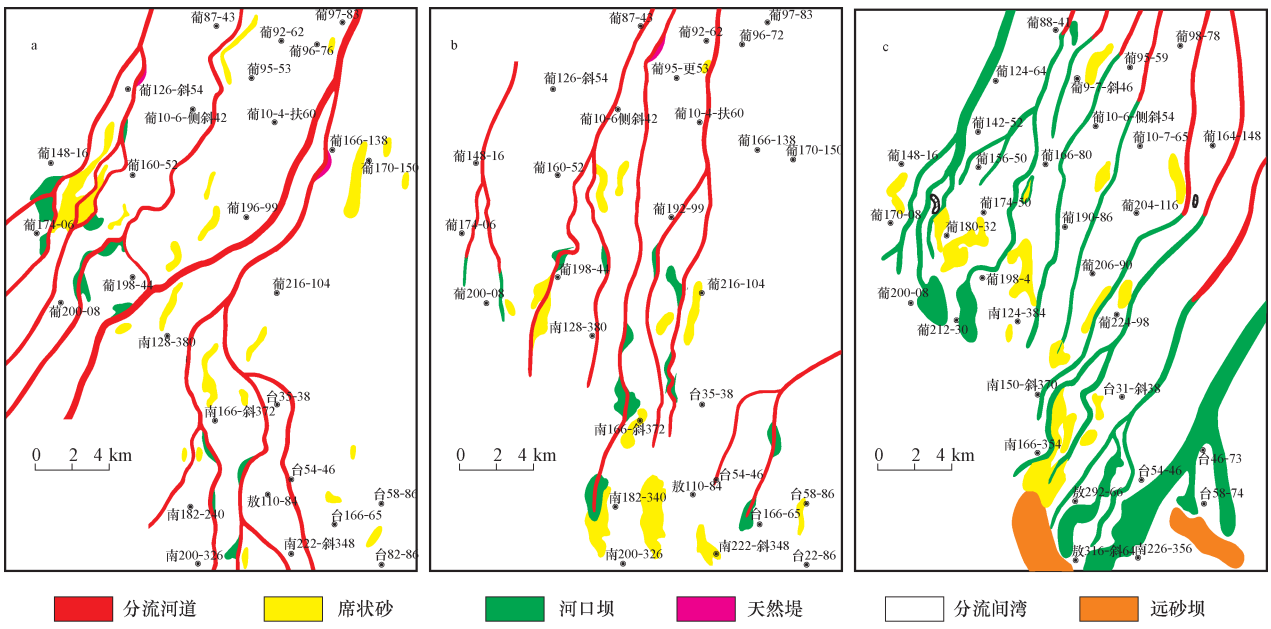


图5 大庆长垣南部黑帝庙油层重点时间单元沉积微相

Fig. 5 Sedimentary microfacies of the Heidimiao reservoir in southern Daqing placantiline at critical geological time

a. H_1^3 单元; b. H_1^5 单元; c. H_1^6 单元

层开启风险性极大,同时计算 SGR 下限值 0.375 对应的风险断距为 50 m,因此研究区当断层断距小于 50 m 时侧向封闭的风险很大,且上述计算表明区内目前所有见气显示井 SGR 均大于封闭临界值(图 6),断层侧向封闭性评价结果表明研究区完全有效圈闭 6 个(如葡东 1 号圈闭,圈闭闭合高度 10 m,断层侧向封闭有效高度 10 m),部分有效圈闭 11 个(如葡西 2 号圈闭,圈闭闭合高度 40 m,断层侧向封闭有效高度 5 m),完全无效圈闭 2 个(如熬西 2 圈闭,断层侧向开启),其评价结果与区内天然气井实际钻井情况相吻合。

4 浅层气富集成藏模式及储量规模

油气运聚成藏过程受多元地质条件及其时空匹配关系控制,以上研究表明充足的气源条件、高效的输导通道、发育的优质储层、有效的封挡圈闭和良好的保存条件是浅层气富集成藏的关键。大庆长垣南部黑帝庙油层浅层气成藏模式为:明水组沉积末期构造反转定型和源岩大量排烃,断裂密集带边界断层复活开启,下伏多套气源岩生成的天然气沿着气源断层上运进入黑帝庙油层,受油层顶部和内部多套盖层封挡影响,通过侧向连通性好的分流河道、河口坝和远砂坝优质储层砂体短距离侧向运移,最终在背斜、断背斜、断块和断鼻圈闭中聚集成藏,形成背斜气藏和断层气藏,即与气源断层沟通的断层侧向封闭性强圈闭为浅层气富集有利区(图 7)。在以上研究基础上,通过对气层生产动态资料和套后测井曲线响应特征的对比分析,建立了

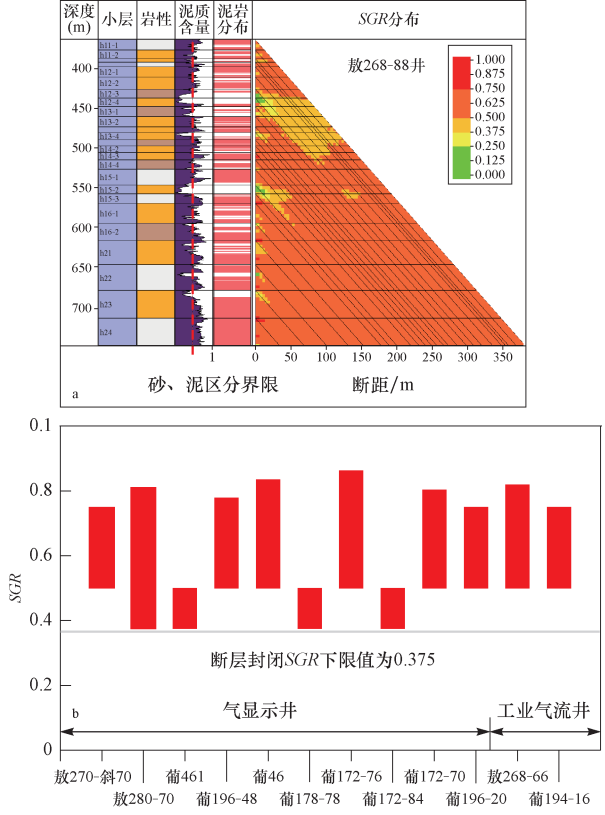


图6 大庆长垣南部黑帝庙油层断层封闭性与气藏关系

Fig. 6 Relationship between fault sealing capacity and gas accumulation for the Heidimiao reservoir in southern Daqing placantiline

黑帝庙油层相应的测井曲线气水解释模板,进而对 1 164口井各小层进行了气水识别,共发现有气显示井 587 口,然后结合圈闭有效范围和闭合高度,参照容积法计算天然气储量的原则和标准,进行了相关地质参数

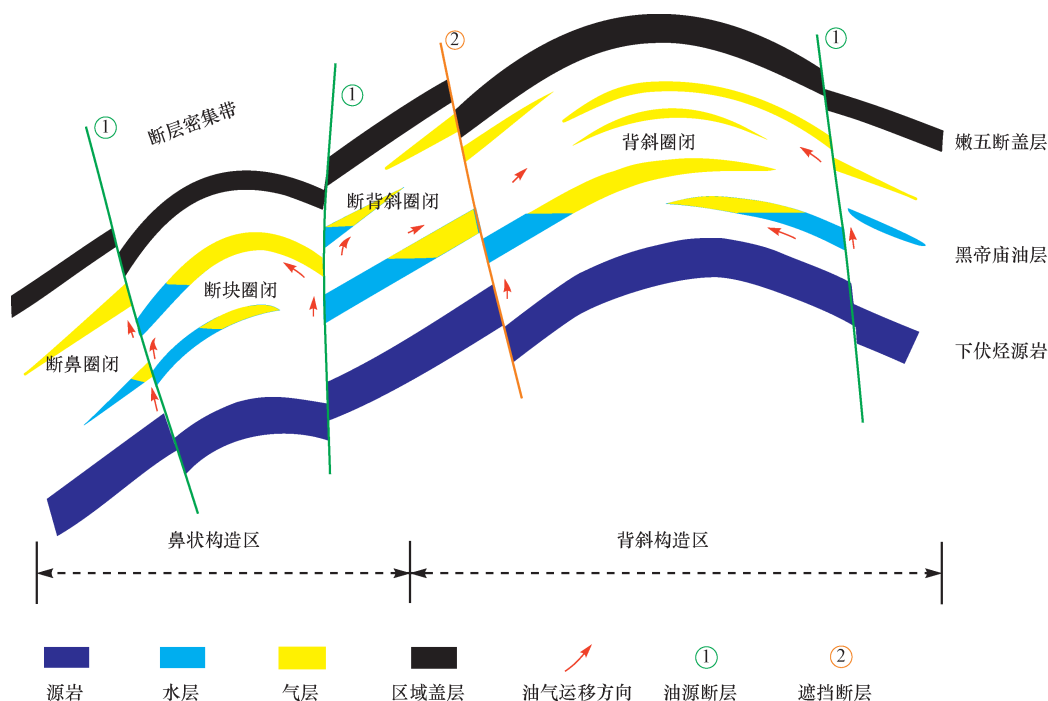


图7 大庆长垣南部黑帝庙油层浅层气成藏模式

Fig. 7 Shallow gas accumulation model of the Heidimiao reservoir in southern Daqing placantiline

提取,最终计算出各区块天然气累计地质储量 $86.8 \times 10^8 \text{ m}^3$, 含气面积 72.9 km^2 , 在各小层天然气预测储量面积叠合基础上,发现有效厚度大于 10 m 的浅层气富集区 7 个(葡 9-4-26 井区、葡 172-84 井区、葡 196-20 井区、敖 102-94 井区、敖 155 井区、敖 268-66 井区和葡 100-46 井区),建议优先开发部署。

5 结论

1) 松辽盆地大庆长垣南部黑帝庙油层浅层气资源丰富。气藏解剖表明研究区主要发育背斜、断背斜、断块和断鼻 4 种气藏类型;浅层气平面上受正向构造影响主要分布在背斜和鼻状构造高点,垂向上受储盖组合特征影响主要分布在中下部 $H_1^5-H_{II}^1$ 小层;气源对比表明葡萄花构造浅层气成因为生物气,主要来自嫩江组一段、二段,葡西鼻状构造浅层气成因为生物气、油型气和无机成因气组成的混合气,分别来自嫩江组一段、二段、青山口组和深部。

2) 总结出控制黑帝庙油层浅层气富集的 4 个主控因素:多套优质烃源岩构成了浅层气富集基础;气源断层与有效盖层匹配控制浅层气富集层位;河控三角洲前缘亚相砂体构成了浅层气富集优质储层;断层侧向封闭性决定浅层气富集规模。

3) 建立了黑帝庙油层浅层气成藏模式:明水组沉积末期构造反转定型,断层密集带边界断层复活开启,下伏烃源岩生成的天然气沿着气源断层上运进入黑帝庙油层,然后在多套有效盖层遮挡下沿着

与气源断层沟通的优质储层砂体短距离侧向运移,最终在背斜、断背斜、断块和断鼻圈闭中聚集成藏。进而结合气水解释模和容积法计算出浅层气地质储量 $86.8 \times 10^8 \text{ m}^3$,并刻画出 7 个优先开发的气藏富集区块。

参 考 文 献

- [1] Floodate G D, Judd A g. The origins of shallow gas[J]. Continental Shelf Research, 1992, 12(10): 1145-1156.
- [2] 丁国生. 我国浅层气资源及气藏类型[J]. 天然气工业, 1997, 19(3): 72-74.
Ding Guosheng. Shallow gas resource and gas reservoir type in China [J]. Natural Gas Industry, 1997, 19(3): 72-74.
- [3] Shurr G W, ridgley J L. Unconventional shallow biogenic gas systems[J]. AAPG Bulletin, 2002, 86(11): 1939-1969.
- [4] 张林晔, 李学田. 济阳拗陷滨海地区浅层天然气成因[J]. 石油勘探与开发, 1990, 7(1): 1-7.
Zhang Linye, Li Xuetian. The origin of nature gas in the shallow reservoir in Binhai area in Jiyang depression[J]. Petroleum Exploration and Development, 1990, 7(1): 1-7.
- [5] 张水昌, 赵文智, 李先奇, 等. 生物气研究新进展与勘探策略[J]. 石油勘探与开发, 2005, 32(4): 90-96.
Zhang Shuichang, Zhao Wenzhi, Li Xianqi, et al. Advances in biogenic gas studies and exploration strategies[J]. Petroleum Exploration and Development, 2005, 32(4): 90-96.
- [6] 周宗良, 郑平, 肖建玲, 等. 黄骅拗陷北大港地区浅层天然气识别与分布特征[J]. 天然气地球科学, 2010, 21(4): 535-540.
Zhou Zongliang, Zheng Ping, Xiao Jianling, et al. Recognition and distribution of shallow natural gas in Beidagang zone of Huanghua depression[J]. Natural Gas Geoscience, 2010, 21(4): 535-540.
- [7] 夏永江, 王延斌, 王晓波, 等. 松辽盆地北部浅层气成藏主控因素

- 及勘探有利区[J]. 石油学报, 2012, 33(6): 961–969.
- Xia Yongjiang, Wang Yanbin, Wang Xiaobo, et al. Main controlling factors in the shallow-gas reservoir formation and its favorable exploration area in the northern Songliao Basin[J]. Acta petrolei sinica, 2012, 33(6): 961–969.
- [8] 王金鹏, 彭仕宓, 赵艳杰, 等. 柴达木盆地晚第四纪超浅层生物气成藏研究. 石油天然气学报, 2008, 30(2): 15–19.
- Wang Jinpeng, Peng Shibi, Zhao Yanjie, et al. Research of ultra-shallow biogenetic gas accumulation of late quaternary in Qaidam basin[J]. Journal of oil and gas technology, 2008, 30(2): 15–19.
- [9] 邹才能, 朱如凯, 吴松涛, 等. 常规与非常规油气聚集类型、特征、机理及展望—以中国致密油和致密气为例[J]. 石油学报, 2012, 33(2): 173–187.
- Zou Caineng, Zhu Rukai, Wu Songtao, et al. Types, Characteristics, genesis and prospects of conventional and unconventional hydrocarbon accumulations: taking tight oil and tight gas in China as an instance[J]. Acta Petrolei Sinica, 2012, 33(2): 173–187.
- [10] 李迪, 吕延防, 刘宗堡. 大庆长垣南部黑帝庙油层沉积特征及对浅层气分布的控制作用[J]. 大庆石油学院, 2009, 33(3): 22–25.
- Li Di, Lü Yanfang, Liu Zongbao. Sedimentary feature and shallow gas distribution rule of Heidimiao reservoir of southern Daqing-placanticline in Songliao basin[J]. Journal of Daqing petroleum institute, 2009, 33(3): 22–25.
- [11] 胡望水, 吕炳全, 张文军, 等. 松辽盆地构造演化及成盆动力学探讨[J]. 地质科学, 2005, 40(1): 16–31.
- Hu Wangshui, Lü Bingquan, Zhang Wenjun, et al. An approach to tectonic evolution and dynamics of the Songliao basin[J]. Chinese journal of geology, 2005, 40(1): 16–31.
- [12] 白振国, 李忠权, 麻成斗, 等. 大庆长垣南部黑帝庙油层浅层气特征[J]. 成都理工大学学报(自然科学版), 2006, 33(6): 593–597.
- Bai Zhenguo, Li Zhongquan, Ma Chengdou, et al. The features of shallow gas in the Heidimiao oil layer of the southern Changyuan in Daqing, china[J]. Journal of Chengdu university of technology (Science & technology edition), 2006, 33(6): 593–597.
- [13] 陈英, 戴金星, 戚厚发. 关于生物气研究中几个理论及方法问题的研究[J]. 石油实验地质, 1994, 16(3): 209–219.
- Cheng Ying, Dai Jinxing, Qi Houfa. On some theoretical and methodological topics of biogenics gas studies[J]. Experimental geology of oil and gas, 1994, 16(3): 209–219.
- [14] 戴金星. 各类天然气的成因鉴别[J]. 中国海上油气(地质), 1992, 6(1): 11–19.
- Dai Jinxing. Identification of various genetic natural gases[J]. China offshore Oil and Gas(Geology), 1992, 6(1): 11–19.
- [15] 卢双舫, 徐庆霞, 刘绍军, 等. 评价生物气生成量、生成期的碳同位素平衡法及其应用[J]. 沉积学报, 2008, 26(2): 308–313.
- Lu Shuangfang, Xu Qingxia, Liu Shaojun, et al. The carbon isotopic equilibrium method of evaluating the biogas-generated quantity and the generation period: Its application[J]. Acta Sedimentologica Sinica, 2008, 26(2): 308–313.
- [16] 沙子萱. 大庆长垣南部地区浅层气成因类型及富集规律研究[J]. 科学技术与工程, 2011, 11(6): 1325–1327.
- Sha Zhixuan. The research of genetic type and accumulation rule of shallow gas in the south of Daqing placanticline[J]. Science technology and engineering, 2011, 11(6): 1325–1327.
- [17] 李剑, 严启团, 张英, 等. 柴达木盆地三湖地区第四系生物气盖层封闭机理的特殊性[J]. 中国科学(D辑), 2007, 37(增刊II): 36–42.
- Li Jian, Yan Qituan, Zhang Ying, et al. The special sealing mechanism of caprock for Quaternary biogenetic gas in Sanhu area, Qaidam Basin[J]. Science in China: Series D, 2007, 37(Suppl II): 36–42.
- [18] 刘哲, 付广, 吕延防, 等. 南堡凹陷断裂对油气成藏控制作用的定量评价[J]. 中国石油大学学报(自然科学版), 2013, 37(1): 27–34.
- Liu Zhe, Fu Guang, Lü Yanfang, et al. Quantitative evaluation for control of faults on hydrocarbon accumulation in Nanpu sag[J]. Journal of china university of petroleum (Edition of natural science), 2013, 37(1): 27–34.
- [19] 刘宗堡, 吕延防, 杨志等. 基于高分辨率层序地层学的大庆长垣南部浅层气分布特征研究[J]. 地层学杂志, 2009, 33(4): 382–390.
- Liu Zongbao, Lü Yanfang, Yang Zhi, et al. Shallow gas distribution character of the Heidimiao reservoir in the southern Daqing placanticline based on high-resolution sequence stratigraphy[J]. Journal of Stratigraphy, 2009, 33(4): 382–390.
- [20] Fisher Q J, Knipe R J. The permeability of faults within siliciclastic petroleum reservoirs of the North Sea and Norwegian Continental Shelf[J]. Marine and Petroleum Geology, 2001, 18(10): 1063–1081.
- [21] Knipe R J. Juxtaposition and seal diagrams to help analyze fault seals in hydrocarbon reservoirs[J]. AAPG Bulletin, 1997, 81(2): 187–195.
- [22] 付晓飞, 潘国强, 贺向阳, 等. 大庆长垣南部黑帝庙浅层生物气的断层侧向封闭性[J]. 石油学报, 2009, 30(5): 678–684.
- Fu Xiaofei, Pan Guoqiang, He Xiangyang, et al. Lateral sealing of faults for shallow biogas in Heidimiao Formation of the southern Daqing placanticline[J]. Acta Petrolei Sinica, 2009, 30(5): 678–684.

(编辑 董立)