文章编号:1673-5005(2015)04-0035-07 doi:10.3969/j.issn.1673-5005.2015.04.005

楚-萨雷苏盆地考可潘索尔坳陷天然气含氮特征及其成因

吴欣松[1,2], 李 娜[1], 周练武[3], 余 达[1], 查宇铭[1]

(1. 中国石油大学地球科学学院,北京 102249; 2. 油气资源与探测国家重点实验室,北京 102249;
3. 中石油大港油田公司,天津 300280)

摘要:通过天然气组分统计分析,结合区域构造演化、烃源岩成熟度历史、典型气藏解剖分析,确定考克潘索尔坳陷氮气的空间分布特征及其主控因素,包括有机质热演化程度、天然气运聚过程、基岩地层的高放射性等。研究表明:天然气组分中氮气含量在垂向上表现为下石炭统低、上泥盆统较高、二叠系最高的分布特点;泥盆系烃源岩大部分已经处于过成熟阶段,因此生成了富氮的天然气,在埋深较大的圈闭中,勘探的经济风险增加;二叠系气藏为典型的下生上储,靠断裂沟通下部烃源岩,天然气的高含氮也与高成熟天然气的垂向运聚密切相关,其总体勘探潜力不大。

关键词:天然气组分; 氮气成因; 烃源岩成熟度; 楚-萨雷苏盆地

中图分类号:TE. 122. 1 **文献标志码**:A

引用格式:吴欣松,李娜,周练武,等. 楚-萨雷苏盆地考可潘索尔坳陷天然气含氮特征及其成因[J]. 中国石油大学学报:自然科学版,2015,39(4):35-41.

WU Xinsong, LI Na, ZHOU Lianwu, et al. Distribution and origin of Molecular Nitrogen in natural gas of Kokpansor Depression, Chu-Sarysu Basin[J]. Journal of China University of Petroleum(Edition of Natural Science), 2015,39(4):35-41.

Distribution and origin of molecular nitrogen in natural gas of Kokpansor Depression, Chu-Sarysu Basin

WU Xinsong[1,2], LI Na[1], ZHOU Lianwu[3], YU Da[1], ZHA Yuming[1]

(1. *College of Geosciences in China University of Petroleum*, *Beijing* 102249, *China*;
2. *The State Key Laboratory of Petroleum Resources and Prospecting*, *Beijing* 102249, *China*;
3. *Dagang Oil Company*, *PetroChina*, *Tianjin* 300280, *China*)

Abstract: Based on the statistics of the natural gas composition, and by combining the areal structural evolution, the maturity of source rock and analysis of the key gas reservoir, this paper determined the distribution and the main controls of the molecular nitrogen in Kokpansor Depression, which include the maturity of source rock, the process of gas accumulation and the high radioactivity of the basement rock. The results show that the content of molecular nitrogen in natural gas is lower in the Lower Carboniferous, higher in the Upper Devonian and the highest in the Lower Permian. In Upper Devonian, most of the source rock was over-matured so that it generated the nitrogen-rich natural gas. The exploration risk in some deep buried traps maybe very high in such a case. On the other hand, gas pools in the Lower Permian belong to exogenetic accumulations and faults are the main channels of the gas input from the source rock. The higher nitrogen content in the Lower Permian is closely related to the long distance vertical migration of the over-matured natural gas. As a result, the exploration outlook of the Lower Permian is very limited.

Keywords: Natural gas composition; origin of the molecular nitrogen; source rock maturity; Chu-Sarysu Basin

收稿日期:2015-01-22

基金项目:国家"973"计划项目(2011CB2011)

作者简介:吴欣松(1969-),男,副教授,博士,研究方向为油气藏形成与分布规律。E-mail:wxs@cup.edu.cn。

对地质家而言,“天然气”这一术语主要是指与油气田相关的气体,其主要组分是甲烷和部分重烃为主,并可能含有少量的非烃(如 CO_2、H_2S、N_2)及稀有气体(He、Ne、Ar)[1]。对于天然气非烃组分中 N_2 的来源与成因,Krooss 等[2]做了比较全面的总结,概括起来主要可以分为火山及岩浆成因、放射性 α 粒子合成、大气水下渗脱溶、有机质降解与热演化、沉积岩黏土矿物成岩、天然气运移与扩散等多种成因类型[3-7],但是由于缺乏过硬的地球化学识别手段,一直以来未能形成相应的地球化学判别标准。虽然在此研究领域国内外成果颇多,但分歧争议也很大,特别是在高氮天然气的存在与油气保存条件的关系方面[8]。楚-萨雷苏(Chu-sarysu)盆地位于哈萨克斯坦共和国中南部,是哈萨克斯坦境内目前唯一以发现天然气为主要流体相态的含油气盆地。其勘探始于 20 世纪 50 年代,首先从西北部的考克潘索尔坳陷(次盆)开始。20 世纪 80 年代中期,由于位于其西侧的南图尔盖盆地发现了中生界侏罗系油田,勘探方向发生了转移,楚-萨雷苏盆地的勘探一度陷于停滞。2008 年以后,加拿大 Condor 石油公司联合哈萨克斯坦的 Marsel 石油公司重新在考克潘索尔坳陷南部(Marsel 区块)开展风险勘探。截至 2013 年,共新钻探井 4 口,其中 2 口井(Tamgalytar 5、Assa 1)测试获得高产气流,另有 2 口井(Kendyrlik 5RD 和 Bugudshilskaya 1)钻探失利,未能提交新的商业储量。迄今为止,楚萨雷苏盆地仍然只是在西北部的考克潘索尔坳陷以及东南部的莫因库姆(Muyunkum)坳陷发现了十多个小气田,储量规模都非常小。位于考克潘索尔坳陷的 3 个气田——Pridorozhnaya 气田、Ortalyk 气田、West Oppak 气田,获得前苏联批准的 C1 级储量之和仅为 $73\times10^8 m^3$。上述十多个小气田和含气构造均表现出氮气组分较高的特征。特别是在二叠系盐下地层(P_1 盐下段)发现了高氮天然气藏,个别气藏中含量甚至大于 98%。这些氮气源自何处,受何种因素控制,是否预示着该区的油气保存条件差,勘探前景低,这是目前该区勘探过程中需要首先回答的重要问题。

1　地质背景

1.1　基本地质特征

楚-萨雷苏盆地是在前寒武结晶基底和下古生界褶皱基底之上形成的一个晚古生代—中新生代复合盆地。盆地基地岩性复杂,主要是上元古界和早古生界变质岩和火成岩。沉积盖层为泥盆系—二叠系和中新生界,最大厚度可达 6 000 m。在地质历史中,由于受盆地西南边界的北西向断层(喀拉套断层)和盆地中部一系列北西向断层走滑拉张和走滑挤压的影响,平面上形成了隆坳相间的构造格局。目前,勘探发现主要集中在盆地东南部的莫因库姆坳陷北部以及盆地西北部的考克潘索尔坳陷南部(图 1)。

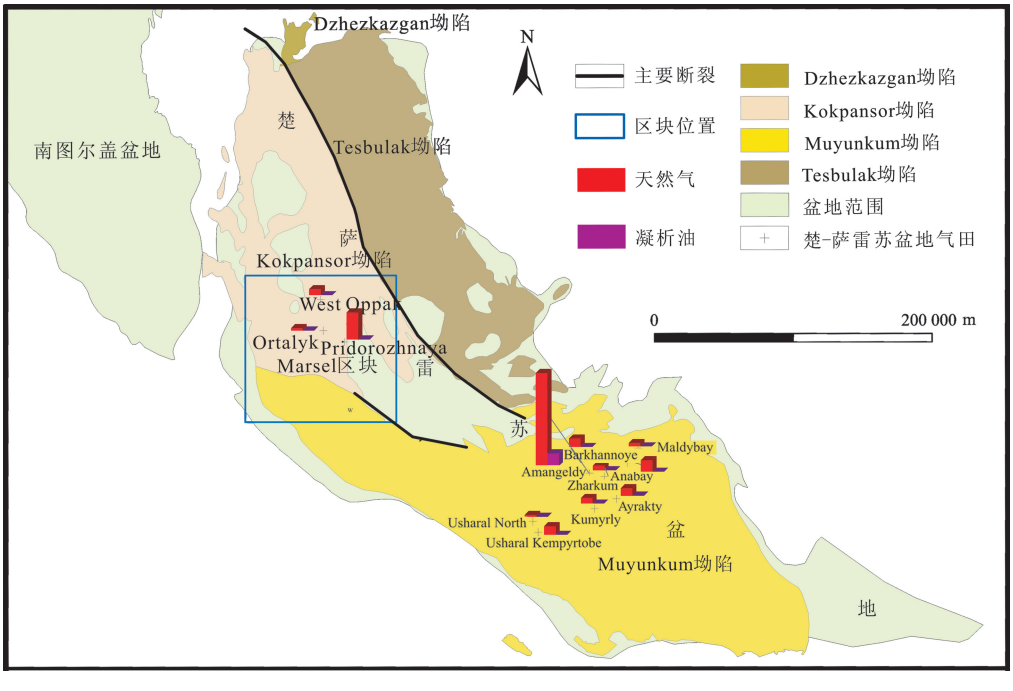

图 1　楚-萨雷苏盆地构造单元及气田平面分布

Fig. 1　Structural units and gas fields distribution in Chu-Sarysu Basin

考克潘索尔坳陷的构造演化主要经历了 5 个主要阶段:①初始断陷阶段(D_{2-3}),坳陷内发育基底卷入式伸展断裂系统,主要在坳陷的东北部沉积了弗拉阶—法门阶(D_{2-3}fr—D_3fm)冲积扇-扇三角洲砂砾岩、湖相泥页岩及盐岩;②被动大陆边缘阶段(C_1),断裂不发育,沉积了以碳酸盐岩、泥灰岩、页岩为主的开阔台地、局限台地及潮坪相的海相地层;③整体隆升阶段(C_{2-3}),研究区表现为区域隆升,坳陷东北部断层发育,走滑挤压形成背斜的雏形,主要沉积以红色铁硅质石英-长石砂岩与粉砂岩互层为特征的陆相红层;④俯冲碰撞阶段(二叠世),发育基底卷入式压扭断裂系统,这一时期基本沿袭了晚石炭的沉积面貌,只是在中期沉积了一套厚度巨大、分布较广的膏岩沉积,该构造运动后,经历了较长时间的风化剥蚀,盆地内基本准平原化;⑤ 陆内拗陷阶段(Mz—Cz),中侏罗世以后,坳陷缓慢沉降,沉积了厚度不大(约 500 m)的冲积相砂砾岩,地层成岩性较差,断裂不发育。研究区以及整个盆地缺失了三叠系。

考克潘索尔坳陷整体上表现为东北低、西南高的构造格局。东北部断裂深大发育,断层逆冲幅度大,使得该区二叠系甚至上石炭统剥蚀殆尽,但是上泥盆统厚度较大;西南部地区构造相位平缓,在二叠纪末遭受了较大程度的剥蚀,而且整体上泥盆系厚度不大或者未接受沉积。

1.2　天然气成藏特征

考克潘索尔坳陷主要烃源岩自下而上包括上泥盆统法门阶(D_3fm)的湖相泥页岩以及下石炭统杜内阶(C_1t)、维宪阶(C_1v)、谢尔普霍夫阶(C_1sr)的海相-泻湖相页岩及泥灰岩。其中泥盆系烃源岩以陆源腐殖型有机质为主,干酪根类型属于Ⅱ$_2$-Ⅲ型;下石炭统烃源岩以海相浮游动植物为主,干酪根类型为Ⅱ$_1$ 型。从坳陷内烃源岩系统采样井(West Oppak 2 井)有机碳分析结果可以看出,泥盆系泥质烃源岩 TOC 平均约为 0.5%,最高可达 1.0%。下石炭系维宪阶海相页岩和泥灰岩有机碳丰度较高,最高可达 2.0%,平均值大于 0.6%(图 2)。中上石炭统和二叠系的泥岩颜色多为氧化色,有机质丰度很低,基本上不具备生烃能力。有机质热演化程度较高,下石炭统烃源岩 R_o 一般为 1.3% ~3.5%,处于高—过成熟阶段,泥盆系烃源岩热演化程度则更高。

在考克潘索尔坳陷,钻探发现多个含气层系,包括下古生界前寒武系结晶基岩、上泥盆统、下石炭统和下二叠统。成藏研究表明,基岩裂缝型气藏为典型的新生古储,不整合面与断裂是油气运移的主要通道;上泥盆统和下石炭统主要为自生自储,裂缝在致密气运聚中起着重要的通道作用,下二叠统则属于明显的古生新储,断层是沟通二叠系与下部烃源岩的重要通道条件。

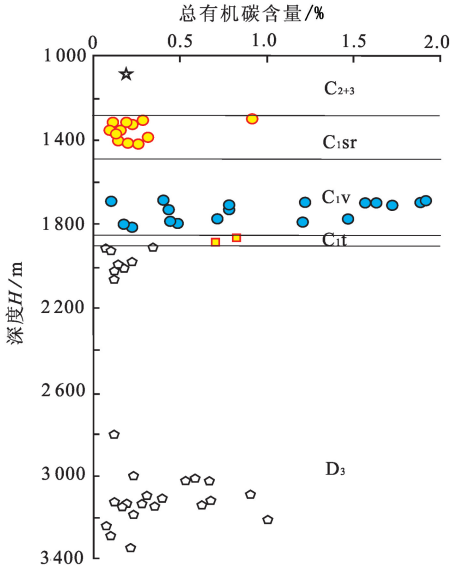

图 2　West Oppak 2 井 TOC 剖面

Fig. 2　TOC column of well West Oppak 2

2　天然气含氮特征与成因分析

2.1　天然气组分分布特征

虽然考克潘索尔坳陷天然气组分分析样品数量不多,但总体仍然看出该区的天然气组成具有以下几个方面的明显特征:①以干气为主,基本不含凝析油,如果抛开非烃类组分的影响,计算出甲烷占烃类组分的含量均大于 92%,平均约为 96%,为典型的干气;②CO_2 含量总体比较低,变化幅度不大,一般为 0.2% ~1.2%,平均约为 0.5%,属于低二氧化碳气藏;③含有相对较高的 He 组分,绝大部分超过 0.15%,达到和超过了氦气矿的 0.1% 工业标准,可以按照单独的矿种计算储量;④H_2S 含量在不同构造相差较大,目前仅在 Pridorozhnaya 气田和 Ortalyk 气田天然气中发现有 H_2S,分布在 0 ~1%,属于低—中含硫级别,其他几个气田和含气构造则没有检测到 H_2S 的存在;⑤N_2 的含量在该区变化较大,从接近于 0 到最高超过 40%。从层位的分布来看,二叠系气藏含量最高(42.8%),达到高含氮级别;其次为泥盆系气藏,含量约为 30%,达到富含氮级别;下石炭统整体较低,一般小于 20%。总体上 N_2 含量从层位分布看,自下而上呈现出高—低—高的分布格局(图 3)。

表 1　考克潘索尔坳陷不同含气构造天然气组成

Table 1　Natural gas composition of different structure in Kokpansor Depression

气田(构造)	井号	层位	测试井段深度 H/m	天然气组分 φ/%					
				CH_4	C_2H_6+	N_2	H_2S	CO_2	He
Tamgalytar	1	C_1sr	2 274 ~ 2 315	90.20	0.95	8.50		0.35	0.18
		C_1sr	2 274 ~ 2 315	81.30	1.05	17.40		0.25	0.18
		C_1v_2	2 584 ~ 2 591	86.15	1.41	12.09		0.35	0.15
	5	C_1sr	2 270 ~ 2 404	87.81	1.60	10.33		0.26	
West Oppak	1	C_1sr	1 360 ~ 1 380	89.30	7.70	2.70		0.30	
		D_3	1 860 ~ 1 900	63.00	4.70	32.00		0.30	
Ortalyk	2	P_1	1 100 ~ 1 225	55.00	2.20	42.80			
	1	C_1v_3	2 135 ~ 2 140	91.85	7.44	0.11	0.300	0.30	
		C_1v_3	2 135 ~ 2 185	93.50	5.30	0.09	0.360	0.75	
		PR_3	2 525 ~ 2 690	83.70	4.40	11.90			
North Pridorozhnaya	1	C_1v_3	2 117 ~ 2 270	91.15	4.45	3.55		0.85	0.17
		C_1v_1	2 478 ~ 2 635	91.60	5.75	2.15		0.50	
Pridorozhnaya	2	C_1sr	1 190 ~ 1 300	88.36	2.18	8.03	0.940	0.40	0.19
		C_1sr	1 350 ~ 1 410	89.40	7.62	1.80	0.930	0.25	
		D_3	2 252 ~ 2 260	65.00	1.04	32.53	0.230	1.20	
		D_3	2 350 ~ 2 500	70.40	1.37	27.90	0.030	0.30	
	4	C_1sr	1 273 ~ 1 410	89.20	2.04	7.80	0.010	0.95	0.23
SoutthPridorozhnaya	15	C_1v_3	1 816 ~ 1 922	81.80	2.00	15.40		0.80	0.14

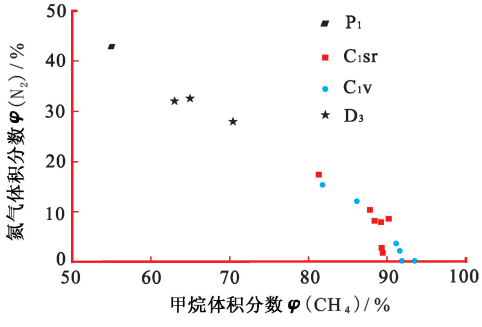

图 3　考克潘索尔坳陷天然气组成中甲烷与氮气含量的关系

Fig. 3　Relationship between CH_4 and N_2 of natural gas composition in Kokopansor Depression

2.2　富氮天然气成因分析

由于不同成因 N_2 同位素值的分布范围相当或重叠较大,到目前为止,不同成因氮气的地球化学判识标准尚未建立[9-10]。研究区考克潘索尔坳陷由于缺乏相应的同位素地球化学分析数据,对于该区氮气成因的研究主要基于对区域地质与油气地质条件开展综合分析。

2.2.1　氮气来源分析

无论是岩浆活动或是幔源气均应具有“富二氧化碳”的特征[5,11]。从楚-萨雷苏盆地考克潘索尔坳陷采集的气样分析结果可以看出,该区天然气组分中的 CO_2 含量较低,并且总体分布稳定(表 1),CO_2 与 N_2 含量之间也缺乏相关性。另外,从楚-萨雷苏盆地区域上看,钻探结果表明在中晚泥盆世之后该区基本未发生过火山活动和岩浆侵入,基本可以排除岩浆活动和幔源的影响。这与王屿涛等[12]提出的准噶尔盆地腹部含氮—富氮天然气成因有一定的差异。

从目前的分析结果来看,在所有的气藏内部均未检测到 O_2 的存在,且可以排除现今大气氮溶解于地下水沿断裂下渗然后脱溶聚集的可能。尽管该坳陷在二叠系沉积之后经历了大规模的走滑挤压和构造抬升作用(根据地层厚度趋势外推,在坳陷东北部被剥蚀的地层厚度达到约 1 500 m),但是从 Ortalyk 气田地质条件的剖析可以发现,该气田总体处于构造稳定区,虽然在圈闭的西南侧发育一条北西西走向的断层(图 4),根据地震资料解释结果,该断层的断距非常小(不到 20 m)。从构造录井资料证实,在下二叠系盐下段气藏的上方,二叠系含盐段的区域性膏盐盖层依然发育,厚度可大于 200 m。可以认为,二叠纪后的构造抬升对该圈闭的保存不会造成大的影响。地层水分析资料也表明,地层水水型主要为氯化钠和氯化钙型,矿化度较高。这些证据表明 Ortalyk 气田下二叠统气藏中的高含量氮气并非为大气来源成因,而更有可能是天然气的垂向运移造成的。沉积有机质演化到一定的阶段,形成富含氮的烃类气体之后,在成藏过程中发生长距离的侧向和垂向运移均可形成富氮天然气藏[10]。

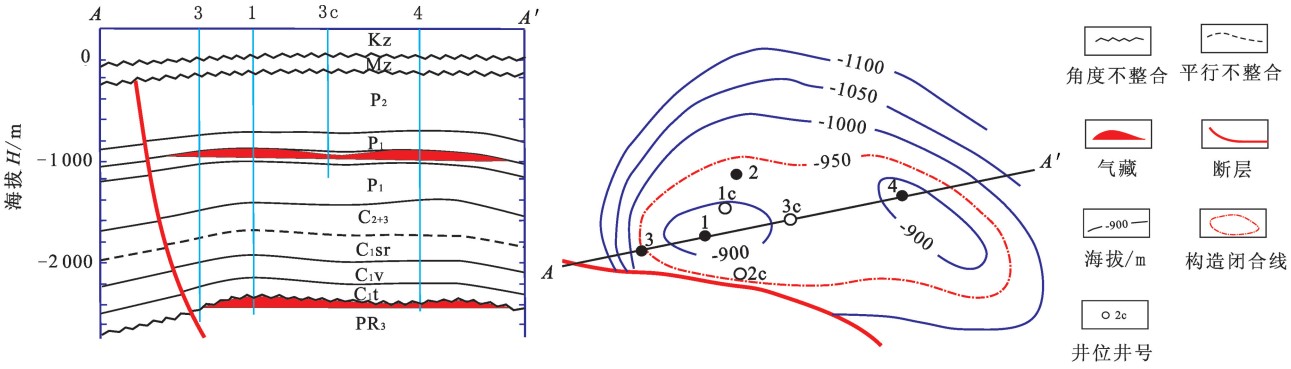

图 4　Ortalyk 气田气藏剖面与二叠系气藏顶面构造

Fig. 4　Ortalyk gas field profile and structural map of P_1 gas pool

2.2.2　天然气富含氮与有机质热演化关系

从表 2 可以看出,考克潘索尔坳陷下石炭统的镜质体反射率均大于 1.5%,已经进入大规模成气阶段。在盆地南部的莫因库姆坳陷,下石炭系统烃源岩的镜质体反射率 R_o 更是可以达到大于 3.0,泥盆系烃源岩的成熟度应更高。另外,从其包络线的延伸趋势(图 5)也不难发现,在地表处 R_o 的值接近 0.5% ~0.7%,从而印证了本区在地质历史中曾经遭受了严重的抬升剥蚀。

表 2　楚-萨雷苏盆地下石炭统烃源岩成熟度统计

Table 2　Source rock maturity statistics of Lower Corboniferous in Chu-Sarysu Basin

坳陷	井名	采样深度 H/m	层位	R_o/%
考克潘索尔坳陷	Kendyrlik 4	1 770.2 ~1 777.4	C_1v	1.49
	West Oppak 2	1 696.8 ~1 703.1(顶部)	C_1v	1.55
	West Oppak 2	1 696.8 ~1 703.1(中部)	C_1v	1.58
	West Oppak 2	1 707.0 ~1 715.0	C_1t	1.60
莫因库姆坳陷	Severnyyzrkyr 1	3 402.7 ~3 409.7	C_1v	3.30
	Bastas 1	1 589.0 ~1 599.0	C_1v	1.39
	Kashkinbay 1	2 266.0 ~2 273.0	C_1t	1.71
	kalgaly 1	2 421.0 ~2 430.0	C_1v	2.36
	kalgaly 1	2 998.0 ~3 008.0	C_1v	3.17
	kalgaly 1	3 027.0 ~3 036.0	C_1v	3.30

从 R_o 与深度关系图上可以看出,二者之间表现出良好的对数线性关系(相关系数大于 0.94),随着埋藏深度的增加而 R_o 对数线性增加(图 5)。据此可以推算,在 West Oppak 地区(以 West Oppak 2 井为例),泥盆系的烃源岩埋深一般大于 3 000 m(图 2),镜质体反射率 R_o 可大于 3.0%,已经处于过成熟阶段。

根据现今地层温度的统计,目前考克潘索尔坳陷的地温梯度仅约为 2.7 ℃/100 m,而在现今约 3 000 m的深度条件下,要达到约 3.0 的镜质体反射率,或者是古地层埋深很大,或者古地温梯度非常高。根据地层埋深与 R_o 的关系,考克潘索尔坳陷南部地区泥盆系烃源岩的成熟度表现为西部高(R_o 最高可大于 3.5%),向东逐渐降低(至约 1.5%)。石炭系烃源岩成熟度分布也基本上呈现出相同的趋势。这与中国准噶尔盆地以及塔里木盆地天然气组分的整体分布格局具有较大的相似性[13-14]。

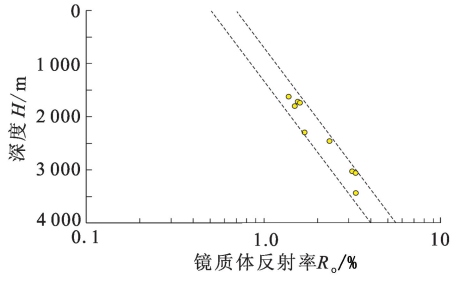

图 5　楚-萨雷苏盆地下石炭统烃源岩镜质体反射率与现今地层埋深的关系

Fig. 5　Relationship of vitrinite reflectance and depth of Lower Carboniferous source rock in Chu-Sarysu Basin

杜建国[6]提出了有机质在过成熟阶段释放出的气体中 $\varphi(N_2)/\varphi(CH_4)$ 值较生烃高峰期大的结论。Krooss 等[2]的模拟结果也表明,氮气生成所需的温度要明显高于甲烷,当温度达到 300℃ 时,可以生成 N_2 含量大于 50% 的天然气。这些认识也为考克潘索尔坳陷泥盆系天然气的高氮的有机质成因提供了重要的佐证。另一方面,不同构造部位相同层位气藏中天然气组分的对比也表明,因埋深差异导致的烃源岩成熟度的差异是导致下石炭统气藏含氮量低于泥盆系的主要原因。以下石炭统谢尔普霍夫阶气藏(C_1sr)为例,Tamgalytar 构造和 North Pridrozhnaya 构造由于埋深大,烃源岩热演化程度高(计算 R_o 大于2.0),其氮气含量均大于8.5%,明显高于 West Oppak 和 Pridorozhnaya 气田相同层位(计算 R_o 小于 2.0)气藏天然气中的含氮量(0 ~ 8.5%)。C_1v 气藏也具有相似的组分特征(表 1)。

另外,Ortalyk 气田缺失泥盆系,其烃源岩为上覆下石炭统杜内阶(C_1t)烃源岩,现今埋深约为 2 400 m,该基岩气藏中 N_2 含量也仅约为 12%。区域研究表明,由于石炭系和泥盆系之间存在泥盆系顶部(含盐段)较厚的盐岩区域盖层的分隔,C_1sr 和 C_1v 层系中的气藏主要为自生自储,基本上没有泥盆系更高成熟度烃源岩生成的天然气混入。这种对比足以说明烃源岩埋深及演化程度对研究区氮气含量的影响。

2.2.3　可能存在的成因分析

泥盆系沉积以后,在考克潘索尔坳陷没有火山活动的和岩浆侵入的证据,但是泥盆系底部(盐下段)则是一套富含火山碎屑的角砾岩和含砾砂岩。GR 测井曲线显示出该地层具有高 GR 特征,其幅度可大于 120 API(图 6),比下石炭统韦宪阶 C_1v 的泥页岩烃源岩的伽马值还要高,说明下泥盆统本身含有很高的放射性元素。

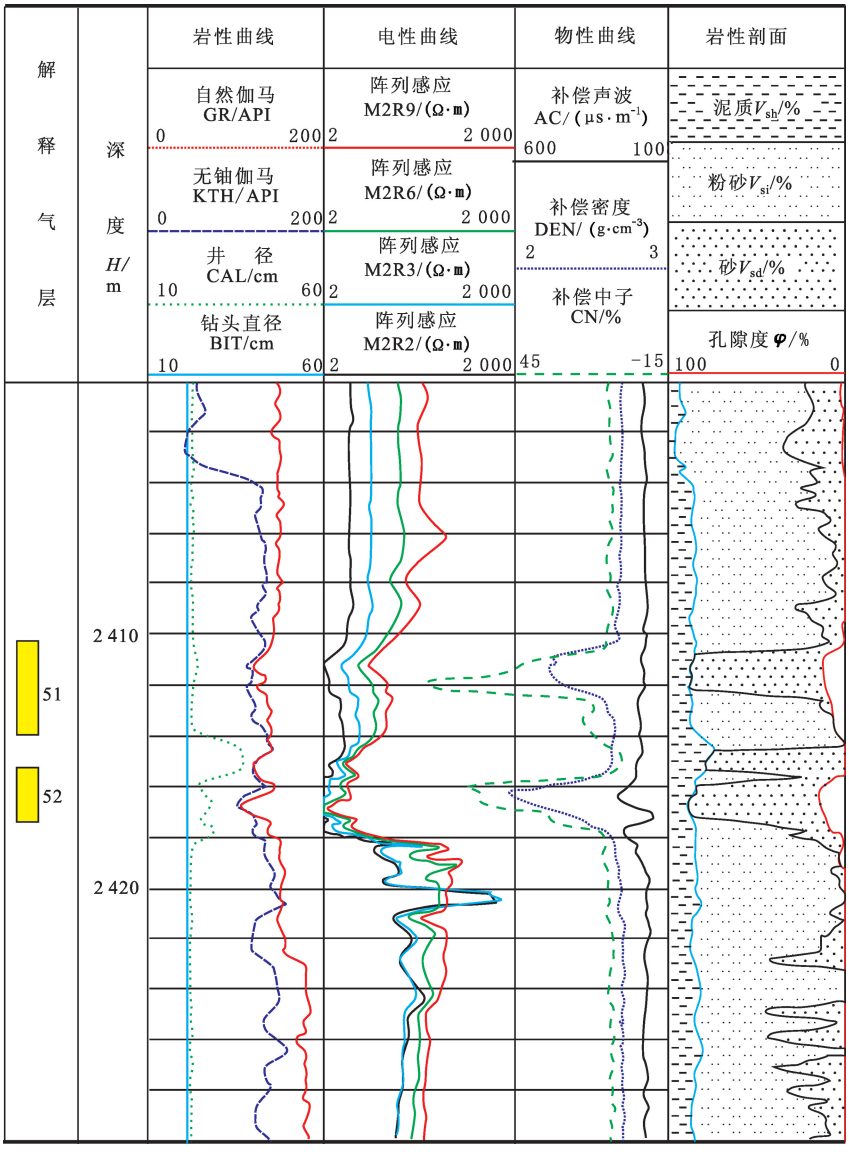

图 6　Asa 1 井泥盆系法门阶高伽马测井响应特征

Fig. 6　High GR response of Famennian Stage in well Asa 1

根据岩石地球化学的相关原理,氮可以由两种与放射性相关的无机化学作用过程形成:一种是由 B 元素与 α 粒子(He 原子)作用形成,另一种由 C 元素与 α 粒子(He 原子)反应产生。而 α 粒子正是由岩石中富含放射性强的 ^{232}Th、^{235}U、^{238}U 等元素核衰变的产物。研究区天然气中普遍含有较高的 He 含量,据此可以推测,研究区特别是在泥盆系气藏以及靠近泥盆系的相关气藏中,天然气中富氮—高氦,可能存在放射性无机化学作用的贡献。

3　结论与认识

(1)综合地质及地球化学分析表明,楚-萨雷苏盆地考克潘索尔坳陷富氮—高氮天然气的成因主要是有机质热演化生烃及天然气运移作用的结果,其次可能存在与放射性衰变有关的无机化学反应的贡献。高演化程度的烃源岩是天然气组分富氮的主要成因,有机质的演化程度的差异性基本控制了上泥盆统和下石炭统气藏天然气含氮量的差异性。

(2)由于二叠系 P_1 含盐段厚层硬石膏层、下石炭统 C_1sr 顶部膏盐与盐岩层、泥盆系法门阶盐岩层等区域盖层的存在,油气保存条件和油气勘探十分有利(坳陷边部和隆起区除外),但是在泥盆系和石炭系埋藏埋深大、烃源岩热演化程度高的地区,天然气的勘探(特别是泥盆系和二叠系)存在较大的经济风险。

参考文献:

[1] 柳广弟. 石油地质学[M].4 版. 北京:石油工业出版社,2009:24-26.

[2] KROOSS B M, LITTKE R, MIILER B, et al. Generation of nitrogen and methane from sedimentary organicmatter: implications on the dynamics of natural gas accumulations [J]. Chemical Geology, 1995(126):291-318.

[3] MAKSIMOW S P, MIILLER E P, BOTNEWA T A, et al. Origin of high nitrogen gaspools[J]. International Geology Review, 1975,18(5):551-556.

[4] MAKSIMOW S P, SORKIN L M, PANKINA R G. On the origin of natural gas accumulations with high nitrogen contents[J]. Zeitschrift Für Angewandte Geologie, 1973, 19(10):499-505.

[5] 宋岩. 影响天然气组分变化的主要因素[J]. 石油勘探与开发,1991,18(2):42-49.
SONG Yan. Main factors affecting the changes in compositions of natural gas[J]. Petroleum Exploration and Development, 1991,18(2):42-49.

[6] 杜建国. 天然气中氮的研究现状[J]. 天然气地球科学,1992,3(2):36-40.
DU Jianguo. Research status of nitrogen in natural gas [J]. Natrual Gas Geoscience, 1992,3(2): 36-40.

[7] 朱岳年. 天然气中非烃组分地球化学研究进展[J]. 天然气地球科学,1994,5(1):1-29.
ZHU Yuenian. Research progress of the non-hydrocarbon composition in natural gas[J]. Natural Gas Geoscience, 1994,5(1):1-29.

[8] 陈安定. 氮气对海相地层油气保存的指示作用[J]. 石油实验地质,2005,27(1):85-89.
CHEN Anding. Nitrogen as an index of oil gas preservation condition in marine strata[J]. Petroleum Geology and Experiment, 2005,27(1):85-89.

[9] HOEFS J. Stable isotope geochemistry[M]. Heidelberg and New York: Springer-Verlag, 1989.

[10] 宋占东,姜振学,宋岩,等. 准噶尔盆地南缘天然气中 N_2 地球化学特征及成因分析[J]. 天然气地球科学,2012,23(3):541-549.
SONG Zhandong, JIANG Zhengxue, SONG Yan, et al. Geochemical characteristics of nitrogen and it genesis in natural gas, southern margin of Junggar Basin [J]. Natrual Gas Geoscience, 2012,23(3):541-549.

[11] 曲希玉,刘立,杨会东,等. 油伴生 CO_2 气的成因及其石油地质意义[J]. 中国石油大学学报:自然科学版,2011,35(4):41-46.
QU Xiyu, LIU Li, YANG Huidong, et al. Genesis of oil-associated CO_2 and its significance in petroleum geology[J]. Journal of China University of Petroleum(Edition of Natural Science),2011,35(4):41-46.

[12] 王屿涛,蒋少斌. 准噶尔盆地腹部含氮-富氮天然气成因 [J]. 新疆石油地质,1997,18(1):46-49.
WANG Yutao, JIANG Shaobin. Nitrogen-bearing and nitrogen-rich natural gas in the hinterland of Junggar Basin[J]. Xinajiang Petroleum Geology, 1997,18(1): 46-49.

[13] 郑建京,吉利名,孟仟祥. 准噶尔盆地天然气地球化学特征及其聚集条件的讨论[J]. 天然气地球化学,2000,11(4/5):17-21.
ZHENG Jianjing, JI Liming, MENG Qianxiang. Discussion of geochemical characteristies of gases in the Jungar Basin[J]. Natrual Gas Geoscience, 2000,11(4/5): 17-21.

[14] 陈建发,朱岳年. 天然气中氮的来源及塔里木盆地东部天然气中氮地球化学特征[J]. 天然气地球科学,2003,14(3): 172-176.
CHEN Jianfa, ZHU Yuenian. The origin of molecular nitrogen in natural gas and geochemical characters of molecular nitrogen in natural gas from east part of Tarim Basin[J]. Natural Gas Geoscience, 2003,14(3):172-176.

(编辑　徐会永)