

·油气地质·

论裂谷盆地侵入岩区天然气的混合性

——以沾化凹陷孤北地区为例

万丛礼¹, 金强², 李钜源³, 赵勇⁴, 杨志伟⁴

(1.中国石化东北油气分公司 勘探开发研究院, 吉林 长春 130062; 2.中国石油大学(华东) 地球科学与技术学院, 山东 青岛 266580; 3.中国石化胜利油田分公司 地质科学研究院, 山东 东营 257015; 4.中国石化胜利油田分公司 油气集输总厂, 山东 东营 257000)

摘要:裂谷盆地岩浆活动强烈,其中侵入岩区的天然气资源丰富且天然气性质异常。为深入研究侵入岩区的天然气成因,对沾化凹陷孤北地区天然气和气源岩的地球化学特征进行了系统分析。结果发现,孤北地区侵入岩区的气源岩过成熟,天然气中无机成因二氧化碳和硫化氢含量较高、烷烃碳同位素较重、天然气性质变化较大。结合天然气成因和同位素分馏理论分析,认为造成天然气性质异常的原因是侵入岩区气源岩除经历正常的热演化作用外,还受到岩浆及岩浆流体的高温烘烤作用,导致有机质发生多阶演化、多次生烃以及碳酸盐岩(或硫酸盐)分解;岩浆流体混入也使天然气组成进一步复杂化。侵入岩区天然气不仅具有普遍混合性,而且具有多重(多源、多阶、多期及烃类气体与非烃类气体)混合性;由于混合类型及混合比的不同,导致天然气性质存在明显差异。

关键词:裂谷盆地 岩浆活动 侵入岩 天然气 混合性 孤北地区

中图分类号: TE122.1

文献标识码: A

文章编号: 1009-9603(2013)04-0001-04

东部裂谷盆地是中国油气资源最丰富的地区。经过近半个世纪的勘探开发,东部裂谷盆地的油气储量和产量持续下降,寻找新的能源接替阵地显得尤为重要。近年来,松辽盆地徐深气田(探明天然气地质储量超过 $1 \times 10^{11} \text{ m}^3$)和松南气田(探明天然气地质储量为 $4.6 \times 10^{10} \text{ m}^3$)等岩浆岩气田的发现引起了中外学者的极大关注,岩浆岩区已被确定为油气勘探的重要领域。侵入岩区的天然气资源丰富但性质复杂,对其成因存在很大争议,制约了下一步的油气勘探。为此,笔者提出了裂谷盆地侵入岩区天然气的普遍混合及多重混合论,揭示了该类地区天然气成因的特殊性和复杂性,以期对侵入岩区油气成因研究及勘探开发提供借鉴。

1 区域地质概况

孤北地区位于沾化凹陷中部,东、西分别与孤北和渤南洼陷相接,南、北分别与孤岛和埕东凸起相连^[1],自东向西可划分为潜山带、断阶带和深洼带3个构造单元。其含气层位主要为奥陶系、石炭系—侏罗系和沙四段,气源岩主要包括潜山带石炭系—二叠系煤岩和深洼带沙四段暗色泥岩。

由于研究区东临郯庐深大断裂,内部又发育孤北、孤西和埕东等断裂,尤其是中生代以来构造运动频繁,导致岩浆活动强烈,成为济阳拗陷岩浆岩最发育的地区之一。孤北地区的岩浆活动包括中生代和新生代2大旋回。中生代岩浆活动分为蒙阴期(晚侏罗世早期)和青山期(晚侏罗世晚期—早白垩世)(表1),该旋回始于晚侏罗世,晚侏罗世晚期—早白垩世达到高峰,至晚白垩世停止。其中,蒙阴期以喷发为主,岩石类型多为凝灰岩;青山期以喷发和喷溢为主,并伴有大量侵入,岩石类型包括安山岩和玄武岩。中生代岩浆岩分布范围广、面积大,整体呈北西—南东向展布,平面上主要分布于郭局子、孤西和五号桩3个构造带。新生代岩浆岩分布面积明显小于中生代,且活动方式均为侵入,主要沿孤西、埕东和义东断裂零星分布,如罗家

表1 孤北地区部分岩浆岩样品K-Ar年龄分析结果

岩浆活动期次	K-Ar年龄/Ma	岩性	样品来源
馆陶组沉积时期	11.91 ~ 31.67	辉长岩	罗151井
新生代 馆陶组沉积时期 (推测)		石英正长岩	渤深4井
中生代 晚白垩世	83.87(±1.67)	闪长玢岩	孤北古1井
中生代 早白垩世	112.98(±1.59)	煌斑岩	义136井

收稿日期:2013-05-21。

作者简介:万丛礼,男,研究员,博士,从事油气勘探及开发方面的研究。联系电话:13074357950, E-mail: wancli2003@yahoo.com.cn。

地区辉长岩和渤深4井区石英正长岩等,表明研究区新生代岩浆活动明显减弱(表1)。

2 天然气地球化学特征

通常天然气组分中烃类气体含量高,非烃类气体含量低,烷烃碳同位素较轻且变化小。例如鄂尔多斯盆地天然气中烃类气体含量超过98%,而二氧化碳含量仅为0.07%~1.6%(平均为0.72%)^[2];即使在构造活动较强的渤海湾盆地,多数地区天然气中的烃类气体含量约为99%,二氧化碳含量低于1%。相比之下,侵入岩区天然气组分非常复杂,非烃类气体和稀有气体含量较高、烷烃碳同位素变化较大。侵入岩区天然气依据组分可大致分为二氧化碳(即二氧化碳含量大于60%)和含二氧化碳的烃类气体2种类型。

统计结果表明,中国目前已发现的二氧化碳(或高含二氧化碳)气藏均分布于东部裂谷盆地的侵入岩区。如松辽盆地万金塔气藏,其二氧化碳含量达97.77%,甲烷含量仅为1.39%;渤海湾盆地平方王地区平气4井气藏的二氧化碳含量为75.33%,甲烷和乙烷含量分别为20.89%和1.25%,而平南地区滨古14井气藏的二氧化碳含量达96.99%,甲烷、乙烷和丙烷含量分别为1.16%,0.27%和0.55%;东部

的苏北、三水、东海和莺歌海盆地也发育许多二氧化碳气藏,其二氧化碳含量为62.38%~99.55%,且 $\delta^{13}\text{C}_{\text{CO}_2}$ 非常重,其值为-5.80‰~4.76‰,远大于无机成因 $\delta^{13}\text{C}_{\text{CO}_2}$ 下限值(-8.0‰);此外,与二氧化碳气伴生的烷烃碳同位素变化较大, $\delta^{13}\text{C}_1$ 为-51.68‰~-28.6‰, $\delta^{13}\text{C}_2$ 为-33.01‰~-30.42‰;且 $^3\text{He}/^4\text{He}$ 值很高(R/R_s 为2.00~4.96)^[2],远大于1,属于幔源成因气。

除无机成因二氧化碳气藏外,侵入岩区还发育高含二氧化碳的烃类气藏(其组分以烃类气体为主,二氧化碳含量大于1%)。例如孤北地区的天然气组分变化较大(表2),其中烃类气体含量为53.29%~98.64%,二氧化碳含量为0.56%~14.19%(渤深5井奥陶系未检测非烃类气体组分,预测其含量超过40%)。孤北地区天然气烷烃碳同位素较重且变化很大,不同构造带(甚至不同井区)存在明显差异;其中深洼带沙四段天然气 $\delta^{13}\text{C}_1$ 为-52.66‰~-35.5‰, $\delta^{13}\text{C}_2$ 为-31.2‰~-20.8‰;潜山带石炭系一侏罗系天然气 $\delta^{13}\text{C}_1$ 为-37.11‰~-32.2‰, $\delta^{13}\text{C}_2$ 为-25.4‰~-16.78‰;断阶带奥陶系天然气 $\delta^{13}\text{C}_1$ 为-43.76‰~-38.0‰, $\delta^{13}\text{C}_2$ 为-28.73‰~-23.4‰。此外,研究区天然气 $\delta^{13}\text{C}_{\text{CO}_2}$ 变化非常大,为-12.9‰~0.7‰;其中潜山带天然气 $\delta^{13}\text{C}_{\text{CO}_2}$ 最轻,低于-10‰,

表2 孤北地区不同构造带天然气地球化学特征

构造带	井号	层位	埋深/m	组分, %				碳同位素, ‰				
				CH ₄	C ₂₊	N ₂	CO ₂	$\delta^{13}\text{C}_{\text{CO}_2}$	$\delta^{13}\text{C}_1$	$\delta^{13}\text{C}_2$	$\delta^{13}\text{C}_3$	$\delta^{13}\text{C}_4$
深洼带	渤深3	Es ₄	4 450.1~4 472.1	70.63	20.9		4.13	-3.22	-39.13	-26.66	-23.44	-23.92
	渤深4	Es ₄	3 898.6~3 924.4	79.75	14.25	4.07	0.56	-2.55	-52.66	-30.75	-28.2	-28.1
	渤深5	Es ₄	4 491.89~4 587.3	80.83		0.57	14.19		-38.0			
	渤深8	Es ₄	4 664.1~4 680						-35.5	-20.8		
	义115	Es ₄	5 144~5 163.4	89.12	3.88	0	6.31	-3.04	-35.93	-24.87	-21.83	-22.07
	义121	Es ₄	4 426.1~4 438.4	91.1	2.58	0	6.31	0.7	-38.0	-21.98	-19.32	-20.61
潜山带	义170	Es ₄	3 806.1~3 829	84.44	11.4			-3.9	-52.6	-31.2	-27.3	-27.2
	渤93	J	3 120~3 136.2	92.1	5.89	0.55	1.47		-37.11	-19.1	-17.1	-18.78
	渤930	P	3 546.2~3 650	92.88	5.76	1.26			-35.46	-16.78	-16.05	-15.4
	义132	C—P	3 374~3 387	82.1	14.21	0.98	1.87	-12.9	-36.97	-25.4	-25	-25.5
	义155	C—P	4 528.8~4 574	87.72	4.35	0.64	7.29	-11.6	-32.2	-22.0	-21.5	-20.9
	孤北古1	C—P	4 020.9~4 139.5	86.67	7.35	0.49	5.45		-35.9	-23.1	-21.2	-21.2
断阶带	孤北古2	C—P	3 517.7~3 534.2						-36.3	-22.5	-21.8	-22
	渤古4	O	4 375~4 460	81.96	10.18	0.44	7.39		-38.1	-24.95	-22.4	-23.55
	渤深5	O	4 764.8	52.28	1.01							
	渤深6	O	4 165.5~4 398.5	73.95	17.81		8.13		-40.8	-27.6	-24.5	-24.8
	渤古403	O	3 806.6~3 966	78.98	12.83	0.88	6.86	-5.5	-37.1	-23.4	-22.4	-23.4
	渤601	O	4 733.8~4 862	80.48	14.56				-40.8	-28.7	-25.8	-26.1
渤601	O	5 007	76.2	17.27	1.22	5.05		-43.76	-28.73	-25.8	-26.06	

为有机成因;而深洼带和断阶带天然气 $\delta^{13}\text{C}_{\text{CO}_2}$ 较重,最大值为0.7‰,最小值为-5.5‰,均大于-8‰。

3 天然气的混合性

天然气组分主要受烃源岩的有机质类型和热演化程度2个因素影响。根据天然气成因和同位素分馏理论,认为烃源岩的热演化程度越高,天然气干燥系数越大,烷烃碳同位素也越重;在热演化程度相同的情况下,煤成气的干燥系数较油型气的大,烷烃碳同位素更重。在裂谷盆地,岩浆侵入烃源岩,岩浆具有极高的温度(700~1 300 ℃)和压力,并携带了大量的岩浆流体(成分以水为主,含有一定量的无机成因二氧化碳和硫化氢、少量的甲烷和稀有气体以及多种金属元素等)^[3-4],对周围烃源岩的热演化及油气生成产生了重要影响,不仅提高了油气丰度,而且改变了油气的物化性质^[5-6]。研究结果表明,侵入岩区天然气复杂的组分是天然气混合的结果,包括多源(不同来源天然气)混合、多阶(不同演化程度天然气)混合、多期(不同生成期次天然气)混合以及烃类气体与非烃类气体混合。

3.1 天然气来源的多样性

侵入岩区天然气组分主要包括烃类气体和非烃类气体,其中,烃类气体可进一步分为有机和无机烃类气体2类,以有机烃类气体为主。

3.1.1 烃类气体

有机烃类气体 有机烃类气体即烃源岩中有机质主要在热作用下生成的烃类气体,主要包括甲烷、乙烷、丙烷和丁烷等。裂谷盆地发育多套烃源岩,如济阳拗陷发育上古生界和中生界煤岩、古近系沙四段和沙三段暗色泥岩等。此外,裂谷盆地侵入岩区断层发育且活动性强,为不同来源天然气混合提供了条件,如孤北潜山带上古生界天然气为石炭系一二叠系生成的煤成气与沙四段生成的油型气的混合,而孤西断阶带奥陶系天然气主要为来源于深洼带沙四段的油型气,并混入了少量煤成气^[7]。

无机烃类气体 基性或超基性岩浆岩中的橄榄石在蚀变过程中产生氢气和甲烷^[8-9],可促进附近烃源岩的生烃演化及油气生成,进而提高油气丰度。此外,地幔中存在的无机烃类气体被岩浆或岩浆流体携带上来^[10],可直接聚集成藏,如松辽盆地德昌地区的天然气即被认为是幔源成因气^[11]。

3.1.2 非烃类气体

二氧化碳 二氧化碳是天然气中重要的非烃

类气体组分,对天然气成因研究具有重要意义。统计结果表明,绝大多数天然气中的二氧化碳含量小于1%,而侵入岩区天然气中的二氧化碳含量较高(最高可达99%)且变化很大。天然气中的二氧化碳可分为有机和无机成因2种。有机成因二氧化碳为烃源岩中有机质在热演化过程中生成的二氧化碳,其演化过程包括生物化学作用、热化学作用和原油氧化等。研究表明,有机质在热演化过程的各个阶段均能生成二氧化碳,但其含量一般小于1%,且 $\delta^{13}\text{C}_{\text{CO}_2}$ 也小于-10‰^[9]。无机成因二氧化碳可进一步分为碳酸盐岩热解成因和幔源成因2种。其中,碳酸盐岩热解成因二氧化碳为碳酸盐岩高温分解而形成,其含量一般很高,且 $\delta^{13}\text{C}_{\text{CO}_2}$ 很重,为-8‰~7‰^[12];例如渤深5井沙四段(储层为泥灰岩,成熟度非常高,镜质组反射率为3.75%,且烘烤特征明显)天然气中的二氧化碳含量为14.19%,而奥陶系(储层为灰岩)天然气中的二氧化碳含量预测超过40%(其烃类气体含量为52.28%,未分析非烃类气体)(表2),分析认为其二氧化碳主要为碳酸盐岩高温热解所形成^[13]。幔源成因二氧化碳是地幔中存在的大量无机成因二氧化碳,被岩浆或热流体携带至沉积地层并混入天然气,使天然气中的二氧化碳含量增高,其 $\delta^{13}\text{C}_{\text{CO}_2}$ 为-9‰~-4‰。

硫化氢 天然气中一般微含(甚至不含)硫化氢(质量浓度小于0.02 g/m³),但孤北地区侵入岩区多口探井的硫化氢质量浓度较高。例如渤古401井和渤古403井硫化氢的质量浓度分别为4.9和9.1 g/m³,如此高的硫化氢质量浓度在济阳拗陷非常罕见,表明研究区天然气成因具有特殊性。孤北地区沙四段膏岩的厚度大且分布范围广,例如渤深5井沙四段膏岩的厚度为160 m。分析认为,天然气中的硫化氢是由于高温岩浆使膏岩中硫酸盐分解所生成;但硫化氢的活动性很强,极易与地层中的铁、铜等金属元素发生化学反应形成黄铁矿和黄铜矿等;因此,目前研究区天然气中残存的硫化氢仅为原始生成硫化氢的一部分。

裂谷盆地侵入岩区天然气的来源包括烃源岩有机质演化、矿物分解以及幔源物质混入,而侵入岩区断层发育及构造活动强烈也为天然气的混合提供了条件,因此,其天然气为不同来源天然气混合的结果。

3.2 天然气的多阶混合性

天然气的多阶混合性是指不同热演化程度烃源岩生成的天然气的混合。天然气是烃源岩中有

机质在相对较低温度(多小于200℃)下缓慢生成的,因此,其化学性质比较稳定。埋藏史及热史分析证实,渤深5井沙四段烃源岩经历的最高埋藏温度约为180℃(未考虑岩浆及岩浆流体因素)(图1),但其镜质组反射率为3.75%,且烘烤特征明显;因此,侵入岩附近的烃源岩除经历由于埋藏作用引起的低温热演化,还受到岩浆及岩浆流体的高温热演化(如基性岩浆的温度为1300℃)。通过对厚度为118 m的基性侵入岩的研究发现,在与侵入岩的距离为0~102,102~130和130~195 m的烃源岩分别处于干气、湿气和生油窗3个演化阶段^[11],表明侵入岩附近烃源岩的热演化具有多个阶段,其生成的天然气是由多个演化阶段生成的天然气的混合。

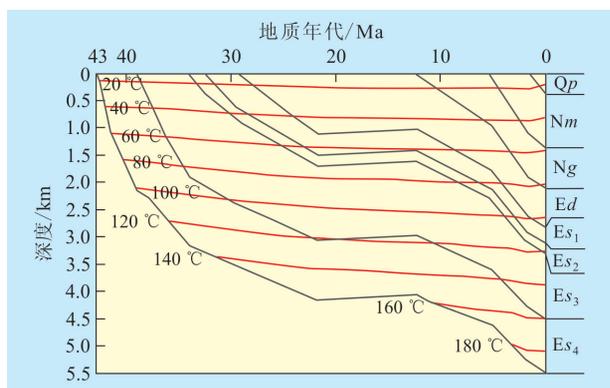


图1 渤南洼陷渤深5井埋藏史及热史

烷烃碳同位素是天然气成因及类型鉴别研究中最主要的参数。依据同位素分馏理论, ^{12}C — ^{12}C 键能低于 ^{13}C — ^{13}C 键能,有机质在热演化成气过程中 ^{12}C — ^{12}C 键优先断裂,残余干酪根中富集 ^{13}C ,生成的烃类气体中富集 ^{12}C 。随着热演化成气过程的发展,高碳数分子逐渐向低碳数分子裂解,残余干酪根的 $\delta^{13}\text{C}$ 减小,而生成烃类气体的 $\delta^{13}\text{C}$ 逐渐增大。因此,烃源岩成熟度是影响天然气烷烃碳同位素的重要因素。

分析发现,孤北潜山带天然气的烷烃碳同位素具有明显的特殊性。例如渤93井天然气 $\delta^{13}\text{C}_1$, $\delta^{13}\text{C}_2$, $\delta^{13}\text{C}_3$ 和 $\delta^{13}\text{C}_4$ 分别为 -37.11% , -19.1% , -17.1% 和 -18.78% ;渤930井天然气 $\delta^{13}\text{C}_1$, $\delta^{13}\text{C}_2$, $\delta^{13}\text{C}_3$ 和 $\delta^{13}\text{C}_4$ 分别为 -35.46% , -16.78% , -16.05% 和 -15.4% ;其 $\delta^{13}\text{C}_2$ 和 $\delta^{13}\text{C}_3$ 较重,远高于煤成气的下限值($\delta^{13}\text{C}_2$ 和 $\delta^{13}\text{C}_3$ 分别大于 -25.1% 和 -23.2%)^[11],且 $\delta^{13}\text{C}_2$ — $\delta^{13}\text{C}_1$ 也较大(分别为 18.01% 和 18.68%)。深洼带天然气的烷烃碳同位素也较重且变化很大,例如渤深8井天然气 $\delta^{13}\text{C}_1$ 和 $\delta^{13}\text{C}_2$ 分别为 -35.5% 和 20.8% ;义115井天然气 $\delta^{13}\text{C}_1$, $\delta^{13}\text{C}_2$ 和 $\delta^{13}\text{C}_3$ 分别为 -35.93% , -24.87%

和 -21.83% ;义121井天然气 $\delta^{13}\text{C}_1$, $\delta^{13}\text{C}_2$ 和 $\delta^{13}\text{C}_3$ 分别为 -38% , -21.98% 和 -19.32% 。整体上,距离侵入岩越近,其天然气的烷烃碳同位素越重,二氧化碳含量越高;例如义170井距离侵入岩较远,其 $\delta^{13}\text{C}_1$, $\delta^{13}\text{C}_2$, $\delta^{13}\text{C}_3$ 和 $\delta^{13}\text{C}_4$ 分别为 -52.6% , -31.2% , -27.3% 和 -27.2% ,远小于邻近侵入岩的渤深8、义115、义121等井(表2),表明高温岩浆对天然气性质的影响非常显著。

渤南洼陷深洼带天然气一直被认为是来自东部潜山带石炭系的煤成气^[14],但笔者不同意该观点。其原因为:①东部潜山带侏罗系和石炭系的埋藏深度比深洼带气层小,即潜山带生成的煤成气不可能向下倒灌进入深洼带;②深洼带沙四段气层既是储层(储集空间为裂缝)也是烃源岩,且存在异常高压,因此外来天然气难以进入。鉴于研究区烃源岩成熟度非常高、烘烤特征明显及天然气中无机成因二氧化碳含量较高等特征,认为研究区天然气是沙四段自生的油型裂解气,其很高的烷烃碳同位素值是烃源岩受岩浆高温导致过成熟及生烃的结果。

3.3 天然气的多期混合性

当烃源岩埋藏达到一定深度(或温度)时,有机质开始缓慢生烃,持续时间往往达数千万年。通常天然气主要是烃源岩在较低温度下一次连续生成的产物,模拟实验也证实烃源岩在高温下十几个小时就能完成生烃过程。孤北潜山带石炭系一二叠系煤岩在白垩纪经历了2次大规模的岩浆侵入,而深洼带沙四段暗色泥岩在馆陶组沉积时期也经历了2次较强的岩浆侵入;岩浆侵入导致研究区烃源岩多次生烃(气),且不同期次生成的天然气发生运移或溢散;由于轻组分运移距离远,重组分运移距离近,导致天然气组分的分馏以及在平面分布上的明显差异,即研究区侵入岩区的天然气是烃源岩不同期次生烃及混合的产物。

3.4 烃类气体与非烃类气体的混合性

非烃类气体含量较高(尤其是无机二氧化碳,含量达99%)是侵入岩区天然气最重要的特征之一,即侵入岩区天然气具有烃类气体与非烃类气体的混合性。此外,裂谷盆地侵入岩区断裂发育及构造活动强烈,为天然气的混合提供了重要条件;由于侵入岩的热作用程度、断层发育程度、构造活动强度、碳酸盐岩含量以及岩浆流体组分等存在差异,造成侵入岩区天然气的混合类型及混合比不同,并最终导致天然气组分在平面分布上的显著变化。

(下转第16页)