

# 天然气研究中的稀有气体 地球化学应用模式

沈平 徐永昌 刘文汇 陶明信

(中国科学院兰州地质研究所, 气体地球化学国家重点实验室, 兰州 730000)

**提 要** 在对天然气稀有气体地球化学特征进行系统研究的基础上, 建立了有关氮、氩同位素组成的横“人”字型的成因模式并提出两种成因类型: A、壳-幔复合型; B、壳源型。同时, 还论述了稀有气体的年代积累效应与气源对比, 进行了大、中型气区天然气地球化学综合研究。

**关键词** 稀有气体 应用模式 成因类型 年代积累效应

**第一作者简介** 沈平 女 59岁 研究员 天然气地球化学

## 0 前言

本文是“八五”国家天然气攻关项目下属的一个四级课题(85-102-15-02-02)的研究成果。3年多来, 对我国19个含油气盆地进行了现场综合科考和样品采集, 分析测试了天然气组分及其同位素组成, 取得一批宝贵的数据, 在此基础上进行了综合研究。总结中还应用了“七五”期间的部分资料。经统计, 共532个气样, 分析测试项目7160项次。经对野外综合科考资料和分析测试数据进行系统研究, 提炼出具有稀有气体自身特色并结合我国地质实际的理论认识和应用模式。

## 1 天然气中稀有气体地球化学特征

### 1.1 天然气中氮、氩浓度及其分布

天然气中氮、氩浓度, 多数为微量组分而存在于烃类气体之中, 由于研究的需要, 氮用百分浓度表示, 氩则采用ppm表示。在523个气样中, 氮浓度为4~13400ppm, 平均543ppm, 氩浓度在0.001~0.799%, 平均为0.0563%。

我国含油气盆地天然气中氮、氩浓度的分布(表1)具有如下特点: (1) 东部裂谷型盆地中天然气储层年代新, 但其氮、氩浓度较高, 尤其是苏北黄桥地区上第三系浅层气, 氮含量高达10000ppm以上, 放射性氩大于0.24%; 三水盆地下第三系储层天然气中氮平均为1500ppm, 达到工业品位; (2) 中、西部盆地构造环境相对稳定, 天然气中氮、氩和放射性成因氩的含量与其储层年代呈正相关关系, 表明氮、氩主要为地壳中放射性成因而具明显的年代积累效应; (3) 南海莺歌海盆地, 上第三系储层天然气中氮、氩含量低, 这是源岩年代新, 从而天然气中氮、氩

• 本文系“八五”国家重点科技攻关项目85-102-15-02-02研究成果之一。

的积累相对少。

表1 中国各含油气盆地天然气中氦、氩含量表

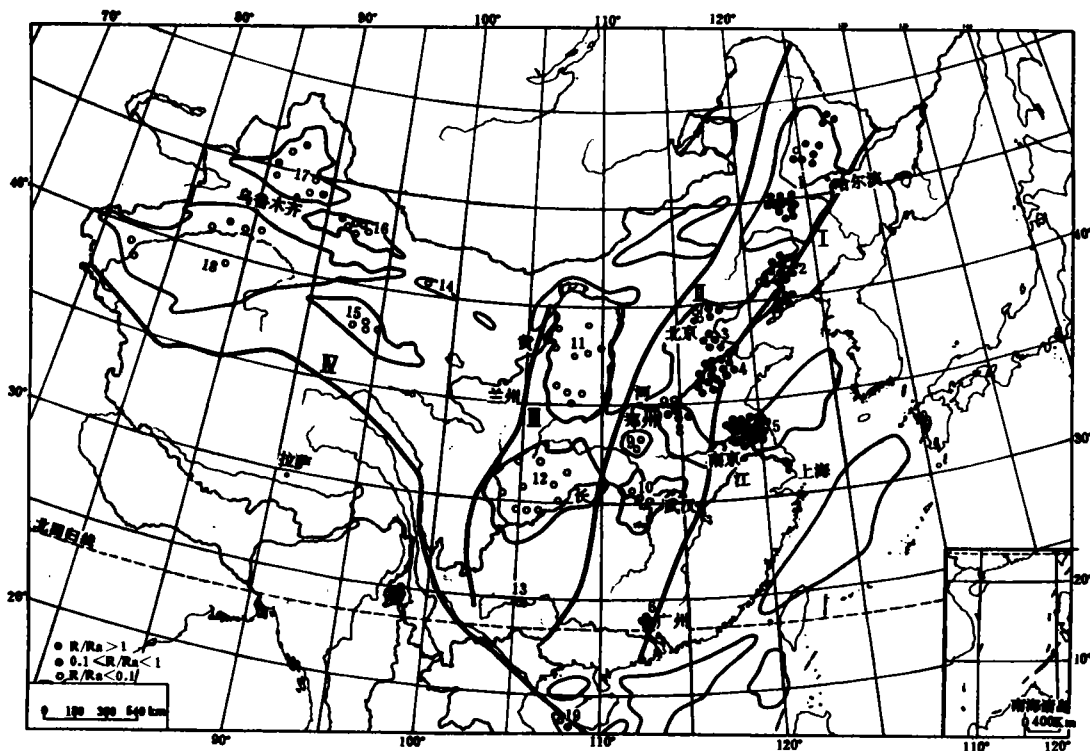
Table 1 The content of He and Ar in oil - gas - bearing basins in China

地区	层位	He (ppm)	Ar <sub>r</sub> (%)	Ar <sub>s</sub> (%)	Ar <sub>r</sub> (%)
松辽	K	$\frac{40-779}{318}$ (18)	0.1120-0.1150 (2)		
	Ed	$\frac{20-200}{83}$ (6)	$\frac{0.0123-0.0836}{0.0461}$ (4)	$\frac{0.011-0.0307}{0.0244}$ (4)	$\frac{0.0013-0.0529}{0.0217}$ (4)
辽河	Es <sub>1</sub>	$\frac{10-234}{45}$ (19)	$\frac{0.013-0.0122}{0.0355}$ (22)	$\frac{0.0105-0.0892}{0.0285}$ (19)	$\frac{0.0005-0.0329}{0.0050}$ (19)
	Es <sub>2</sub>		0.0740 (1)		
	Es <sub>3</sub>	$\frac{9-176}{97}$ (11)	$\frac{0.0048-0.1348}{0.0657}$ (9)	$\frac{0.0210-0.1026}{0.0475}$ (7)	$\frac{0.0023-0.0398}{0.0185}$ (7)
	Es <sub>4</sub>	$\frac{60-64}{62}$ (2)	$\frac{0.0358-0.0747}{0.061}$	$\frac{0.0206-0.0519}{0.0457}$ (3)	$\frac{0.0074-0.0206}{0.0126}$ (3)
	J	988	0.1432	0.0170	0.1262 (1)
	Ar	7	0.0673	0.0532	0.0141 (1)
	黄骅	Nm	$\frac{9-160}{58}$ (5)	$\frac{0.0087-0.0300}{0.0171}$ (5)	0.0080
g		$\frac{81-87}{84}$ (2)	$\frac{0.0120-0.0270}{0.0190}$		
Ed		$\frac{40-190}{140}$ (3)	$\frac{0.0200-0.0220}{0.0210}$ (2)		
Es <sub>1</sub>		$\frac{13-400}{72}$ (10)	$\frac{0.0067-0.0322}{0.0151}$ (7)	0.0078-0.0269	0.0052-0.0053 (2)
Es <sub>2</sub>			0.1200		
济阳	Nm	407-1021 (2)			
	Mg	169-330 (2)	0.0040-0.0400	0.0031-0.0303	0.0009-0.0097 (2)
	Ed	$\frac{4-237}{93}$ (3)			
	Es <sub>1</sub>	1946-2094 (2)			
	Es <sub>2</sub>	$\frac{351-1304}{748}$ (3)	0.1800	0.0839	0.0961
	Es <sub>3</sub>	152	0.0011	0.0007	0.0004
	Es <sub>4</sub>	$\frac{10-350}{208}$ (4)	$\frac{0.0040-0.0600}{0.0229}$ (4)	0.0025-0.0053	0.0015-0.0055
	Ek	$\frac{10-24}{17}$ (3)	0.0340-0.0500	0.0128	0.0212
	O	95-379			
M <sub>2</sub>	5				
苏北	N <sub>1y</sub>	12000-13400	0.4100-0.4500	0.1699-0.1867	0.2401-0.2633
	Es <sub>1</sub>	$\frac{100-960}{433}$ (4)			
	Ed	$\frac{140-890}{397}$ (3)			
	Ef	$\frac{39-960}{550}$ (7)			
三水	E <sub>1-2b</sub>	$\frac{80-2590}{1474}$ (9)	$\frac{0.0090-0.0141}{0.0116}$ (2)	0.0037-0.0197 (2)	0.0104-0.0703 (2)
	Es		0.0085-0.0128 (2)	0.0045-0.0080	0.0040-0.0048
冀中	C-P		0.0051-0.0127	0.0025-0.0067	0.0026-0.0060
	O		0.0091-0.0161	0.0049-0.0074	0.0042-0.0087
	Anz		0.0119-0.0170	0.0019	0.0151

地区	层位	He (ppm)	Ar <sub>1</sub> (%)	Ar <sub>2</sub> (%)	Ar <sub>r</sub> (%)
东 濮	Es <sub>2</sub>	398 (1)	$\frac{0.0135-0.2800}{0.0816}$ (4)	$\frac{0.0078-0.0730}{0.0258}$ (4)	$\frac{0.0047-0.2070}{0.0558}$ (4)
	Es <sub>3</sub>	$\frac{31-297}{177}$ (3)	$\frac{0.0116-0.3400}{0.0934}$ (9)	$\frac{0.0039-0.2121}{0.0481}$ (8)	$\frac{0.0075-0.1701}{0.0554}$ (8)
	Es <sub>4</sub>	89-130 (2)	$\frac{0.0098-0.4400}{0.1034}$ (9)	$\frac{0.0035-0.1236}{0.0330}$ (8)	$\frac{0.0050-0.3287}{0.0797}$ (8)
	P		0.0120	0.0029	0.0091
南 阳	E <sub>2</sub> h	700 (1)			
江 汉	Eg		0.0200-0.0400 (2)		
莺 一 琼	N	$\frac{14-29}{21}$ (3)	$\frac{0.0016-0.0316}{(18)}$		
四 川	J	380-1750 (2)	$\frac{0.0104-0.0170}{0.0134}$ (3)	$\frac{0.0049-0.0080}{0.0068}$ (3)	$\frac{0.0039-0.0096}{0.0063}$ (3)
	T	$\frac{330-710}{506}$ (37)	$\frac{0.0013-0.0215}{0.0080}$ (44)	$\frac{0.0004-0.0133}{0.0037}$ (42)	$\frac{0.0009-0.0082}{0.0042}$ (42)
	P	$\frac{285-560}{454}$ (24)	$\frac{0.0032-0.0226}{0.0087}$ (22)	$\frac{0.0013-0.0152}{0.0036}$ (22)	$\frac{0.0013-0.00139}{0.0050}$ (22)
	C	$\frac{204-2330}{991}$ (6)	0.0021-0.0042	0.0003-0.0013	0.0018-0.0029
	€	1330-2540	0.059	0.0023	0.0203 (1)
	Z	$\frac{2030-2600}{2327}$ (3)	$\frac{0.0375-0.0502}{0.0444}$ (3)	$\frac{0.0012-0.0034}{0.0020}$ (3)	$\frac{0.0363-0.0468}{0.0422}$ (3)
鄂 尔 多 斯	J	$\frac{110-2400}{634}$ (9)	$\frac{0.0141-0.0465}{0.030}$ (8)	$\frac{0.0104-0.0387}{0.0213}$ (8)	$\frac{0.0037-0.0177}{0.0088}$ (8)
	T	$\frac{30-900}{422}$ (4)	$\frac{0.0098-0.0564}{0.0264}$ (5)	$\frac{0.0074-0.0348}{0.0193}$	$\frac{0.0013-0.0198}{0.0067}$
	C-P	43	0.0282	0.0247	0.0035
	O <sub>1m</sub>	$\frac{45-170}{88}$ (4)	$\frac{0.0190-0.4900}{0.2248}$ (6)	$\frac{0.0503-0.1475}{0.1014}$ (4)	$\frac{0.0997-0.3425}{0.2311}$ (4)
酒 西	K	429	0.0292	0.0246	0.0046
	S		$\frac{0.0180-0.0492}{0.0314}$ (3)	$\frac{0.0116-0.0290}{0.0218}$ (3)	$\frac{0.0021-0.0202}{0.0095}$ (3)
吐 一 哈	J <sub>2</sub>	241-693	0.0056-0.0082		
准 噶 尔	N		0.1137-0.1986	0.080-0.1614	0.0337-0.0372
	J	$\frac{147-208}{172}$ (3)	$\frac{0.0054-0.0067}{0.0062}$ (3)		
	T				
	P	137-293	$\frac{0.0149-0.0636}{0.0361}$ (4)	$\frac{0.0074-0.0233}{0.0159}$ (4)	$\frac{0.0141-0.0403}{0.0289}$ (4)
	C	384	$\frac{0.0360-0.0896}{0.0553}$ (3)	$\frac{0.0095-0.0559}{0.0259}$ (3)	$\frac{0.0265-0.0337}{0.0294}$ (3)
塔 里 木	N	$\frac{798-999}{905}$ (3)	$\frac{0.0306-0.0396}{0.0349}$ (4)	$\frac{0.0102-0.0174}{0.0137}$ (4)	$\frac{0.0173-0.0260}{0.0212}$ (4)
	E	634			
	J	$\frac{220-515}{399}$ (3)	0.0129	0.0041	0.0088
	T	$\frac{276-853}{541}$ (6)			
	C	1029	0.0057	0.0021	0.0036
	O	$\frac{540-1808}{1281}$ (3)	0.0142-0.0105	0.0024-0.0034	0.0071-0.0118
€	2494	0.0126	0.0016	0.0110	

## 1.2 天然气中氦、氩同位素组成及其分布

我国天然气中稀有气体氦、氩浓度及其同位素组成的空间分布明显受构造环境控制。



1. 松辽, 2. 辽河, 3. 黄骅, 4. 济阳, 5. 苏北, 6. 三水, 7. 冀中, 8. 东濮, 9. 南阳, 10. 江汉, 11. 鄂尔多斯  
 12. 四川, 13. 百色, 14. 酒西, 15. 柴达木, 16. 吐哈, 17. 准噶尔, 18. 塔里木, 19. 莺歌海  
 I—郟城—庐江深大断裂带 I—大兴安岭—太行山—武陵山构造地球物理梯度带  
 II—贺兰山—龙门山构造地球物理梯度带 N—喀喇昆仑—金沙江—红河深大断裂带

图1 中国含油气区天然气中R/Ra值分布图

Fig. 1 The distribution of R/Ra values of natural gases in oil-gas-bearing basins in China

1.2.1 氦同位素组成特征 对我国含油气盆地天然气中氦同位素分布进行了较为详细的研究(徐永昌等,1994)。本文在原有基础上,又增添了一批新的数据。以 $^3\text{He}/^4\text{He}$ 值在地理上的分布大致是东高西低(图1),并可依据 $^3\text{He}/^4\text{He}$ 比值将中国各含油区氦同位素的分布分为东部、中部、西北部和南海海域(莺歌海)四个区:(1)东部区,沿郟庐大断裂带的盆地,其天然气中 $^3\text{He}/^4\text{He}$ 值高,平均为 $10^{-6}$ ( $R/Ra > 1$ )普遍含幔源氦。偏离郟庐断裂带的盆地, $^3\text{He}/^4\text{He}$ 平均为 $10^{-7}$ ( $1 > R/Ra \geq 0.1$ );(2)中部稳定区的含油气盆地,天然气中 $^3\text{He}/^4\text{He}$ 值平均 $4 \times 10^{-8}$ ( $R/Ra < 0.1$ ),最低为 $5 \times 10^{-9}$ ,氦基本为一元放射性成因氦;(3)西北区为次稳定区,天然气中的 $^3\text{He}/^4\text{He}$ 为 $10^{-7} \sim 10^{-8}$ ( $1 > R/Ra \geq 0.1 \sim R/Ra < 0.1$ ) 在盆缘近山前大断裂带或推覆构造带,其 $^3\text{He}/^4\text{He}$ 为 $10^{-7}$ ,盆地内为 $10^{-8}$ ,基本不含幔源氦;(4)南海莺歌海盆地,在东部区与特提斯—喜马拉雅构造域交汇的海南岛的西南红河大断裂带的西侧,天然气 $^3\text{He}/^4\text{He}$ 值为 $8.26 \times 10^{-8} \sim 4.2 \times 10^{-7}$ ,平均为 $1.8 \times 10^{-7}$ ;主要来自地壳放射性氦。

1.2.2 氩同位素组成特征 在东部区沿郯庐大断裂带的盆地,天然气中 $^{40}\text{Ar}/^{36}\text{Ar}$ 值具有普遍高的特征,这与 $^3\text{He}/^4\text{He}$ 比值高是一致的,表明天然气中氩也与地幔挥发分的混入有直接关系;中、西部稳定和亚稳定区,天然气中 $^{40}\text{Ar}/^{36}\text{Ar}$ 值的变化具随储层年代变老而增大的趋势,明显反映了 $^{40}\text{Ar}$ 放射性年代积累效应的规律(图2)。

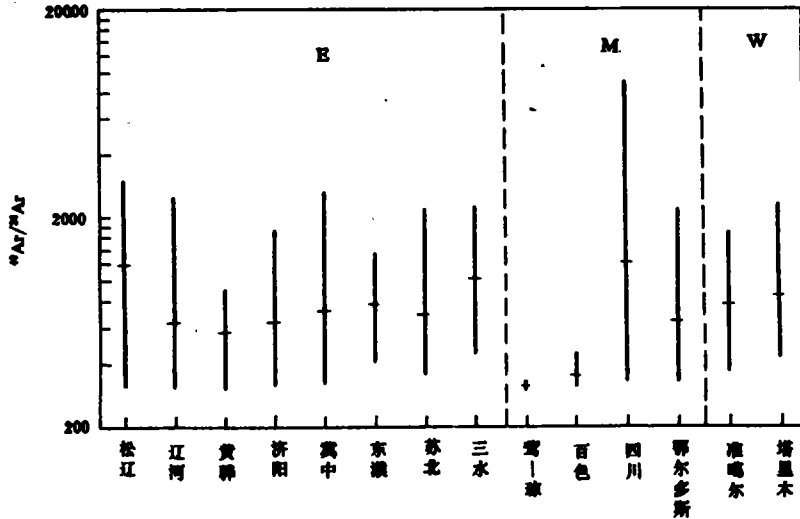


图2 中国各含油气盆地天然气 $^{40}\text{Ar}/^{36}\text{Ar}$ 分布范围图

Fig. 2 The distribution range of  $^{40}\text{Ar}/^{36}\text{Ar}$  ratio of natural gases in oil-gas-bearing basins in China

## 2 氦、氩成因模式及其分类

### 2.1 岩石和天然气中稀有气体同位素组成模式的差异

地球固体样品,用 $^3\text{He}/^4\text{He}$ 和 $^{40}\text{Ar}/^{36}\text{Ar}$ 比值之间的较大变化来描述不同来源稀有气体的特征。岩石样品中 $^3\text{He}/^4\text{He}$ 比值通常在 $10^{-5}\sim 10^{-8}$ 范围, $^{40}\text{Ar}/^{36}\text{Ar}$ 比值一般在 $10^2\sim 10^4$ 范围,除地球内部深源物质的 $^3\text{He}/^4\text{He}$ 和 $^{40}\text{Ar}/^{36}\text{Ar}$ 比值外,地壳样品更多反映了 $^3\text{He}/(\text{U}+\text{Th})$ 和 $\text{K}/^{36}\text{Ar}$ 比值的时间积累效应。由于 $(\text{U}+\text{Th})$ 和 $\text{K}$ 在地球演化过程中具有相似的地球化学行为, $^3\text{He}/(\text{U}+\text{Th})$ 比值和 $\text{K}/^{36}\text{Ar}$ 比值均是系统变化的,因此, $^3\text{He}/^4\text{He}$ 比值与 $^{40}\text{Ar}/^{36}\text{Ar}$ 比值之间始终具有良好的相关性。Kaneoka & Takaoka(1985)通过对岩石样品中稀有气体同位素组成的大量实验推断至少有四种类型:即M(地幔)型、P(地幔羽)型、A(大气)型和C(地壳)型,其中只有M型和P型直接与地幔物质有关,M型反映地幔来源,以洋中脊玄武岩为代表,而P型源表示位于M源之下的富积地幔。各种类型同位素组成列于表2。

对天然气而言,氦、氩同位素组成的分布主要受控于壳源放射性 $^4\text{He}$ 和 $^{40}\text{Ar}$ 的年代积累效应,在有幔源挥发份加入的区域构成壳-幔复合的同位素组成特征。我国至今测定的天然气氦、氩同位素极端数,如表3可以看出,①在天然气中无典型幔源稀有气体组成的天然气;②在中国陆地内天然气中并未发现地幔羽的存在,而天然气中这种稀有气体同位素组成的分布正是壳-幔复合稀有气体同位素的组成特征;③ $^{40}\text{Ar}/^{36}\text{Ar}$ 比值最大的天然气并非象岩石中反映

出的幔源稀有气体,而应是壳源物质长期的年代积累效应所致,氦同位素组成是有力的佐证,其 $^3\text{He}/^4\text{He}$  比值异常低(约  $n \times 10^{-8} \sim n \times 10^{-9}$ ),比幔源氦同位素低 3—4 个量级,反映了壳源稀有气体的 $^{40}\text{Ar}$  和 $^4\text{He}$  的放射性年代积累;④壳-幔复合型稀有气体幔源份额较大,乃致超过 50%者主要分布在我国东部具有深大断裂带存在的地区,且大部分与岩浆活动有关,这类天然气的组分常以非烃( $\text{CO}_2$  和  $\text{N}_2$ )气体为主。

表 2 岩石和大气氦、氩同位素分类端元组成(Kaneoka & Takaoka, 1985)

Table 2 The end - number compositions of an isotopic classification of He and Ar from rocks and atmosphere

气体类型	$^3\text{He}/^4\text{He}$	$^{40}\text{Ar}/^{36}\text{Ar}$
M	$1.1 \times 10^{-5}$	20000
P	$6.0 \times 10^{-5}$	350
A	$1.4 \times 10^{-6}$	295.5
C	$4.0 \times 10^{-7}$	1500

表 3 中国天然气中稀有气体同位素组成类型

Table 3 The isotopic compositional types of rare gases in natural gases in China

天然气类型	$^3\text{He}/^4\text{He}$	$^{40}\text{Ar}/^{36}\text{Ar}$
古老源岩天然气	$(0.56 \sim 2.8) \times 10^{-6}$	4440~9225
高幔源稀有气体为主天然气	$(7 \sim 7.2) \times 10^{-6}$	2200~3069
壳幔复合稀有气体天然气	$(1 \sim 3) \times 10^{-6}$	>300
壳源天然气	$<10^{-6}$	>300

## 2.2 天然气中氦、氩同位素组成及成因类型

天然气中稀有气体主要来源于壳源和幔源两种类型,在壳源中还含有沉积源岩中继承的大气来源的稀有气体,特别是氩。本文在研究了我国天然气中氦、氩同位素组成及其分布规律的基础上,建立了“横人字”型的成因模型(图 3)。图中可以明显地划分出两种成因类型:A—为壳-幔复合型氦、氩同位素组成,主要分布在我国东部活动区,其 $^{40}\text{Ar}/^{36}\text{Ar}$  比值和 $^3\text{He}/^4\text{He}$  比值随幔源挥发份的复合比例的增加而增高;B—为典型的壳源天然气氦、氩同位素组成,主要分布在我国的中、西部稳定和次稳定区,其特征为随年代变老, $^{40}\text{Ar}/^{36}\text{Ar}$  比值增大, $^3\text{He}/^4\text{He}$  比值降低。

## 3 稀有气体的年代积累效应及气源对比

天然气中的稀有气体同位素组成特征明显显示壳源成因和壳-幔复合来源。壳源天然气中氦、氩同位素组成是追索源岩,进行气-源对比最有效的手段之一。

### 3.1 氦、氩同位素年代积累效应

壳源天然气中氦、氩同位素有两个主要来源,一种为原始的稀有气体在沉积演化中赋存于源岩中,其中的氩主要是源岩沉积时水体溶解并在成岩作用过程中进入天然气中的大气氩。另一种是源岩中沉积的放射性元素 U、Th 和 K 通过放射性衰变形成的 $^4\text{He}$  和通过 K—壳层捕获形成的 $^{40}\text{Ar}$ 。U、Th 和 K 放射性成因的稀有气体同位素组成是与源岩时代和元素丰度有关,考

考虑到源岩中放射性元素平均丰度变化较小,放射性成因同位素的组成主要与源岩时代关系密切。由于气源岩对氩、氦的保存为非封闭体系,氩、氦的析出提供了天然气中稀有气体的来源,表现在天然气中则随源岩时代变老, $^{40}\text{Ar}/^{36}\text{Ar}$  比值增大,而 $^3\text{He}/^4\text{He}$  比值减小。这就是天然气中稀有气体同位素组成的源岩年代积累效应。

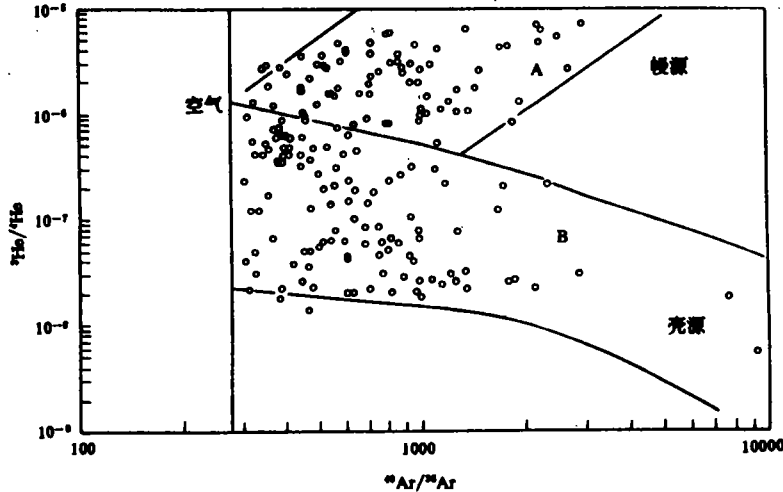


图3 中国天然气中氦、氩同位素组成分布分类图

Fig. 3 Classification of isotopic composition distribution of He and Ar of natural gases in China

天然气中的 $^{40}\text{Ar}/^{36}\text{Ar}$  比值研究表明,天然气中 $^{40}\text{Ar}/^{36}\text{Ar}$  比值变化主要因素是源岩时代,并与源岩中钾含量呈正相关。在新生古储气藏中,储层中 $^{40}\text{Ar}$  对天然气中 $^{40}\text{Ar}$  产生一定的储层时代效应。天然气及其源岩中空气氩随时代变老而变小,同一源岩二次成气的比一次成气的 $^{40}\text{Ar}/^{36}\text{Ar}$  比值偏大。构造活动,岩浆作用和深大断裂的存在会导致 $^{40}\text{Ar}/^{36}\text{Ar}$  比值发生变化,在进行气源对比时要考虑这些因素的影响。

### 3.2 稀有气体同位素年代研究

徐永昌等(1979)对我国四川等四个盆地不同产层天然气氩同位素的测定,首次提出氩同位素年代积累效应的观点,确定天然气氩同位素组成普遍存在空气氩和放射性成因氩二元体系,对天然气氩主要来自空气的传统观点进行了修正。在设定气藏为自生自储的情况,储层时代老,意味着源岩时代也老,从而认为随气藏储层年代变老的沉积层含钾矿物形成的 $^{40}\text{Ar}_{\text{R}}$  也多。当岩石脱气时 $^{40}\text{Ar}_{\text{R}}$  进入水、气。年青气藏中 $^{40}\text{Ar}/^{36}\text{Ar}$  比值小,老储层气藏的 $^{40}\text{Ar}/^{36}\text{Ar}$  比值大。因此,把这种现象叫作气藏中 $^{40}\text{Ar}$  的年代积累效应,并认为可以用 $^{40}\text{Ar}/^{36}\text{Ar}$  比值来确定“同生圈闭”气源岩概略的年代。根据地质年代学基本原理,结合四川盆地天然气资料提出了用 $^{40}\text{Ar}/^{36}\text{Ar}$  计算气源岩年龄的公式, $T = [0.466 \times (^{40}\text{Ar}/^{36}\text{Ar})_{\text{R}} - 140] \times 10^6$  年。(1)

并在四川、酒西、准噶尔、塔里木等盆地若干不同时代油气田中进行气源年龄估算取得了较为理想的效果。

刘文汇和徐永昌(1987)将源岩中的钾丰度与天然气中 $^{40}\text{Ar}/^{36}\text{Ar}$  比值联系起来研究。对所

获分析资料进行数学处理,获得了  $Ar_{\alpha}-K_{\#}$  的气源岩年龄计算公式:

$$Ar_{\alpha}-K_{\#} \text{ 法 } T=0.0574 \times ({}^{40}Ar/{}^{36}Ar)_{\alpha} / (K_{\#} \times 100) + 190 \quad (\text{Ma}) \quad (2)$$

该公式对四川盆地二叠系和三叠系气藏能更好地地区分开。

近年来通过大量资料的数学处理,取得了利用稀有气体及其同位素组成进行壳源源岩年龄计算的公式:

$$\text{氩同位素法 } T=530.8 \log ({}^{40}Ar/{}^{36}Ar)_{\alpha} - 1323.1 \quad (\text{Ma}) \quad (3)$$

$$\text{氦同位素法 } T=-315.5 \log ({}^3He/{}^4He)_{\alpha} - 1959.2 \quad (\text{Ma}) \quad (4)$$

并将所获不同时代源岩的天然气中氦、氩同位素组成分布列于表4,利用公式和表可以进行气源追索和气源对比。

表4 不同时代源岩天然气氦、氩同位素组成分布

Table 4 The distribution of He and Ar isotopic compositions of natural gases from the source rocks with different ages

源岩地质时代	地质年龄 (Ma)	估算天然气中同位素值分布	
		${}^{40}Ar/{}^{36}Ar$	${}^3He/{}^4He \quad (\times 10^{-8})$
		式(3)	式(4)
现代天气		295.5	140
第四纪 Q	0~2	295.5~314	140~60.8
晚第三纪 N	2~23	314~343	60.8~52.2
早第三纪 E	23~65	343~412	52.2~38.4
白垩纪 K	65~140	412~571	38.4~22.2
侏罗纪 J	140~208	571~767	22.2~13.5
三叠纪 T	208~250	767~920	13.5~10.0
二叠纪 P	250~290	920~1094	10.0~7.4
石炭纪 C	290~355	1094~1450	7.4~4.6
泥盆纪 D	355~410	1450~1833	4.6~3.1
志留纪 S	410~440	1833~2088	3.1~2.5
奥陶纪 O	440~510	2088~2841	2.5~1.6
寒武纪 E	510~570	2841~2686	1.6~1.0
震旦纪 Z	570~800	3638~9996	1.0~0.2

### 3.3 气源对比

确定油气源岩是油气勘探的重要任务,而天然气中氦、氩同位素组成是追索源岩最重要手段之一。稀有气体同位素气源对比的基础是源岩的年代积累效应。这种时代效应意味着源岩时代愈老,放射性成因的 ${}^{40}Ar$ 和 ${}^4He$ 积累愈多,造成天然中 ${}^{40}Ar/{}^{36}Ar$ 比值逐渐增大, ${}^3He/{}^4He$ 比值不断变小的演化特征。因此,利用这种特征可以进行气—气对比,气—源对比和气体运移聚集特征研究。同时应用源岩时代与天然气中稀有气体同位素组成之间的数字表达式(式3、4)计算气源岩时代。根据储层层位与源岩时代之间的关系对天然气生储关系进行判识。

利用天然气中稀有气体同位素组成可以把天然气分为深部来源型,自生自储型,新生古储型和古生新储层。不同类型的生储组合具有明显不同的稀有气体同位素地球化学特征(表5、6)。在特殊地质条件下,可以用于煤型气的判识如东濮凹陷的文留气藏(徐永昌等,1985)。氦、氩同位素年代学的研究对天然气勘探有实用意义。



表5 古生新储型天然气氩、氦同位素组成特征

Table 5 Characteristics of Ar and He isotopic compositions of natural gases of the palaeogenic - neoreservioired type

地区	储层	$^{40}\text{Ar}/^{36}\text{Ar}$	$^3\text{He}/^4\text{He}$	R/Ra	气源岩时代
东濮 文留气藏	Es <sub>4</sub>	1175	$2.23 \times 10^{-7}$	0.23	石炭—二叠纪
四川 威远	P <sub>1</sub>	5222	$3.03 \times 10^{-8}$	0.022	震旦纪
塔里木 柯克亚	N	605—683	$8.6 \times 10^{-8}$	0.061	侏罗纪
		855—982	$(6.1-7.9) \times 10^{-8}$	0.04—0.056	石炭—二叠纪

表6 新生古储型天然气氩、氦同位素组成特征

Table 6 Characteristics of Ar and He isotopic compositions of natural gases of the neogenic - palaeoreservioired type

地区	储层	$^{40}\text{Ar}/^{36}\text{Ar}$	$^3\text{He}/^4\text{He}$	R/Ra	气源岩时代
冀中	AnZ	518	$6.24 \times 10^{-6}$	0.04	Es
	Mz	456	$1.43 \times 10^{-6}$	1.03	
济阳	AnZ	415			Es
	AnZ	528—529	$4.99 \times 10^{-7}$	0.356	
辽河	Ar	375	$6.04 \times 10^{-7}$	0.43	Es

## 4 大中型气区天然气地球化学综合研究

在研究我国主要含油气区天然气中稀有气体氩、氦同位素地球化学的基础上,又对近年来发现的鄂尔多斯盆地中北部气区,四川盆地川东气区和莺—琼盆地东方—乐东含气构造和崖13-1气田,进行稀有气体氩、氦地球化学、烃类气体地球化学,含油气区相关的地质背景的综合研究。

### 4.1 鄂尔多斯盆地中北部气区

鄂尔多斯盆地中北部气区为奥陶系储层的天然气,其 $^{40}\text{Ar}/^{36}\text{Ar}$ 比值较高,最高达2141,具奥陶纪的表征值, $^3\text{He}/^4\text{He}$ 值普遍低,反映了源岩时代的放射性积累效应,根据天然气甲烷碳同位素及该区奥陶和石炭二叠二套源岩的成熟度( $R_s$ 表示),对靖边探区进行二元复合计算结果,天然气中油型气复合率平均为70%,煤型气平均复合率为30%。表明该区天然气主要来自下奥陶统。

### 4.2 四川盆地川东气区

四川盆地川东气区,储层时代多,构造复杂,普遍分布于石炭系储层的天然气,其气源尚在争论之中,依据天然气氩同位素的研究在高峰场和大池干的气井中出现 $^{40}\text{Ar}/^{36}\text{Ar}$ 的高比值为1811~1870,经年龄估算为406~414Ma,为志留纪年龄范围,提出了石炭系气藏天然气主要来自志留系的认识,硫化氢中硫同位素 $\delta^{34}\text{S}$ 低值与其它时代气藏绝然不同,可成为志留系源岩的一种旁证,结合该区地质,地球化学资料综合研究结果与上述认识基本一致。

### 4.3 莺歌海盆地

莺歌海盆地上第三系莺黄组储层的天然气,其 $^{40}\text{Ar}/^{36}\text{Ar}$ 比值低为302~326,反映了年代新的氩同位素组成特征,与天然气储层为上第三纪完全吻合,氩同位素比值低, $^3\text{He}/^4\text{He}$ 值为 $10^{-7}$ ~ $10^{-8}$ ,氩主要为壳源放射性氩,相应氩、氦浓度也很低,表明莺歌海盆地乐东和东方两含

气构造的天然气主要是上第三系自生自储的。根据莺琼盆地有机质成熟度( $R_o$ 表示)与埋深关系, $R_o$ 与 $\delta^{13}C_1$ 值关系,换算天然气运移距离追索气源岩深度,其结果崖13-1气田的天然气基本上是自生自储的,乐东和东方两含气构造的天然气经历较长距离的运移,追索其源岩深度大约在3300m以下或更深部位,主要在上第三系莺黄组范围之内,最深可能在梅山组。这与上述氦同位素研究结果基本吻合。同时研究了该区构造、断裂对油气运移与聚集的作用,及氦同位素组成与构造环境的关系。从构造地质的分析也引证了上述的研究结果。

本专题报告共30多万文字,在此仅简要介绍该专题的内容,供专家和同行们指正。在“八五”工作得到石油天然气总公司、各油田的大力协助,中国科学院协调局及兰州地质研究所的支持,在此一并表示感谢。

收稿日期:1994年10月15日

### 参 考 文 献

- [1]徐永昌、沈平、陶明信等,1994,中国含油气盆地天然气中氦同位素分布,科学通报,39(16):1505—1508。
- [2]Kaneoka, I. and Takaoka, N., 1985, Noble - gas state in the Earth's interior - some constraints on the present state, Chemical Geology Isotope Geosickne section, 52:75—95.
- [3]徐永昌、王先彬、吴仁铭等,1979,天然气中稀有气体同位素,地球化学,(4):271—282。
- [4]徐永昌、沈平、陶明信等,1990,幔源氦的工业储集和郑庐大断裂带,科学通报,35(12):932—935。
- [5]徐永昌、沈平,1985,中原—华北油气区“煤型气”地球化学特征初探,沉积学报,3(2):37—46。
- [6]刘文汇、徐永昌,1987,天然气中氦同位素组成及其与源岩、储层钾氩关系,中国科学院兰州地质研究所生物气体地球化学开放研究实验室,1986研究年报,兰州:甘肃科学技术出版社,191—200。

## Applied Models of Rare Gas Geochemistry in the Research of Natural Gases

*Shen Ping Xu Yongchang Liu Wenhui Tao Mingxing*

(State Key Laboratory of Gas - geochemistry, Lanzhou Institute  
of Geology, Chinese Academy of Sciences, Lanzhou 730000)

### Abstract

A large number of valuable analytic data of the chemical compositions and isotopes of natural gases have been obtained from 532 natural gas samples of 19 oil - gas - bearing basins in China. On the basis of the comprehensive research of the characteristics of natural gases it has been considered that the space distribution of the content and isotopic composition of rare gases in natural gases were controlled by tectonic settings. According to the  $^3\text{He}/^4\text{He}$  values the distribution of the He isotopes in the oil - bearing basins can be divided into four areas: (1) eastern active area, where the natural gases of the basins near the Tancheng - Lujiang Fault have an average  $^3\text{He}/^4\text{He}$  value of  $10^{-6}$ , suggesting the addition of the mantle - derived volatile components, and the natural gases of the basins far from the Tancheng - Lujiang Fault have a mean  $^3\text{He}/^4\text{He}$  value of  $10^{-7}$ ; (2) middle stable area, where the natural gases of the basins have an average  $^3\text{He}/^4\text{He}$  value of  $4 \times 10^{-8}$ , minimum of  $5 \times 10^{-9}$ , which means that He was monoradioactive; (3) northwest substable area,

where the natural gases of the basins have a range of  $^3\text{He}/^4\text{He}$  values from  $10^{-8}$  to  $10^{-7}$ ; and (4) southwest area of Hainan Island, along both sides of Honghe River Fault, where the natural gases of the basins have a range of  $^3\text{He}/^4\text{He}$  ratio from  $10^{-8}$  to  $10^{-7}$  and averages  $10^{-7}$ , indicating that He was crust - derived. A reverse Y - shaped origin model of rare gases has been proposed and two - origin types have been provided: (a) Crust - and mantle - derived type, distributed in the eastern active area, where the  $^{40}\text{Ar}/^{36}\text{Ar}$  and  $^3\text{He}/^4\text{He}$  values of rare gases increase with the addition of mantle - derived gases and (b) crust - derived type, distributed in the stable and substable area of Central and West China, characterizing that the  $^{40}\text{Ar}/^{36}\text{Ar}$  Ar values of rare gases increase but the  $^3\text{He}/^4\text{He}$  values decrease with geological ages. Meanwhile, the time - accumulating - effect of Ar and He isotopes in natural gases is also researched. The formula which can be used to calculate the ages of crust - derived gas source rocks using He and Ar isotopic methods is suggested. The formula can be applied to tracing and comparing gas source rocks, which is of practical significance for gas exploration. In addition, the rare gas geochemistry, hydrocarbon gas geochemistry, and the related geological backgrounds of the central north gas area of Erdos Basin, the Chuandong gas area of Sichuan Basin, the Ya 13 - 1 gas fields and the Dongfang - Ledong gas zone have comprehensively been researched and some new views on the three large - or middle - sized gas areas have been suggested.