

文章编号: 1001-6112(2009)03-0258-04

应用稀有气体同位素判识油田水淹现象

——以辽河盆地黄沙坨油田为例

张晓宝¹, 史 朋^{1,2}, 马素萍¹, 李传浩³,
戴本亮⁴, 张 瑞¹, 段国禄⁵, 宋成鹏¹, 王宏勇¹

(1. 中国科学院 地质与地球物理研究所 气体地球化学重点实验室, 兰州 730000;

2. 中国科学院 研究生院, 北京 100049; 3. 中国石油 长庆油田公司 第三采油厂, 宁夏 银川 750006;

4. 中国石油 辽河油田公司 采油一厂, 辽宁; 5. 中国石油 青海油田公司 勘探开发研究院, 青海 敦煌 736202)

摘要: 采集了辽河盆地黄沙坨油田注水开采所利用的水源井水、处理后的水源井水、注水井水和生产井原油样品, 脱附了其中的水溶气和油溶气, 测量了其³He/⁴He、⁴He/²⁰Ne 和⁴⁰Ar/³⁶Ar, 发现它们可以判识生产井水淹现象和水淹程度。研究表明: (1) 黄沙坨油田水源井、处理后的水源井水及注水井中水、³He/⁴He、⁴He/²⁰Ne 和⁴⁰Ar/³⁶Ar 均具有大气成因的特征; (2) 黄沙坨油田原油⁴⁰Ar/³⁶Ar 误差范围内与空气值接近, 说明原油遭受了水淹, ⁴⁰Ar/³⁶Ar 可以成为油田遭水淹的示踪剂, 但它与⁴He/²⁰Ne 之间没有线性关系, 因此不能反映油田受水淹的程度; (3) 黄沙坨油田原油⁴He/²⁰Ne 和³He/⁴He 大于大气值, 且两者呈较好的线性关系, 说明其不但可以作为生产井油层遭受水淹的示踪剂, 也可作为油层遭受水淹程度的指标。

关键词: 水淹; 示踪; 稀有气体; 黄沙坨油田; 辽河盆地

中图分类号: TE39

文献标识码: A

IDENTIFYING THE PHENOMENA OF WATER FLOOD IN OIL FIELDS USING NOBLE GAS ISOTOPE

—EXAMPLED BY THE HUANGSHATUO OILFIELD IN THE LIAOHE BASIN

Zhang Xiaobao¹, Shi Peng^{1,2}, Ma Suping¹, Li Chuanhao³,
Dai Benliang⁴, Zhang Rui¹, Duan Guolu⁵, Song Chengpeng¹, Wang Hongyong¹

(1. *Key Laboratory of Gas Geochemistry, Institute of Geology and Geophysics, Chinese Academy of Science, Lianzhou, Gansu 730000, China;* 2. *Graduate School of Chinese Academy, Beijing 100049, China;*

3. *Chang Qing Third Oil Recovery Factory, CNPC, Ningchuan, Ningxia 750006, China;*

4. *Liaohe First Oil Recovery Factory, CNPC, Liaoning, China;* 5. *Research Institute of Petroleum Exploration and Development, Qinghai Oil Field, CNPC, Dunhuang, Qinghai 736020, China*)

Abstract: The source water for water injection, source water after procession, water of an injection well, and oil crude of a production well were sampled and degassed. The ³He/⁴He, ⁴He/²⁰Ne and ⁴⁰Ar/³⁶Ar of the gases from the waters and oils were analyzed. We found that they can be used for identifying the phenomena and degree of water flood of a production well. Our research shows that the ³He/⁴He, ⁴He/²⁰Ne and ⁴⁰Ar/³⁶Ar of the source water for water injection, source water after procession and water of an injection well characterize an atmosphere source. The ⁴⁰Ar/³⁶Ar of crude oil in the Huangshatuo oil field is near that of the air in an error range, indicating that it was flooded by water and can be used as a tracer of water flood in an oil field, however it has no relation with ⁴He/²⁰Ne and can not be used for reflecting the degree of water flood. The ⁴He/²⁰Ne and ³He/⁴He of the oil from the Huangshatuo oil field were larger than those of air and they have a better liner relation, indicating they can be used for tracing water flood and its degree of an oil bed in a production well.

Key words: water flood; tracer; noble gas; Huangshatuo Oilfield; Liaohe Basin

收稿日期: 2007-11-05; 修订日期: 2009-05-11。

作者简介: 张晓宝(1958—), 男, 研究员, 主要从事石油地质研究。E-mail: xbzhang@lzb. ac. cn。

基金项目: 国家基金面上项目“稀有气体作为油气田开发示踪剂的基础理论与应用研究”资助(40472971)。

天然气和原油稀有气体在天然气成因^[1,2]、运移^[3,4]、气源追索^[5]、盆地构造背景^[6]和大地热流^[7,8]等油气勘探方面的示踪意义已得到了广泛的研究与应用。但是,油气稀有气体示踪作用在油气田开发,尤其是在油气田遭水淹方面的示踪意义研究非常薄弱。辽河盆地黄沙坨油田油气稀有气体具有壳幔二元复合的特征^[5],目前已进入注水开采阶段,是研究稀有气体在油气田开发过程中示踪作用的理想实例。本文分别采集了该油田水源井水、处理后的水源井水、注水井水和生产井原油,脱附了其中的水溶气和油溶气,测量了其中的稀有气体 $^3\text{He}/^4\text{He}$ 、 $^4\text{He}/^{20}\text{Ne}$ 和 $^{40}\text{Ar}/^{36}\text{Ar}$,深入探讨了其在判识油田水淹现象和水淹程度方面的示踪作用。

1 研究区石油地质背景

黄沙坨火山岩油藏(图1)位于辽河盆地东部凹陷区中段铁匠炉构造西侧,南部与欧利坨子油田接壤。辽河盆地东部凹陷中段在古近纪渐新世沙三中后期发生了大规模、强烈的构造运动,并伴随着猛烈的火山喷发,致使该区火山岩具有分布广、期次多、厚度大等特征。该区断裂发育,断层和裂缝成为油气运移的主要通道,巨厚的火山岩体则成为良好的储集层。火山岩上下都发育有巨厚的泥岩,其下伏中新统沙河街组下段暗色泥岩是辽河盆地

最主要的烃源岩,而其上覆沙河街组上段的厚层泥岩是良好的盖层。临近油源,畅通的油气运移通道、良好的生储盖组合,形成了黄沙坨油田丰富的石油储量^[9]。

2 样品与实验

采集了辽河盆地黄沙坨油田6口井的原油样品(表1)。层位为古近系沙河街组上段(E_3^3)。为了讨论油田注水过程中原油和所注水体之间稀有气体的交换作用,同时采集了水源井、处理后的水源井水及注水井中的水样。采样装置和采样方法见参考文献^[5]。样品真空脱气及原油溶解气和水溶气净化及 $^3\text{He}/^4\text{He}$ 、 $^4\text{He}/^{20}\text{Ne}$ 和 $^{40}\text{Ar}/^{36}\text{Ar}$ 测量方法见参考文献^[10~12]。测试结果见表1。

3 结果讨论

3.1 $^{40}\text{Ar}/^{36}\text{Ar}$

^{36}Ar 一般被认为是地球原始组分,而 ^{40}Ar 是 ^{40}K 通过K壳层俘获形成的。不同来源的 $^{40}\text{Ar}/^{36}\text{Ar}$ 具有不同的特征。大气成因的 $^{40}\text{Ar}/^{36}\text{Ar}$ 为295.5;壳源放射性成因的 $^{40}\text{Ar}/^{36}\text{Ar}$ 随流体年代的增长而增大,即具有年代积累效应^[5,13];幔源 $^{40}\text{Ar}/^{36}\text{Ar}$ 变化较大,从350到 2×10^4 ;未遭受水淹油田油气中的 $^{40}\text{Ar}/^{36}\text{Ar}$ 一般为壳源或壳幔二源复合成因的,

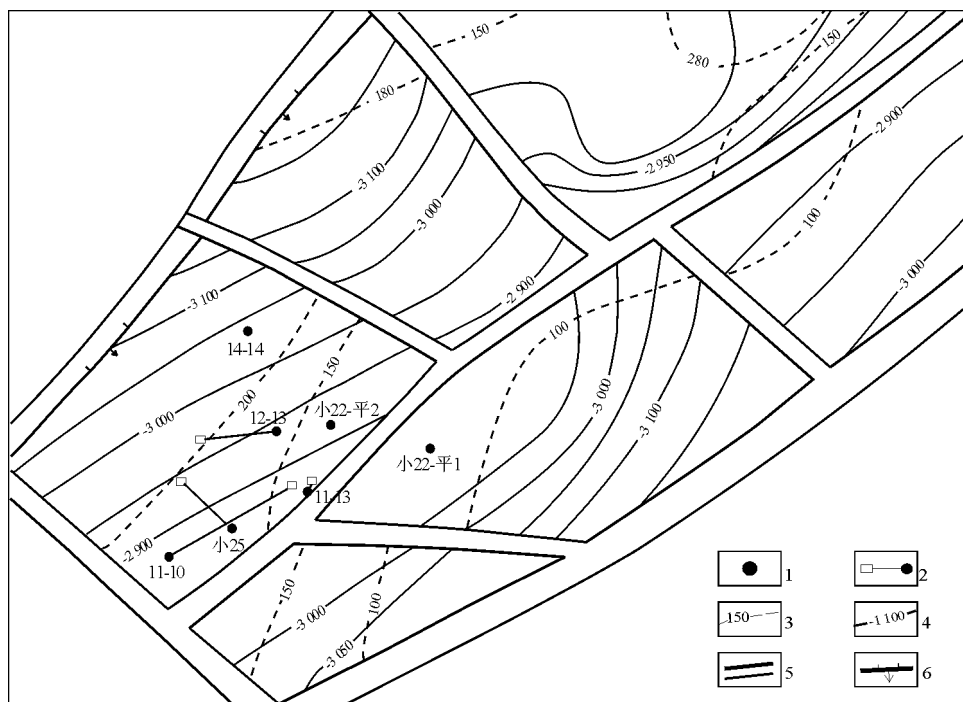


图1 辽河盆地黄沙坨油田井位分布与采样位置示意

1. 完钻油井; 2. 钻井平台及井底位移; 3. 油层等厚线/m; 4. 构造等深线/m; 5 正断层; 6. 逆断层

Fig. 1 Locations of the sampled wells in the Huangshatuo Oilfield in the Liaohedong Basin

表 1 辽河盆地黄沙坨油田原油和注水稀有气体同位素值

Table 1 Noble gas isotopic data of crude oils and injection water in the Huangshatuo Oilfield in the Liaohe Basin

样品类型	井号	层位	$^4\text{He}/^{20}\text{Ne}$	$^3\text{He}/^4\text{He}, 10^{-6}$	$\text{R}/\text{Ra}^{1)}$	$^{40}\text{Ar}/^{36}\text{Ar}$
原油	小 22—平 1	Es^3	7.50	2.95 ± 0.10	2.11	298
	小 22—平 2	Es^3	1.04	2.23 ± 0.07	1.60	294
	小 25	Es^3	1.90	2.78 ± 0.08	1.98	298
	11—10	Es^3	15.70	3.45 ± 0.11	2.47	302
	11—13	Es^3	3.50	2.93 ± 0.09	2.10	303
	12—13	Es^3	1.85	2.81 ± 0.09	2.01	340
水样	水源井水		0.62	1.15 ± 0.04	0.82	300
	处理后		0.57	1.84 ± 0.06	1.31	302
	水源井水		0.58	1.52 ± 0.05	1.09	295
	14—14 (注水井)	Es^3	0.32	1.40 ± 0.03	1.00	295.5
气样	兰州兰山		0.32	1.40 ± 0.03	1.00	295.5

1)R 为样品的 $^3\text{He}/^4\text{He}$,Ra 为空气 $^3\text{He}/^4\text{He}$ 。

其值一般大于空气值^[5,8,14]。从表 1 中可知,水源井、处理后的水源井水及注水井中水 $^{40}\text{Ar}/^{36}\text{Ar}$ 介于 295~302 之间,在误差范围内,主要反映了大气的特征;12—13 井原油 $^{40}\text{Ar}/^{36}\text{Ar}$ 较高,达 340 以外,基本未遭受水淹;其他样品 $^{40}\text{Ar}/^{36}\text{Ar}$ 位于 294~303 之间,在误差范围内,与空气值接近,表明这些生产井均已遭受水淹。图 2 为辽河盆地黄沙坨油田 $^{40}\text{Ar}/^{36}\text{Ar}$ 和 $^4\text{He}/^{20}\text{Ne}$ 关系图。从图 2 可见,随着 $^4\text{He}/^{20}\text{Ne}$ 减小,原油样品 $^{40}\text{Ar}/^{36}\text{Ar}$ 逐步接近水源井水、处理后的水源井水和注水井水 $^{40}\text{Ar}/^{36}\text{Ar}$, 在误差范围内原油样品 $^{40}\text{Ar}/^{36}\text{Ar}$ 基本与空气相当,因此在油田当前水淹条件下 $^{40}\text{Ar}/^{36}\text{Ar}$ 可以反映水淹现象,但不能反映其被水淹的程度。这是由于油气中氩的浓度多小于 0.02%,而大气中氩的浓度为 0.96%,远大于油气中氩的浓度^[5];当两者混合后油气中壳源或壳幔复合源 $^{40}\text{Ar}/^{36}\text{Ar}$ 特征很容易被大气成因的 $^{40}\text{Ar}/^{36}\text{Ar}$ 掩盖。

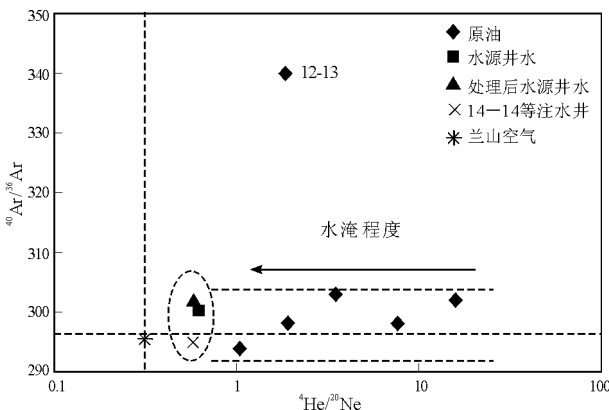


图 2 辽河盆地黄沙坨油田 $^{40}\text{Ar}/^{36}\text{Ar}$ 和 $^4\text{He}/^{20}\text{Ne}$ 关系
Fig. 2 Plot of the $^{40}\text{Ar}/^{36}\text{Ar}$ vs. $^4\text{He}/^{20}\text{Ne}$ of oils and waters in the Huangshatuo Oilfield in the Liaohe Basin

3.2 $^3\text{He}/^4\text{He}$

$^3\text{He}/^4\text{He}$ 是稀有气体来源的非常灵敏的示踪剂。大气型 $^3\text{He}/^4\text{He} = 1.384 \times 10^{-6}$,地壳型 $^3\text{He}/^4\text{He} = 2 \times 10^{-8}$,地幔型(包括 M 型和 P 型) $^3\text{He}/^4\text{He} > 1.1 \times 10^{-5}$ ^[15]。据研究,未遭受水淹油气田油气样品 $^3\text{He}/^4\text{He}$ 具有壳源或壳幔源混合的特征^[5,8]。从表 1 可见,水源井、处理后的水源井水及注水井中水的 $^3\text{He}/^4\text{He}$ 与空气接近,R/Ra 处于 0.80 至 1.31 之间,反映了大气成因稀有气体为主的特征。原油 $^3\text{He}/^4\text{He}$ 位于 1.60 至 2.47 间,反映了样品与水体之间稀有气体相互交换的特征。图 3 为辽河盆地黄沙坨油田 $^3\text{He}/^4\text{He}$ 和 $^4\text{He}/^{20}\text{Ne}$ 关系图。从图 3 可知,随着油样 $^4\text{He}/^{20}\text{Ne}$ 减小, $^3\text{He}/^4\text{He}$ 相应减小,逐步接近水源井水、处理后的水源井水和注水井水 $^3\text{He}/^4\text{He}$,进而接近大气 $^3\text{He}/^4\text{He}$,这说明 $^3\text{He}/^4\text{He}$ 不但能反映油层遭水淹的现象,而且可以反映油层遭水淹的程度。11—10 井原油遭受

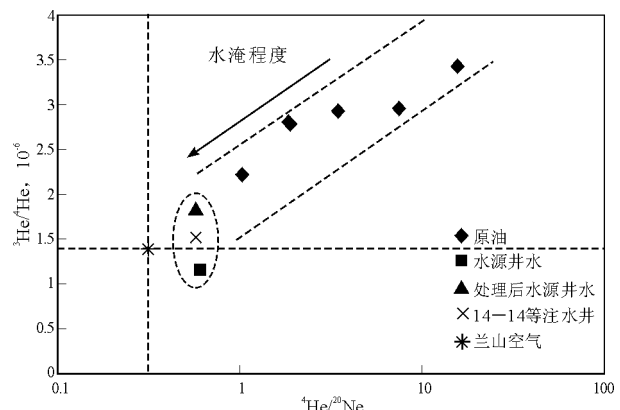


图 3 辽河盆地黄沙坨油田 $^3\text{He}/^4\text{He}$ 和 $^4\text{He}/^{20}\text{Ne}$ 关系
Fig. 3 Plot of the $^3\text{He}/^4\text{He}$ vs. $^4\text{He}/^{20}\text{Ne}$ of oils and waters in the Huangshatuo Oilfield in the Liaohe Basin

水淹的程度较弱,小平2井遭受水淹的程度最强,其它样品位于两者之间。辽河盆地 Es^3 油气中氦的浓度位于 $(9\sim 176)\times 10^{-6}$ 之间,平均 97×10^{-6} ,大气中氦的浓度为 5.24×10^{-6} ,远低于油气中氦的浓度^[5],因此随着油田水淹程度的增加,原油 $^3He/^4He$ 逐渐接近水源井、处理后的水源井水、注水井中水和空气值 $^3He/^4He$,而不是像原油 $^{40}Ar/^{36}Ar$ 一样很快表现出大气成因的特征。

3.3 He^4/Ne^{20}

$^4He/^{20}Ne$ 空气值为 0.32, $^4He/^{20}Ne$ 常被用于指示样品受大气污染控制的程度^[16]。如果样品的 $^4He/^{20}Ne$ 较其高 2 个量级以上一般认为样品基本未受到空气污染^[16]。从表 1 中可见,水源井、处理后的水源井水及注水井中水的 $^4He/^{20}Ne$ 与空气处于同一量级,反映了大气成因稀有气体的特征;大部分原油 $^4He/^{20}Ne$ 较空气 $^4He/^{20}Ne$ 高一个量级,极个别原油样品较空气高 2 个量级,说明样品已受到了水淹的影响。根据 $^4He/^{20}Ne$ 值,11—10 井原油遭受水淹的程度较弱,小平 2 井遭受水淹的程度最强,其它样品位于两者之间。从图 2 和图 3 也可以看出,原油 $^4He/^{20}Ne$ 值的变化,不但可以反映水淹现象,也可以反映油层遭水淹的程度。

4 结论

1)与未遭受水淹油气中氦、氩等壳源或壳幔复合成因不同,黄沙坨油田水源井水、处理后的水源井水及注水井中水 $^4He/^{20}Ne$ 、 $^3He/^4He$ 和 $^{40}Ar/^{36}Ar$ 均具有大气成因的特征,从而为其成为油层水淹现象的示踪剂奠定了基础。

2)黄沙坨油田原油 $^{40}Ar/^{36}Ar$ 误差范围内与空气值接近,说明原油遭受了水淹, $^{40}Ar/^{36}Ar$ 可以作为油田遭水淹的示踪剂,但它与 $^4He/^{20}Ne$ 之间没有线性关系,即随着 $^4He/^{20}Ne$ 增大,基本仍然处于空气值的范围内,因此不能反映油田受水淹的程度。

3)黄沙坨油田原油 $^4He/^{20}Ne$ 和 $^3He/^4He$ 大于大气 $^4He/^{20}Ne$ 和 $^3He/^4He$,且两者呈较好的线性关系,说明 He^4/Ne^{20} 和 $^3He/^4He$ 不但可以作为生产井油层遭受水淹的示踪剂,也可作为油层遭受水淹程度的指标。

致谢:本项目在采样过程中得到了中国石油勘探开发研究院苏爱国高级工程师、中国石油天然气总公司辽河油田公司采油一厂戴本亮高级工程师

的热情帮助,在此深表谢意。

参考文献:

- 徐永昌,沈平,陶明信等. 东部含油气区天然气中幔源氦的地球化学 I. 氦资源的新类型:沉积壳层幔源氦的工业储集[J]. 中国科学(D),1996,26(1): 1~8
- Poreda R J, Jenden P D, Kaplan I R, et al. Mantle helium in Sacramento basin natural gas wells[J]. *Geochim Cosmochim Acta*, 1986, 50: 2847~2853
- Torgersen T, Kennedy B M. Air-Xe enrichments in Elk Hills oil field gases: role of water in migration and storage[J]. *Earth and Planetary Science Letters*, 1999,167(3-4): 239~253
- Battani A, Sarda P, Prinzhofer A. Basin scale natural gas source, migration and trapping traced by noble gases and major elements: the Pakistan Indus Basin[J]. *Earth and Planetary Science Letters*, 2000, 181(1-2): 229~249
- 徐永昌,沈平,刘文汇等. 天然气中稀有气体地球化学[M]. 北京:科学出版社,1998. 97~227
- Oxburgh E R, O'Nions R K. Helium loss, tectonics and the terrestrial heat budget[J]. *Science*,1987,237: 1583~1588
- Polyak B G, Prasolov E M, Cermak V, et al. Isotopic compositions of noble gases in geothermal fluids of the Krusne Hary Mts., Czechoslovakia, and the nature of the local geothermal anomaly[J]. *Geochim Cosmochim Acta*,1985,49: 695~699
- Zhang Xiaobao, Ma Liyuan, Chen Jianping. et al. Crude oil He and Ar isotopic characteristics and their geochemical significance: an example from the Gangxi oil field in the Huanghua depression. [J]. *Annals of Geophysics*, 2005, 48 (1): 135~144
- 陈元春,吴昌志,武毅. 辽河盆地黄沙坨火山岩油藏开发实践[J]. *新疆石油地质*,2006,27(1):71~75
- 徐永昌,沈平,刘文汇等. 天然气中稀有气体地球化学[M]. 北京:科学出版社,1998. 97~227
- 孙明良. 水中氦同位素质谱分析[J]. *质谱学报*,1995,16(1): 34~38
- 孙明良. 天然气中的氦同位素质谱[J]. *分析测试学报*,1991, 19(5):50
- 刘文汇,徐永昌. 天然气中氦氩同位素组成的意义[J]. *科学通报*,1993,38(9):818~821
- Ballentine C J, O'Nions R K, Coleman M. A magnus opus: Helium, neon, and argon isotopes in a North Sea Oilfield[J]. *Geochim Cosmochim Acta*, 1996,60(5): 831~849
- Kaneoka I, Takaoka N. Noble gas state in the Earth's interior; some constraints on the present state[J]. *Chemical Geology*, 1985,52: 75~95
- Wakita H, Sano Y, Urabe A, et al. Origin of methane-rich natural gas in Japan: formation of gas fields due to large-scale submarine volcanism[J]. *Applied Geochemistry*, 1990,5(3): 263~278