

文章编号: 0253-2697(2013)02-0323-05 DOI: 10. 7623/syxb201302014

天然气汞含量作为煤型气与油型气判识指标的探讨

韩中喜 李 剑 严启团 王淑英 葛守国 王春怡

(中国石油勘探开发研究院廊坊分院 河北廊坊 065007)

摘要:虽然天然气汞含量作为判识煤型气和油型气的一项重要指标已经被很多学者所接受,但在勘探实践中应用的并不多,究其原因还是对该指标的认识不够深入。为探讨该指标的适用性,笔者对天然气中汞的成因机制进行探讨。首先通过煤中汞含量、煤的产气率以及煤粉热释汞实验,分析认为天然气中的汞主要来自于气源岩,尤其是煤,只有当地层温度达到一定数值以后,气源岩中的汞才会在热力的作用下大量被释放并随生成的天然气一起运移并聚集到气藏中,气源岩类型和地层温度共同决定了天然气汞含量的高低。其次,笔者对全国8大盆地500多口天然气井开展了天然气汞含量检测,并对其中部分气井进行了天然气烷烃碳同位素检测。统计分析表明,当天然气汞含量大于 $30\mu\text{g}/\text{m}^3$ 时,可基本判断该天然气类型为煤型气;当天然气汞含量介于 $10\sim 30\mu\text{g}/\text{m}^3$ 时,其为煤型气的几率较大,在结合其他地质资料的情况下也可比较容易得出合理的结论;但当天然气汞含量介于 $5\sim 10\mu\text{g}/\text{m}^3$,甚至更低时,天然气汞含量只能作为判识煤型气和油型气的辅助参数。

关键词:天然气;煤型气;油型气;汞;判识;指标

中图分类号:TE112.111

文献标识码:A

Discussion on the applicability of mercury content in natural gases as an identification index of coal-type gas and oil-type gas

HAN Zhongxi LI Jian YAN Qituan WANG Shuying GE Shouguo WANG Chunyi

(Langfang Branch, PetroChina Research Institute of Petroleum Exploration & Development, Langfang 065007, China)

Abstract: Although the mercury content in natural gases used as an identification index of coal-type gas and oil-type gas has been accepted by many gas geochemists, it is not used so much in practical exploration. The reason is probably that the index is not clearly understood. In order to clarify the applicability of this index, firstly, we discussed the genetic mechanism of mercury in natural gases. Through examining the mercury content in coal and the gas production ratio of coal, and conducting a thermal releasing mercury experiment on crumble coal, we concluded that mercury in natural gases comes mainly from source rocks, especially coal, only the formation temperature reaches to a certain value, can mercury in source rocks begin to be released enormously by the force of heat, and migrate into a gas pool with generated gas and accumulate there. Therefore, the mercury content in gases is determined both by the source rock type and formation temperature. Secondly, we measured the mercury content of gas samples collected from more than 500 gas wells in 8 giant basins of China, and performed the carbon isotopic measurement of alkane-gas from some wells. The statistical analysis of these data showed that the gas can be generally judged as a coal-type gas when the mercury content in the gas is more than $30\mu\text{g}/\text{m}^3$; it is more likely to be a coal-type gas when its mercury content ranges between $10\sim 30\mu\text{g}/\text{m}^3$; and it should be pointed out that an reasonable conclusion can be drawn only by combining this measurement value with other geological data. However, the mercury content in natural gases can be used only as an auxiliary identification parameter when it varies between $5\sim 10\mu\text{g}/\text{m}^3$ or even much lower.

Key words: natural gas; coal-type gas; oil-type gas; mercury; identification; index

判别煤型气和油型气的方法很多,最常见的有烷烃碳同位素法、轻烃法和生物标志化合物法,其他的方法还有气组分法和汞含量法^[1]。虽然汞含量法作为鉴别煤型气和油型气的一种有效方法已经被很多学者所接受^[2-4],但在实际工作过程中采用该方法的并不多。

究其原因主要有两个:一是天然气中汞的形成机制认识不清,尽管大多数学者认为天然气中的汞主要来自于气源岩^[5-7],但仍然有部分学者认为天然气中的汞主要来自于地壳深部^[8-9];二是天然气汞含量作为煤型气和油型气判识指标界限的认识还有待进一步深化。戴

基金项目:国家重大科技专项“中国大型气田形成条件、富集规律及目标评价”(2011ZX05007)资助。

第一作者及通讯作者:韩中喜,男,1979年2月生,2004年毕业于中国石油大学(华东),2007年获中国石油勘探开发研究院硕士学位,现为中国石油勘探开发研究院廊坊分院工程师,主要从事天然气地质与勘探及天然气气质检测与评价方面的研究。Email: hanzhongxi69@petrochina.com.cn

金星根据国内外 12 个盆地(四川、渤海湾、鄂尔多斯、江汉、南襄、苏北、琼东南、松辽和中欧、北高加索、卡拉库姆及德涅波-顿涅茨)的煤型气和油型气汞含量资料进行分析认为,煤型气汞含量为 $10 \sim 3 \times 10^6 \text{ ng/m}^3$,通常大于 700 ng/m^3 ,油型气汞量在 $4 \sim 1.42 \times 10^6 \text{ ng/m}^3$,通常小于 600 ng/m^3 。但这一指标在实际使用过程中还存在一些困难,因此有必要对该项指标作进一步探讨。

1 天然气中汞的形成机制

越来越多的证据表明天然气中的汞主要来自于气源岩(尤其是煤),而非地壳深部。这是因为成煤的腐殖质对汞具有很强的吸聚能力,腐殖质胶体吸附量平

均为 $3 \sim 4 \text{ g/kg}$,在相同地质环境中比其他一切胶体的吸附量都高,如腐殖泥汞含量高达 $1000 \mu\text{g/kg}$ 以上,而一般淡水沉积物只有 $73 \mu\text{g/kg}$ 左右^[11]。Kevin 和王起超等学者曾对美国和中国不同产煤区煤中汞含量进行过统计^[12-13],这些地区煤中汞含量介于 $(0.003 \sim 2.9) \times 10^3 \text{ ng/g}$ (表 1),中国不同地区煤中平均汞含量为 $0.202 \times 10^3 \text{ ng/g}$ 。戴金星曾对不同煤阶的煤产气率做过统计,煤的产气率一般为 $206 \sim 458 \text{ m}^3/\text{t}$ ^[14](表 2),按照最高产气率计算,假设煤中的汞全部释放,则由此形成的天然气汞含量可以达到 $6550 \sim 6331877 \text{ ng/m}^3$ 。目前世界上已知的最高天然气汞含量也未超过这一范围,德国武斯特罗夫气田天然气汞含量为 $3 \times 10^6 \text{ ng/m}^3$ ^[11]。

表 1 美国与中国不同产煤区煤中汞含量^[12-13]

Table 1 Mercury contents of coals in different coal production location in America and China

美国地区	汞含量/ $(\mu\text{g} \cdot \text{g}^{-1})$		中国地区	汞含量/ $(\mu\text{g} \cdot \text{g}^{-1})$	
	范围	平均值		范围	平均值
Appalachian	0.003~2.9	0.20	黑龙江	0.02~0.63	0.12
Eastern Interior	0.007~0.4	0.10	吉林	0.08~1.59	0.33
Fort Union	0.007~1.2	0.13	辽宁	0.02~1.15	0.20
Green River	0.003~1.0	0.09	北京	0.06~1.07	0.28
Hams Fork	0.02~0.6	0.09	内蒙古	0.23~0.54	0.34
Gulf Coast	0.01~1.0	0.22	安徽	0.14~0.33	0.22
Pennsylvania	0.003~1.3	0.18	江西	0.08~0.26	0.16
Powder River	0.003~1.4	0.10	河北	0.05~0.28	0.13
Raton Mesa	0.01~0.5	0.09	山西	0.02~1.59	0.22
San Juan River	0.003~0.9	0.08	陕西	0.02~0.61	0.16
South West Utah	0.01~0.5	0.10	山东	0.07~0.30	0.17
Uinta	0.003~0.6	0.08	河南	0.14~0.81	0.30
Western Interior	0.007~1.6	0.18	四川	0.07~0.35	0.18
Wind River	0.007~0.8	0.18	新疆	0.02~0.05	0.03

表 2 不同煤阶煤产气率数据^[14]

Table 2 Coal gas production ratio of different coal rank

煤阶	镜质体反射率/%	产气率/ $(\text{m}^3 \cdot \text{t}^{-1})$
煤	<0.50	38~68*
长烟煤	0.50~0.65	42~99
气煤	0.65~0.90	45~126
肥煤	0.90~1.20	64~179
焦煤	1.20~1.70	86~244
瘦煤	1.70~1.90	124~298
贫煤	1.90~2.50	152~389
无烟煤	>2.50	206~458

注*:褐煤前产气率系借用国外文献数据。

虽然煤系有机质具备形成高含汞天然气的物质基础,但并不是所有的煤型气均具有较高的天然气汞含量。笔者曾对沁水盆地南部煤层气勘探开发试验区樊庄区块的 8 口煤层气井进行了汞含量分析,检测结果表明这些井天然气汞含量很低,均小于 10 ng/m^3 ^[15]

(表 3)。这说明天然气汞含量高低不仅与天然气类型有关,也受其他因素的控制。

表 3 沁水盆地南部地区煤层气汞含量数据^[15]

Table 3 Mercury content of coal-bed gas in the south of

Qinshui Basin

采样井号	深度/m	汞含量/ $(\text{ng} \cdot \text{m}^{-3})$
晋试 5-7	889	<10
固 6-10	616	<10
蒲 1-5	512	<10
华溪 4-10	715	<10
华溪 7-14	724	<10
蒲南 2-7	711	<10
华蒲 7-14	702	<10
樊平 1-1	515	<10

研究表明,一定温度下,煤吸汞和释汞是一个动态的过程,温度越低煤对汞的吸附量越大,温度越高吸附量越低。为了验证这一现象,笔者做了如下实验,实验

装置如图1所示,为了达到较高的控温精度($\pm 1^\circ\text{C}$),选取电热鼓干燥箱作为加热单元。首先将煤样粉碎成10~18目大小的颗粒,装入直径6 mm、长18 cm的玻璃管,两端用脱脂棉封堵,由此制得煤粉管,每支装入煤粉量为2 g,煤粉汞含量为57 ng/g。设定电热鼓干燥箱加热温度,待温度稳定后,启动气泵,用1 mL注射器抽取饱和汞蒸气从注射口注入,在气流的带动下饱和汞蒸气依次通过煤粉管和水浴降温槽,最后被金阱吸附,吸附汞后的金阱可通过原子吸收光谱仪检测其吸附的汞量。所有连接部件均为硅胶和玻璃制品。在实验过程中,加热温度从60℃开始,每20℃一个间隔,一直加热到160℃,检测结果如图2所示。

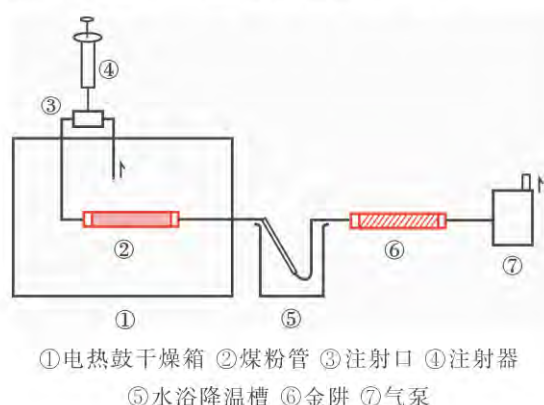


图1 煤粉加热吸汞、释汞实验装置示意图

Fig. 1 Experimental apparatus of coal flour absorbing and releasing mercury

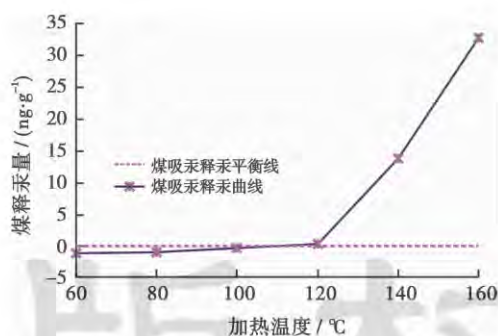


图2 煤粉在不同温度下的吸汞和脱汞现象

Fig. 2 Phenomenon of coal flour absorbing and releasing mercury at different temperature

可以看出,当加热温度低于100℃时,金阱所吸附汞量小于注入的汞量;当加热温度高于120℃时,金阱吸附汞量大于注入的汞量。因此可以判断,煤粉吸汞和释汞的平衡点位于100~120℃,大体为110℃。这表明作为生气母质的煤,虽然具备形成高含汞天然气的物质基础,但当气源岩地层温度过低时,煤中的汞很难被释放出来,甚至还会将环境中的汞吸聚起来,这样形成的天然气汞含量会很低。只有当气源岩达到一定

温度后,煤中的汞才会在热力的作用下释放并进入气藏,因此气源岩类型和地层温度共同决定了天然气汞含量的高低。这里的地层温度既包括天然气生成时的气源岩层温度,又包括天然气现今所在储层的地层温度。这一结论与目前已知的全球高含汞气田的分布是一致的,这些高含汞气田所在地区岩浆活动比较活跃,地温梯度相对较高,产气层与气源岩层埋藏往往较深,地层温度通常超过100℃。荷兰格罗宁根(Groningen)气田是世界上著名的高含汞气田,根据Bingham报道,该气田天然气汞含量大体为 $180\mu\text{g}/\text{m}^3$ ^[16],格罗宁根气田位于欧洲北海含油气区的西荷兰盆地,主要烃源岩层为上石炭统煤层,产层是埋藏深度为2700 m的赤底砂岩,气层温度为107℃^[17]。泰国湾地区天然气也具有较高的天然气汞含量,根据Wilhelm的统计,泰国湾地区天然气汞含量在 $100\sim 400\mu\text{g}/\text{m}^3$ ^[18]。泰国湾地区的沉积盆地形成于第三纪,盆地形成初期花岗岩侵入活动发育,主要烃源岩层为沼泽相暗色泥岩和煤层,地温梯度在 $5^\circ\text{C}/\text{hm}$ 以上,气藏埋深2000~2600 m,气层温度在120℃以上^[19-20]。岩浆等地热活动为气源岩中汞的释放提供了丰富的热力,并确保进入气层的汞不会因为温度过低而被围岩中的有机质和黏土矿物吸附。

2 天然气汞含量作为判识指标的适用性

为搞清天然气汞含量与天然气类型之间的关系,笔者对中国陆上的8大含气盆地(松辽、渤海湾、鄂尔多斯、四川、沁水、塔里木、准噶尔及吐哈)中的500多口气井开展了天然气汞含量检测,并对其中部分气井进行了天然气烷烃碳同位素分析(表4)。在进行天然气汞含量检测时借鉴国际标准化组织2003年推荐标准ISO6978-2,但由于该标准采样方法只适用于天然气处理厂外输气,对于含油、含水较多的井口天然气则不适用。为消除油、水的干扰,笔者首先将天然气通入气体采样袋,然后静置片刻,待油、水从天然气中分离后,再将天然气通入测汞仪检测。大量实验分析表明该方法检测数据具有很好的重复性和再现性。另外,该方法同样适用于天然气处理厂外输气,并与ISO6978-2标准方法具有很好的可比性。

研究表明,当乙烷碳同位素低于 -28‰ 时,天然气汞含量一般不超过 $30\mu\text{g}/\text{m}^3$;当乙烷碳同位素高于 -28‰ 时,天然气汞含量总体随乙烷碳同位素值的增加而迅速变大(图3)。煤型气汞含量算术平均值约 $30\mu\text{g}/\text{m}^3$,油型气汞含量算术平均值则只有 $3\mu\text{g}/\text{m}^3$,煤型气汞含量总体要高出油型气一个数量级。除此以外,煤型气汞含量拥有比油型气更大的分布范围,油型气汞含量介于 $0\sim 30\mu\text{g}/\text{m}^3$,煤型气则介于 $0\sim 2240\mu\text{g}/\text{m}^3$ 。

表 4 中国部分盆地气井天然气汞含量与甲、乙烷碳同位素数据
Table 4 Natural gas mercury content and carbon isotope of methane and ethane

盆地名称	气田名称	井号	汞含量/(ng·m ⁻³)	δ ¹³ C ₁ /‰	δ ¹³ C ₂ /‰
鄂尔多斯盆地	榆林	榆 32-15	1 290	- 33. 0	- 25. 6
		榆 42-6	483	- 31. 3	- 25. 5
		陕 211	24 900	- 33. 0	- 25. 2
		榆 29-10	29 800	- 33. 4	- 24. 3
		榆 28-12	13 600	- 33. 2	- 26. 3
		榆 28-2	1 490	- 33. 6	- 32. 3
		陕 141	7 890	- 33. 3	- 25. 8
		榆 26-12	9 670	- 32. 5	- 25. 9
		榆 27-01	5 230	- 33. 1	- 30. 8
	靖边	榆 50-5	630	- 33. 7	- 29. 3
		陕 193	291	- 32. 3	- 30. 7
		陕 45	469	- 41. 5	- 35. 0
	苏里格	G6-11B	540	- 32. 3	- 30. 7
		苏 14-9-34	118 000	- 32. 6	- 23. 2
		苏 14-9-32	1 960	- 32. 4	- 22. 7
		苏 36-2-4	45 000	- 33. 8	- 23. 0
		苏 36-7-4	5 500	- 34. 0	- 23. 0
		苏 10-39-55	1 800	- 32. 3	- 23. 1
四川盆地	九龙山	苏 5-5-28	152 000	- 32. 0	- 23. 1
		苏 5	122 000	- 32. 5	- 22. 9
		龙 9	42 000	- 30. 4	- 27. 9
		龙 8	36 200	- 30. 8	- 27. 0
		龙 10	40 500	- 30. 4	- 27. 7
	八角场	角 42	3 300	- 38. 2	- 27. 8
		角 33	34 200	- 38. 4	- 26. 3
		角 47	23 800	- 38. 7	- 26. 1
		角 48	61 400	- 40. 3	- 26. 5
		角 49	6 190	- 37. 0	- 27. 3
	威远	威 5	<10	- 32. 0	- 35. 7
		威 93	<10	- 32. 3	- 36. 2

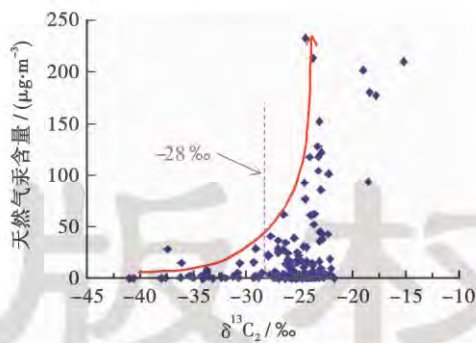


图 3 天然气汞含量与乙烷碳同位素组成关系
Fig. 3 Relationship of natural gas mercury content and carbon isotope of ethane

由于油型气汞含量一般不超过 30 μg/m³,因此对于汞含量超过 30 μg/m³ 的天然气来说可以基本判定为煤型气。而对于汞含量介于 10~30 μg/m³ 的天然气来说,由于油型气汞含量只有 5%左右位于该区间,在结合其他地质资料的情况下也可比较容易得出合理的结论。但当天然气汞含量介于 5~10 μg/m³,甚至

更低时,天然气汞含量只能作为判识煤型气和油型气的辅助参数(表 5)。

表 5 煤型气和油型气天然气汞含量统计分布数据
Table 5 Distribution of statistics of coal type and oil type gas mercury content

汞含量/(μg·m ⁻³)	≤5	5~10	10~30	>30
煤型气分布/%	30	20	20	30
油型气分布/%	85	10	5	0

3 结 论

(1) 气源岩类型和其所经历的最高地层温度及现今气层温度共同决定了天然气汞含量的高低。煤系有机质具备形成高含汞天然气的物质基础,但只有当气源岩层达到一定温度(110℃)后,气源岩中的汞才可能被大量释放并进入气层。气层只有保持一定的地层温度才能确保天然气中的汞不会因为温度过低而被围岩中的有机质和黏土矿物吸附。

(2) 煤型气汞含量总体要远高于油型气一个数量级,煤型气汞含量算术平均值为 $30 \mu\text{g}/\text{m}^3$ 左右,而油型气汞含量算术平均值则只有 $3 \mu\text{g}/\text{m}^3$ 左右。煤型气汞含量拥有比油型气更大的分布范围,油型气汞含量介于 $0 \sim 30 \mu\text{g}/\text{m}^3$,煤型气则介于 $0 \sim 2240 \mu\text{g}/\text{m}^3$ 。

(3) 当天然气汞含量大于 $30 \mu\text{g}/\text{m}^3$ 时,可基本判断该天然气类型为煤型气。当天然气汞含量介于 $10 \sim 30 \mu\text{g}/\text{m}^3$ 时,其为煤型气的几率较大,在结合其他地质资料的情况下也可比较容易得出合理的结论。但当天然气汞含量介于 $5 \sim 10 \mu\text{g}/\text{m}^3$,甚至更低时,天然气汞含量只能作为判识煤型气和油型气的辅助参数。

参考文献

- [1] 戴金星,裴锡古,戚厚发. 中国天然气地质学:卷一[M]. 北京:石油工业出版社,1992:69-87.
Dai Jinxing, Pei Xigu, Qi Houfa. China natural gas geology: volume 1[M]. Beijing: Petroleum Industry Press, 1992: 69-87.
- [2] 党振荣,刘永斗,王秀,等. 苏桥潜山油气藏烃源讨论[J]. 石油学报,2001,22(6):18-23.
Dang Zhenrong, Liu Yongdou, Wang Xiu, et al. Discussion on the source rock in Suqiao buried hill hydrocarbon reservoirs[J]. Acta Petrolei Sinica, 2001, 22(6): 18-23.
- [3] 张虎权,王廷栋,卫平生,等. 煤层气成因研究[J]. 石油学报,2007,28(2):29-32.
Zhang Huquan, Wang Tingdong, Wei Pingsheng, et al. Study on the origins of coal-bed gas[J]. Acta Petrolei Sinica, 2007, 28(2): 29-32.
- [4] 石彦民,于俊利,廖前进,等. 黄骅坳陷孔西地区油气的地球化学特征及油源初探[J]. 石油学报,1998,19(2):5-11.
Shi Yanmin, Yu Junli, Liao Qianjin, et al. A study on geochemistry of hydrocarbons and their sources in Kongxi area of Huanghua depression[J]. Acta Petrolei Sinica, 1998, 19(2): 5-11.
- [5] 李剑,严启团,汤达祯. 天然气中汞的成因机制与分布规律预测[M]. 北京:地质出版社,2011:153-155.
Li Jian, Yan Qituan, Tang Dazhen. Formation mechanism and distribution rule of mercury in natural gas[M]. Beijing: Geological Publishing House, 2011: 153-155.
- [6] 韩中喜,严启团,王淑英,等. 辽河坳陷天然气汞含量特征简析[J]. 矿物学报,2010,30(4):508-511.
Han Zhongxi, Yan Qituan, Wang Shuying, et al. Analysis of natural gas mercury concentration characteristics from Liaohe depression[J]. Acta Mineralogica Sinica, 2010, 30(4): 508-511.
- [7] 李剑,韩中喜,严启团,等. 中国气田天然气中汞的成因模式[J]. 天然气地球科学,2012,23(3):413-418.
Li Jian, Han Zhongxi, Yan Qituan, et al. Genesis of mercury in natural gas of Chinese gas fields[J]. Natural Gas Geoscience, 2012, 23(3): 413-418.
- [8] 涂修元. 天然气和表土中汞蒸气含量及分布特征[J]. 地球化学,1992,9(3):294-304.
Tu Xiuyuan. The concentration of mercury vapor in natural gas and regolith and its distribution characteristics[J]. Geochemica, 1992, 9(3): 294-304.
- [9] Zettlitzer M, Scholer H F, Eiden R, et al. Determination of elemental, inorganic and organic mercury in north German gas condensates and formation brines[R]. SPE 37260, 1997.
- [10] 戴金星,戚厚发,郝石生. 天然气地质学概论[M]. 北京:石油工业出版社,1989:68-70.
Dai Jinxing, Qi Houfa, Hao Shisheng. Natural gas geology introduction[M]. Beijing: Petroleum Industry Press, 1989: 68-70.
- [11] 戴金星. 煤成气的成分及成因[J]. 天津地质学会志,1984,2(1):16-18.
Dai Jinxing. Composition and its genesis of coal-typed gas[J]. Tian Jin Di Zhi Xue Hui Zhi, 1984, 2(1): 16-18.
- [12] Kevin C G, Christopher J Z. Mercury transformation in coal combustion flue gas[J]. Fuel Processing Technology, 2000, 65(1): 289-310.
- [13] 王起超,沈文国,麻壮伟. 中国燃煤汞排放量估算[J]. 中国环境科学,1999,19(4):318-321.
Wang Qichao, Shen Wenguo, Ma Zhuangwei. The estimation of mercury emission from coal combustion in China[J]. China Environmental Science, 1999, 19(4): 318-321.
- [14] 戴金星,戚厚发,王少昌,等. 我国煤系的油气地球化学特征、煤成气藏形成条件及资源评价[M]. 北京:石油工业出版社,2001:25.
Dai Jinxing, Qi Houfa, Wang Shaochang, et al. Geochemical features of hydrocarbon from coal-measure, formation and resource evaluation of coal- formed gas reservoir in China[M]. Beijing: Petroleum Industry Press, 2001: 25.
- [15] 韩中喜,严启团,李剑,等. 沁水盆地南部地区煤层气汞含量特征简析[J]. 天然气地球科学,2010,21(6):1054-1059.
Han Zhongxi, Yan Qituan, Li Jian, et al. Analysis of coalbed methane mercury concentration characteristics in the south of Qinshui Basin[J]. Natural Gas Geoscience, 2010, 21(6): 1054-1059.
- [16] Bingham M D. Field detection and implications of mercury in natural gas[R]. SPE 19357, 1990.
- [17] 李国玉,金之钧. 世界含油气盆地地图集[M]. 北京:石油工业出版社,2005:451-453.
Li Guoyu, Jin Zhijun. World atlas of oil and gas basins[M]. Beijing: Petroleum Industry Press, 2005: 451-453.
- [18] Wilhelm S M, McArthur A. Removal and treatment of mercury contamination at gas processing facilities[R]. SPE 29721, 1995.
- [19] 藤原,昌史. 使用三维地震反射资料综合解释泰国海上气田的含气砂岩层[J]. 石油技术协会志,1986,51(1):83-90.
Teng Yuan, Chang Shi. Using 3D seismic data to interpret gas bearing sand layer in Thailand's offshore gas field[J]. Journal of the Japanese Association for Petroleum Technology, 1986, 51(1): 83-90.
- [20] 姜伟. 美国 Unocal 公司在泰国湾的钻井技术[J]. 石油钻采工艺,1995,17(6):43-48.
Jiang Wei. Drilling technology applied by American Unocal Company in Siam Bay[J]. Oil Drilling & Production Technology, 1995, 17(6): 43-48.

(收稿日期 2012-09-02 改回日期 2012-12-03 责任编辑 熊 英)