

文章编号: 1000-0550(2000)04-0611-04

煤层甲烷碳同位素在煤层气勘探中的地质意义 ——以沁水盆地为例

张建博¹ 陶明信²

1(中国地质大学 北京 100083) 2(中国科学院兰州地质研究所 兰州 730000)

摘要 根据沁水煤层气甲烷碳同位素的组成与分布特征,从煤层甲烷碳同位素在煤层气解吸—扩散—运移中的分馏效应,结合水文地质条件和构造条件,讨论了煤层甲烷碳同位素在煤层气勘探中的地质意义,认为沁水煤层气 $\delta^{13}C_1$ 值不仅总体上较高,而且随埋深增大而增高,说明沁水煤层气存在因煤层抬升而卸压所导致的煤层气解吸—扩散—运移效应,从而形成了该区甲烷碳同位素在平面上的分带现象。

关键词 煤层甲烷 碳同位素

第一作者简介 张建博 男 1964年出生 高级工程师 天然气地质勘探

中图分类号 P593 TE132.2 **文献标识码** A

1 引言

煤层气作为一种非常规天然气,其甲烷的碳同位素特征与常规煤型气甲烷相似。由于中国煤层气地质选区地质构造复杂,演化程度较高,造成煤层气大量散失^[1]。煤层气的散失或聚集程度可反映在甲烷碳同位素值的变化上。研究煤层甲烷碳同位素特征,对于指导蓄势待发的煤层气勘探开发具有指导作用。中国石油天然气集团公司在山西晋城地区根据煤层甲烷的碳同位素组成变化,结合煤层分布、含气量、水文及构造特征,发现沁水煤层气田,取得重大突破。

2 沁水煤层气田地质概况

沁水煤层气田位于山西省东南部沁水盆地南部晋城斜坡带,地理座标为东经 $112^{\circ}10' \sim 112^{\circ}43'$,北纬 $35^{\circ}32' \sim 35^{\circ}50'$,东西长50 km,南北宽30 km,包括樊庄区块(北部)、潘庄区块(南部)和郑庄区块(西北部)。郑庄区块与樊庄和潘庄区块以一条既不导水又不导气的寺头大断层为界(图1)。本区为以石炭—二叠系含煤沉积为主的富煤区,煤层埋藏深度一般小于1 000 m,煤质好、热演化程度高、含气饱和度高、保存条件好、煤层气资源丰富,是煤层气勘探有利地区^[2]。

气田总体构造形态为一完整的马蹄形斜坡带,褶皱呈舒缓波状,断层较少,无岩浆活动,构造简单。主力煤层为石炭系山西组3[#]煤和二叠系太原组15[#]煤,非主力煤层为10[#]煤。煤层埋藏深度变化总体为北深南浅,而中部又深于东西两侧。煤的热演化程度普遍

较高,其变质程度由东南向西北方向逐渐降低, R_o 由5.25%降低为2.5%。在西北部地区,由东南向西北方向, R_o 由2.5%降低为1.9%。

3 沁水煤层气甲烷碳同位素组成与分布特征

3.1 样品采集与分析

在钻探过程中,利用绳索取芯工具迅速提取煤芯并立即装罐。在现场对罐内煤层(吸附)气进行解吸实验,分别在4小时、24小时和96小时,用排水集气法采集解吸出的气样。甲烷碳同位素分析在德国生产的Finnigan MAT Delta-s同位素质谱仪上完成。

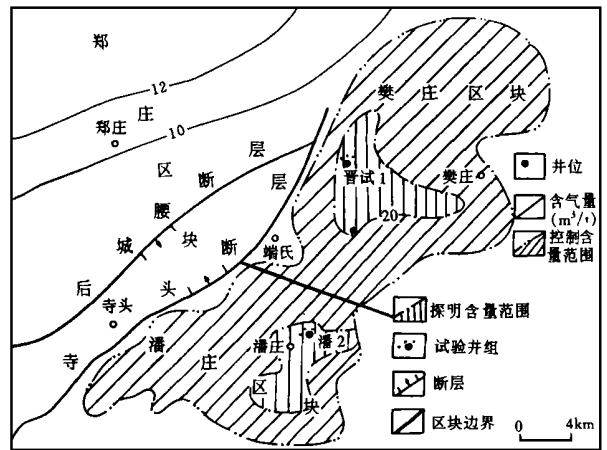


图1 沁水煤层气田构造分区简图

Fig.1 The sketch map of structural division of the Qinshui basin

表1 沁水煤层气田不同井区的甲烷碳同位素值

井号	编号	煤层	井深/m	$\delta^{13}\text{C}_1/\text{‰}$	$R_o/\text{‰}$	取样时间
HG2	HG2-4-1	3#	518.00	-33.08	3.6	4小时
		3#	518.00	-33.11	3.6	24小时
		3#	518.00	-29.88	3.7	96小时
	HG2-13-1	15	610.55	-37.76	4.0	4小时
		15	610.55	-33.98	3.9	24小时
		15	610.55	-29.56	4.2	96小时
HG3	HG3-3-1	3#	514.50	-35.23	4.9	4小时
		3#	514.50	-34.91	5.0	24小时
		3#	514.50	-34.10	5.0	96小时
	HG3-9-2	10	557.49	-35.80	4.9	4小时
		10	557.49	-35.55	4.9	24小时
		10	557.49	-34.58		96小时
	HG3-11-2	15	604.11	-39.38		4小时
		15	604.11	-38.00		24小时
		15	604.11	-37.12		96小时

3.2 甲烷碳同位素组成与分布特征

3.2.1 煤层气解吸过程中甲烷的碳同位素分馏变化特征

表1列出了沁水煤田HG2和HG3两口井中共5个煤芯样在不同解吸时间所采集气样的甲烷碳同位素分析数据。结果表明,同一煤样解吸出的煤层气,其 $\delta^{13}\text{C}_1$ 值随解吸时间延长而逐渐变高。如HG2井3#煤层解吸气的 $\delta^{13}\text{C}_1$ 值在解吸至4小时时间为-35.08‰(PDB,下同)。24小时时为-33.11‰,至96小时时则进一步变重达-29.88‰(表1)。

由于 ^{12}C 甲烷的极性弱于 ^{13}C 甲烷,致使 ^{12}C 甲烷优先解吸而产生碳同位素分馏效应。煤层甲烷碳同位素的轻重顺序应为4小时解吸气<24小时解吸气<96小时解吸气,这也与前人的同类研究结果相一致^[3]。

3.2.2 甲烷碳同位素的区域分布与变化特征

如上所述,由于存在解吸分馏效应,沁水煤层气甲烷的碳同位素组成变化范围相当宽,而且在区域上也有明显的变化或差别。除表1所列之外,本区有关煤层气的测试结果表明,在煤层埋深大于300m地区,煤层气甲烷碳同位素总体较重, $\delta^{13}\text{C}_1$ 值介于-20.78‰~55.00‰之间,且与煤层埋深之间呈现正相关关系;在埋深小于300m地区, $\delta^{13}\text{C}_1$ 值一般小于-55.00‰。

4 甲烷碳同位素组成与煤岩热演化的关系及其次生变化

为了进一步了解煤岩热演化与其所生成甲烷的碳同位素组成之间的关系,选用低熟煤岩样品进行了热模拟实验,并对其产物中甲烷的碳同位素组成进行

了分析,结果如图2所示。图中的 R_o 值也是由热模拟实验所确定的,即实验升到某一温度点后,测得煤样的 R_o 值,具体结果成对应关系如表2所列。

如图2中所示,煤岩热模拟实验所生成甲烷的碳同位素组成总体上呈现为“重—轻—重”的演变特征。即在 R_o 值低于0.5‰前(相应温度低于300℃),所产甲烷的 $\delta^{13}\text{C}_1$ 值约为-24‰,之后随温度升高而逐渐变低,至温度为500℃, R_o 值为1.4‰时, $\delta^{13}\text{C}_1$ 值达最低值,为-32‰,其后 $\delta^{13}\text{C}_1$ 值又随温度升高而变高,在温度为650℃, R_o 值约为2.1‰时, $\delta^{13}\text{C}_1$ 值达

表2 煤岩热模拟实验中温度与 R_o 值的对应关系Table 2 The relationship of the R_o with temperature during coal production thermo-modeling

温度/℃	300	400	450	500	550	600	650	700
$R_o/\text{‰}$	0.65	0.95	1.18	1.4	1.6	1.9	2.1	2.4

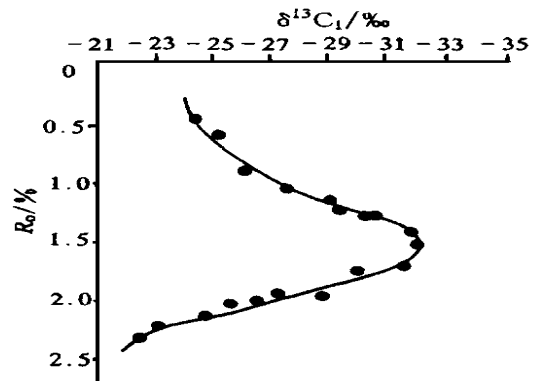
图2 煤岩热模拟阶段 $\delta^{13}\text{C}_1$ 值变化(据钱凯等^[1])

Fig. 2 The variation of $\delta^{13}\text{C}_1$ during coal production thermo-modeling (after from Qian Kai et al. 1996)

21.7‰, 徐永昌等曾对褐煤做过类似的热模拟实验。其实验温度为 250℃~600℃, 其产物甲烷的 $\delta^{13}C_1$ 值也同样具有随温度增高呈现出重—轻—重($\delta^{13}C_1$ 值相应约为 -26‰→-33‰→-27‰)的演化特征, 与本文实验结果基本吻合。徐永昌等认为, 以上特征可能反映了 CH_4-CO_2 间的碳同位素平衡反应, 而自然界天然气中的碳同位素组成在早期热演化阶段未见偏重的现象, 这可能是早期生气量小, 而中、后期生成的大量气体掩盖了早期的同位素组成特征^[4]。

根据一般的热演化规律, 过成熟阶段($R_o > 2.0\%$)生成甲烷 $\delta^{13}C_1$ 值还可继续增高^[2]。当然, 室内热模拟实验与自然演化之间存在若干差别, 难以准确再现自然状况, 但仍不失其参考价值。结合本区煤岩的 R_o 值(1.9%~5.25%)很高的实际情况分析, 本区煤层甲烷的 $\delta^{13}C_1$ 值一般不应低于 -35‰, (热模拟实验产物的 $\delta^{13}C_1$ 最低值为 -32‰)。故可认为, 本区 $\delta^{13}C_1$ 值变化很大主要是煤层气解吸分馏效应及其解吸扩散程度不同所造成的。

5 甲烷碳同位素变化的分区及其地质意义

如前所述, 煤层甲烷的碳同位素组成不仅具有母质继承效应, 而且在气体解吸过程中可发生显著的分馏变化, 在其后的扩散运移过程中, 又可进一步加剧同位素的分馏变化程度。因此, 从这一角度看, 甲烷的碳

同位素组成在一定程度上可反映煤层气的解吸—运移程度, 亦即可间接反映煤层气保存或富集条件。

沁水盆地在晚古生代含煤地层沉积后, 普遍经历了燕山期—喜马拉雅期的构造抬升, 广泛存在煤储层卸压和煤层气解吸—扩散的地质条件^[1]。如果构造演化、煤层埋藏历史、煤储层封盖等地质条件有利于煤层气保存, 则解吸—扩散过程有利于煤层气富集; 反之, 则会导致煤层气大量逸散。

沁水煤层气 $\delta^{13}C_1$ 值不仅总体上较高, 而且随埋深增大而增高。说明沁水煤层气田煤层气存在着因煤层抬升而卸压所导致的煤层气解吸—扩散—运移效应, 这种效应最终形成了甲烷碳同位素组成在平面上的分带现象。综合水文地质条件、构造位置、碳同位素特征等, 并结合煤层含气饱和度, 可以将晋城煤层气田平面上划分为三个区带(图3):

(1) 甲烷风化带: 煤层气以含 N_2 、 CO_2 为主, 甲烷浓度很低 $\delta^{13}C_1$ 值小于 -55‰。此带位于径流区, 煤层气保存条件差, 是煤层气勘探的不利地区。如寺头断层的西南部地区为主要的泄水区, 地表径流强, 煤层气保存条件极差, 煤层含气量很低, 含气饱和度很低。

(2) 原生一次生煤层气混合吸附带: 此带大气淡水与煤层水交替, 煤层埋藏适中, 物性好, 含气量大, 含气饱和度高, $\delta^{13}C_1$ 值在 -30‰~-40‰左右, 在部分封盖条件较好的构造高部位存在着次生成因的煤层

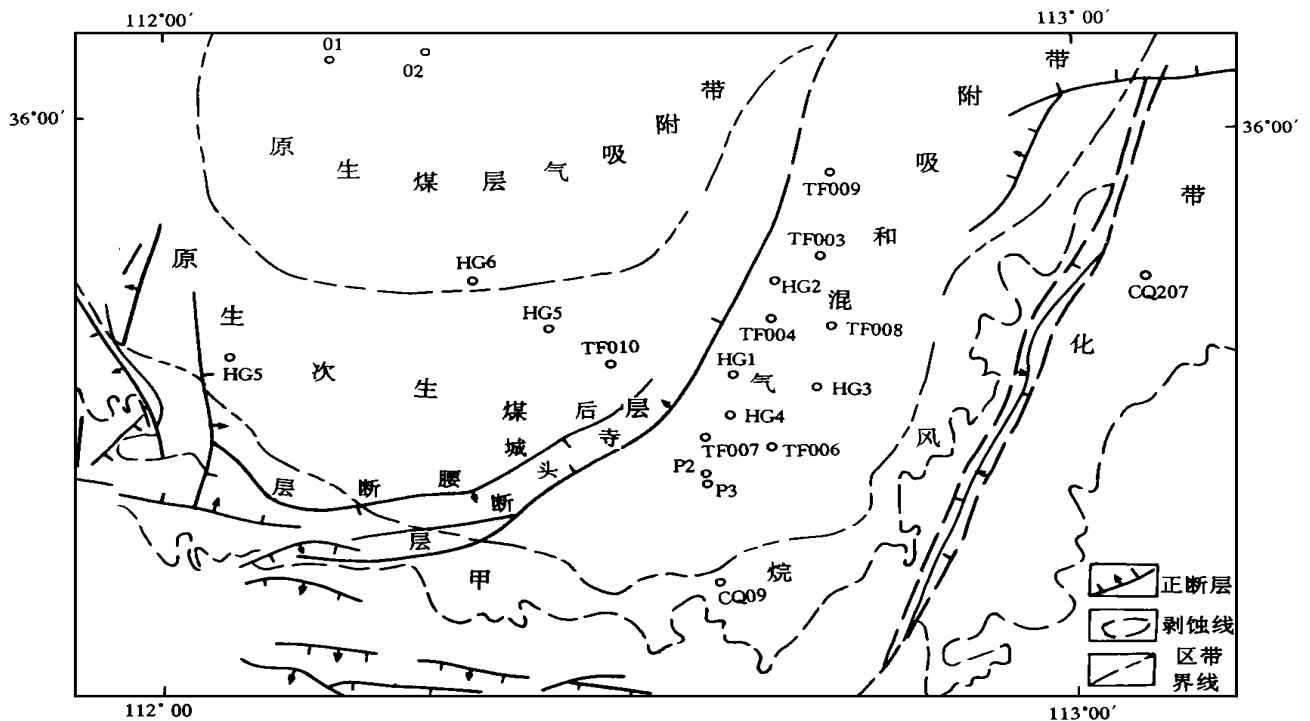


图3 沁水煤层气田不同井区煤层甲烷碳同位素关系图

Fig. 3 The relationship of the methane carbon isotope in different wells in Qinshui basin

气。

(3) 原生煤层气吸附带: 处于承压水环境, 主要为原生的煤层气藏, $\delta^{13}\text{C}_1$ %值小于 -30% 左右。

依据煤层甲烷碳同位素空间分布特征对沁水煤层气田进行分带后, 可以看出甲烷分化带不是勘探有利地区, 原生一次生煤层气混合吸附带是煤层气勘探的重点地区, 如位于该区带的 HG1 井获得了 $4\ 000\text{m}^3$ /日的工业气流量。原生煤层气吸附带由于埋藏较深, 物性较差, 煤层气可解吸率低, 故不是勘探的理想区带。

6 结论

(1) 由于煤层气解吸—扩散—运移效应, 使得甲烷碳同位素组成发生显著的分馏变化。

(2) 甲烷碳同位素的轻重可在一定程度上反映煤层气的解吸扩散运移程度乃至气藏的保存条件, 对

于评价煤层气藏及勘探具有重要意义。

(3) $\delta^{13}\text{C}_1$ %值分布在 -30% ~ -40% 左右的原生一次生煤层气混合吸附带是沁水煤层气田勘探的有利区。

感谢中国石油天然气集团公司廊坊分院天然气煤层气室的大力协助, 感谢赵庆波经理、李景明所长的精心指导和帮助。

参 考 文 献

- 1 钱凯, 赵庆波. 煤层甲烷气勘探开发理论与实验测试技术[M]. 北京: 石油工业出版社, 1996
- 2 张建博, 王红岩. 沁水盆地煤层气有利区预测[M]. 江苏徐州: 中国矿业大学出版社, 1998
- 3 Stach E, Teichmüller M, Makowsky, *et al.* Stach's Textbook of Coal Petrology [M]. 1975
- 4 徐永昌. 天然气成因理论及应用[M]. 北京: 科学出版社, 1994

Geological Significances of Coal Bed Methane Carbon Isotope in Coal Bed Methane Exploration

ZHANG Jian-bo¹ TAO Ming-xin²

¹(China University of Geosciences Beijing 100083)

²(Lanzhou Institute of Geology, Chinese Academy of Sciences Lanzhou 730000)

Abstract

As an unconventional natural gas, the characteristics of carbon isotope in coal bed methane (CBM) is similar to conventional gas. This paper summarizes the character of China coal bed methane carbon isotope according to field desorption, thermo-modeling and carbon isotope testing. Taking Qinshui CBM field as a example, it points out the potential area and profitable target zone for CBM exploration and development from carbon isotope fractionation effect and desorption, diffusion and movement effect of CBM, combined with hydrology and structural condition.

Geologic target area in China has complex tectonic and high maturation, lots of CBM was lost during evolution stage. The variation of carbon isotope value can directly reflect the CBM accumulation degree. Due to desorption, diffusion and movement effect of CBM, the thermo-modeling value of carbon isotope was much higher than carbon isotope value. Meanwhile, the carbon isotope, which also reflects the preservation condition of CBM trap, is important to evaluate the origin of CBM reservoir and exploration potential. Four different types are divided in terms of carbon isotope value distribution. According to this theory, Qinshui CBM basin in Jincheng area, Shanxi province was found.

Rope coring technique was used and carbon isotope testing of field desorption gas was firstly conducted in Qinshui CBM basin. The desorption gas sample for carbon isotope analysis was collected at 4, 24 and 96 hours by water displacement. Because of ^{12}C having less electrical property than ^{13}C , CBM molecule with ^{12}C was prior to molecule with ^{13}C in desorption procedure and lead to carbon isotope fractionation, the early adsorption gas had lighter carbon isotope than late adsorption gas.

Qinshui CBM field is a large gas field and can be divided into 3 zones in terms of carbon isotope distribution feature. Carbon isotope in coal seam 15 is lighter than coal seam 3 because of being interfered by carbonate water. The best location lies in primary-secondary zone with carbon isotope at -30% ~ -40% .

Key words coalbed methane carbon isotope