中国科学: 地球科学 2014 年 第 44 卷 第 9 期: 1940 ~ 1947
www.scichina.com earth.scichina.com
《中国科学》杂志社
SCIENCE CHINA PRESS

论 文

鄂尔多斯盆地东缘煤层气甲烷碳同位素分布及成因

李勇[①②*], 汤达祯[①], 方毅[②], 许浩[①], 孟艳军[①]

① 煤层气国家工程中心煤储层实验室, 中国地质大学能源学院, 北京 100083;
② Department of Energy and Mineral Engineering, G3 Center and Energy Institute, The Pennsylvania State University, Park, PA 16802, USA
* E-mail: cugbliyong@gmail.com

收稿日期: 2013-08-28; 接受日期: 2013-12-24; 网络版发表日期: 2014-08-20
国家科技重大专项项目(编号: 2011ZX05062-01)、国家自然科学基金项目(批准号: 41272175)、国土资源部公益性行业科研专项项目(编号: 201311015-01)和中央高校基本科研业务费专项资金项目(编号: 2652013057)资助

摘要 鄂尔多斯盆地东缘煤层气甲烷碳同位素分布及其成因对认识该区煤层气藏的形成和分布规律, 煤层气资源评价具有重要意义. 在系统总结该区煤层气组分和煤层气碳同位素的地域、时域和煤阶分布特征的基础上, 结合煤储层演化过程, 分析了甲烷碳同位素的变化规律. 该区甲烷碳同位素分布范围宽, 同位素组成总体偏轻, 地域上由北往南呈现"变轻-加重-变轻"的趋势, 针对性分析认为北部低煤阶次生生物气的生成, 中部水动力活跃地区引起的水溶解分馏, 南部构造演化过程中地层抬升造成的解吸分馏, 以及局部岩浆运动引起的快速增温生烃分馏是造成该区甲烷碳同位素普遍偏轻的主要因素.

关键词
煤层气
碳同位素
成因
分馏

鄂尔多斯盆地东缘已初步形成保德、柳林、大宁-吉县、韩城四大煤层气勘探实践基地, 日产气超过 40×10^4 m^3. 该区南北长逾 560 km, 东西宽 50~200 km, 面积约 8×10^4 m^2, 埋深 1500 m 以浅的煤层气地质资源量约 9×10^{12} m^3(陈钟惠等, 1989; 接铭训, 2010; 田文广等, 2012). 构造上隶属于伊盟隆起、晋西挠折带和渭北隆起三个构造单元, 活跃多个煤层气勘探开发区块(图 1). 自北向南, 煤阶渐次增大, 构造和水文发育情况不同, 煤储层演化有较大差异, 煤层气成因上存在区别(郭英海等, 1998; 秦勇, 2003; 赵庆波等, 2011; 李勇等, 2012). 本文以大量测试数据为依据, 系统总结该区煤层气中甲烷稳定碳同位素的地域分布特征, 对其成因进行探讨, 进而归纳了煤层气形成演化的地质控制因素, 对分析该区煤层气生成、保存和逸散条件, 开展区带优选具有积极推动作用.

1 煤层气组分特征

煤矿采掘面的煤解吸气组分变化大, 其次为煤矿抽放气和钻井煤心解吸气, 排采气的组分变化最小(宋岩等, 2012). 鄂尔多斯盆地东缘煤层气井排采气的数据统计表明, 该区煤层气的组分以甲烷为主, 平均含量在 80%以上, 但含量呈现明显的区域性变化, 中部的柳林、三交、石楼等地区普遍大于 95%; 北部的保德、临县地区较低, 在 70%~85%; 南部的大宁、吉县、韩城地区变化幅度大, 呈现区域间小范围

中文引用格式: 李勇, 汤达祯, 方毅, 等. 2014. 鄂尔多斯盆地东缘煤层气甲烷碳同位素分布及成因. 中国科学: 地球科学, 44: 1940–1947
英文引用格式: Li Y, Tang D Z, Fang Y, et al. 2014. Distribution of stable carbon isotope in coalbed methane from the east margin of Ordos Basin. Science China: Earth Sciences, 57: 1741–1748, doi: 10.1007/s11430-014-4900-x

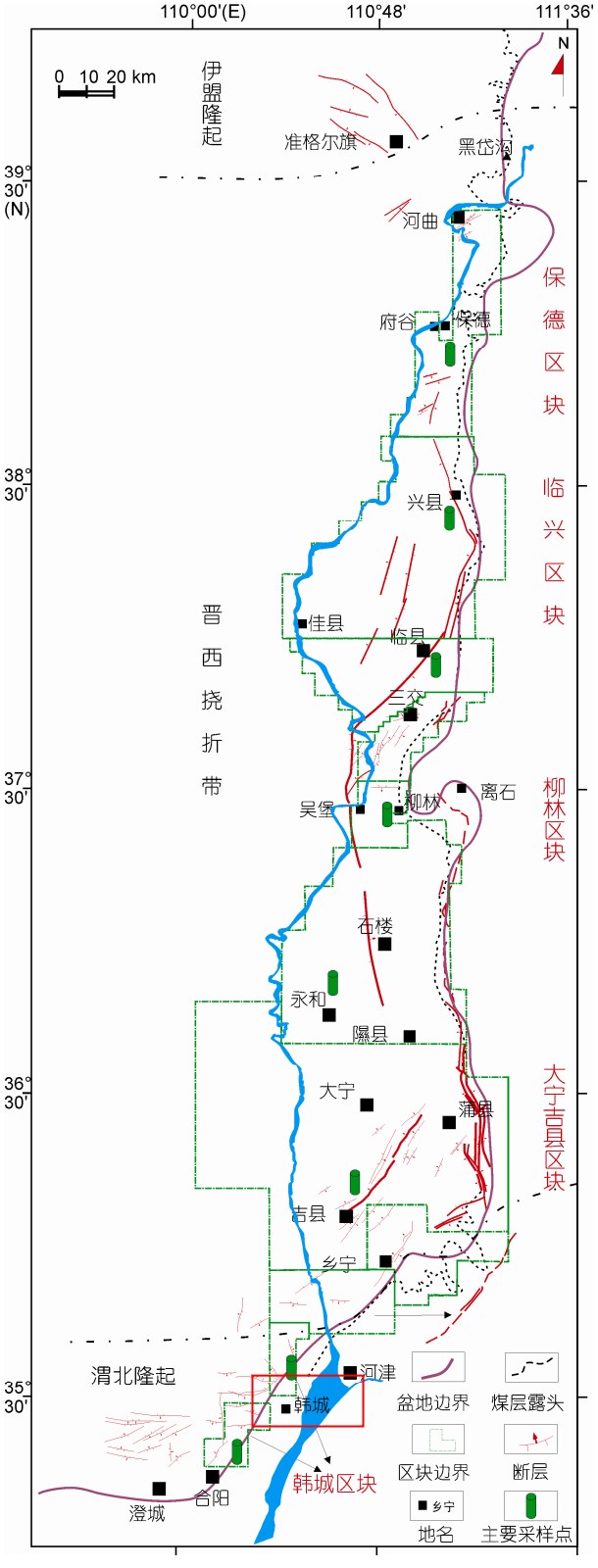

图 1　鄂尔多斯盆地东缘煤层气勘探分区

的变化，在 70%~99%波动(表 1). 重烃气的含量总体偏低，在北部和中部很少见，南部的韩城地区含量较高，最高可达 10%. 非烃气主要为 N_2，其次为 CO_2，含量在 0%~30%之间变化，与 CH_4 含量的区域变化趋势相逆.

2　煤层气甲烷碳同位素分布

鄂尔多斯盆地东缘煤层气甲烷碳同位素分布范围较宽，在−70‰~−30‰分布，其中−50‰~−40‰范围内所占比例最高，该区间上下的甲烷碳同位素数量基本对等. 就地区而言，北部以兴县地区最重，保德地区次之；中部临县至柳林地区最轻，其中柳林地区在−62‰~−42‰分布，反映了存在使同位素明显变轻的因素；南部以吉县地区最重，韩城地区普遍较重，但也存在一定比例很轻的甲烷碳同位素. 总体趋势上，由北向南呈现波浪式的“变轻-加重-变轻”变化态势(表 2).

3　煤层气成因及地质条件

Rightmire(1984)，Rice(1993)将煤层气划分为生物成因气和热成因气，Scott 等(1994)将煤层气划分为原生生物气、次生生物气和热成因气，Smith 等(1996)、宋岩等(2012)探讨了不同沉积环境下的煤层气甲烷碳同位素特征.

鄂尔多斯盆地东缘由北向南煤阶不断变高，煤层气形成和演化环境存在差异，此次研究着重选取北部以气肥煤为主的保德和兴县、中部焦煤为主的柳林、南部贫煤为主的韩城地区进行对比分析.

3.1　与埋深的关系

Teichmuller(1970)发现了煤层气的“垂向分带”现象，认为由于 ^{12}C 的极性弱于 ^{13}C 甲烷，致使 ^{12}C 优先解吸，碳同位素发生分馏，并在扩散-运移过程中使煤层气 ^{12}C 甲烷相对富集导致煤层气变轻，造成原生带-过渡带-解吸带的由深至浅的垂向分带序列(秦勇等, 2000). 三地煤层气甲烷碳同位素在总体上均呈现随埋深增加，同位素加重的趋势，以保德、兴县地区的线性关系最好，韩城部分地区受特定演化环境影响，在 800 m 埋深处出现甲烷碳同位素变轻带. 柳林煤层气甲烷碳同位普遍较轻，受控于特定地质控制

表 1　鄂尔多斯盆地东缘煤层甲烷碳同位素测试结果

地点	煤层	CH_4(%)	CO_2(%)	N_2(%)	$\delta^{13}C_1$(‰, PDB)	地点	煤层	CH_4(%)	CO_2(%)	N_2(%)	$\delta^{13}C_1$(‰, PDB)
保德	3	76.68	1.21	22.11	46.20	石楼	3	97.85	1.23	0.92	36.19
	3	69.77	6.07	240.16	50.20		8	97.68	1.32	1.02	43.82
	3	78.81	1.04	20.15	52.20		8	96.38	2.96	0.67	43.53
	8	70.83	4.09	25.08	54.10		8	96.95	1.95	1.10	38.02
	8	73.04	1.25	25.70	54.20	大宁	5	64.53	1.74	33.59	/
	8	83.55	7.11	9.32	55.52		8	82.95	1.62	14.93	/
兴县	3	82.35	2.29	15.36	48.70	吉县	5	98.88	0.81	0.28	42.90
	3	84.01	2.02	13.98	46.20		5	96.69	1.56	1.75	45.85
	3	87.09	1.51	11.41	47.40		5	97.70	1.88	0.42	37.80
	3	87.35	0.92	11.54	44.30		5	97.88	1.21	0.91	48.48
	3	86.12	1.73	12.14	44.80	韩城	5	84.44	1.32	13.35	39.10
	8	75.26	4.36	20.39	41.70		5	92.94	1.37	4.53	38.60
	8	78.07	2.59	19.35	46.30		5	94.57	1.20	3.07	38.80
	8	79.35	3.24	17.41	45.20		5	82.67	2.21	14.65	35.00
	8	86.55	2.15	11.30	46.50		5	97.50	0.81	0.65	33.50
	8	75.88	3.28	21.85	44.70		5	97.54	0.70	0.59	34.10
	8	74.52	4.92	18.44	46.50		5	85.37	0.77	13.51	35.90
	8	76.37	4.72	18.91	44.90		5	96.41	0.53	2.20	36.00
临县	3	66.96	0.64	32.40	64.10		3	88.58	0.60	10.06	41.60
	3	80.95	2.40	12.64	65.40		5	72.82	0.82	26.55	39.20
	3	67.16	2.74	30.10	67.20		4	89.77	0.43	9.64	40.80
	8	76.33	2.90	19.52	57.62		4	91.74	4.48	7.06	38.50
	8	70.62	1.53	22.58	55.41		4	85.49	0.32	12.77	39.70
	8	75.58	4.92	19.50	55.60		5	94.52	0.84	3.81	38.10
	8	80.11	6.95	12.94	55.45		5	94.64	0.59	3.63	38.70
	8	70.25	3.20	26.55	55.42		5	85.24	0.74	13.78	35.10
三交	3	90.71	0.63	8.66	/		11	87.83	0.76	11.31	36.20
	3	98.39	0.79	0.83	/		11	91.31	0.56	7.46	35.10
	5	95.44	0.72	3.84	/		3	96.36	0.62	2.87	35.80
	8	97.08	0.50	2.41	/		3	96.19	0.63	3.07	36.30
柳林	3+4	97.44	1.38	1.18	57.78		3	96.67	0.59	2.65	36.50
	5	95.23	1.23	1.79	60.54		5	96.20	0.61	2.62	35.70
	8+9	96.40	1.72	1.88	62.08		5	92.54	0.83	6.55	36.70
	8+9	82.81	0	16.93	50.58		5	88.28	1.00	10.67	37.40
	8+9	90.38	3.76	5.73	54.06		5	93.59	0.57	5.68	60.10
	3+4	98.76	0.24	1	48.69		4	93.13	0.24	6.56	58.60
	5	97.68	0.44	1.88	48.77		4	94.38	0.24	5.24	57.30
	8+9	95.60	2.84	1.56	55.31		4	69.01	1.22	29.76	54.10
	10	95.46	2.6	1.95	54.76		4	91.88	0.28	7.81	63.90
	3+4	96.48	1.16	2.36	50.17		5	72.81	0.75	27.06	60.70
	5	92.25	2.14	5.61	53.20		5	90.18	0.40	9.39	61.20
	10	95.66	2.02	2.32	53.06		5	87.31	0.49	12.18	48.00
	3+4	96.29	1.52	2.19	55.04		5	93.41	0.54	4.25	47.90
	5	94.17	1.03	4.79	58.48		5	93.71	0.61	2.98	70.10
	8+9	89.50	2.63	7.87	56.34		5	68.97	1.05	29.03	69.90
	3	96.20	0.94	2.87	50.65		5	87.15	0.63	10.26	69.10
	5	97.80	1.1	1.09	53.41		11	73.90	1.09	24.14	68.60
	3	93.52	1.08	5.04	42.57		5	86.53	1.09	12.15	68.80
	4	94.42	1.73	3.84	42.26		3	91.74	0.69	4.73	35.00
	5	79.13	4.78	16.09	44.99		5	90.69	0.58	5.86	33.50
	8+9	94.89	3.73	1.38	48.72		11	89.71	1.09	6.30	34.10
	3	81.96	2.66	15.38	56.20		4	95.57	1.20	2.59	35.90
	4	89.99	4.67	5.34	58.01		4	95.84	1.45	2.03	38.80
	5	87.61	4.16	8.23	58.74		4	94.24	2.00	3.50	37.40
	8+9	91.68	5.86	2.39	46.14		4	79.05	2.65	17.27	37.40
石楼	3	95.92	1.31	2.77	41.45	累计数据点: 111					

表 2　鄂尔多斯盆地东缘煤层气甲烷碳同位素实测结果

样品分区	采样深度(m)	甲烷含量(%)	甲烷碳同位素 $\delta^{13}C_1$(‰, PDB)	样品数量
保德	567.07~913.17	69.77~83.55[a)] 75.45	−55.52~−46.20 −52.56	6
兴县	787.30~874.63	74.52~87.35 81.07	−48.70~−41.70 −45.60	12
临县	423.53~567.40	66.96~80.95 73.49	−67.20~−55.41 −59.52	8
三交	379.00~469.50	90.71~98.39 95.41	/	4
柳林	486.43~1107.89	79.13~98.76 92.85	−62.08~−42.26 −52.82	25
石楼	543.42~825.55	95.92~97.85 96.96	−43.82~−36.19 −40.62	5
大宁	491.00~558.23	64.53~82.95 73.74	/	2
吉县	1023.17~1201.35	96.69~98.88 97.79	−45.15~−38.60 −41.14	4
韩城	343.00~1215.05	68.97~97.54 89.16	−70.10~−33.50 −44.51	45

a) 最小值~最大值 / 平均值

因素. 保德、兴县地区呈现较好的线性关系, 煤层气形成和后期演化相对稳定, 存在“垂向分带”(图 2).

3.2　与煤阶的关系

不同煤阶的煤层气甲烷碳同位素的分布范围不同, 其中镜质组最大反射率 0.5%处平均值为−62‰, 2.0%处为−43‰, 4.0%处为−36‰(秦勇等, 2000). 鄂尔多斯盆地东缘不同煤阶的碳同位素分布基本符合上述趋势, 但部分地区存在明显偏轻的碳同位素. 其中韩城最大镜质组反射率在 2.0%附近, 其碳同位素分布基本呈现随反射率增大而加重的趋势, 但不可忽视有少量碳同位素明显过轻, 在−60‰左右分布; 柳林碳同位素基本稳定, 总体偏轻; 保德、兴县地区数据点较少, 与反射率关系不明显, 同时煤的反射率比较低, 碳同位素变轻现象不明显(图 3).

3.3　煤层气成因地质差异

采用煤层气成因判别的经典图版 Whiticar 图版(Whiticar, 1999), 将韩城、柳林、保德和兴县的数据在该图版上成图, 发现热成因气在三个地区均占主导地位, 但在柳林地区显示有相当数量的甲烷碳同位素明显变轻, 有疑似次生生物气的生成, 韩城地区存在少量变轻的碳同位素, 保德和兴县地区则相对较少(图 4).

该图版显示了变轻甲烷碳同位素的存在, 结合

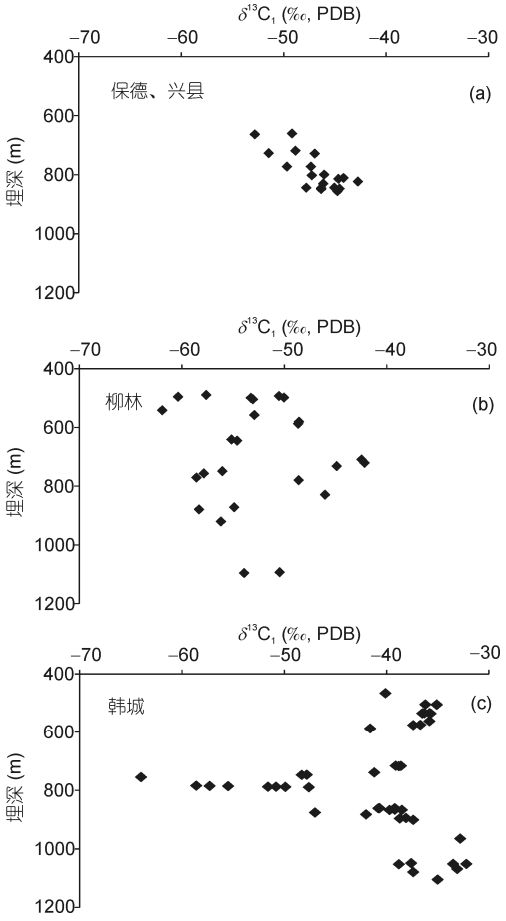

图 2　鄂尔多斯盆地东缘典型地区甲烷碳同位素与埋深关系图

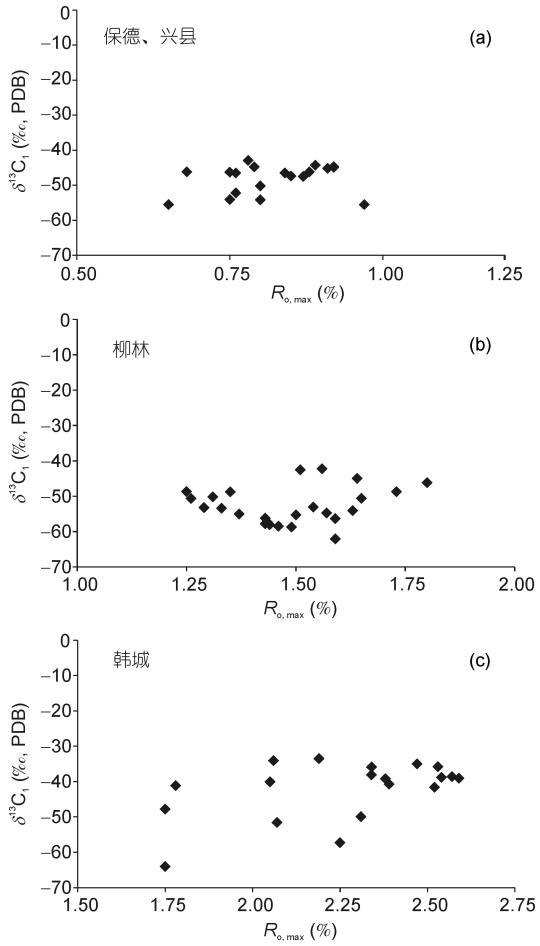

图 3　鄂尔多斯盆地东缘典型地区甲烷碳同位素与煤阶关系图

鄂尔多斯盆地东缘实际情况，认为其仍存在一些问题. 一是图版上显示三个地区的煤主要在Ⅱ型干酪根的范围内，而研究区上石炭统的煤几乎全为腐殖煤；二是秦勇等(2000)通过生物气模拟实验结果解释，长焰煤能生成生物气，但同样实验条件下瘦煤中却没有生物气的产出，因此在长焰煤等较低煤阶中，后期生物化学作用可能是使碳同位素变轻的原因，但中、高煤化度的烟煤和无烟煤中的有机质已失去生物活性，可能不存在次生生物气生成的物质条件(王爱宽等，2010)，该区韩城和柳林煤演化程度均较高，不能解释为次生生物成因气的存在. 结合鄂尔多斯盆地东缘煤层气的形成演化和成藏条件，分别给出了造成这三个典型地区碳同位素变轻的解释.

韩城和柳林煤的变质程度处于中-高级烟煤阶段，微生物对有机质的降解能力很弱，次生生物气不易形成，对甲烷碳同位素的影响有限；CH_4 与 CO_2 之间的碳同位素交换反应造成的煤层气甲烷碳同位素变轻的影响也基本不存在，因为该反应要求具有较高浓度的 CH_4 与 CO_2 和较低的温度条件，在煤阶较高的条件下，CO_2 的含量大幅减少，且 CO_2 极易溶解在水中或扩散丢失. 但是在煤层气形成后的早期，因为此时煤层气中 CH_4 和 CO_2 含量均较高，此反应会发生影响(戴金星等，1986；宋岩等，2012).

鄂尔多斯盆地东缘供煤层气勘探的主力煤层有2~3 层，分布在海陆交互相沉积的太原组和陆相、海

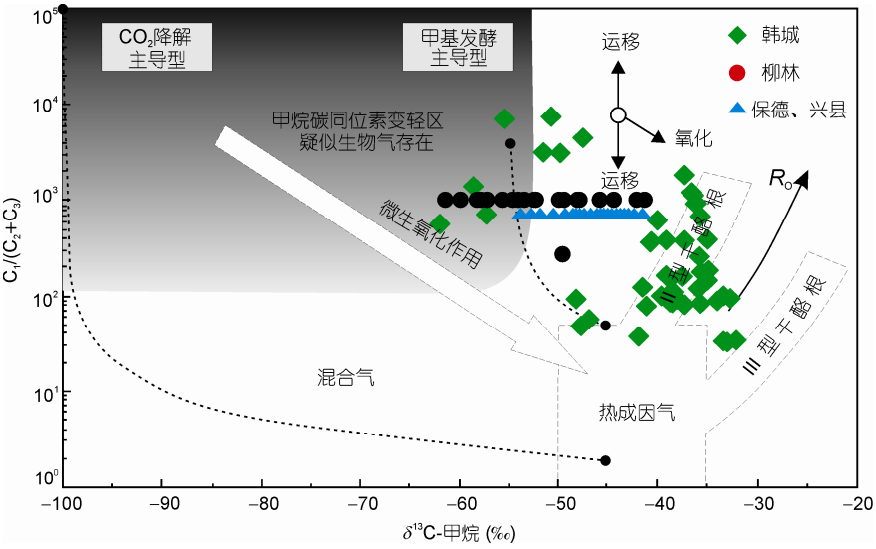

图 4　煤层气成因鉴别图

据 Whiticar(1999)修改

陆过渡相沉积的山西组(陈钟惠等, 1989). 煤变质作用类型以深成变质作用为主, 主要发生在三叠纪末构造抬升之前的最大埋深阶段, 是本区的主生气时期, 但在临县地区由于燕山期岩浆活动, 使煤层在深成变质作用的基础上叠加了岩浆热变质作用(汤达祯, 1998). 煤系沉积后的构造活动对煤层气的保存产生较大影响, 东部边界构造变形较强, 近南北向的压性断裂和褶皱构造发育, 向盆地内部褶皱逐渐减弱, 同时, 煤层在东部出露, 为水动力的活跃提供了条件. 韩城地区隶属渭北隆起, 构造变形更为复杂, 且存在较大的区域内差异, 也造成了其存在甲烷碳同位素的高低分异. 鄂尔多斯盆地东缘不同煤层气区块的地质因素差异造成了甲烷碳同位素分馏过程和分馏效果不同.

柳林位于晋西挠折带中部, 受柳林鼻状构造的影响, 煤层在东部出露, 地表水通过太原组煤层上部的灰岩沿单斜向地层深部渗透, 煤层处在较强的水动力条件下. 经过水淋滤后的煤层气碳同位素会明显变轻, 水溶作用使 CH_4 碳同位素产生分馏, 更容易把 $^{13}CH_4$ 溶解带走(秦胜飞等, 2005, 2006), 从而造成甲烷碳同位素普遍偏轻.

韩城地区煤层的地下水类型基本上为 $CaCl_2$ 型, 水文处于滞留区, 水动力弱, 水溶作用的影响也相对较轻. 追溯其演化历史, 在白垩纪晚期, 燕山运动使韩城象山矿地区的地层抬升并遭受剥蚀, 引起煤层埋藏变浅和上覆地层压力降低, 导致煤层气发生解吸, 在此过程中 $^{13}CH_4$ 优先吸附、滞后解吸. 从解吸分馏的角度来看, $^{12}CH_4$ 富集区一般为煤层气逸散严重的地区, 含气量相对较低. 韩城煤阶相对较高吸附空间大, 也意味着吸附下部煤层运移上来的 $^{12}CH_4$ 更多, 吸附的气体越不容易从煤体表面解吸, 后期开发过程中能够解吸出来的 $^{12}CH_4$ 的相对含量也就越多, 解吸的 $^{13}CH_4$ 的相对含量越少, 分馏效果也就会较低煤阶更明显, 从而造成韩城象山矿附近甲烷碳同位素明显变轻.

针对解吸分馏的机理和原因, 诸多学者进行过研究. Teichmuller(1970)年提出根据煤层深度将其分为原生带和解吸带, 其对德国鲁尔和萨尔煤田的研究表明解吸带的煤层甲烷碳同位素较轻. 国内学者戴金星等(1986)、秦勇等(2000)、胡国艺等(2001)采用该理论来表述了华北、沁水盆地等地区碳同位素变轻的解释. 秦胜飞等(2006)认为该理论存在两个问题, 一是如果解吸带甲烷变轻是由于 ^{12}C 优先解吸所致, 那么煤层中残留的甲烷会变重; 二是如果解吸带中甲烷碳同位素变轻是由于原生带的 ^{12}C 解吸后往上扩散至解吸带, 然后再被解吸带的煤层吸附, 使解吸带中的甲烷碳同位素变轻的话, 那么原生带中的甲烷碳同位素应变重, 而且重于相同成熟度的常规煤成气, 这与国内各主要煤层气盆地煤层甲烷碳同位素总体偏轻的事实不符. 但韩城象山地区地层抬升明显, 上部煤层甲烷解吸逸散多, 后期埋藏过程中, 下部煤层中的甲烷解吸扩散到上部煤层再重新吸附成藏, 即原理论中“解吸带”的甲烷仍然是会变轻的. 韩城地区主要为贫煤-无烟煤, 在排除其他因素之后, 认为该理论在解释韩城地区煤层甲烷碳同位素变轻的成因上具有很好的吻合性.

保德、兴县地区的煤层气甲烷碳同位素在图版上并没有呈现直接的生物气证据, 同时通过碳同位素与埋深的关系表明, 其存在甲烷同位素“垂向分带”现象, 综合认为保德、兴县地区以热成因气为主. 同时, 勘探开发实践表明, 保德地区煤层气井产水量也较高, 与柳林地区有所类似, 认为较强的水动力条件也会在一定程度上造成保德地区煤层气甲烷碳同位素变轻.

4 煤层气甲烷碳同位素分布地质控制机理

柳林地区较强的水动力条件引起的水动力分馏和韩城地区构造演化过程引起的解吸分馏是分别造成了两地煤层气甲烷碳同位素变轻的主要因素. 临县地区煤层气的碳同位素在–59‰左右, 碳同位素明显偏轻, 结合其地质环境和煤层气开发实践认为, 存在两种因素. 一是紫金山岩浆活动时造成的快速升温导致煤中富 ^{12}C 的烷基侧链的降解/裂解效率增大, 烃压随之增高, 扩散速率也随之增大, 降解/裂解速率增大与扩散速率增高两方面作用使甲烷碳同位素随“煤阶”增高而变轻, 也已由秦勇等(2000)通过对淮北煤层气组成的分析和热模拟实验证明; 二是其太原组相对活跃的水动力条件也会在一定程度上发挥影响.

在保德及其以北地区, 随着煤阶的降低, 次生生物气的产生会逐渐明显. 研究区的山西组和太原组煤层分别形成于淡水环境和咸水环境中, 分别有利于甲基发酵型和 CO_2 降解型次生生物气的生成(钱贻

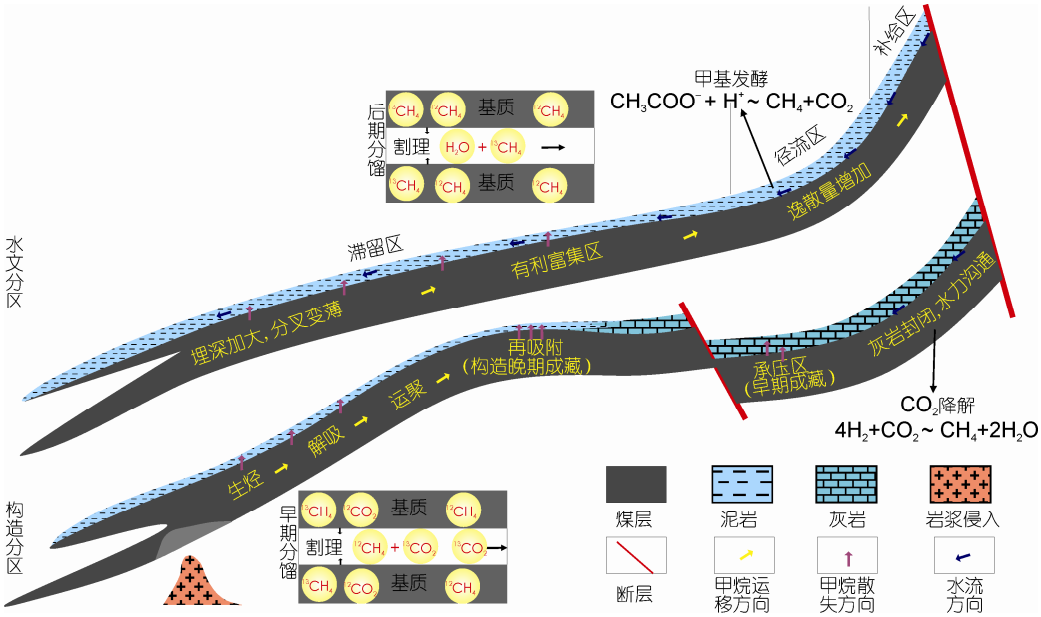

图 5　鄂尔多斯盆地东缘煤层气甲烷碳同位素分馏地质控制模式图

伯等, 1998; 陶明信等, 2005). 综合以上提出了适合于鄂尔多斯盆地东缘甲烷碳同位素分馏地质控制机理(图 5). 主要包含如下地质差异解释: (1) 次生生物气分馏, 对应于保德以北地区; (2) 水动力分馏, 对应于保德到柳林水动力活跃地区; (3) 岩浆接触变质分馏, 对应于临县等存在区域岩浆侵入, 引起快速增温生烃的地区; (4) 早期 CO_2 交换分馏, 存在于绝大多数地区, 现今影响不明显; (5) 构造抬升引起的吸附解吸分馏, 韩城部分地区较为典型, 易发生于煤阶较高地区.

5　结论

鄂尔多斯盆地东缘煤层气井排采气中甲烷含量普遍在 80%以上, 中部和南部的三交、柳林、石楼、吉县地区含量最高, 均在 93%以上, 北部煤阶较低的保德、兴县、临县地区含量相对较低在 75%左右, 南部构造相对活跃的大宁和韩城地区存在含量低值区. 总体呈现北部低、中部和南部高; 浅部低、深部高; 煤阶低值区和构造活跃区, 含量低的特点.

研究区煤层气甲烷碳同位素在–70‰~–30‰分布, 其中–50‰~–40‰范围内所占比例最高, 区域上呈现中部轻、南北重的特点. 中部临县、柳林地区最轻, 在–55‰左右; 南部石楼、吉县比较重, 在–40‰左右; 韩城大部分地区偏重, 在–40‰左右, 但在部分地区存在较轻碳同位素, 可达–65‰.

研究区煤层气甲烷碳同位素由北向南宏观上随煤阶升高, 碳同位素变重. 但受各煤层气勘探开发区特定的地质因素影响, 大部分地区的煤层气甲烷碳同位素在一定程度上变轻. 其中北部低煤阶次生生物气的生成, 中部水动力活跃地区引起水动力分馏, 南部煤阶较高地区构造演化过程中抬升造成的解吸分馏, 局部岩浆运动造成的煤体快速增温生烃分馏是造成该区煤层气甲烷碳同位素变轻的四种主要因素.

参考文献

陈钟惠, 张年茂, 张守良, 等. 1989. 鄂尔多斯盆地东缘晚古生代含煤岩系沉积体系和聚煤作用的时空演化. 地球科学——中国地质大学学报, 14: 357–366

戴金星, 戚厚发, 宋岩, 等. 1986. 我国煤层气组分、碳同位素类型及其成因和意义. 中国科学: 化学, 16: 1317–1326

郭英海, 刘焕杰, 权彪, 等. 1998. 鄂尔多斯地区晚古生代沉积体系及古地理演化. 沉积学报, 16: 44–51

胡国艺, 刘顺生, 李景明, 等. 2001. 沁水盆地晋城地区煤层气成因. 石油与天然气地质, 22: 319–321

接铭训. 2010. 鄂尔多斯盆地东缘煤层气勘探开发前景. 天然气工业, 30: 1–6
李勇, 汤达祯, 许浩, 等. 2012. 鄂尔多斯盆地东缘“翘板”支点影响下的含煤地层发育特征. 煤炭学报, 37: 378–382
钱贻伯, 连莉文, 陈文正, 等. 1998. 生物气形成过程 CH_4 生物气形成碳同位素变轻规律的研究. 石油学报, 19: 29–33
秦胜飞, 宋岩, 唐修义, 等. 2005. 流动的地下水对煤层含气性的破坏机理. 科学通报, 50: 99–104
秦胜飞, 唐修义, 宋岩, 等. 2006. 煤层甲烷碳同位素分布特征及分馏机理. 中国科学 D 辑: 地球科学, 36: 1092–1097
秦勇. 2003. 中国煤层气地质研究进展与述评. 高校地质学报, 9: 339–357
秦勇, 唐修义, 叶建平, 等. 2000. 中国煤层甲烷稳定碳同位素分布及成因探讨. 中国矿业大学学报, 29: 113–119
宋岩, 柳少波, 洪峰, 等. 2012. 中国煤层气地球化学特征及成因. 石油学报, 33: 99–106
汤达祯. 1998. 煤变质演化与煤层气生成条件. 北京: 地质出版社. 91
陶明信, 王万春, 解光新, 等. 2005. 中国部分煤田发现的次生生物成因煤层气. 科学通报, 50: 14–18
田文广, 汤达祯, 王志丽, 等. 2012. 鄂尔多斯盆地东北缘保德地区煤层气成因. 高校地质学报, 18: 479–484
王爱宽, 秦勇, 林玉成, 等. 2010. 褐煤中天然产甲烷菌富集培养与生物气产出模拟. 高校地质学报, 16: 80–85
赵庆波, 孙粉锦, 李五忠. 2011. 煤层气勘探开发地质理论与实践. 北京: 石油工业出版社. 337
Rice D D. 1993. Composition and origins of coalbed gas. In: Law B E, Rice D D, eds. Hydrocarbons from Coal: AAPG Studies in Geology Series 38. Tulsa: The American Association of Petroleum Geologists. 159–183
Rightmire C T. 1984. Coalbed methane resources. In: Rightmire C T, Eddy G E, Kirr J N, eds. Coalbed Methane Resources of the United States: AAPG Studies in Geology Series 17. Tulsa: The American Association of Petroleum Geologists. 1–14
Scott A R, Kaiser W R, Ayers W B, et al. 1994. Thermogenic and secondary biogenic gases, San Juan Basin, Colorado and New Mexico: Implications for coalbed gas producibility. AAPG Bull, 78: 1186–1209
Smith J W, Pallasser R J. 1996. Microbial origin of Australian coalbed methane. AAPG Bull, 80: 891–897
Teichmuller R U A. 1970. Das Kohlenstoff-Lsotopen-Verhaltnis im Methan Von Grubengas und Flozgas und Seino Abhangigkeit Von Grubengas und Flozgas und Seine Abhangigkeit Von don den Geologischen Verhaltnissen. 9th Geol Mitt, 9: 181–206
Whiticar M J. 1999. Carbon and hydrogen isotope systematics of bacterial formation and oxidation of methane. Chem Geol, 161: 291–314