

doi:10.3799/dqkx.2017.520

成煤母质形成环境对热成因煤层气氢碳同位素的影响： 不同气候环境的草本沼泽泥炭热模拟实验

段毅^{1,3,4}, 段明辰², 吴应忠^{1,4}, 姚泾利⁵, 罗安湘⁵, 邓秀芹⁵, 齐亚林⁵

1. 甘肃省油气资源研究重点实验室/中国科学院油气资源研究重点实验室/中国科学院西北生态环境资源研究院, 甘肃兰州 730000

2. 甘肃政法学院经济管理学院, 甘肃兰州 730070

3. 长安大学地球科学与资源学院, 陕西西安 710054

4. 中国科学院大学地球科学学院, 北京 100049

5. 中国石油长庆油田分公司勘探开发研究院, 陕西西安 710018

摘要: 煤层气的成因研究可以为煤层气勘探与开发提供科学依据, 然而, 煤层气的氢碳同位素组成受多种因素的影响, 以前较多的研究是成气母质性质和成熟度对煤层气氢碳同位素的影响, 对于成煤物质形成的气候环境对热解煤层气同位素的影响尚不清楚。热解模拟了高纬度寒冷干旱和低纬度热带湿润环境的草本泥炭, 对热解烃类气体的氢碳同位素组成及其差异性进行了研究。研究结果表明: 与低纬度热带湿润环境中形成的草本泥炭相比较, 高纬度寒冷干旱环境的草本泥炭热解甲烷、乙烷和丙烷具有轻的氢同位素组成和重的碳同位素组成, 并且从泥炭连续热解至 R_0 。分别为 2.5%、3.5% 和 5.5% 时, 甲烷、乙烷和丙烷 δD 值分别平均降低 $-17\% \sim -10\%$ 、 $-32\% \sim -28\%$ 和 $-25\% \sim -17\%$, 甲烷和乙烷 $\delta^{13}C$ 值分别平均升高 $2.9\% \sim 3.6\%$ 和 $0.9\% \sim 1.1\%$ 。认为这种同位素差异起因于气候环境对形成泥炭的植物氢碳同位素组成的影响, 建立了高纬度寒冷干旱和低纬度热带湿润环境中形成的成煤有机质热解烃类气体氢碳同位素组成与 R_0 之间的关系式, 同时也建立了烃类气体的碳和氢同位素之间的关系式。这些研究成果为不同气候环境下形成的成煤有机质生成的煤层气成因研究提供了科学依据。

关键词: 泥炭; 模拟实验; 气体产物; 氢碳同位素; 气候环境; 煤层气成因; 地球化学。

中图分类号: P593

文章编号: 1000-2383(2017)09-1541-08

收稿日期: 2016-12-28

Impact of Formation Environment of Coal-Forming Material on Hydrogen and Carbon Isotopic Compositions of Thermogenic Coalbed Gas: Thermal Simulation of Herbaceous Marsh Peats Formed under Different Climatic Environments

Duan Yi^{1,3,4}, Duan Mingchen², Wu Yingzhong^{1,4}, Yao Jingli⁵, Luo Anxiang⁵, Deng Xiuqin⁵, Qi Yalin⁵

1. Gansu Provincial Key Laboratory of Petroleum Resources/Key Laboratory of Petroleum Resources Research, Chinese Academy of Sciences/Northwest Institute of Eco-Environment and Resources, Chinese Academy of Sciences, Lanzhou 730000, China

2. School of Economics and Management, Gansu Institute of Political Science and Law, Lanzhou 730070, China

3. School of Earth Science & Resources, Chang'an University, Xi'an 710054, China

4. School of Earth Science, University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China

5. Exploration and Development Institute of Changqing Oilfield Company, CNPC, Xi'an 710018, China

Abstract: The study of coalbed methane (CBM) can provide scientific basis for coalbed methane exploration and development. However, the hydrogen and carbon isotopic compositions of CBM are affected by many factors. Previous studies were mainly concerned with the influence of the properties of gas-forming parent material and maturity on the hydrogen and carbon isotopic

基金项目: 国家自然科学基金 (Nos.41472121, 41772108, 41272125)。

作者简介: 段毅(1956-), 男, 研究员, 主要从事油气地球化学、石油地质学和有机地球化学等方面的研究和教学工作。

ORCID:0000-0003-3925-5281. E-mail: duany@lzb.ac.cn

引用格式: 段毅, 段明辰, 吴应忠, 等. 2017. 成煤母质形成环境对热成因煤层气氢碳同位素的影响: 不同气候环境的草本沼泽泥炭热模拟实验. 地球科学, 42(9): 1541-1548.

compositions of CBM. The influence of formation environment of gas-forming parent material on the isotopic compositions of thermogenic CBM is still unclear. Closed-system isothermal pyrolysis experiments were performed on herbaceous marsh peats derived from high latitude area with cold and dry climates and low latitude area with tropical moist climate. The hydrogen and carbon isotopic compositions and their differences of the hydrocarbon gases (methane, ethane and propane) generated during the pyrolysis of the samples were studied. The results show that the hydrocarbon gases generated from the herbaceous swamp peat in high latitude area had lighter hydrogen and heavier carbon isotopic compositions compared with those in low latitude area. At pyrolysis intervals from peat to vitrinite reflectance values (R_o) of 2.5%, 3.5% and 5.5%, the differences in the average δD values between the samples in high latitude and low latitude areas were from -17‰ to -10‰ for methane, -32‰ to -28‰ for ethane and -25‰ to -17‰ for propane, and in the average $\delta^{13}C$ values between them were 2.9‰ to 3.6‰ for methane and 0.9‰ to 1.1‰ for ethane, respectively. The differences should result from the influence of climatic environment on hydrogen and carbon isotopic compositions of coal-forming original material. The relationship between R_o values and the hydrogen and carbon isotopic compositions of gases generated by coal-forming organic matter under different climatic environments as well as the hydrogen or carbon isotopic relationships of methane and ethane were established. These results may provide a basis for studying on the genesis of coalbed gas formed by coal-forming material under different climatic environments.

Key words: peat; simulation experiment; gas product; hydrogen and carbon isotopes; climatic environment; coalbed gas origin; geochemistry.

0 引言

煤层气是一种非常规天然气,这种天然气来自煤层并且赋存于煤层之中(Clayton, 1998).煤层气的成因研究可以为煤层气勘探与开发提供科学依据(Kotarba, 1990; Liu *et al.*, 1997; Clayton, 1998; Kotarba and Rice, 2001; 秦勇等, 2000).在煤层气的成因研究中,氢碳同位素法是有效地球化学方法之一(Rice, 1993; Song *et al.*, 2012; 宋岩等, 2012; Rao *et al.*, 2014; 张亮等, 2016).然而,煤层气的氢碳同位素组成受多种因素的影响,以前较多的研究是成气母质性质和成熟度对煤层气氢碳同位素的影响(戴金星等, 1986; Berner and Faber, 1988; Liu *et al.*, 2007; Duan *et al.*, 2011, 2016; 谷穗等, 2015; 汪岗等, 2016),对于成煤物质形成的气候环境对热解煤层气同位素的影响尚不清楚.

通过不同气候环境下泥炭的热模拟实验,研究热解烃类气体氢碳同位素的组成和演化特征,确定不同气候环境下形成的成煤物质热解气体氢碳同位素组成之间的差异性,就可以为认识不同气候环境下成煤物质形成的煤层气同位素地球化学特征提供资料.为了这一设想的尝试,笔者选择具有不同气候

环境因素的草本沼泽泥炭进行热模拟实验,研究了成煤物质形成的气候环境对热解气体氢碳同位素组成的影响,以及不同气候环境下形成的成煤物质生成的气体氢碳同位素的演化规律.研究成果可以为煤层气成因研究提供依据.

1 研究样品及实验方法

样品采自新疆维吾尔自治区阿勒泰哈拉沙孜草本沼泽($48^{\circ}06'59''N, 88^{\circ}21'52''E$),以及广东省湛江屋山村草本沼泽($21^{\circ}13'48''N, 110^{\circ}22'32''E$),为现代泥炭剖面样品,深度为 1.5~3.0 m,均为草本沼泽泥炭.新疆阿勒泰和广东省湛江泥炭样品有机碳含量类似,分别为 32.3%和 34.5%;它们形成的气候环境差别显著,分别为寒冷干旱和热带湿润气候(表 1).

样品的模拟方法和烃类气体氢、碳同位素的测定方法,与以前的报道相类似(Duan *et al.*, 2011, 2016; 段毅等, 2013).简言之,研究的所有样品都粉碎到 60 目,粉碎的样品放入热反应釜中,在马福炉中将模拟温度从 250 °C 升到 650 °C,以 50 °C 为一温阶进行封闭体系热模拟.在气相色谱—高温热转变—同位素比值质谱仪(GC-TC-IRMS)上对热解气

表 1 样品参数

Table 1 Parameters of the samples

地区	样号	样品	海拔(m)	气候	TOC(%)	雨水 δD 值(‰)	年均降雨量(mm)	年均蒸发量(mm)	年均气温(°C)
阿尔泰	Alt	草本泥炭	2 560	寒冷干旱	32.3	-100	350~600	1 816	-3.8~1.8
湛江	Zwx-3	草本泥炭	28	热带湿润	34.5	-53	1 393~1 798	1 700~2 200	23.4

体进行了氢、碳同位素测定.热解气体氢碳同位素分析标准偏差分别小于 3‰和 0.3‰.热解残留产物的镜质体 R_o 值测定与分析标准偏差与以前报道的相类似(Duan *et al.*, 2011, 2016; 段毅等, 2013).

2 结果与讨论

2.1 形成气候环境不同的草本泥炭热解烃类气体的氢同位素组成与演化

为了认识煤层气形成过程中气体氢同位素组成的影响因素,笔者对泥炭形成环境差别显著的新疆阿勒泰哈拉沙孜草本泥炭和广东湛江屋山村草本泥炭进行了热模拟实验研究.如图 1 所示,阿勒泰哈拉沙孜泥炭热解甲烷、乙烷和丙烷的 δD 值分别分布在 $-363‰ \sim -122‰$ 、 $-291‰ \sim -104‰$ 和 $-284‰ \sim -153‰$,平均值分别为 $-258‰$ 、 $-226‰$ 和 $-229‰$,甲烷氢同位素组成比乙烷的平均轻 32‰.湛江屋山村泥炭热解甲烷、乙烷和丙烷的 δD 值分别为 $-359‰ \sim -114‰$ 、 $-249‰ \sim -83‰$ 和 $-278‰ \sim -97‰$,平均值分别为 $-241‰$ 、 $-194‰$ 和 $-204‰$,甲烷氢同位素组成比乙烷的平均轻 47‰.随着模拟温度升高,生成的甲烷 δD 值增大;相同温度点生成的甲烷和乙烷的 δD 值表现为 $\delta D_{CH_4} < \delta D_{C_2H_6}$.

图 2a 和 2b 分别为两种环境的泥炭热解甲烷和乙烷氢同位素组成与模拟残余固体样品中 R_o 值相关图.高纬度寒冷干旱和低纬度热带湿润环境的泥炭热解甲烷氢同位素组成与 R_o 值的关系式分别

为: $\delta D_{CH_4} = 51.0R_o - 411.7$ 和 $\delta D_{CH_4} = 54.0R_o - 402.5$;乙烷氢同位素组成与 R_o 值的关系式分别为: $\delta D_{C_2H_6} = 55.3R_o - 341.6$ 和 $\delta D_{C_2H_6} = 52.9R_o - 308.5$.样品具有很好的相关性, R^2 为 0.91~0.97.高纬度寒冷干旱和低纬度热带湿润环境的泥炭热解甲烷、乙烷氢同位素组成热演化具有不同的数学表达式,这为认识沉积盆地煤层气甲烷的成因研究提供了氢同位素依据(Stahl and Carey, 1975; 戴金星和戚厚发, 1989).

2.2 形成气候环境不同的草本泥炭热解烃类气体碳同位素组成与演化

图 3a 和 3b 为两种环境的草本泥炭热解甲烷和乙烷的碳同位素组成随热模拟演化的变化图.阿勒泰哈拉沙孜泥炭热解甲烷、乙烷和丙烷碳同位素组成范围分别为 $-43.7‰ \sim -29.4‰$ 、 $-36.7‰ \sim -24.8‰$ 和 $-36.8‰ \sim -19.0‰$,平均值分布分别为 $-36.2‰$ 、 $-30.1‰$ 和 $-28.2‰$,甲烷碳同位素组成平均值比乙烷的轻 6.1‰.湛江屋山村泥炭热解甲烷、乙烷和丙烷的碳同位素组成分别为 $-48.0‰ \sim -31.7‰$ 、 $-34.9‰ \sim -26.1‰$ 和 $-33.5‰ \sim -15.9‰$,平均值分别为 $-39.6‰$ 、 $-31.2‰$ 和 $-28.0‰$,甲烷碳同位素组成平均值比乙烷轻 8.4‰.随着热模拟演化升高,甲烷、乙烷和丙烷 $\delta^{13}C$ 值增大;相同热模拟演化点产生的甲烷和乙烷 $\delta^{13}C$ 值呈现为 $\delta^{13}C_{CH_4} < \delta^{13}C_{C_2H_6}$.

由图 3a 和 3b 可知,两种环境的草本泥炭热解甲烷和乙烷的碳同位素组成与模拟残余固体样品中 R_o 值之间具有很好的相关性.高纬度寒冷干旱和低

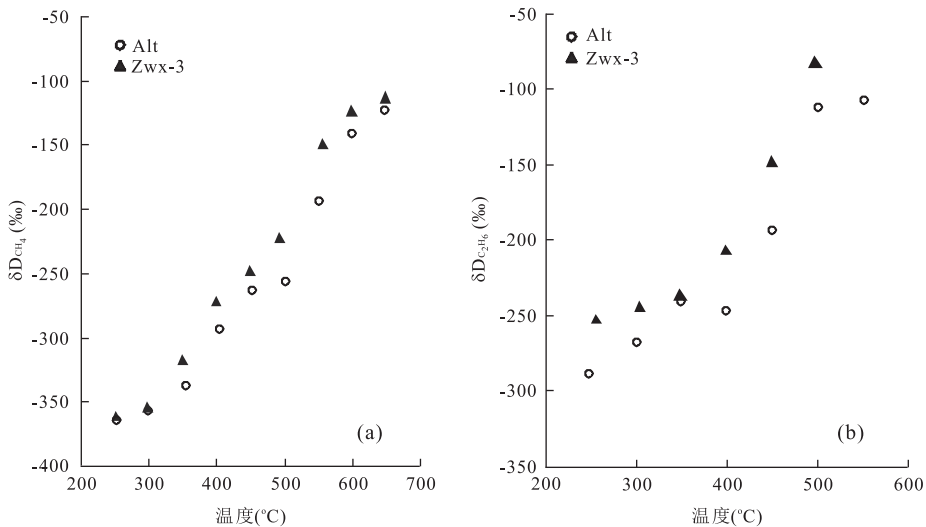
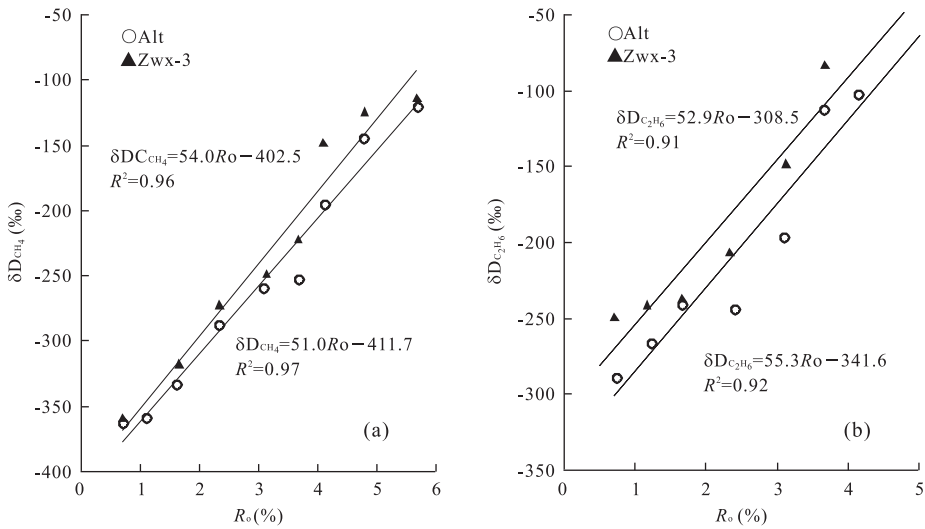
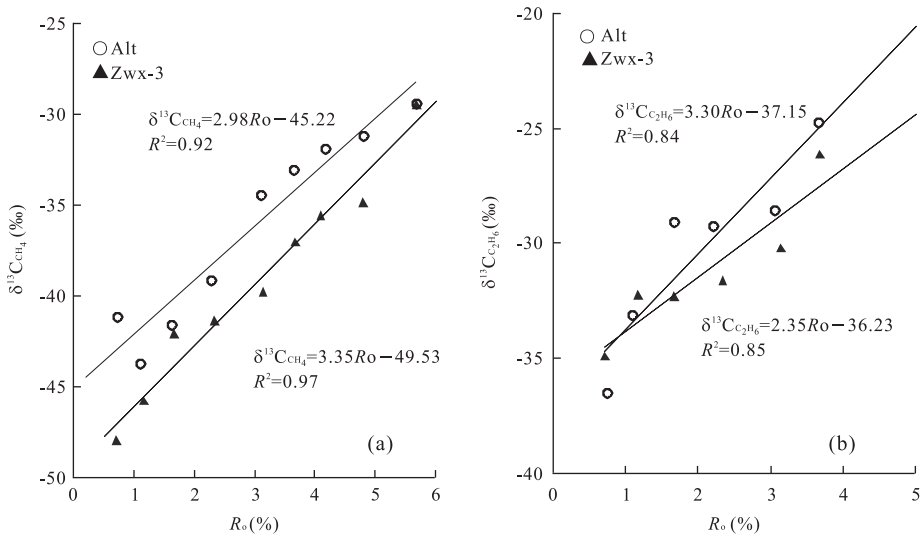


图 1 甲烷 (a)、乙烷 (b) δD 值与热解温度的关系

Fig.1 δD of CH_4 (a) and C_2H_6 (b) vs. pyrolysis temperature

图 2 甲烷(a)、乙烷(b) δD 值与 R_o 的关系Fig.2 δD of CH_4 (a) and C_2H_6 (b) vs. R_o .图 3 甲烷(a)、乙烷(b) $\delta^{13}C$ 值与 R_o 的关系Fig.3 $\delta^{13}C$ of CH_4 (a) and C_2H_6 (b) vs. R_o .

纬度热带湿润环境的泥炭热解甲烷碳同位素组成与 R_o 的关系式分别为： $\delta^{13}C_{CH_4} = 2.98R_o - 45.22$ 和 $\delta^{13}C_{CH_4} = 3.35R_o - 49.53$ ；乙烷碳同位素组成与 R_o 的关系式分别为： $\delta^{13}C_{C_2H_6} = 3.30R_o - 37.15$ 和 $\delta^{13}C_{C_2H_6} = 2.35R_o - 36.23$ ； R^2 为 0.84~0.97。高纬度寒冷干旱和低纬度热带湿润环境的泥炭热解甲烷和乙烷碳同位素组成热演化具有不同的数学表达式，这为认识沉积盆地煤层气甲烷的成因研究提供了碳同位素依据。

2.3 成煤母质形成的气候环境对热成因煤层气氢碳同位素的影响

以前虽然对植物中脂类氢碳同位素的气候环境

影响已有许多研究(Chikaraishi *et al.*, 2004; Bi *et al.*, 2005; Sessions, 2006; Chikaraishi and Naraoka, 2007; Pedentchouk *et al.*, 2008; Duan and Wu, 2009; 段毅等, 2011), 但是对于来自植物的成煤母质形成的气候环境对热成因煤层气氢碳同位素的影响都是不清楚的。笔者对具有不同气候环境的泥炭进行热模拟实验发现, 在热模拟过程中, 与湛江屋山村草本泥炭相比较, 阿勒泰哈拉沙孜草本泥炭热解的烃类气体具有轻的氢同位素组成(图 1, 2), 并且其甲烷、乙烷和丙烷分别平均轻 17‰、32‰和 25‰。已有研究表明, 植物生长地区的雨水中氢同位素特征影响了植物的氢同位素组成, 由于雨滴凝结时的温

表 2 不同演化阶段烃类气体平均氢同位素组成

Table 2 Average δD value of hydrocarbon gas generated from peats at different evolution stages

温度(°C)	R_o (%)	δD_{CH_4} (‰)	$\delta D_{C_2H_6}$ (‰)	$\delta D_{C_3H_8}$ (‰)	δD_{CH_4} (‰)	$\delta D_{C_2H_6}$ (‰)	$\delta D_{C_3H_8}$ (‰)	Δ_{CH_4} (‰)	$\Delta_{C_2H_6}$ (‰)	$\Delta_{C_3H_8}$ (‰)
		Alt	Alt	Alt	Zwx-3	Zwx-3	Zwx-3	Alt-Zwx-3	Alt-Zwx-3	Alt-Zwx-3
250~400	<2.5	-337.1	-261.7	-248.4	-326.8	-233.4	-231.2	-10	-28	-17
250~500	<3.5	-310.4	-225.7	-229.3	-297.9	-194.0	-204.4	-13	-32	-25
250~650	<5.5	-257.9	-225.7	-229.3	-241.4	-194.0	-204.4	-17	-32	-25

表 3 不同演化阶段烃类气体平均碳同位素组成

Table 3 Average $\delta^{13}C$ value of hydrocarbon gas generated from peats at different evolution stages

温度(°C)	R_o (%)	$\delta^{13}C_{CH_4}$ (‰)	$\delta^{13}C_{C_2H_6}$ (‰)	$\delta^{13}C_{C_3H_8}$ (‰)	$\delta^{13}C_{CH_4}$ (‰)	$\delta^{13}C_{C_2H_6}$ (‰)	$\delta^{13}C_{C_3H_8}$ (‰)	Δ_{CH_4} (‰)	$\Delta_{C_2H_6}$ (‰)
		Alt	Alt	Alt	Zwx-3	Zwx-3	Zwx-3	Alt-Zwx-3	Alt-Zwx-3
250~400	<2.5	-41.4	-31.9	-32.6	-44.3	-32.8	-31.0	2.9	0.9
250~500	<3.5	-38.8	-30.1	-28.2	-42.4	-31.2	-28.0	3.6	1.1
250~650	<5.5	-36.2	-30.1	-28.2	-39.6	-31.2	-28.0	3.4	1.1

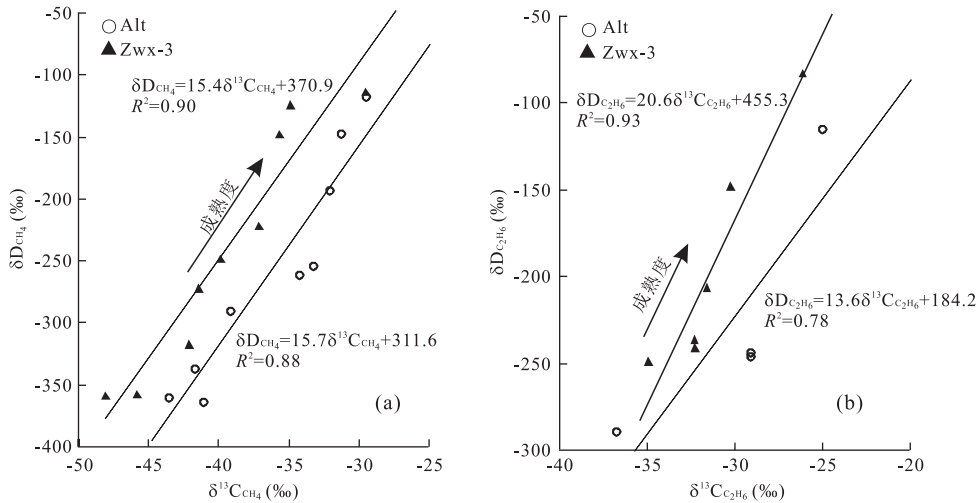


图 4 甲烷 δD 值与 $\delta^{13}C$ 值(a)和乙烷 δD 值与 $\delta^{13}C$ 值(b)的关系

Fig.4 δD vs. $\delta^{13}C$ of CH_4 (a) and δD vs. $\delta^{13}C$ of C_2H_6 (b)

度和水汽来源影响了雨水的氢同位素组成,因此雨水的同位素组成明显地受控于地理和气候因素(Dansgaard, 1964; Criss, 1999). Rozanski *et al.* (1993)和 Criss(1999)的研究结果表明,随纬度的增加,雨水富集轻氢同位素,具有纬度效应.Dansgaard (1964)研究结果指示了大气降水的平均 δD 值是随着气温的升高而增大,这是因为在降水过程中,气温可以影响雨水的氢同位素分馏系数.阿勒泰哈拉沙孜草本泥炭形成于高纬度寒冷干旱气候环境,该地区雨水 δD 值为 $-100‰$ (表 1).湛江屋山村草本泥炭形成于低纬度热带湿润气候环境,该地区雨水 δD 值为 $-53‰$ (表 1).因此,阿勒泰地区植物的氢同位素应该轻于湛江地区植物的氢同位素.由于泥炭继承了植物这种氢同位素组成特征,使阿勒泰哈拉沙孜泥炭热解产生的烃类气体的 δD 值较低,而湛江

屋山村泥炭热解产生的烃类气体的 δD 值较高.例如,阿勒泰哈拉沙孜草本泥炭与湛江屋山村草本泥炭热解甲烷、乙烷和丙烷 δD 值之间的最大差值分别为 $-46‰$ 、 $-46‰$ 和 $-56‰$ (图 1),它们的平均值与雨水 δD 值之间的 $-47‰$ 差值相类似.

对于模拟产生的烃类气体碳同位素来说,阿勒泰地区样品重于湛江地区样品,与烃类气体氢同位素相反.一般来说,植物的碳同位素组成受气候环境因素的影响.以前的研究表明,空气相对湿度愈大,植物的碳同位素组成愈轻,这是因为空气湿度调节植物叶片气孔的开合,从而湿度影响了植物的碳同位素组成(Francey and Farquhar, 1982).另外,气温对植物的碳同位素组成的影响也是明显的,在空气相对湿度相同情况下,气温升高会使植物的碳同位素组成变轻(Edwards *et al.*, 2000).阿勒泰地区

的湿度和温度都低于湛江地区,这样阿勒泰地区植物的碳同位素组成应该重于湛江地区植物的碳同位素组成.沼泽泥炭脂类继承了植物脂类这种碳同位素组成差异,从而使高纬度寒冷干旱和低纬度热带湿润环境的草本泥炭热解烃类气体,碳同位素组成反映了它们植物脂类的碳同位素差异.

为了认识高纬度寒冷干旱和低纬度热带湿润环境的草本泥炭热解的烃类气体同位素差异及其演化特征,笔者确定了泥炭不同演化阶段生成的烃类气体平均氢碳同位素组成和高纬度寒冷干旱和低纬度热带湿润环境的草本泥炭热解的烃类气体同位素之间的平均差值(Δ 值).如表 2 和 3 所示,从泥炭分别演化至 R_0 分别为 2.5%、3.5% 和 5.5% 时,热解烃类气体氢碳同位素组成都变重;高纬度寒冷干旱与低纬度热带湿润地区的草本泥炭热解甲烷氢同位素之间差值分别为 -10%、-13% 和 -17%,而碳同位素之间差值分别为 2.9‰、3.6‰ 和 3.4‰.由此可见,从泥炭煤化作用至不同成熟度阶段,始终存在着高纬度寒冷干旱与低纬度热带湿润环境的草本泥炭热解甲烷氢、碳同位素之间差异,即高纬度寒冷干旱草本泥炭热解甲烷氢同位素组成相对较轻,碳同位素组成相对较重.

由图 4 可见,甲烷和乙烷氢碳同位素组成都是随着成熟度增加而变重,并且高纬度寒冷干旱和低纬度热带湿润环境下形成的成煤有机质,其生成的烃类气体氢碳同位素组成沿着不同的途径演化.它们的甲烷氢与碳同位素组成关系式分别为: $\delta D_{CH_4} = 15.4\delta^{13}C_{CH_4} + 370.9$ 和 $\delta D_{CH_4} = 15.7\delta^{13}C_{CH_4} + 311.6$; 它们的乙烷氢与碳同位素组成关系式分别为: $\delta D_{C_2H_6} = 20.6\delta^{13}C_{C_2H_6} + 455.3$ 和 $\delta D_{C_2H_6} = 13.6\delta^{13}C_{C_2H_6} + 184.2$,并且样品具有很好的相关性, R^2 为 0.78~0.92.首次获得了高纬度寒冷干旱和低纬度热带湿润环境下形成的成煤有机质热解气体 $\delta^{13}C$ 与 δD 值之间的关系式,可以作为具有不同气候环境下形成的成煤物质热解煤层气成因及其演化程度的判识模式.

3 结论

目前,对于成煤母质形成的气候环境对热解煤层气同位素的影响尚不清楚.模拟实验研究结果表明,高纬度寒冷干旱环境中形成的成煤母质,其生成的烃类气体具有低的 δD 值和高的 $\delta^{13}C$ 值,并且这种差异存在于成煤物质演化的全过程.高纬度寒冷

干旱环境与低纬度热带湿润环境形成的草本泥炭,其热解甲烷、乙烷和丙烷 δD 值之间的最大差值分别为 -46‰、-46‰ 和 -56‰,它们的平均值与高纬度寒冷干旱和低纬度热带湿润地区雨水 δD 值之间的 -47‰ 差值相类似.气候环境影响了植物的氢碳同位素组成,不同气候环境中泥炭脂类继承了植物这种氢碳同位素组成差异,使其热解的烃类气体氢碳同位素组成不同.

本文确定了不同气候环境的成煤有机质从泥炭演化到不同成熟度阶段,其生成的烃类气体氢、碳同位素组成与差值,建立了不同气候环境的成煤物质热解烃类气体演化和成因的同位素判识模式.这些为不同气候环境下形成的热成因煤层气演化和成因提供了氢碳同位素示踪指标.

致谢:赵阳、曹喜喜和马兰花在样品采集及模拟实验中做了大量工作,深表感谢.感谢匿名审稿专家提出的宝贵意见!

References

- Berner, U., Faber, E., 1988. Maturity Related Mixing Model for Methane, Ethane and Propane, Based on Carbon Isotopes. *Organic Geochemistry*, 13(1-3): 67-72. doi: 10.1016/0146-6380(88)90026-5
- Bi, X. H., Sheng, G. Y., Liu, X. H., et al., 2005. Molecular and Carbon and Hydrogen Isotopic Composition of *n*-Alkanes in Plant Leaf Waxes. *Organic Geochemistry*, 36(10): 1405-1417. doi: 10.1016/j.orggeochem.2005.06.001
- Chikaraishi, Y., Naraoka, H., 2007. $\delta^{13}C$ and δD Relationships among Three *n*-Alkyl Compound Classes (*n*-Alkanoic Acid, *n*-Alkane and *n*-Alkanol) of Terrestrial Higher Plants. *Organic Geochemistry*, 38: 198-215.
- Chikaraishi, Y., Naraoka, H., Poulson, S. R., 2004. Hydrogen and Carbon Isotopic Fractionations of Lipid Biosynthesis among Terrestrial (C_3 , C_4 and CAM) and Aquatic Plants. *Phytochemistry*, 65(10): 1369-1381. doi: 10.1016/j.phytochem.2004.03.036
- Clayton, J. L., 1998. Geochemistry of Coalbed Gas—A Review. *International Journal of Coal Geology*, 35(1-4): 159-173. doi: 10.1016/s0166-5162(97)00017-7
- Criss, R. E., 1999. Principles of Stable Isotope Distribution. Oxford University Press Inc, New York.
- Dai, J. X., Qi, H. F., Song, Y., et al., 1986. Composition, Carbon Isotope Characteristics and the Origin of Coalbed Gases in China and Their Implications. *Chinese Science Bulletin*, 30(12): 1324-1337 (in Chinese).
- Dai, J. X., Qi, H. F., 1989. The Relationship between $\delta^{13}C$ and

- R_o of Coal-Derived Gas in China. *Chinese Science Bulletin*, 34(9): 690–692 (in Chinese).
- Dansgaard, W., 1964. Stable Isotopes in Precipitation. *Tellus*, 16(4): 436–468. doi: 10.3402/tellusa.v16i4.8993
- Duan, Y., Duan, M. C., Sun, T., et al., 2016. Thermal Simulation Study on the Influence of Coal-Forming Material on the Isotopic Composition of Thermogenic Coalbed Gas. *Geochemical Journal*, 50(1): 81–88. doi: 10.2343/geochemj.2.0386
- Duan, Y., He, J. X., Wu, B. X., et al., 2011. Composition and Genesis of *n*-Alkanes and their Hydrogen Isotope in Sediments from Saline Lake, China. *Earth Science*, 36(1): 53–61 (in Chinese with English abstract).
- Duan, Y., Wu, B. X., 2009. Hydrogen Isotopic Compositions and Their Environmental Significance for Individual *n*-Alkanes in Typical Plants from Land in China. *Chinese Science Bulletin*, 54(3): 461–467. doi: 10.1007/s11434-008-0443-x
- Duan, Y., Wu, B. X., He, J. X., et al., 2011. Characterization of Gases and Solid Residues from Closed System Pyrolysis of Peat and Coals at Two Heating Rates. *Fuel*, 90(3): 974–979. doi: 10.1016/j.fuel.2010.10.039
- Duan, Y., Wu, Y. Z., Yao, J. L., et al., 2013. Carbon and Hydrogen Isotopic Compositions and Their Evolutions of Gases Generated by Forest Marsh Peat at Different Thermal Maturity Stages. *Earth Science*, 38(1): 87–93 (in Chinese with English abstract).
- Edwards, T. W. D., Graf, W., Trimborn, P., et al., 2000. $\delta^{13}\text{C}$ Response Surface Resolves Humidity and Temperature Signals in Trees. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 64: 161–167.
- Francey, R. J., Farquhar, G. D., 1982. An Explanation of $^{13}\text{C}/^{12}\text{C}$ Variations in Tree Rings. *Nature*, 297(5861): 28–31. doi: 10.1038/297028a0
- Gu, S., Cai, J. H., Chang, D. W., et al., 2015. Reducing Formation Damage to Low-Porosity and Low-Permeability CBM Reservoirs Using Calcium Carbonate Nanoparticles. *Earth Science*, 40(6): 1093–1100 (in Chinese with English abstract).
- Kotarba, M. J., Rice, D. D., 2001. Composition and Origin of Coalbed Gases in the Lower Silesian Basin, Southwest Poland. *Applied Geochemistry*, 16(7–8): 895–910. doi: 10.1016/S0883-2927(00)00058-5
- Kotarba, M., 1990. Isotopic Geochemistry and Habitat of the Natural Gases from the Upper Carboniferous \check{Z} acl \acute{e} r Coal-Bearing Formation in the Nowa Ruda Coal District (Lower Silesia, Poland). *Organic Geochemistry*, 16(1–3): 549–560. doi: 10.1016/0146-6380(90)90069-c
- Liu, Q. Y., Liu, W. H., Dai, J. X., 2007. Characterization of Pyrolysates from Maceral Components of Tarim Coals in Closed System Experiments and Implications to Natural Gas Generation. *Organic Geochemistry*, 38(6): 921–934. doi: 10.1016/j.orggeochem.2007.02.002
- Pedentchouk, N., Sumner, W., Tipple, B., et al., 2008. $\delta^{13}\text{C}$ and δD Compositions of *n*-Alkanes from Modern Angiosperms and Conifers: An experimental Set up in Central Washington State, USA. *Organic Geochemistry*, 39: 1066–1071.
- Qin, Y., Tang, X. Y., Ye, J. P., et al., 2000. Characteristics and Origins of Stable Carbon Isotope in Coalbed Methane of China. *Journal of China University of Mining & Technology*, 29(2): 113–119 (in Chinese with English abstract).
- Rao, P. L. S., Rasheed, M. A., Hasan, S. Z., et al., 2014. Role of Geochemistry in Coalbed Methane—A Review. *Geosciences*, 4(2): 29–32.
- Rice, D. D., 1993. Composition and Origins of Coalbed Gas. Hydrocarbons from Coal. In: Law, B. E., Rice, D. D., eds., Hydrocarbons from Coal. AAPG Studies in Geology Series 38, AAPG, Tulsa, 159–184.
- 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, 159–184.
- Rozanski, K., Arguas, L., Gongiantini, R., 1993. Isotope Patterns in Modern Global Precipitation. In: Swart, P. K., Lohmann, K. C., McKenzie, J., et al., eds., Climate Change in Continental Isotope Records. American Geophysical Union, Geophysical Monograph 78, Washington, D. C., 1–36.
- Sessions, A. L., 2006. Seasonal Changes in D/H Fractionation Accompanying Lipid Biosynthesis in *Spartina Alterniflora*. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 70(9): 2153–2162. doi: 10.1016/j.gca.2006.02.003
- Song, Y., Liu, S. B., Hong, F., et al., 2012. Geochemical Characteristics and Genesis of Coalbed Methane in China. *Acta Petrolei Sinica*, 33(z1): 99–106 (in Chinese with English abstract).
- Song, Y., Liu, S. B., Zhang, Q., et al., 2012. Coalbed Methane Genesis, Occurrence and Accumulation in China. *Petroleum Science*, 9(3): 269–280. doi: 10.1007/s12182-012-0209-6
- Stahl, W. J., Carey, B. D., 1975. Source-Rock Identification by Isotope Analyses of Natural Gases from Fields in the Val Verde and Delaware Basins, West Texas. *Chemical Geology*, 16(4): 257–267. doi: 10.1016/0009-2541(75)90065-0

Wang, G., Qin, Y., Xie, Y.W., et al., 2016. Geochemical Characteristics and Its Origin of Cbm in Gujiao Blocks. *Journal of China Coal Society*, 41(5): 1180–1187 (in Chinese with English abstract).

Zhang, L., Luo, J., Cui, G.D., et al., 2016. Mechanisms of Cold Shock during Coalbed Fracturing Assisted with Cryogenic Gases. *Earth Science*, 41(4): 664–674 (in Chinese with English abstract).

附中文参考文献

戴金星, 戚厚发, 1989. 我国煤成气的 $\delta^{13}C-R$ 关系. *科学通报*, 34(9): 690–692.

段毅, 吴应忠, 姚泾利, 等, 2013. 森林沼泽泥炭不同演化阶段

气体碳氢同位素演化特征. *地球科学*, 38(1): 87–93.

段毅, 何金先, 吴保祥, 等, 2011. 咸水湖泊沉积物中正构烷烃及其氢同位素组成与成因. *地球科学*, 36(1): 53–61.

谷穗, 蔡记华, 常德武, 等, 2015. 使用纳米碳酸钙降低低孔低渗煤层气储层伤害. *地球科学*, 40(6): 1093–1100.

秦勇, 唐修义, 叶建平, 等, 2000. 中国煤层甲烷稳定碳同位素分布与成因探讨. *中国矿业大学学报*, 29(2): 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(z1): 99–106.

汪岗, 秦勇, 解奕炜, 等, 2016. 古交区块煤层气地球化学特征及其成因. *煤炭学报*, 41(5): 1180–1187.

张亮, 罗炯, 崔国栋, 等, 2016. 低温气体辅助煤层气压裂中的冷冲击机理. *地球科学*, 41(4): 664–674.

《地球科学》荣获“第三届湖北出版政府奖”

2017年9月7日在湖北省出版工作会议上,《地球科学》(中文版)被授予“第三届湖北出版政府奖”。中国地质大学(武汉)副校长、《地球科学》主编赖旭龙教授作为获奖代表出席会议并领奖。

“湖北出版政府奖”是省政府设立的省级新闻出版最高奖,由省政府主办、省新闻出版广电局承办,每三年举办一次。本次评选根据《湖北省出版政府奖评选章程》规定,经严格评审,25种图书、4种报纸、6种期刊和9位个人获得该奖。