科学通报 2011 年 第 56 卷 第 6 期：407 ~ 413
论 文 www.scichina.com csb.scichina.com
《中国科学》杂志社
SCIENCE CHINA PRESS

草本沼泽泥炭不同演化阶段气体碳氢同位素组成及其演化特征

段毅, 张晓丽, 孙涛, 吴保祥, 何金先, 徐丽

中国科学院地质与地球物理研究所油气资源研究重点实验室, 兰州 730000
E-mail: duany@ns.lzb.ac.cn

2010-10-19 收稿, 2010-12-14 接受
国家自然科学基金(40872092, 40772069)、中国科学院"科技支甘"工程项目和国家重点基础研究发展计划(2005CB422105)资助项目

摘要 煤层气聚集存在着"累积聚气"和"阶段聚气"两种形式. 目前缺乏"阶段聚气"煤层气的地球化学特征和指标的研究. 通过草本沼泽泥炭在不同温度下制备的样品进行热模拟实验, 获得了不同演化阶段甲烷和乙烷的碳、氢同位素组成和演化规律. 发现甲烷和乙烷碳同位素组成明显地受原始样品演化程度的影响, 而氢同位素组成主要与成熟度密切相关. 确定了成煤有机质从 *R*o 为 1.2%, 1.7%, 2.4%, 3.2%, 3.7%分别演化至 *R*o 5.7% (4.8%)之间生成的气体碳、氢同位素组成. 建立了成煤有机质在不同演化阶段热解气体碳、氢同位素组成与 *R*o 之间的关系和甲烷与乙烷的碳、氢同位素之间的关系式. 这些为研究不同成熟度区间生成的煤层气的成因和"阶段聚气"的煤层气地球化学特征认识及其成因判识提供了科学依据. 并且, 将这些研究结果应用到我国沁水盆地南部煤层气研究, 认为该地区煤层气是在中侏罗世以后聚集而成, 具有"阶段聚气"的特征, 这与地质研究结果相一致, 从而证明了热模拟研究成果对自然界煤层气成因的判识具有重要的科学意义.

关键词
泥炭
模拟实验
煤层气
阶段聚气
碳氢同位素
沁水盆地

煤层气是赋存于煤层中的自生自储式非常规天然气[1], 是一种新型的洁净能源资源, 对其成因机制的研究已成为石油地质学研究的热点[1~6]. 煤层气碳氢同位素是判识煤层气成因的最有效方法之一. 煤层气聚集存在着"累积聚气"和"阶段聚气"两种形式, 以往煤层气成因的研究都是按照"累积聚气"的模式进行的[7~14], 缺乏"阶段聚气"煤层气的地球化学特征和指标的研究. 成煤物质在不同演化阶段形成的煤层气同位素组成应该是不同的, 通过"阶段生烃"模拟实验, 研究成煤物质的不同演化阶段形成的气体同位素组成特征, 可以为认识 "阶段聚气" 的煤层气同位素地球化学特征提供科学依据. 但是, 这种研究还未见报道过.

研究成煤物质生烃过程的模拟实验研究通常采用的样品为不同煤阶的煤和泥炭[11,12,15~19]. 成煤物质生烃存在于煤化全过程之中, 而煤化过程包括了早期和晚期两个阶段. 从泥炭到褐煤的早期阶段主要经历了低温生物化学过程, 从褐煤到无烟煤的晚期阶段则经历了高温物理化学过程[20]. 因此, 泥炭代表了成煤的初级物质, 用泥炭进行模拟实验可以了解在煤化中热力作用生烃的全过程. Yao 等人[17]对泥炭与褐煤和亚烟煤进行了模拟实验对比研究, 并且注意到了泥炭与褐煤和亚烟煤具有类似的演化途径, 只是泥炭的气体产物中CO_2组分含量较高. 段毅等人[11,12]对泥炭与不同煤阶煤的模拟实验研究结果与上述完全相似, 并且发现泥炭生成的甲烷碳同位素比不同煤阶煤生成的甲烷碳同位素要轻. 这些说明了泥炭保留更多的成煤物质原始组分, 用其模拟实验具有很好的代表性.

为了解"阶段生烃"模拟热解气体同位素组成与

英文版见: Duan Y, Zhang X L, Sun T, et al. Carbon and hydrogen isotopic compositions and their evolutions of gases generated by herbaceous swamp peat at different thermal maturity stages. Chinese Sci Bull, 2011, 56, doi: 10.1007/s11434-011-4356-8

演化特征, 及其能否判识“阶段聚气”的煤层气同位素成因, 我们选择同一成煤物质草本沼泽泥炭, 在 250, 300, 350, 400 和 450℃下制备成 5 个原始样品, 进行 5 个阶段热解生烃模拟实验, 研究了不同热成熟阶段气体碳氢同位素组成与演化、气体碳氢同位素分馏及煤层气成因的判识意义.

1 样品及实验方法

样品为草本沼泽黑色泥炭, 2008 年 8 月采自吉林省敦化市大桥乡于家屯, 地理位置为 43°15′43″N, 128°20′21″E, 为现代泥炭剖面样品, 深度为 0.6~1.25 m. 采样地区海拔 568 m, 属中温带冷凉湿润气候(年平均气温 2.6℃, 降雨量 632 mm). 现在生长的植物主要为草本植物. 泥炭中有机碳含量为 30.1%.

泥炭样品在室温下自然凉干后, 粉碎至 60 目. 1300 g 粉碎样品分为重量不同的 5 个样品, 分别装入热反应釜中, 抽真空, 充入氦气并封口, 将密封的反应釜置于具有温控仪的马福炉中, 分别在 250, 300, 350, 400 和 450℃下恒温加热 72 h, 制备成 5 个原始样品. 然后, 每个原始样品根据不同温阶进样量各不相同, 分别装入热反应釜中, 抽真空, 用氦气置换 3 次后, 充入氦气并封口, 密封的反应釜置于具有温控仪的马福炉中, 快速升温至设定温度时, 恒温加热 72 h. 以 50℃为一温阶, 从原始样品制备的温度度点加 50℃升至 650℃进行热模拟.

对每一温度点所生成的气体进行收集, 并且在气相色谱-高温热转变-同位素比值质谱议(GC-TC-IRMS)上进行了气体碳氢同位素测定. 气相色谱仪为 Agilent 6890, 同位素比值质谱仪为德国 Bremen 公司制造的 Delta plus XP 型, 它们之间的高温热解装置(1440℃)由 GC-CIII 接口连接. 碳同位素的色谱柱为 CP-Carbobond (25 m×0.53 mm i.d.×10 μm) 型熔融石英毛细柱, 起始温度为 30℃, 以 15℃/min 升到 240℃, 然后恒温 15 min; 而氢同位素的色谱柱为 HP-Al/KCl(50 m×0.53 mm i.d.×15 μm) 型熔融石英毛细柱, 起始温度为 30℃, 以 15℃/min 升到 180℃, 然后恒温 5 min, 载气为 He. 气体碳同位素分析标准偏差小于 0.3‰, 氢同位素分析标准偏差小于 3‰. 热解固体产物进行了镜质组反射率(*R*o 值)测定, 分析标准偏差小于 0.07%.

2 结果与讨论

2.1 不同热成熟阶段气体碳氢同位素组成与演化

为了认识煤层气形成过程中气体碳、氢同位素组成与演化特征, 我们对草本沼泽泥炭进行了阶段热模拟实验研究. 对于 250, 300, 350, 400 和 450℃下制备的 5 个原始样品来说, 每隔 50℃升至 650℃生成的气体同位素组成及其演化都具有一定的规律. 虽然自然界的煤化早期受生物化学作用比较明显, 但是我们制备原始样品的最低温度为 250℃, 对应的 *R*o 值为 0.72, 相当于气煤阶段, 该煤阶及其以后形成的热成因气主要受热力作用. 因此, 这些研究成果为了解不同热成熟阶段煤层气的地球化学特征提供了依据.

(1) 250, 300, 350, 400 和 450℃下制备的 5 个原始样品的甲烷碳同位素组成范围分别为–40.0‰~–27.5‰, –39.8‰~–28.2‰, –34.6‰~–27.7‰, –27.5‰~–25.9‰和–27.2‰~–26.5‰, 平均值分别为–34.5‰, –33.9‰, –31.1‰, –27.8‰和—26.9‰(图 1(a)和表 1). 图 1(a)为 5 个样品热模拟气体中甲烷碳同位素值与生烃模拟温度相关图. 从图中可以看出, 随模拟温度的升高, 样品生成甲烷的碳同位素值逐渐增高, 甲烷的碳同位素值与模拟温度之间都呈现良好的正相关性. 研究样品甲烷的碳同位素组成在模拟温度低温差别显著, 呈现为原始样品演化程度越高, 生成的甲烷碳同位素组成越重, 在模拟温度达到高温

表 1 草本沼泽泥炭热模拟不同 *R*o 区间生成的甲烷、乙烷和二氧化碳 $\delta^{13}C$ 与 δD 平均值 a)

样品	*R*o(%)	$\delta^{13}C_{CH_4}$	δD_{CH_4}	$\delta^{13}C_{CO_2}$	$\delta^{13}C_{C_2H_6}$	$\delta^{13}C_{C_3H_8}$	$\delta D_{C_2H_6}$
250~650℃(C_3t)	1.2~5.7	–34.5	–228	–17.9	–27.8	–28	–209
300~650℃(C_3t)	1.7~5.7	–33.9	–219	–17.6	–28.9	–28.7	–200
350~650℃(C_3t)	2.4~5.7	–31.1	–199	–16.3	–26.2	–24.2	–166
400~650℃(C_3t)	3.2~5.7	–27.8	–151	–16.4	–18.8		–107
450~600℃(C_3t)	3.7~4.8	–26.9	–144	–15.4			

a) 250~650℃表示 250℃下制备的样品从 300℃升至 650℃, 其他与此类推; 表中各气体组分同位素数据为模拟温度(或 *R*o 值)区间各个温度点气体组分同位素平均值, 代表了这一演化阶段生成的气体中该组分气体的同位素组成

时，生成的甲烷碳同位素组成趋于一致；同时，400和 450℃较高温度下制备的两个样品生成甲烷的碳同位素组成及其随着模拟温度升高演化趋势都极为类似.

(2) 前3个样品生成的乙烷碳同位素组成分布分别在–32.1‰~–23.3‰，–31.8‰~–23.2‰和–29.0‰~–23.1‰之间，平均值分别为–27.8‰，–28.4‰和–26.2‰；400℃下制备的原始样品，在 450℃生成的乙烷碳同位素组成为–18.8‰(图 1(b)和表 1). 乙烷主要出现在250~400℃下制备的 4 个样品中，并且存在于模拟温度小于 500℃的演化阶段. 同一样品的乙烷碳同位素组成随着模拟温度升高而变重. 同一模拟温度点产生的甲烷和乙烷具有$\delta^{13}C_1 < \delta^{13}C_2$的特征.

(3) 5 个样品生成的甲烷氢同位素组成范围分别为–335‰~–151‰，–298‰~–150‰，–263‰~–135‰，–225‰~–112‰和–217‰~–119‰，平均值分别为–228‰，–220‰，–199‰，–151‰和－168‰(图 1(c)和表 1). 随着模拟温度升高，5 个样品生成的甲烷氢同位素组成都变重；原始样品演化程度越高，生成的甲烷氢同位素组成具有变重的趋势；400 和 450℃较高温度下制备的两个样品生成的甲烷氢同位素组成较为类似.

(4) 前3个样品生成的乙烷氢同位素组成范围分别为–265‰~–112‰，–250‰~–100‰和–222‰~–102‰，平均值分别为–209‰，–200‰和–166‰；400℃下制备的原始样品，在450℃生成的乙烷氢同位素组成为–107‰(图 1(d)和表 1). 随着模拟温度升高，同一样品的乙烷氢同位素组成变重. 同一模拟温度点产生的甲烷和乙烷具有$\delta D_{C_1} < \delta D_{C_2}$的特征.

2.2 不同热成熟阶段气体碳氢同位素与 *R*o 的关系

根据草本沼泽泥炭热解气体碳氢同位素热动力学分馏机制，可以建立气体碳氢同位素组成与镜质体反射率(*R*o)之间的数学式，以便了解煤层气碳氢同位素组成与其源岩有机质演化程度的关系，进而

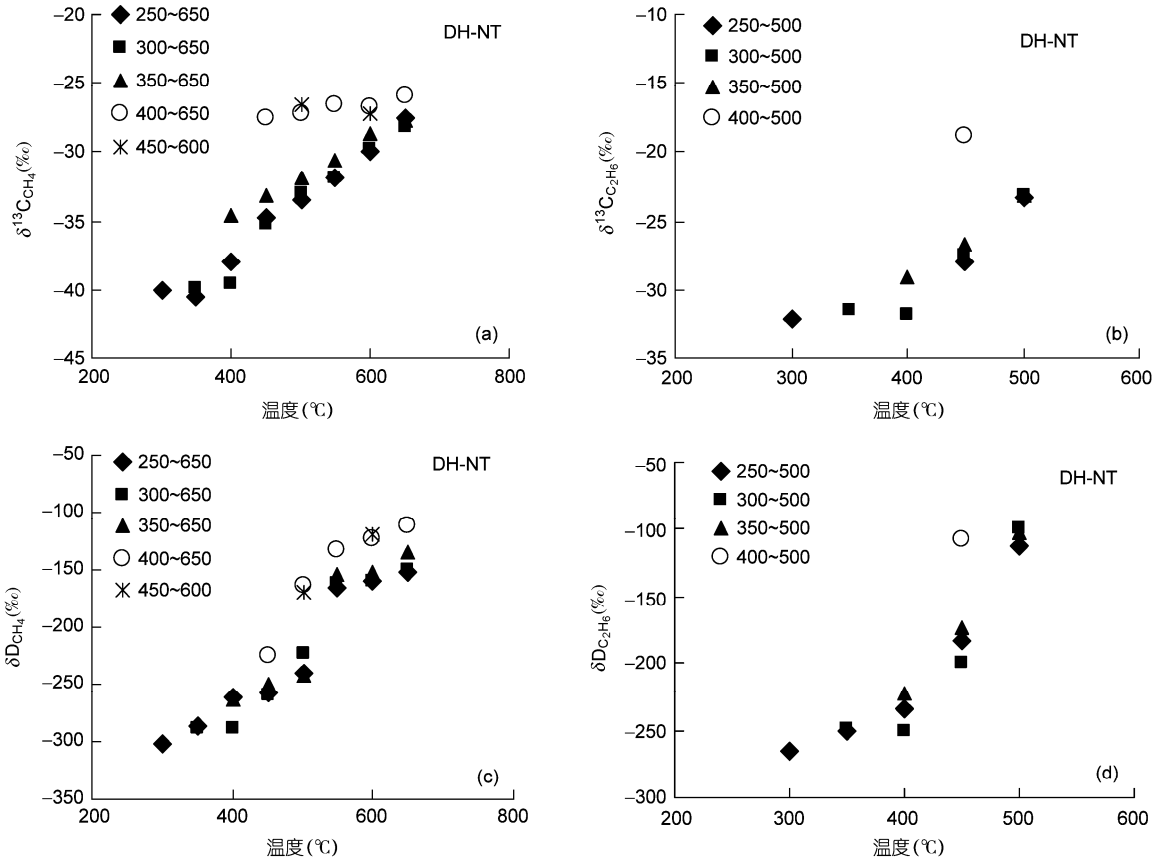


图 1 甲烷、乙烷δ^{13}C 值((a),(b))和δD 值((c), (b))与热解温度的关系

图例 250~650 表示 250℃下制备的样品从 300℃升至 650℃，其他类推，余同

研究煤层气的成因[21,22]. 图 2(a)为原始样品演化程度不同的 5 个样品热解甲烷碳同位素组成与模拟残余样品中 *R*o 值相关图. 由于 250, 300 和 350℃下制备的 3 个原始样品热解甲烷碳同位素组成和演化极为类似, 所以它们建立了一个关系式为$\delta^{13}C_1 = 3.00 Ro - 44.19$; 同理, 400 和 450℃两个样品建立了一个关系式为$\delta^{13}C_1 = 0.42 Ro - 28.58$. 250, 300 和 350℃下制备的 3 个原始具有很好的相关性, R^2 为 0.9322. 并且, 随着原始样品演化程度增高, 数学式的斜率变小, 纵截距变大.

图 2(b)为 250, 300 和 350℃下制备的 3 个原始样品热解乙烷碳同位素组成与模拟残余样品中 *R*o 值相关图. 从图中可以看出, 这 3 个原始样品热解乙烷碳同位素组成和演化很类似, 并且它们的乙烷碳同位素组成与 *R*o 值之间存在较好的相关性. 另外, 400℃下制备的原始样品热解乙烷碳同位素组成较重, 与上述 3 个样品的明显不同.

图 2(c)为样品热解甲烷氢同位素组成与模拟残余样品中 *R*o 值相关图. 从图中可以看出, 250, 300 和 350℃下制备的个 3 原始样品热解甲烷氢同位素组成和演化极为类似, 并且呈三段式演化特征, 即在 *R*o 值小于 3.7%时, $\delta^{13}D_{C_1}$ 值增加较慢; *R*o 值介于 3.7%~4.1%之间, $\delta^{13}D_{C_1}$ 值急剧增加; *R*o 值大于 4.1%时, $\delta^{13}D_{C_1}$ 值增加慢. 这说明在 *R*o 值为 3.7%~4.1%时, 氢同位素热动力学分馏最大. 在 400℃和 450 下制备的 2 个原始样品热解甲烷氢同位素组成和演化也极为类似, 并且呈二段式演化特征, 即在 *R*o 值小于 4.1%时, $\delta^{13}D_{C_1}$ 值增加较快; *R*o 值大于 4.1%时, $\delta^{13}D_{C_1}$ 值增加较慢. 热解甲烷氢同位素这种三段式或二段式的演化机制还不清楚.

250, 300 和 350℃下制备的 3 个原始样品热解乙烷氢同位素组成和演化很类似(图 2(d)), 随着 *R*o 值增

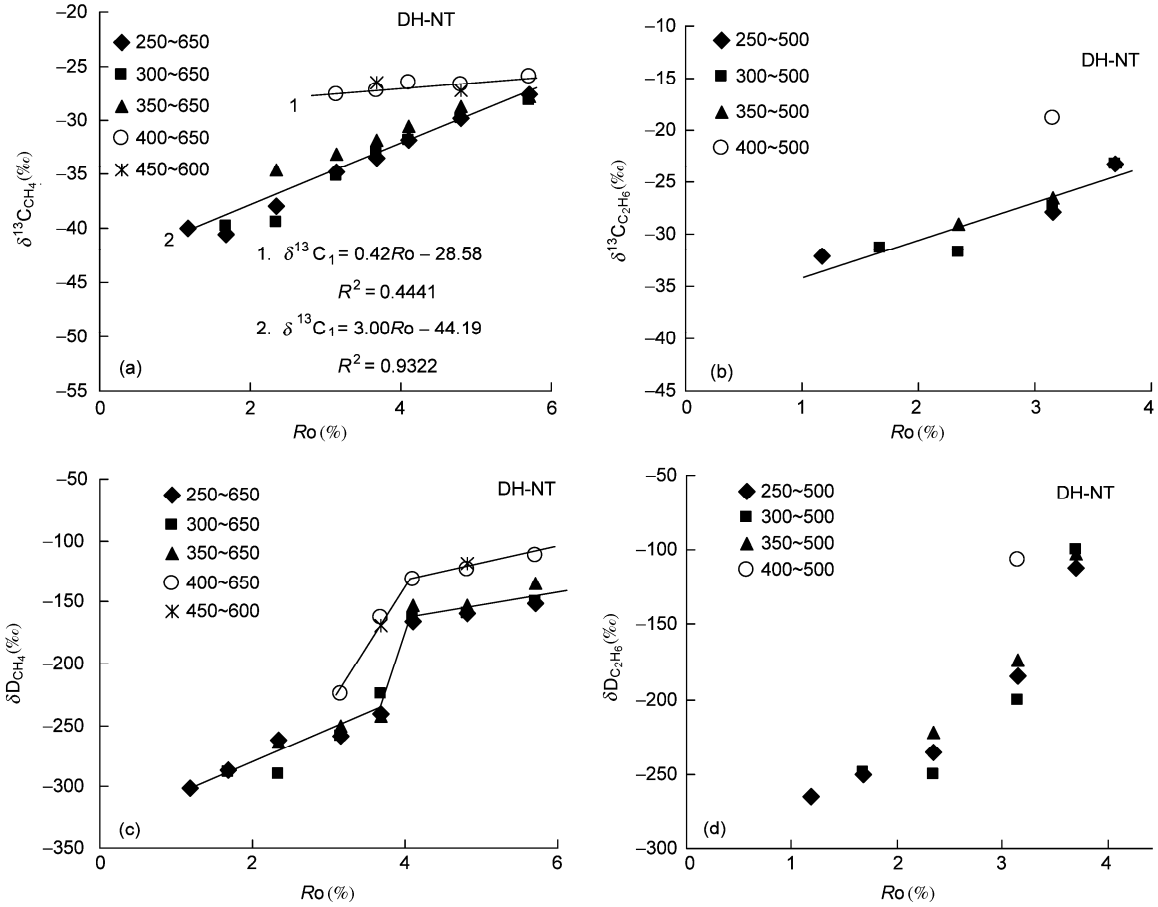


图 2 甲烷、乙烷$\delta^{13}C$((a),(b))值和δD 值((c),(b))与 *R*o 值的关系

加，乙烷氢同位素组成有规律的变重. 400℃下制备的原始样品热解乙烷氢同位素组成较重，与上述 3 个样品对应相同 *R*o 值的氢同位素组成具有明显的差别.

从上述演化程度不同的原始样品的甲烷和乙烷碳氢同位素组成与 *R*o 的关系特征可以看出，所有样品模拟气体都具有随演化程度增加，甲烷和乙烷碳氢同位素组成具有变重的特征；煤的初始演化程度明显地影响了煤层气甲烷和乙烷的碳氢同位素组成；在演化过程中，乙烷和甲烷碳同位素具有相似的演化规律，反映了单一类型母质生气的特征. 这些研究成果，为不同演化盆地煤层气甲烷的成因研究提供了依据，特别是泥炭作为煤的原始物质，其热解甲烷和乙烷碳氢同位素组成与 *R*o 的关系，反映了煤化全过程中不同演化阶段煤层气的甲烷和乙烷碳氢同位素组成演化特征.

2.3 煤层气成因的判识意义

世界上许多含煤层气盆地形成过程都具有多期性，从而使煤层气更多的具有“阶段聚气”的特征. 通过草本沼泽泥炭的模拟实验，首次获得了不同演化阶段甲烷和乙烷碳氢同位素组成和演化规律(表 1)，为“阶段聚气”的煤层气地球化学特征认识及其成因判识提供了科学数据.

图 3 为甲烷碳和氢同位素组成相关图. 由图可见，甲烷碳同位素组成明显地与原始样品演化程度有关，氢同位素组成主要与成熟度密切相关. 该图可以区分不同演化阶段和不同成熟度下生成的煤层气. 图 4 为甲烷与乙烷δ^{13}C 值和甲烷与乙烷δD 值相关图，甲烷与乙烷的碳、氢同位素之间的关系式分别为δC_{C_1}=0.78 $\delta^{13}C_{C_2}$−13.77 和δD_{C_1}=0.36 δD_{C_2}−194.07，并且样品具有很好的相关性，R^2 为 0.8346 和 0.8570. 这种关系式表明，甲烷与乙烷的碳、氢同位素都是随着成熟度增加而变重，因此该图可以判识煤层气的成因；同时，甲烷与乙烷δD 值相关图还可以判识不同演化阶段生成的煤层气. 另外，首次获得了成煤有机质不同演化阶段热解气体δ^{13}C 和δD 值与 *R*o 值之间的关系式，可以作为不同演化阶段煤层气成因及其演化程度的判识指标.

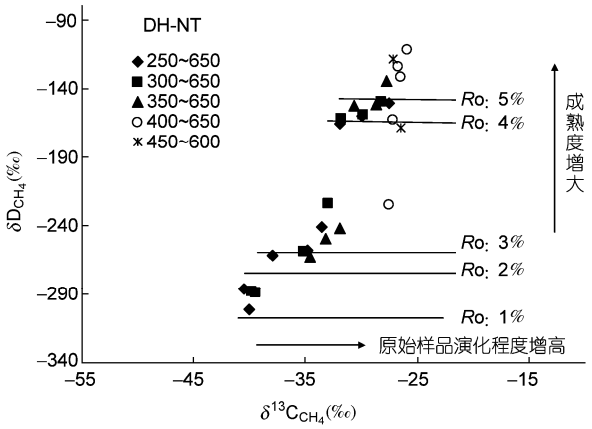


图 3 甲烷δ^{13}C 与δD 值相关图

例如，我国沁水盆地南部地区的石炭统太原组和下二叠统山西组(*R*o 值约为 2.8%~4.8%)煤层气碳

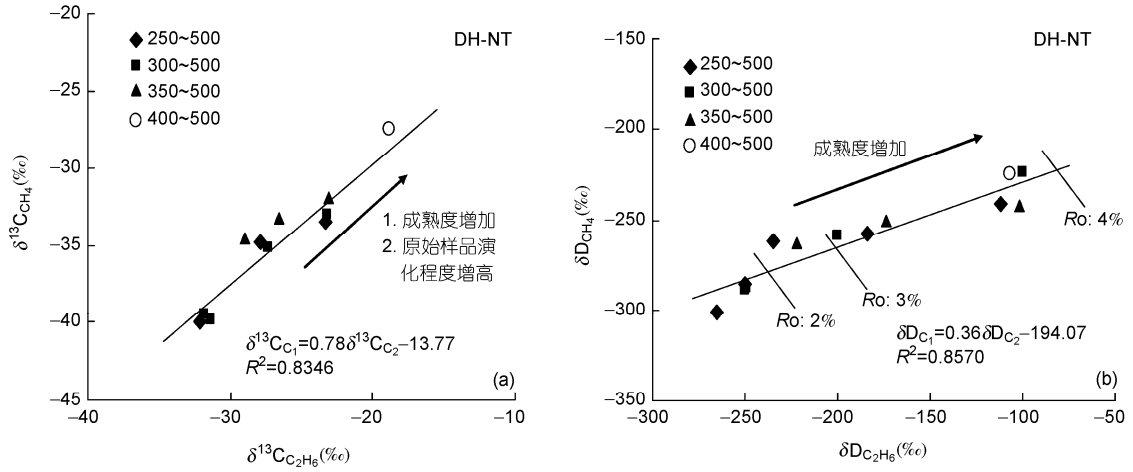


图 4 甲烷和乙烷δ^{13}C(a)与δD(b)值相关图

同位素组成分布为–33.7‰~–30.2‰[23], 氢同位素组成大约分布在–200‰~–160‰之间(由陶明信提供), 这些值与草本沼泽泥炭在 *R*o 值从 1.7%, 2.4%演化至 5.7%生成的甲烷δ^{13}C 值(–33.9‰~–31.1‰)和δD 值(–219‰~–199‰)相似, 这说明沁水盆地南部煤层气是由 *R*o>1.7%以后煤生成的气体聚集而成, 具有"阶段聚气"的特征. 这与该地区煤层气聚集的地质研究结果是一致的, 这种研究结果表明, 三叠纪末期该地区生成的煤层气由于后期抬升而遭到破坏, 晚侏罗世-晚白垩世是沁水盆地南部主要煤层的有效生气阶段, 也是煤层气的主要封存时期; 并且在中侏罗世末时, 煤层的 R_{max} 为 1.75%, 晚白垩世末时, 煤层的 R_{max} 为 4.05%[24], *R*o 值在我们研究的范围内[25,26].

3 结论

为了认识煤层气的成因和"阶段聚气"的煤层气稳定同位素地球化学特征, 使用草本沼泽泥炭在 250, 300, 350, 400 和 450℃下恒温 72 小时制备成 5 个原始样品, 对这 5 个样品进行了热模拟实验, 研究了不同成熟度区间热解气体碳、氢同位素的组成特征及其影响因素.

5 个原始样品热模拟生成的甲烷和乙烷碳、氢同位素值都与模拟温度之间呈良好的正相关性, 原始样品演化程度越高, 生成的甲烷氢同位素组成具有变重的趋势, 但是不同样品之间的氢同位素差别没有碳同位素明显. 发现甲烷和乙烷碳同位素组成明显地受原始样品演化程度的影响, 而氢同位素组成主要与成熟度密切相关.

确定了成煤有机质从 *R*o 为 1.2%, 1.7%, 2.4%, 3.2%, 3.7%分别演化至 *R*o 5.7% (4.8%)之间生成的气体碳、氢同位素组成, 建立了成煤有机质不同演化阶段热解气体碳氢同位素组成与 *R*o 之间的关系和甲烷与乙烷的碳、氢同位素之间的关系式, 这些为研究不同成熟度区间生成的煤层气成因提供了科学数据.

将这些研究结果应用到我国沁水盆地南部煤层气研究, 认为该地区煤层气是在中侏罗世以后聚集而成, 具有"阶段聚气"的特征, 证明了热模拟研究成果对自然界煤层气成因的判识具有重要的科学意义.

参考文献

1 Clayton J L. Geochemistry of coalbed gas—A review. Int J Coal Geol, 1998, 35: 159–173
2 Kotarba M J. Isotopic geochemistry and habitat of the natural gases from the Upper Carboniferous Zacier coal-bearing Formation in the Nowa Ruda coal district (Lower Silesia, Poland). Org Geochem, 1990, 16: 549–560
3 Liu D M, Yang Q, Tang D Z. Reaction kinetics of coalification in Ordos Basin, China. In: Yang Q, ed. Geology of Fossil Fuel-coal. Utrecht: The Netherlands, 1997. 147–159
4 秦勇, 唐修义, 叶建平, 等. 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, 2000, 29: 113–119
5 Kotarba M J, Rice D D. Composition and origin of coalbed gases in the Lower Silesian basin, southwest Poland. Appl Geochem, 2001, 16: 895–910
6 赵孟军, 宋岩, 苏现波, 等. 沁水盆地煤层气藏演化的关键时期分析. 科学通报, 2005, 50(S1): 110
7 Landais P. Assessement of coal potential evolution by experimental simulation of natural coalification. Org Geochem, 1991, 17: 705–710
8 Raymond M, Landais P. Artificial coalification: Comparison of confined pyrolysis and hydrous pyrolysis. Fuel, 1994, 73: 1691–1696
9 Behar F, Vandenbroucke M, Teermann S C, et al. Experimental simulation of gas generation from coals and a marine kerogen. Chem Geol, 1995, 126: 247–260
10 Cramer B. Methane generation from coal during open system pyrolysis investigate by isotope specific, Gaussian distributed reaction kinetics. Org Geochem, 2004, 35: 379–392
11 段毅, 吴保祥, 郑朝阳, 等. 煤层气组分的形成演化模拟实验研究. 科学通报, 2005, 50: 27–31
12 段毅, 吴保祥, 郑朝阳, 等. 山西沁水盆地煤生烃动力学研究. 科学通报, 2005, 50: 1405–1411
13 Liu Q Y, Liu W H, Dai J X. Characterization of pyrolysates from maceral components of Tarim coals in closed system experiments and implications to natural gas generation. Org Geochem, 2007, 38: 921–934
14 陈建平, 邓春萍, 王汇彤, 等. 中国西北侏罗纪煤系显微组分热解油生物标志物特征及其意义. 地球化学, 2006, 2: 141–150
15 Behar F, Vandenbroucke M, Teerman S C, et al. Experimental simulation of gas generation from coals and a marine kerogen. Chem Geol, 1995, 126: 247–260
16 刘全有, 刘文汇, 秦胜飞, 等. 煤岩及煤岩加不同介质的热模拟地球化学实验——气态和液态产物的产率以及演化特征. 沉积学报, 2001, 19: 465–468

17 Yao S, Xue C, Hu W, et al. A comparative study of experimental maturation of peat, brown coal and subbituminous coal: Implications for coalification. Int J Coal Geol, 2006, 66: 108–118
18 Rollins M S, Cohen A D, Bailey A M, et al. Organic chemical and petrographic changes induced by early-stage artificial coalification of peats. Org Geochem, 1991, 17: 451–465
19 Kracht O, Gleixner G. Isotope analysis of pyrolysis products from Sphagnum peat and dissolved organic matter from bog water. Org Geochem, 2000, 31: 645–654
20 Stach E, Mackowsky M-Th, Teichmüller M, et al. Stach's Textbook of Coal Petrology. 2nd ed. Berlin: Gebrüder Borntraeger, 1982
21 Stahl J W, Carey B D. Source-rock identification by isotope analyses of natural gases from fields in the Val Verde and Delaware Basins, West Texas. Chem Geol, 1975, 16: 257–267
22 戴金星, 戚厚发. 我国煤成气的δ^{13}C-*Ro* 关系. 科学通报, 1989, 34: 690–692
23 段毅, 孙涛, 刘军峰, 等. 煤层气碳同位素阶段演化的模拟实验研究及其应用. 沉积学报, 2010, 28: 401–404
24 孙占学, 张文, 胡宝群, 等. 沁水盆地地温场特征及其与煤层气分布关系. 科学通报, 2005, 50: 93
25 桑树勋, 刘焕杰, 李贵中, 等. 煤层气生成与煤层气富集 I: 有效阶段生气量与煤层气富集. 煤田地质与勘探, 1997, 25: 14–17
26 赵孟军, 宋岩, 苏现波, 等. 决定煤层气地球化学特征的关键地质时期. 天然气工业, 2005, 25: 51–54

·动 态·

有机催化芳烃 C—H 键活化以高效构建联芳香基化合物的方法

北京大学北京分子科学国家实验室(筹)施章杰研究组研究发现, 有机分子邻菲罗啉类衍生物可催化芳基碳氢键活化, 并成功实现了邻菲罗啉促进的芳基卤化物(溴化物和碘化物)与普通芳环的交叉偶联反应, 以高效地构建联芳基化合物. 研究发现, 将偶联反应应用到分子内体系, 同样可高产率地得到苯并色烯分子. 该结果为合成各种杂原子多环化合物提供了高效经济的新方法. 相关的机理研究证明, 该反应具有不同于任何一种经典的过渡金属催化碳氢键活化的反应机理, 是一种全新的碳氢键活化方式, 同时解决了合成中的重金属残留问题. 相关研究论文发表在 2010 年 12 月 *Nature Chemistry*, 2(12): 1044—1049 上.

可高选择性检测活细胞内有机过氧化自由基的荧光探针

北京大学化学生物学系陈鹏研究组将一种特异的有机过氧化物识别蛋白(OhrR)与环化的黄色荧光蛋白相对接, 构建出了一种可特异性识别有机过氧化物的荧光探针, 能够有效和高选择性地对有机过氧化自由基产生荧光响应, 而不与过氧化氢、超氧阴离子、单线态氧、羟自由基等物质发生反应. 相关研究论文发表在 2010 年 12 月 8 日 *J Am Chem Soc*, 132(48): 17065—17067 上.

利用富勒烯笼制造出可控进出的单水分子封闭容器

中国科学院化学研究所北京分子科学国家试验室(筹)甘良兵研究组与德国 Karlsruhe 技术研究院 Wim Klopper 研究组合作, 以富勒烯为瓶体, 以一种磷酸盐为瓶盖, 设计出一种可装入一个水分子的封闭容器. 通过控制附着在富勒烯孔边缘的磷酸盐, 可作为开关使水分子进或出. 相关研究论文发表在 2010 年 12 月 17 日 *Angew Chem Int Edit*, 49(51): 9935—9938 上.

(信息来源: 科学技术部《基础科学研究快报》)