基于傅里叶变换质谱的烃源岩成熟度评价方法及地质意义

韩双彪[1)]，谢林丰[1)]，唐致远[1)]，李剑[2)]，王成善[*3)]，Brian HORSFIELD[4)]

1）中国矿业大学(北京)，地球科学与测绘工程学院，北京，100083，中国；

2）中国石油天然气股份有限公司勘探开发研究院，北京，100083，中国；

3）中国地质大学(北京)，生物地质与环境地质国家重点实验室，北京，100083，中国；

4）德国地学研究中心，勃兰登堡州波茨坦，14473，德国

伴随非常规油气资源的勘探开发，油气资源开采的广度和深度进一步扩大，一定程度上缓解了我国油气供需矛盾、保障了我国能源安全，同时有力推动了能源结构战略转型。但同时也对能源地质研究工作提出了新的挑战。有机质成熟度是油气评价的重要参数之一，不同成熟阶段的有机质会对应产出不同成因、不同性质、不同质量的油气，如何准确评价沉积有机质成熟度是当前油气资源勘探开发工作的关键问题之一。前人在科研实践工作中从光学、化学、谱学等角度提出了适用条件各异的成熟度评价方法，在部分地质环境中获得了良好的应用效果，但已有的成熟度指标多受测定方法原理的制约导致其适用性不同程度受限(肖贤明等，2020)，制约了油气资源的高质量勘探开发。

近年来，一种超高分辨率质谱分析技术——傅里叶变换离子回旋共振质谱(FT-ICR MS)逐渐在能源地质领域得到重视并广泛应用(卢鸿等，2014)。FT-ICR MS结合超导磁体的应用，可以保证在不降低检测灵敏度的前提下实现高分辨率，具有很高的质量精确度，无需内标物就能够达到小于2×10^{-6}的质量测量准确度(王光辉等，2001)。磁场强度为12 T(tesla，特斯拉)的FT-ICR MS的分辨率高达10^{-6} Da，理论上其分辨能力远超识别由碳、氢、氧、氮、硫组成的各种化合物分子的最高要求(10^{-4} Da)(Han Yuanjia et al.，2018)，可以通过“元素-分子-化合物”(通过分析元素组成推演分子结构，再进一步判断化合物种类)的形式完成高分辨率分析，实现高精度识别包括杂原子化合物在内的可溶有机质。

在松辽盆地大陆科学钻探工程的基础上，研究团队选取了全球不同含油气盆地、不同沉积相、不同层系的典型烃源岩，针对沉积有机质成熟度评价问题开展了系统深入的研究。本研究充分利用FT-ICR MS高分辨率、高精度的优势，系统分析了不同含油气盆地主力烃源岩有机质组分特征，并进一步从分子角度讨论了有机质热演化特征，研究团队基于傅里叶变换质谱分析结果提出了成熟度评价指标——MAT(Noah et al.，2020)，为烃源岩成熟度评价问题提供了更广阔的思路。

1 烃源岩有机质极性分子化合物组成特征

松辽盆地大陆科学钻探工程建立了完整的陆相白垩纪地层标准，其中松科2井井深7018 m，获取了3370～5960 m深度范围内连续的沙河子组地层岩芯资料，该层段内烃源岩连续沉积、有机质镜质体反射率(R_o)在1.33%～4.24%之间，T_{max}在510～665℃之间，基本覆盖了高成熟至过成熟阶段，且烃源岩成熟度与烃源岩埋深呈正相关线性关系，同时TOC普遍大于1%，具有较高的有机质丰度。因此，松辽盆地沙河子组地层是讨论烃源岩有机质化合物组分特征及其受热应力影响的动态演化规律的极佳对象。本团队将FT-ICR MS与大气压光电离(atmospheric-pressure photoionization，APPI)联用，以单同位素离子总丰度(total monoisotopic ion abundance，TMIA)为单位统计各类化合物相对含量，系统测定了松辽盆地松科2井沙河子组烃源岩的化合物分子组成特征，并结合有机质成熟度系统讨论了热演化过程中不同化合物组分含量的动态演化规律。

根据FT-ICR MS分析结果，松辽盆地沙河子组有机质中碳氢化合物(仅由碳、氢两种元素组成的有机化合物)及含氮、硫、氧等杂原子的非烃化合物的组分及含量与烃源岩成熟度显著相关，其中碳氢化合物TMIA随成熟度升高显著降低，成熟度相对较低的烃源岩有机质化合物以碳氢化合物为主，TMIA在23.17%～63.65%之间，而成熟度相对较高的烃源岩中碳氢化合物TMIA仅在0.97%～6.79%之间；O_x化合物(由碳、氢、氧三种元素组成的有机质极性分子化合物，下标代表化合物中氧原子数量)以O_1、O_2、O_4化合物为主，O_x化合物TMIA随成熟度升高显著升高，成熟度相

注：本文为国家自然科学基金项目(编号42072168，41790450)、国家重点研发计划项目(编号2019YFC0605405)和中央高校基本科研业务费专项(编号2022YQDC06)联合资助的成果。

收稿日期：2022-06-10；改回日期：2022-08-19；网络发表日期：2023-03-14；责任编辑：潘静。

作者简介：韩双彪，男，1987年生。副教授，主要从事非常规油气地质评价工作。E-mail：bjcuphan@163.com。

*通讯作者：王成善，男，1951年生。教授，主要从事沉积学研究。E-mail：chshwang@cugb.edu.cn。

DOI：10.19762/j.cnki.dizhixuebao.2023018.

对较低的烃源岩中 O_x 化合物 TMIA 在 8.80%～14.26%之间，成熟度相对较高的烃源岩中 O_x 化合物 TMIA 在 37.76%～55.04%之间。N_y 化合物（由碳、氢、氮三种元素组成的有机质极性分子化合物，下标代表化合物中氮原子数量）以 N_1 化合物为主，TMIA 相对较低，总体随成熟度升高 TMIA 逐渐降低，成熟度相对较低的烃源岩中 N_1 化合物 TMIA 在 11.21%～19.1%之间，而成熟度相对较高的烃源岩中 N_1 化合物 TMIA 在 0.48%～4.52%之间。S_z 化合物（由碳、氢、硫三种元素组成的有机质极性分子化合物，下标代表化合物中硫原子数量）以 S_1 化合物为主，与 CH、N_y 化合物类似，在高成熟烃源岩中 TMIA 急剧下降，在成熟度相对较低的烃源岩中 S_1 化合物 TMIA 在 5.48%～10.32%之间，而成熟度相对较高的烃源岩中 S_1 化合物 TMIA 在 0.64%～1.32%之间。N_yS_z 化合物（由碳、氢、氮、硫四种元素组成的有机质极性分子化合物，下标代表化合物中各元素的原子数量）几乎不发育，TMIA 仅在 0.05%～2.69%之间。O_xN_y 化合物（由碳、氢、氧、氮四种元素组成的有机质极性分子化合物，下标代表化合物中各元素的原子数量）以 N_1O_1 化合物为主，含量随沉积有机质成熟度升高逐渐增加，成熟度相对较低的烃源岩中 O_xN_y 化合物 TMIA 在 4.91%～14.25%之间，成熟度相对较高的烃源岩中 O_xN_y 化合物 TMIA 在 22.11%～51.14%之间。O_xS_z 化合物（由碳、氢、氧、硫四种元素组成的有机质极性分子化合物，下标代表化合物中各元素的原子数量）TMIA 在 0.01%～13.87%之间，S_1O_1、S_1O_2、S_1O_3、S_1O_4 均有发育，总体上均随成熟度升高含量逐渐增加。

2 基于 FT-ICR MS 的烃源岩成熟度评价方法

2.1 烃源岩有机质组分变化规律

有机质热演化过程中，缩聚反应和芳构化反应往往同步进行，最终形成热稳定性更强的高碳化合物，该过程中有机质化合物组分具有较明显的演变规律，即随着成熟度的增加，分子结构中芳香环周围的官能团及侧链逐渐脱落，化合物中芳香结构逐渐增加而脂肪结构逐渐减少（Schenk et al.，1986）。在前述理论基础上，利用 FT-ICR MS 高精度分辨率的优势，导出所有信噪比大于 6 的质谱峰，将质谱仪器所测并经内部校正后的 IUPAC 质量数（IUPAC mass）通过下式转换为 Kendrick 质量数：

Kendrick 质量数 = IUPAC 质量数 ×（14/14.01565）

转换后的 Kendrick 质量数与其最接近的整数质量的差值定义为质量偏差（Kendrick mass defect，KMD）。Kendrick 质量数的实质是将 CH_2 的相对分子质量 14.01565 定义为整数质量单位，即 14.00000，这样转换后的质量表中所有相差 14 的整数质量单位所对应的化合物即具有相同的母体结构单元，但具有不同的亚甲基数，也就是取代基不同的同类型化合物具有相同的 KMD 数值。通过 KMD 值大小可以快速鉴定同类型化合物；通过分子量计算程序计算出各个化合物分子中 C、H、S、N、O 等原子的组合方式，将 CH、O_1、N_1、S_1 化合物作为目标化合物，得到各质谱峰对应的分子式（$C_cH_hS_sN_nO_o$，下标 c、h、n 分别为分子中碳、氢、氮原子个数），最终能得到目标化合物的分子组成信息及其对应的等效双键数（double band equivalence，DBE），也即分子结构中环烷环数和双键个数之和：DBE = c −（h/2）+（n/2）+1，每一种 DBE 对应不同碳原子数的一个化合物系列。CH 化合物仅由碳、氢两种元素组成，代表烷烃类或芳烃类化合物，O_1 化合物由碳、氢、氧三种元素组成但仅含一个氧原子，可以代表具有不同结合形式的含氧化合物，例如醛、醇、酮、呋喃等，N_1 化合物由碳、氢、氮三种元素组成但仅含一个氮原子，代表各种含有吡啶和吡咯等结构的含氮化合物、胺类或氨类化合物（如具有油气运移指示潜能的咔唑类化合物），S_1 化合物由碳、氢、硫三种元素组成但仅含一个硫原子，代表芳族噻吩的可能性最大（Noah et al.，2020）。以碳原子数为 X 轴区分长链化合物与短链化合物，以 DBE 为 Y 轴区分化合物不饱和度，以碳数-DBE 交汇图的形式更直观地表达目标化合物分子结构及组分的动态演化规律。

根据碳数-DBE 交汇图投图结果（图 1）可以发现，目标化合物组分及含量在有机质热演化过程中具有显著的变化特征，即各目标化合物的碳数和 DBE 总体上均随成熟度升高逐渐降低，化合物种类也均随成熟度升高不同程度地减少。根据 DBE 值的大小，可以将 CH 化合物分为 DBE1-5、DBE6-15 和 DBE15＋三组，分别为低、中、高 DBE 化合物，它们具有不同的芳香度和分子大小（Han Yufu et al.，2022）。DBE 为 12、15、18 的 N_1 化合物主要是烷基咔唑类化合物，具有 1～3 个芳环（Zhu Xiaochun et al.，2011），在有机质热演化过程中，由于具有长碳链和低不饱和度的含氮化合物的稳定性逐渐降低，沉积有机质中具有更多稠环的碱性氮化物（能用高氯酸在醋酸溶液中滴定的氮化物，如吡啶，喹啉等）会逐渐富集。DBE≥3 的 S_1 类化合物最有可能是含噻吩单元的芳香族化合物，而 DBE 数较低的 S_1 类化合物可以解释为烷基硫醇（四氢噻吩）或烷基噻吩（四氢硫吡喃）（Liu Weimin et al.，2018）。显然，成熟度是造成不同烃源岩有机质成分差异的主要因素（Jiang Bin et al.，2021），成熟度较低的烃源岩中有机质化合物分子以高 DBE 化合物为主，碳数的范围较宽，成熟度较高的烃源岩中有机质化合物分子以低 DBE 化合物为主，碳数的范围也更窄。

2.2 参数计算

基于团队前期研究基础（Noah et al.，2020），在碳数-DBE 交汇图中划定 DA1 和 DA2 两个定义区间，其中：DA1 =（碳数 20～30）&（DBE10～20）+（碳数 30～40）&（DBE20～30）+（碳数 40～50）&（DBE30～40），即图 1 中蓝色区域；DA2 =（碳数 30～40）&（DBE10～20）+（碳数 40～50）&（DBE20～30）+（碳数 50～60）&（DBE30～40），即图 1 中橙色区域。通常认为，随着有机质热成熟度增加，芳香结构随之相对增加而脂肪结构随之相对减少，对于拥有相同碳数且为同一类型的化合物，相较于 DA2 区域，处于 DA1 区域的

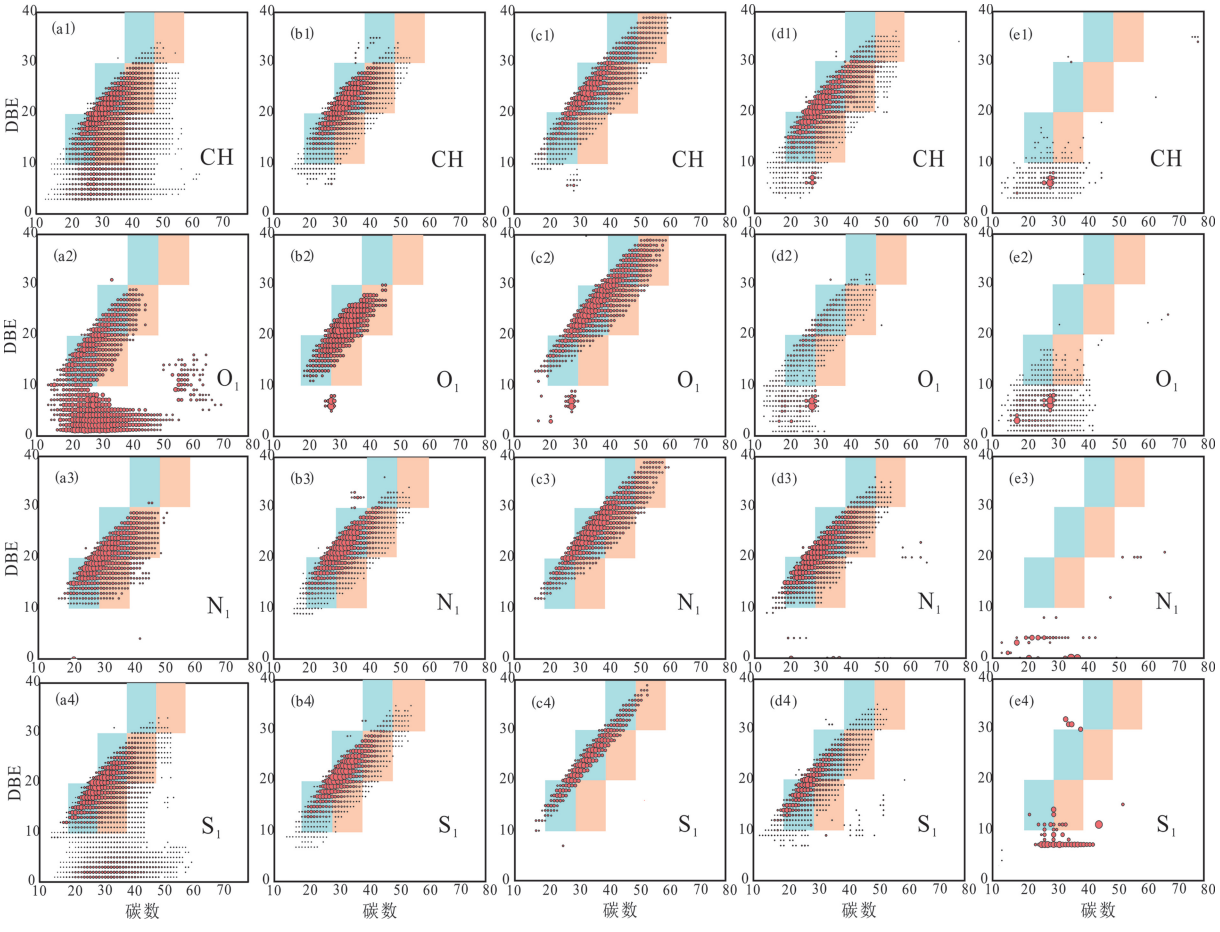

图 1　五组样品中(a～e)目标化合物的碳数-DBE 图版及 MAT 的成熟度计算区域

(a1～a4:R_o=0.91%;b1～b4:R_o=1.26%;c1～c4:R_o=1.68%;d1～d4:R_o=3.77%;e1～e4:R_o=4.24%)

化合物具有更多的等效双键,具有较高 DBE 的化合物可以通过环合和芳构化反应从具有较低 DBE 的化合物形成(Poetz et al.,2014),因此 DA1 中的化合物芳构化程度相对较高。统计两个定义区间对应的信号丰度 SA1 和 SA2,基于有机质在热应力作用下发生的侧链裂解、芳构化和缩合等反应,根据公式 MAT=(SA1)/(SA2)计算 MAT 值。理论上,MAT 可代表量化目标化合物中碳数和 DBE 下降的动态过程,从而区分烃源岩成熟度的高低。

2.3　可行性及适用性评价

为进一步验证 MAT 的可行性和适用性,研究团队选取了全球范围内不同盆地不同层系的典型烃源岩样品(Horsfield et al.,2022;Han Shuangbiao et al.,2023),包括美国 Williston 盆地 Bakken 地层、加拿大 Western 盆地 Duvernay 地层、德国 Lower Saxony 盆地 Posidonia 地层、中国松辽盆地沙河子组地层、澳大利亚 Georgina 盆地 Arthur Creek 地层,这些样品包括湖相、海相的不同类型烃源岩,TOC 在 0.97%～44.05%之间且普遍大于 2%,同时 T_{max} 在 423～665℃之间,R_o 在 0.48%～4.24%之间,基本覆盖了未成熟—过成熟的成熟度全区间,充分满足本研究对比讨论所需。

R_o 是目前有机质成熟度评价工作中相对常用的成熟度指标,在部分地质环境中能获得相对准确的评价结果,将本研究提出的 MAT 与 R_o 拟合对比,能有效地进一步讨论 MAT 的可行性及适用性。对比拟合结果如图 2 所示,总体上 R_o 在 0.48%～2.5%(T_{max} 为 420～600℃)的成熟度区间内,MAT 与成熟度有着显著的正相关线性关系,R_o 在 2.5%～4.5%(T_{max} 为 600～670℃)之间时,MAT 与成熟度负相关。R_o 在 0.48%～2.5%之间时,各目标化合物 R_o-MAT 的相关系数 R^2 在 0.811～0.918 之间。各目标化合物的 MAT 与 R_o 有较强的线性关系,总体而言 CH 化合物与 O_1 化合物相关性最好,离散度最低,N_1 化合物次之,S_1 化合物也具有良好的相关性,但离散度相对较高。综上所述,MAT 与有机质成熟度具有显著的相关关系,能较好地应用于成熟度评价工作中。

3　地质意义

基于 FT-ICR MS 能够直观地反映烃源岩有机质化合物分子热演化过程中相对含量的变化规律,最终通过信号丰度换算实现连续量化的有机质成熟度评价。通过对各样品的 MAT 与 R_o 拟合分析,当 R_o<2.5%时,CH 化合物中对应未成熟阶段(R_o<0.5%)的 MAT<0.6,对应成熟阶段(R_o 介于 0.5%～1.3%之间)的 MAT 范围为 0.60～2.28,对应

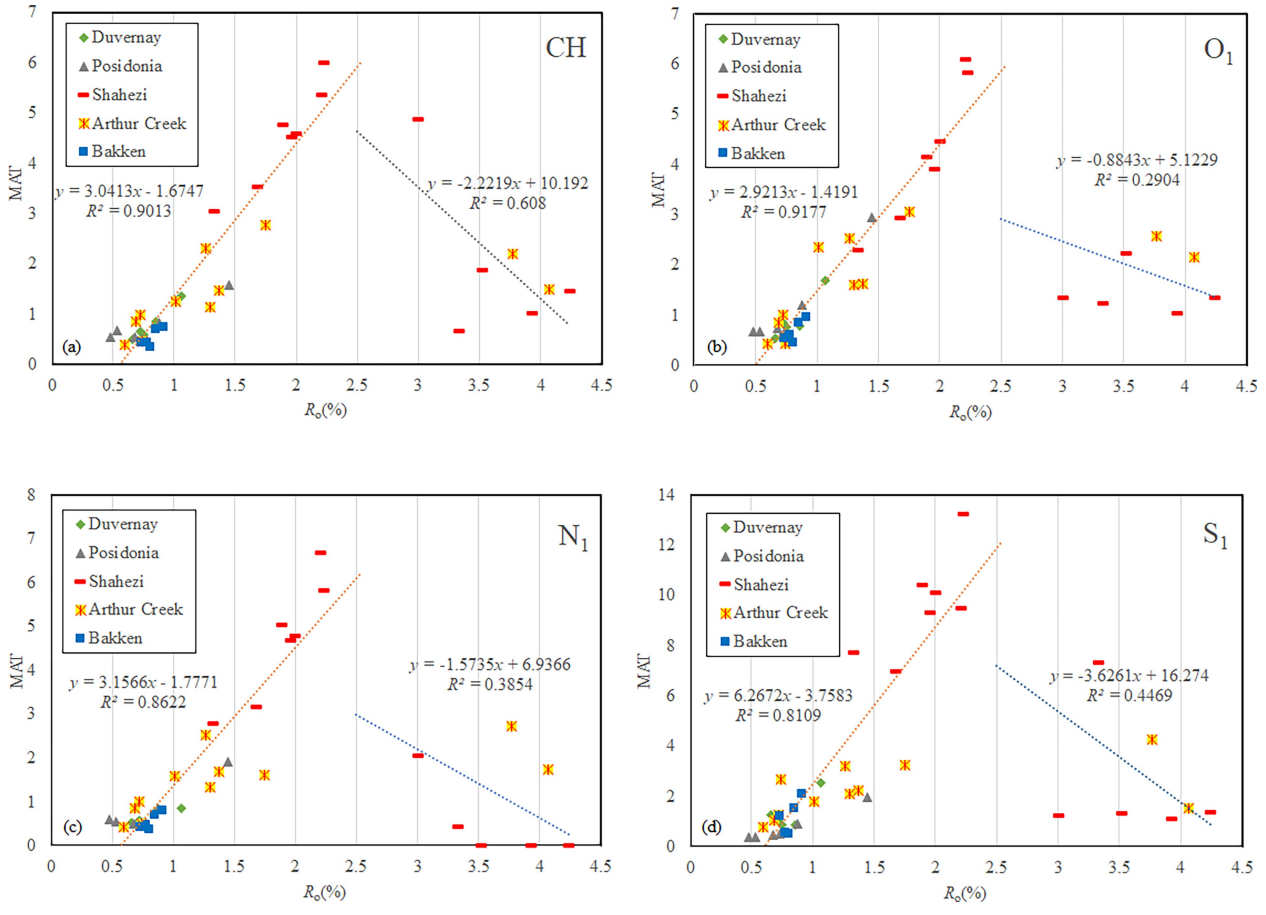

图 2 不同类型样品 MAT 与 R_o 对比评价

高成熟阶段(R_o 介于 1.3%～2.0%之间)的 MAT 范围为 2.28～4.41,对应过成熟阶段且 R_o<2.5%的 MAT 范围为 4.41～5.93;O_1 化合物中对应未成熟阶段的 MAT<0.65,对应成熟阶段的 MAT 范围为 0.65～2.38,对应高成熟阶段的 MAT 范围为 2.38～4.42,对应过成熟阶段且 R_o<2.5%的 MAT 范围为 4.4～5.88;N_1 化合物中对应未成熟阶段的 MAT<0.55,对应成熟阶段的 MAT 范围为 0.55～2.33,对应高成熟阶段的 MAT 范围为 2.33～4.54,对应过成熟阶段且 R_o<2.5%的 MAT 范围为 4.54～6.11;S_1 化合物的 MAT 与 R_o 拟合结果离散度较高,应用于评价有机质成熟度时,使用 CH、O_1、N_1 三种化合物的 MAT 效果更好。当 R_o>2.5%时,四类化合物的 MAT 随成熟度增加呈下降趋势,且下降点的拟合曲线离散度较高,相关系数 R^2 在 0.502～0.696 之间。一方面受热演化程度、烃源岩母质类型、镜质体富集程度、镜质体自身类型和所处沉积环境等各因素的影响(Price et al., 1985;郭迪孝等,1990),测量分散有机质镜质体反射率时结果可能出现偏差;另一方面,伴随有机质热成熟度的增加,DBE 和碳数均逐渐下降,且在高成熟阶段过渡至过成熟阶段时下降尤为显著,在部分过成熟样品中甚至不发育 DBE 在 10～40、碳数在 0～60 的化合物,在澳大利亚 Georgina 盆地 Arther Creek 地层和中国松辽盆地沙河子地层的过成熟样品中均有体现,这一现象指示着高热演化条件下特定物理化学反应的发生,例如有机质化合物分子的突然崩解以及焦沥青、石墨的生成。有机质分子化学键主要以共价键为主,共价键的键长及键能共同决定了化合物分子的热稳定性,有机质热演化过程中伴随侧链的脱落和缩聚反应的发生(Poetz et al., 2014),具有更短键长和更高键能的大分子化合物逐渐生成,但这些大分子化合物同样具有热稳定性极限,在热解温度、时间达到该极限时,大分子化合物将可能突然崩解,进而导致高 DBE 高碳数化合物相对含量的急剧降低,同时也有可能伴随晚期甲烷的生成(Lorant and Behar, 2002)。在热演化作用进行的过程中,H/C 原子比持续下降,过成熟阶段,有机质进一步发生缩聚作用将导致含氢量更低的碳质残余物产生,即焦沥青、石墨等(Hou Yuguang et al., 2019),最终体现在碳数-DBE 图版中即表现为 DBE 在 10～40、碳数在 0～60 的化合物几乎不发育的现象,进而导致 MAT 的显著降低。

本次研究的分析方法以有机质结构演化特征的内在规律为理论基础,通过分析元素组成推演分子结构,再进一步判断化合物种类,量化了有机质热演化过程中化合物分子的结构特征,评价原理回归了热演化过程中有机质化合物分子结构演变的本质,不受镜质体等特定组分空间分布及丰度的限制,在不同盆地、不同沉积环境、不同钻孔、不同地层的对比评价中获得了良好的应用效果,有望为烃源岩成熟度评价

提供新的借鉴和参考,同时为深入研究有机质生烃机理提供了新的角度和思路。

主要参考文献

郭迪孝, 鄸轩增. 1990. 镜质体反射率是成熟度的通用"标尺"吗?. 石油实验地质, 12(4): 421～425.

卢鸿, 史权, 马庆林, 时阳, 刘金钟, 盛国英, 彭平安. 2014. 傅里叶变换离子回旋共振质谱对中国高硫原油的分子组成表征. 中国科学: 地球科学, 44(1): 122～131.

王光辉, 熊少祥, 何美玉, 王洪奇. 2001. 傅里叶变换-离子回旋共振质谱. 现代仪器, (1): 125.

肖贤明, 周秦, 程鹏, 孙键, 刘德汉, 田辉. 2020. 高-过成熟海相页岩中矿物-有机质复合体(MOA)的显微激光拉曼光谱特征作为成熟度指标的意义. 中国科学: 地球科学, 50(9): 1228～1241.

Han Shuangbiao, Xie Linfeng, Du Xin, Xiang Chaohan, Tang Zhiyuan, Wang Chengshan, Horsfield B, Mahlstedt N. 2023. Insights into organic metagenesis using Raman spectroscopy and high resolution mass spectrometry: A case study of the Shahezi Formation, deep Songliao basin, China. International Journal of Coal Geology, 265: 104153.

Han Yuanjia, Poetz S, Mahlstedt N, Karger C, Horsfield B. 2018. Fractionation and origin of N_yO_x and O_x compounds in the Barnett Shale sequence of the Marathon 1 Mesquite well, Texas. Marine and Petroleum Geology, 97: 517～524.

Han Yufu, Noah M, Lüders V, Krms S, Schubert F, Poetz S, Horsfield B, Kai M. 2022. Fractionation of hydrocarbons and NSO-compounds during primary oil migration revealed by high resolution mass spectrometry: Insights from oil trapped in fluid inclusions. International Journal of Coal Geology, 254: 103974.

Hou Yuguang, Zhang Kunpeng, Wang Furong, He Sheng, Dong Tian, Wang Cheng, Qin Weifeng, Xiao Yan, Tang Biao, Yu Rui, Du Xuebin. 2019. Structural evolution of organic matter and implications for graphitization in over-mature marine shales, South China. Marine and Petroleum Geology, 109: 304～316.

Horsfield B, Mahlstedt N, Weniger P, Misch D, Vranjes-Wessely S, Han Shuangbiao, Wang Chengshan. 2022. Molecular hydrogen from organic sources in the deep Songliao basin, P. R. China. International Journal of Hydrogen Energy, 47: 16750～16774.

Jiang Bin, Tian Yankuan, Zhai Zheng, Zhan Zhaowen, Liao Yuhong, Zou Yanrong, Peng Ping'an. 2021. Characterization of heteroatomic compounds in free and bound bitumen from different source rocks by ESI FT-ICR MS. Organic Geochemistry, 151: 104147.

Liu Weimin, Liao Yuhong, Pan Yinhua, Jiang Bin, Zeng Qing, Shi Quan, Samuel H C. 2018. Use of ESI FT-ICR MS to investigate molecular transformation in simulated aerobic biodegradation of a sulfur-rich crude oil. Organic Geochemistry, 123: 17～26.

Lorant F, Behar F. 2002. Late generation of methane from mature kerogens. Energy & Fuels, 16: 412～427.

Noah M, Horsfield B, Han Shuangbiao, Wang Chengshan. 2020. Precise maturity assessment over a broad dynamic range using polycyclic and heterocyclic aromatic compounds. Organic Geochemistry, 148(12): 104099.

Poetz S, Horsfield B, Wilkes H. 2014. Maturity-driven generation and transformation of acidic compounds in the organic-rich posidonia shale as revealed by electrospray ionization Fourier transform ion cyclotron resonance mass spectrometry. Energy & Fuels, 28: 4877～4888.

Price L C, Baker C E. 1985. Suppression of vitrinite reflectance in amorphous rich kerogen—A major unrecognized problem. Journal of Petroleum Geology, 8(1): 59～84.

Schenk H J, Witte E G, Müller P J, Schwochau K. 1986. Infrared estimates of aliphatic kerogen carbon in sedimentary rocks. Organic Geochemistry, 10: 1099～1104.

Zhu Xiaochun, Shi Quan, Zhang Yahe, Pan Na, Xu Chunming, Chung K H, Zhao Suoqi. 2011. Characterization of nitrogen compounds in coker heavy gas oil and its subfractions by liquid chromatographic separation followed by Fourier transform ion cyclotron resonance mass spectrometry. Energy & Fuels, 25: 281～287.

HAN Shuangbiao, XIE Linfeng, TANG Zhiyuan, LI Jian, WANG Chengshan, Brian HORSFIELD: Evaluation method of source rock maturity based on Fourier transform mass spectrometry and its geological significance

《地质学报》(中文版)征稿简则

《地质学报》是中国地质学会主办的地质科学学术刊物。《地质学报》反映地质科学各分支学科及边缘学科中最新、最高水平的基础理论研究和基本地质问题研究成果。《地质学报》(中文版)和《地质学报》(英文版)分别独立刊载论文。

一、《地质学报》编辑部与作者约定如下:

1. 作者应保证稿件不一稿两投,并对所投稿件拥有无可争议的著作权。

2. 所有文章均需通过网上办公系统投稿,《地质学报》中文版请投 **http://www.geojournals.cn/dzxb/ch/index.aspx**;《地质学报》英文版:**https://onlinelibrary.wiley.com/journal/17556724**;《地质论评》:**http://www.geojournals.cn/georev/ch/index.aspx**。

网上投稿,请将文、图、表放入同一个 Microsoft Word 文件中(请作者自留原始文件,以备修改,详细投稿办法见网站说明)。投稿被接收与否以编辑部网上收妥回信为准。

3. 不得将投向本编辑部的稿件同时投至其他刊物,否则视为一稿两投。

4. 编辑部承诺一般在 90 日内给出刊用与否的通知。作者在 90 日内,不应将稿件另投他刊。

5. 对决定录用的稿件,作者应根据编辑部提供的修改意见修改后,向编辑部提交论文 Word 文档、清绘好的 CorelDRAW 图件。

6. 稿件文责自负,若做实质性修改,须征得作者同意。

7. 稿件刊出后,将按规定支付稿酬。

二、对投稿内容的要求:

每篇文章需包含下列要素:文章题目(不多于 25 个汉字)、作者、作者单位、内容提要(不少于 400 个汉字)、关键词(5 个左右)、引言(本刊不标"引言"字样,但必须有引言节)、正文、图表、致谢、参考文献、注释、英文摘要(同中文摘要)、作者简介。重要内容说明如下:

1. **正文**:长度不限。应有地质背景、研究方法、研究结果、讨论、结论等几部分。

投向《地质学报》(英文版)的稿件,行文必须规范、通顺,请附相应的中文稿,以备准确理解原文含意。

2. **图件**:① 凡涉及国界的图件必须绘制在地图出版社公开出版的最新地理底图上。② 图件请用 CorelDraw X4 版本格式最好(且不是导入的)。若为其他软件编成的图件,请提供 600 dpi 的 TIFF 格式的文件。彩色照片(包括图版)请提供 600 dpi 以上的 JPG 格式文件。③ 图件大小:竖排图件宽度<165 mm(通栏图)和<80 mm(半栏图),高度都<230 mm。横排图件宽度<240 mm,高度<150 mm。图内的中文全部用宋体,英文和数字用 Times New Roman,希腊字符用幼圆字体;字号 8 pt,个别字体可用 7 pt。④ 图件不同区域可用通用地质花纹(或符号)区分,除照片外,一般不用灰度图。若必须用灰度图表示不同区域时,灰阶应尽量少,阶差应尽量地大。⑤ 图件若为彩色照片者,可选择集中制成图件。⑥ 图名、图说明、图例注释都应有相应的英文说明。

3. **参考文献**:本刊采用著者-年制,在正文及其图表中:如文献有两个作者或两个作者以上,用"等"或"et al."。举例说明:××××(Whalen et al., 1987; Gilder et al., 1991;许志琴等,2002; Hu Ruizhong et al., 2008)。或"Song Biao et al.(2002)指出采样方法……";"许志琴等(2003)指出……"(同时列出多篇文献时,按年代先后排列)。

中文文献均需提供英译,所有英文文献均放在"References"标题之下。英文文献按"第一作者字母序+年代"排列,其后其他文种放在"参考文献标题之下,按中文、日文、西文、俄文、其他文排列。中文文献按"第一作者姓名汉语拼音字母+年代"先后排列。其他文均按各自第一作者姓名字母顺序排列。若是投《地质学报(英文版)》无须考虑上述情况。

文章请列出全部作者。但专著可按原书封面样式给出,其中的论文写"见:XXX 主编."项时,指明主编一人即可("见:XXX 等主编.")。每一条文献的列出格式请参照我刊 2016 年以来的文章。书籍的引用,分两种情况:a、书籍本身有相应英文名的,引用按正常要求;b、书籍本身没有相应英文名的,尽量不引用此文献,若必须引用,则仅在中文参考文献中列出,正文中的出现用中文引用。

4. **注释**:引用非公开出版物时在文后单列注释一栏,格式与参考文献相同。参考文献及注释详细格式可见《地质学报》修改注意事项。

5. **英文摘要**:在《地质学报》中文版和《地质论评》上发表的论文必须提交英文摘要,包括题名、作者、作者单位、内容提要和关键词。作者和作者单位均应为全名,内容提要与相应中文提要一致,最好更为详细。

6. **作者简介**:主要介绍作者的学术经历,包括资助项目、姓名、性别、学历、职称、研究方向、E-mail 等,具体格式可参考我刊已发表的最新文章。

《地质学报》(中文版)编辑部