中国科学: 地球科学 2014 年 第 44 卷 第 8 期: 1723 ~ 1730
www.scichina.com earth.scichina.com
《中国科学》杂志社
SCIENCE CHINA PRESS

论 文

塔里木盆地海相烃源岩与原油芳烃单体烃碳同位素分布特征及其意义

张敏[①②*], 赵红静[①②†], 洪艳春[③], 陈祖林[①②], 林俊峰[①]

① 长江大学地球环境与水资源学院, 武汉 430100;
② 长江大学油气资源与勘探技术教育部重点实验室, 武汉 430100;
③ 中油国际(PK)有限责任公司, 北京 102206
* 联系人, E-mail: zmjpu@163.com
† 联系人, E-mail: zhaodiana@qq.com

收稿日期: 2013-07-30; 接受日期: 2013-11-06; 网络版发表日期: 2014-07-15
国家自然科学基金项目(批准号: 40973041)、高等学校博士点基金(博导类)项目(编号: 20104220110001)和湖北省自然科学基金项目(编号: 2009CDB205)资助

摘要 芳烃化合物是原油和烃源岩抽提物中的主要馏分, 经过小型氧化铝两步层析法, 可以得到分离度高的二环芳烃和三环芳烃化合物. 塔里木油田不同地区的上奥陶统烃源岩和寒武系-下奥陶统烃源岩抽提物芳烃馏分的 GC-IRMS 分析表明芳烃单体烃碳同位素组成除受热演化程度影响外, 还受有机质来源、沉积环境和成烃过程的影响. 无论是烷基萘、烷基联苯、烷基菲的亚系列, 还是单体化合物, 如 1-甲基菲、9-甲基菲、2, 6-二甲基菲等的δ^{13}C 值均表现为寒武系-下奥陶统烃源岩偏重, 两套烃源岩之间亚系列的δ^{13}C 差值最高可达 16.1‰, 单体烃之间差值可达 14‰. 综合塔里木盆地不同时代烃源岩和原油的生物标志物组合特征及单体烃的碳同位素组成, 可为油源对比提供强有力的佐证. 塔中地区大部分奥陶系原油 9-甲基菲具有偏负的δ^{13}C 组成, 贫伽玛蜡烷, 富含升藿烷, 主要来自于上奥陶统烃源岩; 而塔东地区原油和部分塔中地区原油富伽玛蜡烷、贫升藿烷, 9-甲基菲的δ^{13}C 组成明显较重, 表明其主力油源岩为寒武系-下奥陶统烃源岩.

关键词
芳烃
单体烃碳同位素
9-甲基菲
油源对比
塔里木盆地

芳烃化合物是沉积有机质中的主要组成部分, 一般可占有机质总量或原油族组成中的 20%~45%, 由于其组成和分布特征往往反映了原始有机质来源、沉积和成岩环境、地质热历史、非生物合成作用、地质流体的运移与聚集、乃至二次蚀变作用的影响, 因此广泛应用于油气勘探开发、环境监测与环境保护等诸多领域. 有机质的稳定碳同位素组成特征同样富含有机质母质来源、沉积环境、热演化、次生蚀变和运移分馏等多种地质信息. 20 世纪 80 年代, 原油的饱和烃和芳烃碳同位素组成就被用来区分海相和陆相原油(Sofer 等, 1986). 90 年代以来, 随着色谱-同位素比值质谱(GC-IR-MS)分析技术的日趋完善(Peters 等, 2005), 尤其是单体烃同位素分析技术(CSIA 或 IRM/GCMS)的发展使得碳同位素组成研究深入到分

中文引用格式: 张敏, 赵红静, 洪艳春, 等. 2014. 塔里木盆地海相烃源岩与原油芳烃单体烃碳同位素分布特征及其意义. 中国科学: 地球科学, 44: 1723–1730
英文引用格式: Zhang M, Zhao H J, Hong Y C, et al. 2014. The distribution characteristic and its significance of compound specific isotopic composition of aromatic hydrocarbon from marine source rock and oil in the Tarim Basin, Northwest China. Science China: Earth Sciences, doi: 10.1007/s11430-014-4937-x

子级别, 从而为复杂油气藏的油源对比提供了一种可靠的新途径.

芳烃馏分中芳烃化合物组成复杂, 本底高, 进行色谱分析时共溢出现象严重, 往往达不到单体烃同位素比值测定所需要的分离度, 而芳烃的精细分离技术的研究则使得芳烃单体碳同位素组成逐渐成为石油地球化学家进行复杂油气藏的油源对比的新兴有效手段(Kim 等, 2005; 周佩瑜和孙永革, 2008; 刘美美等, 2010; 林俊峰和张敏, 2011; 陈祖林等, 2013).

Freeman 等(1994)检测了德国 Rheingraben 地区的 Messel 页岩中的奥利烷系、乌散烷系、脱 A 羽扇烷系、脱 A 乔木烷系和脱 A 伽玛蜡烷系芳香烃的碳同位素组成, 发现不同芳构化程度的化合物的同位素组成差异很小, 在有无 A 环的三萜烯之间也无同位素分馏效应出现, 说明芳烃化合物的同位素组成受控于其生物前身物. Radke 等(1998)对比研究富含陆源有机质的煤页岩、煤岩和海相泥页岩中的菲和甲基菲的产率和碳同位素组成, 发现陆相有机质中的菲系列化合物的$\delta^{13}C$ 比海相来源的重, 差值最高可达 7‰, 且从开始生烃的低热成熟度到生烃高峰期未有明显变化, 表明芳烃化合物的碳同位素组成主要与有机质类型相关, 而与热演化程度关系不大. Grice 等(2007)研究了澳大利亚珀斯盆地二叠-三叠系沉积物中的芳烃化合物的碳同位素组成特征, 也得到了相似的结论. Maslen 等(2011)对西澳大利亚盆地原油中的烷基苯、烷基萘、烷基菲和烷基联苯的总体碳同位素组成及 1,6 二甲基萘(DMN)、1,2,5 三甲基萘(TMN)、1-MP 和 9-MP 的碳同位素组成进行了系统研究, 结果表明海相有机质来源芳烃化合物碳同位素组成偏轻, 而且该四个化合物的碳同位素组成可以区分陆相和海相原油. 贾望鲁等(2008)对比了塔里木原油沥青质热解产物中的 1,2,3,4-四甲基苯、正构烷烃和原油沥青质的碳同位素组成, 发现 1,2,3,4-四甲基苯的$\delta^{13}C$ 值在−19.6‰~24.0‰, 明显偏重, 表征了静水条件下 H_2S 充溢的强还原环境. 这些研究均表明虽然芳烃化合物的组成和含量与有机质热演化程度具有相当密切关系, 但单芳烃化合物的碳同位素组成却主要受控于母质来源, 因此有望在复杂油气藏的油源对比中取得突破.

塔里木盆地是我国西部典型的多旋回叠合盆地(金之钧, 2006), 具有多套烃源岩, 多期生排烃, 多期成藏, 多层系含油气和多种类型油气藏共存的特点. “八五”、“九五”期间国家重点科技攻关研究成果明确了塔里木盆地台盆区主要存在寒武系-下奥陶统、中上奥陶统两套烃源岩. 从形成模式和沉积环境上来看, 两套烃源岩存在较大差异: 寒武系-下奥陶统主要为源岩发育在沉积中心的“保存模式”, 水体分层, 缺氧事件, 浮游生物为主; 而中、上奥陶统主要为烃源岩发育在台缘斜坡带上的“生产力模式”, 受上升洋流控制, 底层水有氧, 浮游、底栖动、植物都很发育, 藻类勃发. 其生排烃史也有明显差异, 寒武系烃源岩演化快、生烃早, 加里东晚期进入大量生排烃阶段, 现已进入高-过成熟演化阶段; 而中、上奥陶统烃源岩演化慢、生烃晚(朱光有等, 2011), 目前烃源层主体处于成熟阶段. 这两套烃源岩谁主谁次迄今仍为油气源争论的焦点. 由于烃源岩热成熟度高, 多期充注所导致的地球化学性质的复杂以及原油次生蚀变所带来的组成变化, 传统的石油地球化学方法并不能彻底解决这一难题. 本文首次系统研究了塔里木盆地代表性烃源岩和原油样品的烷基萘、烷基菲和烷基联苯的单体烃碳同位素组成, 以期为精细油源对比提供新的地球化学依据.

1 样品与实验

本次研究选取样品涉及塔中、塔东和塔北 3 个区域, 其中塔中地区上奥陶统烃源岩样品 5 个、原油样品 7 个; 塔东地区寒武系-下奥陶统烃源岩样品 8 个, 原油样品 3 个; 塔北地区寒武系烃源岩样品 1 个, 原油样品 2 个(图 1). 对烃源岩和原油样品分别进行了饱和烃、芳烃的 GC/MS 分析; 并选取具有代表性的 8 个烃源岩和 11 个原油进行了芳烃单体烃分离(表 1), 测定芳烃分子碳同位素组成.

烃源岩氯仿沥青“A”抽提物和原油中的芳烃馏分直接进行 GC/MS 分析, 经过小型氧化铝柱两步层析法(陈祖林等, 2012)精细分馏出来的不同环数的芳烃馏分进行 GC-IRMS 分析. GC/MS 分析采用 Agilent 6890N-5975IMSD 色谱/质谱仪, 色谱柱为 HP-5MS 石英毛细柱(60 m × 0.32 mm × 0.25 μm), 汽化室温度为 300℃, 恒温脉冲不分流进样, 载气流速为 1.0 mL/min. 柱炉温的升温程序为: 起始温度 100℃, 保持 1 min, 2℃/min 升至 300℃, 恒温 10 min. 质谱采用 EI 电离方式, 电子能量为 70 Ev, 接口温度为 280℃, 采集方

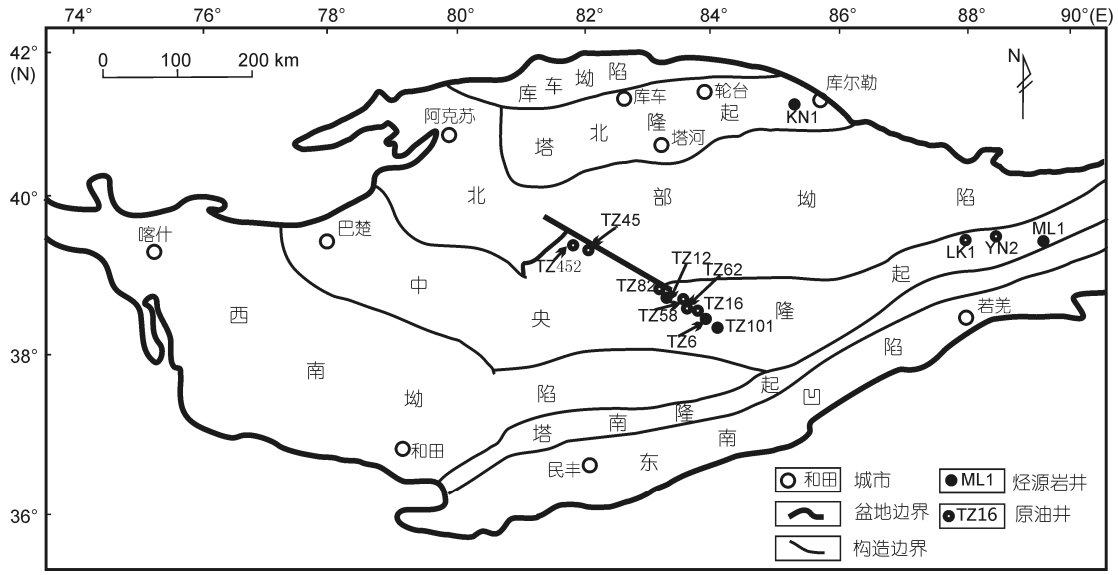

图 1　研究区取样位置示意图

表 1　研究区芳烃分子碳同位素组成的烃源岩和原油样品基本信息

样品	地区	样品代号	井号	深度(m)	层位	岩性
烃源岩	塔中	TZ6-a	塔中 6	3870	O_3	泥灰岩
		TZ6-b	塔中 6	3975	O_3	泥灰岩
		TZ12	塔中 12	4656~4669	O_3	泥质灰岩
		TZ101-a	塔中 101	3896.06~3900	O_3	黑色泥岩
		TZ101-b	塔中 101	3893~3894.46	O_3	黑色泥岩
	塔东	ML1-a	米兰 1	4948.8	O_1	黑色泥岩
		ML1-b	米兰 1	5655.7~5658.9	O_1	灰岩
	塔北	KN1	库南 1	5189	$\in$	黑灰色灰岩
原油	塔北	YW2	羊屋 2	6453~6499	O_2	
		LN621	轮南 621	5720.8~5785.5	O	
	塔中	TZ45	塔中 45	6206~6150	O	
		TZ58	塔中 58	4592.19~4700	O	
		TZ16	塔中 16	3812.5~3819.5	C_{III}	
		TZ62	塔中 62	4052.98~4073.58	S	
		TZ452	塔中 452	6376.76~6550	O	
		TZ82	塔中 82	5349.25~5385.00	O	
	塔东	TD2	塔东 2	4561.93~5040	$\in+O_1$	
		YN2	英南 2	2644~3646	J	
		LK1	龙口 1	4635~4650	J	

式为全扫描和选择离子采集模式, 全扫描质量范围 50~550 amu. GC-IRMS 测定使用的是 Isoprime GV 型色谱-同位素比值质谱, 采用的是 HP-5MS 色谱柱 (60 m × 0.32 mm × 0.25 μm). 升温程序为起始温度 100℃, 保持 1 min, 2℃/min 升至 300℃, 恒温 10 min, 载气为氦气, 恒流模式. 其余条件与 GC/MS 一致.

2 讨论与结果

2.1 精细分馏出的二环和三环芳烃化合物及其碳同位素

在两步层析法中, 第一步冲洗出二环芳烃(主要为烷基萘系列), 第二步冲洗出三环芳烃(烷基菲系列), 各化合物的定性采用特征离子峰的溢出时间与顺序(图2), 各化合物的定性见图2中说明. 从图中可看出, 烷基萘、烷基菲系列化合物可在色谱上得到非常好的分离, 对于一个正常原油, 基本不存在本底, 完全能满足萘、菲系物单体碳同位素的分析测试需求. 图 3 为芳烃馏分中烷基萘和烷基菲系列化合物的GC-IRMS 的 *m*/*z* 45/44 比值和 *m*/*z* 44 图, 图中烷基萘系列和烷基菲系列化合物均可以在色谱柱中达到基线分离, 化合物之间干扰小, 其相关化合物的特征峰也较为明显. 相同样品的芳烃单体烃碳稳定同位素两次测定结果之间的标准差大部分为 0.5‰左右(陈祖林等, 2013), 满足样品分析的重复性实验要求.

2.2 不同层位代表性烃源岩中芳烃化合物单体烃碳同位素组成特征

本次研究烃源岩样品中大多数取自塔中地区的上奥陶统, 少部分取自塔东和塔北地区的寒武系-下奥陶统. 从不同芳烃亚系列单体烃碳同位素组成上来看, 塔中地区烃源岩芳烃馏分亚系列随芳环数量和甲基数量的增加, 其碳同位素组成有变轻的趋势(图4), 与 Maslen 等(2011)所观察到的现象相似. 其烷基萘系列的δ^{13}C 值从甲基萘(MN)的−29.3‰~−26.2‰减轻

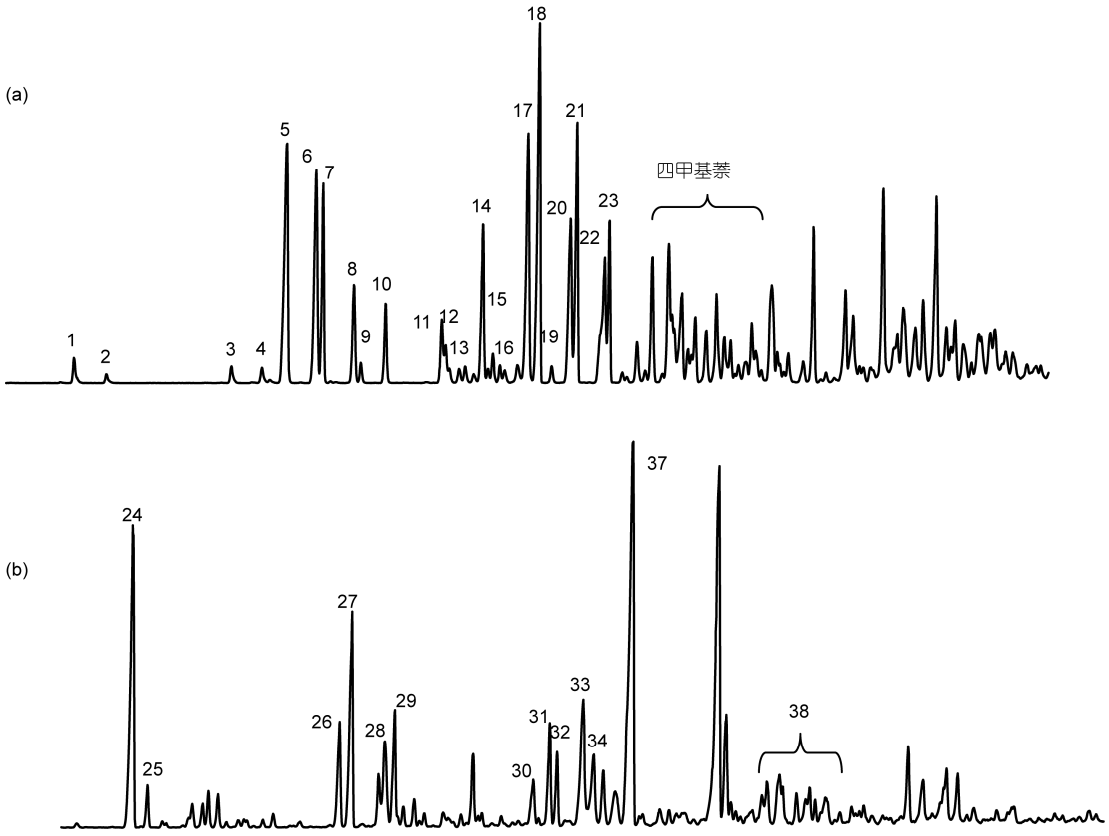

图 2 小型氧化铝柱两步层析法馏出物总离子流图

(a) 第一步冲洗出的二环芳烃; (b) 第二步冲洗出的三环芳烃. 1. 2-甲基萘; 2. 1-甲基萘; 3. 2-乙基萘; 4. 1-乙基萘; 5. 2,7-二甲基萘; 6. 1,7-二甲基萘; 7. 1,3+1,6-二甲基萘; 8. 1,4-二甲基萘; 9. 1,5-二甲基萘; 10. 1,2-二甲基萘; 11. 3-甲基联苯; 12. 4-甲基联苯; 13. 三甲基萘; 14. 1,3,7-三甲基萘; 15. 1,3,6-三甲基萘; 16. 1,4,6+1,3,5-三甲基萘; 17. 2,3,6-三甲基萘; 18. 1,2,7-三甲基萘; 19. 1,6,7-三甲基萘; 20. 1,2,6-三甲基萘; 21. 1,2,4-三甲基萘; 22. 1,2,5-三甲基萘; 23. 1,4,5-三甲基萘; 24. 菲; 25: 蒽; 26. 3-甲基菲; 27. 2-甲基菲; 28. 9-甲基菲; 29. 1-甲基菲; 30. 3,6-二甲基菲; 31. 2,6+3,5-二甲基菲; 32. 2,7-二甲基菲; 33. 2,10-二甲基菲; 34. 1,6-二甲基菲; 35. 2,3-二甲基菲; 36. 4,9 +1,9-二甲基菲; 37. 萤蒽; 38. 三甲基菲

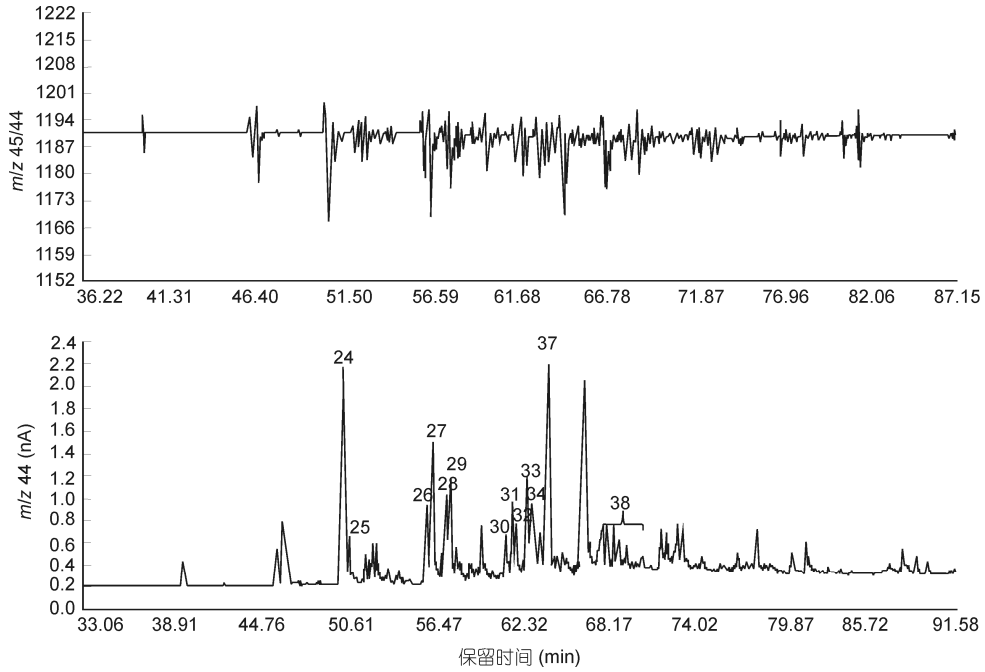

图 3　芳烃馏分中烷基菲系列化合物 GC-IRMS 分析的 *m/z* 45/44 和 *m/z*44 离子流质谱图

* 序号所代表的化合物同图 2

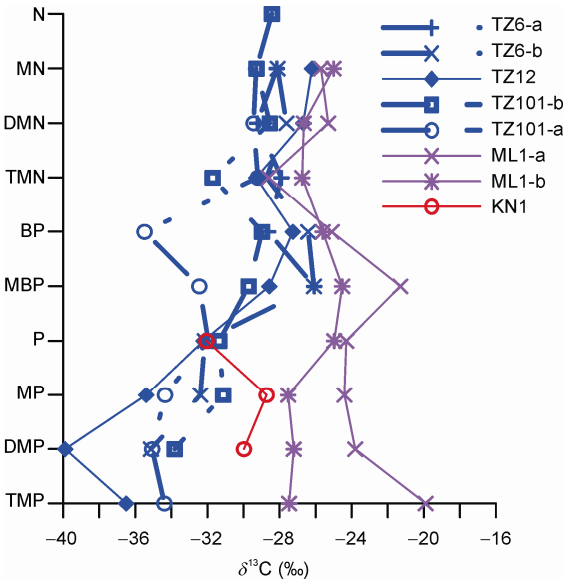

图 4　塔里木盆地不同地区不同层位烃源岩中芳烃化合物碳同位素组成

N: 萘; MN: 甲基萘; DMN: 二甲基萘; TMN: 三甲基萘; BP: 联苯; MBP: 甲基联苯; P: 菲; MP: 甲基菲; DMP: 二甲基菲; TMP: 三甲基菲

至三甲基萘(TMN)的−31.7‰~−27.9‰; 烷基联苯的 δ^{13}C 值从联苯(BP)的−35.5‰~−26.4‰减轻至甲基联苯(MBP)的−32.4‰~−26.1‰; 烷基菲的 δ^{13}C 值从菲(P)的−32.2‰~−31.3‰减轻至三甲基菲(TMP)的−36.5‰~−34.4‰. 但是, 塔东地区的 O_1 样品和塔北地区寒武系样品的这种随芳环数量和甲基数量增加, 碳同位素组成变轻的趋势并不显著. 其中塔东地区的 O_1 样品烷基萘系列的碳同位素组成从 MN 的−25.7‰~−25.0‰变化到 TMN 的−28.6‰~−26.7‰; 烷基联苯从 BP 的−25.6‰~−25.1‰变化到 MBP 的−24.5‰~−21.3‰; 烷基菲系列从 P 的−25.0‰~−24.3‰变化到 TMP 的−27.5‰. 塔北地区库南 1 井烃源岩仅分离出菲系列化合物, 其烷烃碳同位素组成变化较大, 菲、甲基菲和二甲基菲的 δ^{13}C 组成分别为−32‰, −28.7‰和−30.0‰.

层位不同, 芳烃亚系列碳同位素组成有明显差异, 总体上, 上奥陶统样品不同亚系列芳烃化合物的 δ^{13}C 均明显比寒武系-下奥陶统样品偏负, 以烷基菲最为明显, 不同层位之间的 δ^{13}C 值差异最高可达 16.1‰(图 4). 塔北地区的库南 1 井的寒武系烃源岩样品中的菲的碳同位素组成与上奥陶统样品差别不大, 但 MP 和 DMP 则明显偏重(图 4). 这种芳烃亚系列碳同位素组成老地层重, 新地层轻的特征既表明了生源输入和沉积环境差异, 在很大程度上也反映了成

熟度的影响. 塔东地区下奥陶统样品的芳烃亚系列碳同位素组成分布方式也明显与塔中地区上奥陶统样品不同: 随着芳烃环数的增加, 其芳烃亚系列碳同位素并没有减轻的趋势, 随烷基数量的增加, 烷基萘系列碳同位素组成略为减轻, 但烷基联苯则是变重, 烷基菲未见明显规律性变化. 这种分布差异很难用热成熟作用所导致的碳同位素分馏作用来解释, 极可能反映的是烃源岩有机质输入、沉积环境的差异. 塔东地区下奥陶统和塔北地区寒武系样品的烷基菲碳同位素组成远重于塔中地区上奥陶统样品, 表明烷基菲碳同位素组成更能代表 2 套烃源岩之间的差异.

单体芳烃化合物中, 1,6-DMN 主要来源于高等植物, 但具偏负的δ^{13}C 值的原油则可能源于海相源岩. 1,2,5-TMN 反映了细菌贡献, 1-MP 在陆相原油中含量较高, 9-MP 则在海相原油中占据显著优势(Malsen 等, 2011), 因此, 特定的芳香化合物的碳同位素组成也具有溯源意义. 从塔里木盆地不同地区不同层位典型烃源岩样品的特定芳烃化合物的碳同位素组成来看, 不同地区、不同层位之间差异较大, 与芳烃亚系列碳同位素组成特征相似.

塔东地区下奥陶统烃源岩芳烃馏分中的 1,6-DMN, 1,2,5-TMN, 1-MP, 9-MP 和 1,9-DMP 的δ^{13}C 值比塔中地区上奥陶统样品明显偏重(图 5), 其中 1-MP 的δ^{13}C 值差异可达 14‰, 1,9-DMP 的δ^{13}C 值差异更是可达 25‰. 塔北地区寒武系烃源岩所检测出的芳烃单体烃仅限于烷基菲, 1-MP, 9-MP 和 1,9-DMP 的δ^{13}C 值分别为–30.09‰, –25.8‰和–31.40‰, 与塔中地区差别亦很明显, 其 1-MP 和 9-MP 的碳同位素组成与塔东地区下奥陶统样品更为接近. 与芳烃亚系列碳同位素组成相似的是, 塔中地区上奥陶统烃源岩芳烃单体烃碳同位素组成与其芳环数目和侧链数目有很大相关性, 因这 5 个化合物在 X 轴上的排列顺序, 导致其碳同位素组成分布在图 5 上表现为锯齿型; 但塔东地区的下奥陶统样品的芳烃单体烃碳同位素组成则呈现出一种随分子量增加而碳同位素变重的趋势. 芳烃碳同位素的这 2 种不同的变化趋势暗示了塔盆区上、下奥陶统烃源岩芳烃碳同位素组成经历了两种不同的分馏方式. 塔北地区寒武系烃源岩烷基菲碳同位素组成的分布方式与上、下奥陶统均不相同, 但其 1-MP 和 9-MP 的碳同位素组成显然重于塔中地区上奥陶统样品, 因此 1-MP 和 9-MP 的碳同位素组成有望成为很好的油源对比指标.

2.3 油气源对比

国内一些有机地球化学学者业已对塔里木盆地海相原油的油源问题进行了探讨, 王招明将寒武系-下奥陶统和中上奥陶统两套烃源岩的生标特征分别总结为“六高一低”和“六低一高”(王招明和肖中尧, 2004). 利用此生物标志物组合进行油源对比是最常用的方法之一, 但是由于受塔里木盆地的地质条件

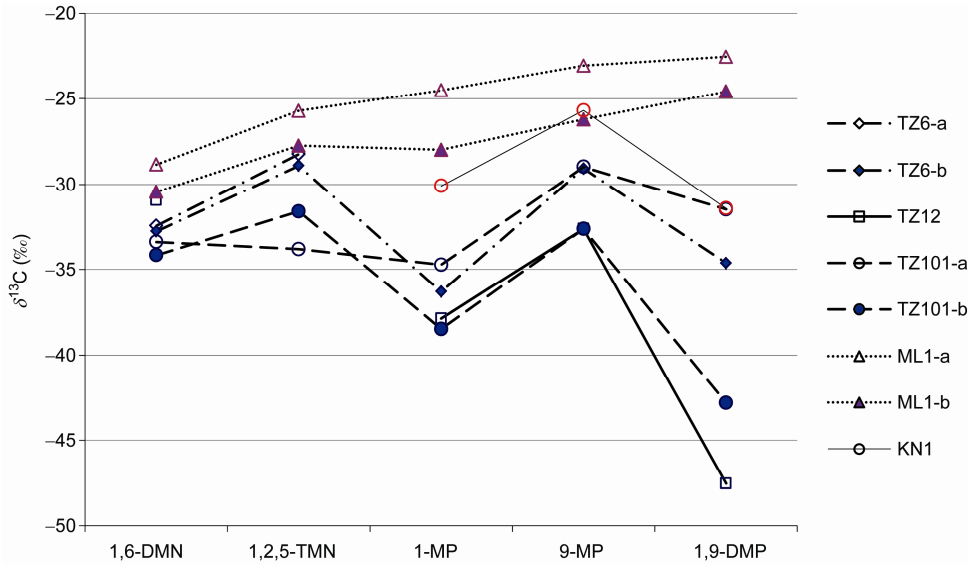

图 5　塔里木盆地不同地区不同层位烃源岩中 1, 6-DMN, 1, 2, 5-TMN, 1-MP, 9-MP 和 1, 9-DMP 的碳同位素组成

所限制, 仅依据此方法所得出的油源对比结果往往说服力不够. 结合芳烃单体烃碳同位素组成和生物标志物组合特征, 能够对研究区原油样品进行特征明显的分类, 从而为油源对比提供了有力的佐证.

研究区不同层位烃源岩芳烃馏分中的烷基菲单体烃δ^{13}C 值及其分布特征差异大, 将其与生物标志物组成特征相结合, 可将寒武系-下奥陶统和中上奥陶统两套烃源岩完美区分开. 塔里木盆地上奥陶统烃源岩贫伽玛蜡烷, 富升藿烷, 9-MP 碳同位素组成偏负, 位于图 6(a)左下方和图 6(b)右下方; 寒武系-下奥陶统烃源岩富伽玛蜡烷, 相对贫升藿烷, 9-MP 碳同位素组成较重, 落于图 6(a)右上方和图 6(b)左上方. 依据其伽玛蜡烷、升藿烷含量及 9-MP 的δ^{13}C 值、本次所检测的原油样品亦可明显分为两类: 一类具有与寒武系-下奥陶统烃源岩相似的生标和碳同位素组成特征, 表征其主力油源为寒武系-下奥陶统, 包括塔中地区的 TZ452 井的奥陶系原油、塔中 62 井的志留系原油、塔东地区的龙口 1 井和英南 2 井的侏罗系原油以及塔东 2 井的寒武系-下奥陶统原油; 另一类原油则具有与上奥陶统烃源岩相似的生标组合和碳同位素组成特征, 表征上奥陶统烃源层的贡献, 主要为塔中地区的奥陶系原油, 包括塔中 16 井、塔中 45 井、塔中 58 井和塔中 82 井原油. 这些结论与前人的研究成果相一致(Zhang 等, 2000; Zhang 等, 2006;朱光有等, 2011).

3　结论

利用小型氧化铝柱两步层析法可以实现芳烃化合物的精细分馏, 第一步洗脱出两环芳烃, 主体为烷基萘和烷基联苯化合物; 第二步洗脱出三环芳烃, 主体为烷基菲化合物, 对该馏分进行 GC/MS 分析和 GC-IRMS 分析时, 基线平直, 不同化合物之间干扰小, 可实现单体烃碳同位素组成的测定.

随着甲基数目和环数的增加, 同一个烃源岩样品的芳烃化合物的碳同位素组成变轻. 不同层位之间, 芳烃系列化合物的碳同位素组成差异较大, 总体上, 塔里木盆地上奥陶统烃源岩的碳同位素组成相对寒武系-下奥陶统烃源岩偏负, 芳烃亚系列(萘、甲基萘、二甲基萘、三甲基萘、联苯、甲基联苯、菲、

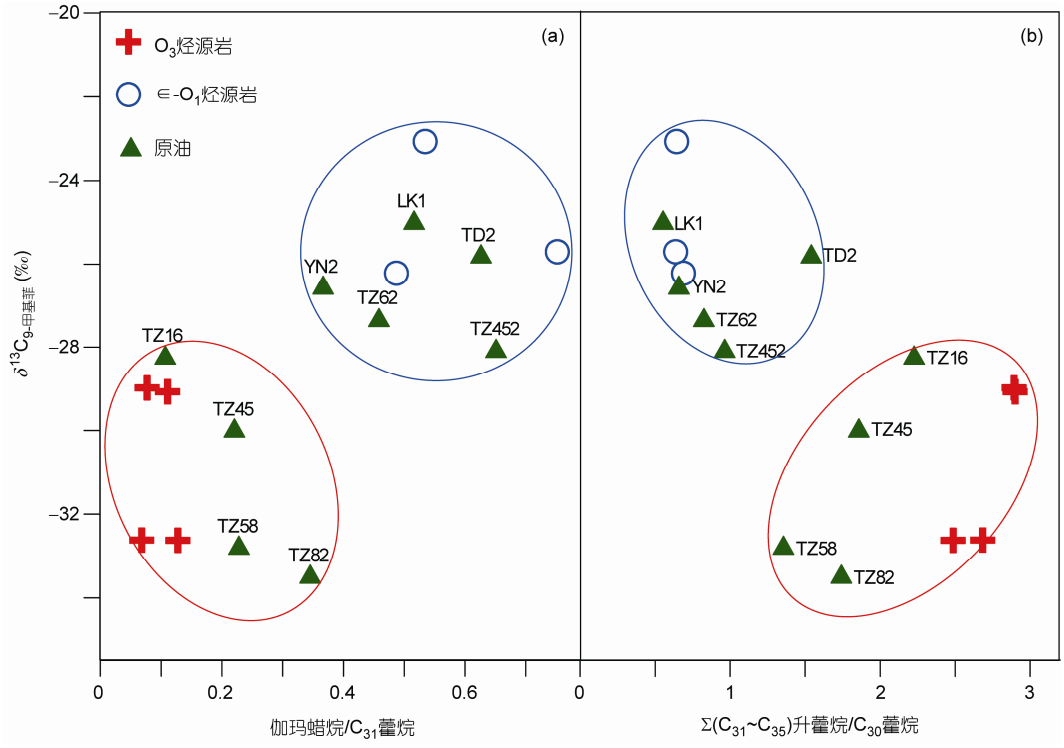

图 6　塔里木盆地典型烃源岩与原油的 9-MPδ^{13}C 组成与伽玛蜡烷/C_{31} 藿烷和Σ(C_{31}~C_{35})升藿烷/C_{30} 藿烷比值交汇图

(a) $\delta^{13}C_{9\text{-甲基菲}}$-伽玛蜡烷/$C_{31}$ 藿烷; (b) $\delta^{13}C_{9\text{-甲基菲}}$-Σ($C_{31}$~$C_{35}$)升藿烷/$C_{30}$ 藿烷

甲基菲、二甲基菲和三甲基菲)和单体烃(2,6 DMN, 1, 2, 5-TMN, 1-MP, 9-MP 和 1, 9-DMP)均如是. 其中, 以烷基菲系列差异最为明显. 与此同时, 塔东地区下奥陶统烃源岩芳烃亚系列和单体烃碳同位素分布特征均迥异于塔中地区上奥陶统烃源岩, 暗示该2套烃源岩芳烃除成熟度差异外, 所经历的同位素分馏模式亦不同, 成因机理也大为相异.

芳烃单体烃碳同位素组成在复杂油气藏的油源对比中效果显著. 塔中地区大部分奥陶系原油 9-MP 碳同位素组成偏负, 贫伽玛蜡烷, 富升藿烷, 其主力油源为上奥陶统烃源岩; 塔东地区原油和部分塔中地区原油富伽玛蜡烷、贫升藿烷, 9-MP 碳同位素组成明显较重, 表明了寒武系-下奥陶统烃源岩的显著贡献.

参考文献

陈祖林, 张敏, 刘海钰. 2013. 芳烃单体烃 GC/IRMS 分析分离的便捷柱色谱法. 石油实验地质, 35: 1–4

陈祖林, 赵红静, 张敏, 等. 2012. 一种快速分离和富集萘系和菲系化合物的小型氧化铝柱层析法. 石油天然气学报, 34: 34–39

贾望鲁, 彭平安, 肖中尧. 2008. 塔里木盆地典型海相原油沥青质中 1, 2, 3, 4-四甲基苯的碳同位素组成——母源形成于强还原环境的证据. 中国科学 D 辑: 地球科学, 38: 94–98

金之钧. 2006. 中国典型叠合盆地油气成藏研究新进展(之二)——以塔里木盆地为例. 石油与天然气地质, 27: 281–294

林俊峰, 张敏. 2011. 矿物燃料中芳烃分子同位素研究进展. 石油天然气学报, 33: 24–29

刘美美, 凌媛, 谢曼曼, 等. 2010. 多环芳烃单体同位素分析进展. 岩矿测试, 29: 64–70

王招明, 肖中尧. 2004. 塔里木盆地海相原油的油源问题的综合述评. 科学通报, 49: 1–8

周佩瑜, 孙永革. 2008. 原油中萘系物柱色谱快速分离技术及其初步应用. 地球化学, 37: 512–518

朱光有, 崔洁, 杨海军, 等. 2011. 塔里木盆地塔北地区具有寒武系特征原油的分布及其成因, 岩石学报, 27: 2435–2446

Freeman K H, Boreham C J, Summons R E, et al. 1994. The effect of aromatization on the isotopic compositions of hydrocarbons during early diagenesis. Org Geochem, 21: 1037–1049

Grice K, Nabbefeld B, Maslen E. 2007. Source and significance of selected polycyclic aromatic hydrocarbons in sediments (Hovea-3 well, Perth Basin, Western Australia) spanning the Permian-Triassic boundary. Org Geochem, 38: 1795–1803

Kim M, Kennicutt M C, Qian Y. 2005. Polycyclic aromatic hydrocarbon purification procedures for compound specific isotope analysis. Environ Sci Technol, 39: 6770–6776

Maslen E, Grice K, Le Métayer P, et al. 2011. Stable carbon isotopic compositions of individual aromatic hydrocarbons as source and age indicators in oils from western Australian basins. Org Geochem, 42: 387–398

Peters K, Walters C, Moldowan J. 2005. The Biomarker Guide. Vol. 1. Biomarkers and Isotopes in the Environment and Human History. Cambridge: Cambridge University Press

Radke M, Hilkert A, Rullkötter J. 1998. Molecular stable carbon isotope compositions of alkylphenanthrenes in coals and marine shales related to source and maturity. Org Geochem, 28: 785–795

Sofer Z, Zumberge J E, Lay V. 1986. Stable carbon isotopes and biomarkers as tools in understanding genetic relationship, maturation, biodegradation, and migration of crude oils in the Northern Peruvian Oriente (Maranon) Basin. Org Geochem, 10: 377–389

Zhang M, Huang G H, Hu G Y. 2006. Reservoir geochemistry of the Tazhong oilfield in the Tarim Basin, China. Part I. Geochemistry characteristics and genetic classification of crude oils. Chin J Geochem, 25: 157–162

Zhang S C, Hanson A D, Moldowan J M. et al. 2000. Paleozoic oil-source rock correlations in the Tarim Basin, NW China. Org Geochem, 31: 273–286