

玛湖凹陷二叠系风城组碱湖沉积物中甾类化合物分布: 古环境及生源意义*

王东勇^{1,2} 陈践发¹ 李美俊^{1,3} 王文强⁴ 肖 洪¹
邹贤利³ 孙 彪^{1,2} 秦慧强¹

1 中国石油大学(北京), 油气资源与工程全国重点实验室, 地球科学学院, 北京 102249

2 加拿大阿尔伯塔大学土木与环境工程系, 加拿大埃德蒙顿 T6G 2H5

3 中国石油大学(北京)克拉玛依校区石油学院, 新疆克拉玛依 834000

4 西安石油大学地球科学与工程学院, 陕西西安 710065

摘 要 碱湖相烃源岩中有机质来源复杂, 会形成丰富且复杂的甾类化合物。通过对玛湖凹陷二叠系风城组 17 件代表性碱湖沉积物进行气相色谱—质谱与单体烃同位素分析并结合前人研究成果, 详细分析了其中丰富的甾类化合物的分布特征, 并讨论了其主控因素。结果表明: 风城组沉积物中含有极低丰度的 C_{27} 规则甾烷和极高丰度的 C_{28} 和 C_{29} 规则甾烷, 这可能是由于沉积物中一些绿藻种属特殊有机质贡献的结果。所分析样品中的重排甾烷相对丰度较低, 这可能与风城组沉积物中低含量的黏土矿物有关。风城组沉积物中低丰度的烷基甾烷可能与特殊的有机质来源有关, 同时也可能是与高盐度的沉积环境有关, 特别是相对于 C_{29} 4-甲基甾烷和 C_{30} 甾烷, 含有低丰度的 C_{28} 4-甲基甾烷。来自于古湖泊边缘区的样品中, C_{30} 24-正丙基胆甾烷丰度较高, 可能指示着该地区风城组烃源岩有机质中有红藻的生物来源贡献。此外, 在风城组沉积物中检测并鉴定了高丰度的羊毛甾烷, 表明风城组沉积时期高盐度的沉积水体条件, 并推测其生物来源可能是蓝绿藻, 但不排除其他特殊藻类的贡献。高丰度的 C_{28} 和 C_{29} 规则甾烷和 β -胡萝卜素可能也指示着特殊绿藻种属的贡献。特殊的有机质贡献造成了三芳基甾烷的缺失。综上, 高盐度的沉积水体条件、特殊的有机质来源及低含量的黏土矿物组成, 导致风城组碱湖沉积物中丰富且复杂的甾类化合物分布。

关键词 甾类化合物 古环境 有机质 碱湖 风城组 玛湖凹陷

第一作者简介 王东勇, 男, 1998 年生, 博士研究生, 主要从事有机地球化学和油气勘探研究。E-mail: dywang0907@163.com。

通讯作者简介 李美俊, 男, 1972 年生, 教授, 博士, 主要从事有机地球化学和油气勘探研究。E-mail: meijunli@cup.edu.cn。

中图分类号: P578.98 文献标志码: A

Distributions of steroidal biomarkers in alkaline sediments of the Permian Fengcheng Formation, Mahu sag, NW China: implications for palaeoenvironment and organic matter source

* 国家自然科学基金青年科学基金项目(编号: 42202134)、新疆维吾尔自治区自然科学基金项目(编号: 2023D01A20)和国家留学基金委(编号: CSC202306440129)。[Co-funded by the National Natural Science Foundation Youth Science Fund Project (No. 42202134), Natural Science Foundation project of Xinjiang Uygur Autonomous Region (No. 2023D01A20) and China Scholarship Council (No. CSC202306440129)]

收稿日期: 2024-11-04 改回日期: 2025-03-03

WANG Dongyong^{1,2} CHEN Jianfa¹ LI Meijun^{1,3} WANG Wenqiang⁴ XIAO Hong¹

ZOU Xianli³ SUN Biao^{1,2} QIN Huiqiang¹

¹ State Key Laboratory of Petroleum Resources and Engineering, College of Geosciences, China University of Petroleum (Beijing), Beijing 102249, China

² Civil and Environmental Engineering Department, University of Alberta, Edmonton AB, T6G 2H5, Canada

³ Faculty of Petroleum, China University of Petroleum-Beijing at Karamay, Xinjiang Karamay 834000, China

⁴ School of Geoscience Science and Engineering, Xi'an Shiyou University, Xi'an 710065, China

Abstract Steroids in the geological records is generally relevant to the organic matter source; in return, the distributions of steroids would provide unique insights to organic source in sediments. Organic matter input in the alkaline sediments is complex, which can form various steranes. In this study, a total 17 cores were sampled to carry out GC-MS and GC-IR MS to investigate the distributions of steranes and their controlling factors by combination of previous reports. Low Pr/Ph combined with high content β -carotane, C_{23} tricyclic terpane and gammacerane indicates a high salinity water body during the Permian Fengcheng Formation. The samples are characterized by low relative abundance of C_{27} regular sterane and high relative abundance of C_{28} and C_{29} regular steranes, which is due to the contributions from some special organic matter input such as green algae. The content of diasteranes in the selected samples is very low likely leading by the low clay content. A low alkyl-steranes present in the Fengcheng Formation source rocks, which may be affected by organic matter source as well as high strongly reducing environment as shown a low C_{28} 4-methyl sterane relative to C_{29} 4-methyl steranes and C_{30} sterane. Occurrence of C_{30} 24-n-propyl cholestane in Fengcheng Formation samples located in edge of paleo-lake may imply the organic matter contribution from red algae. Moreover, high contents of lanosteranes have been detected in the samples, which suggests a reducing sedimentary environment and a green-algal source as supported by abundant C_{28} and C_{29} regular steranes and β -carotane. The absence of triaryldinosterane in the samples is likely ascribed to some special organic matter source and a low contribution of dinoflagellates. In summary, it is the strongly reducing environment, distinct organic matter input, as well as low clay content in mineral compositions that lead to the various and complex steranes distributions pattern in alkaline sediments.

Key words steroids, palaeoenvironment, organic matter source, alkaline sediments, Fengcheng Formation, Mahu sag

About the first author WANG Dongyong, born in 1998, is a Ph.D. candidate whose study focuses on organic geochemistry and petroleum exploration research. E-mail: dywang0907@163.com.

About the corresponding author LI Meijun, born in 1972, is a professor at China University of Petroleum (Beijing) and his primary research interest is petroleum geochemistry and exploration. E-mail: meijunli@cup.edu.cn.

1 概述

脂质类生物标志化合物已经被广泛应用于沉积环境判识、有机质输入类型分析、有机质成熟度评估以及油—油/源对比 (Peters *et al.*, 2005)。其中, 甾烷类化合物普遍存在于地质体中, 是一类非常重要的脂质类生物标志化合物, 蕴含丰富的地质信息。在分子地球化学领域, 甾烷类化合物及其相

关地化参数不仅被应用于石油地质研究, 包括油—油/源对比、成熟度评估、沉积环境分析、有机质输入、油气运移、含油气系统等, 同时也被应用于环境科学和其他相关学科研究。

甾烷类化合物是种类繁多的化合物, 且不仅普遍存在于生物体中, 还广泛分布在地质记录中。甾类化合物是一系列含有四环结构、比较稳定且在地

质历史时期保存完好的生物标志物 (Mackenzie *et al.*, 1980; ten Haven *et al.*, 1989a)。其中, 最古老且无争议的原生甾烷被保存在古元古代 (1640 Ma) 沉积物中 (Leider *et al.*, 2019)。在生物体中, 甾烷提高了生物细胞膜的刚性, 同时它们可以实现其他功能 (Leider *et al.*, 2019)。通过甾环结构或侧链上的双键数量和位置、侧链内的烷基化程度以及 A 环上是否含有甲基可以识别不同生物体对甾类化合物的贡献。然而, 在连续的成岩反应过程中, 由于双键的饱和化与侧链裂解使甾类化合物碳骨架结构改变, 从而难以厘清不同生物体的贡献 (Mackenzie *et al.*, 1982)。由于此类化合物广泛分布于生物体和后续的成岩作用, 甾醇在判断古老沉积物沉积环境的应用是有限制的, 更适用于现代沉积物 (Mackenzie *et al.*, 1982)。根据不同结构的甾烷或/和同分异构体的相对丰度, 甾类化合物被广泛应用于热成熟度评价 (Seifert and Moldovan, 1981)。然而, 甾烷在早期成岩作用阶段 (即沉积物接受沉积以后, 形成干酪根之前) 的成岩演化尚未得到充分研究 (Tissot and Welte, 1984; Synnott *et al.*, 2023)。

沉积有机质中分布有多种多系列甾类化合物。在众多的甾类化合物中, 本研究重点讨论 7 类甾类化合物的分布特征, 包括规则甾烷、重排甾烷、烷基甾烷、24-丙基胆甾烷、羊毛甾烷、三芳甾烷和甲基三芳甾烷。甾醇前驱体角鲨烯通过环化作用转化形成环角鲨烯 (Summons *et al.*, 2006), 继而环化形成 2 种胆甾醇: 环状类固醇和羊毛甾醇 (图 1)。其中, 羊毛甾醇通过埋藏成岩作用和还原作用形成羊毛甾烷 (Chen *et al.*, 1989), 而环状类固醇通过氧化去甲基化与去饱和作用, 从而产生甾醇。甾烯是通过生物体中的甾醇经过脱水作用而形成的不饱和化合物, 形成于沉积作用的最早期, 并含有多种侧链相关结构 (Mackenzie *et al.*, 1982)。随着热成熟度的增加, 甾烯通过成岩作用和还原作用并进一步通过黏土矿物催化作用形成规则甾烷 (Brassell *et al.*, 1980)。通过早期成岩作用转化, 甾烯骨架发生重排作用形成重排甾烯, 这些化合物进一步通过成岩作用还原形成重排甾烷 (Sieskind *et al.*, 1979; Mackenzie *et al.*, 1982)。芳香族甾类化合物通常形成于较高成熟度水平阶段。在成岩作用早期, 甾烯通过黏土矿物催化和芳构化反应可形

成 A-环单芳甾烷 (Brassell *et al.*, 1984; ten Haven *et al.*, 1989b)。随后, A-环单芳甾类通过不断芳构化作用形成 C-环单芳甾烷, 继而形成三芳甾类化合物 (Mackenzie *et al.*, 1982; Mackenzie and McKenzie, 1983)。

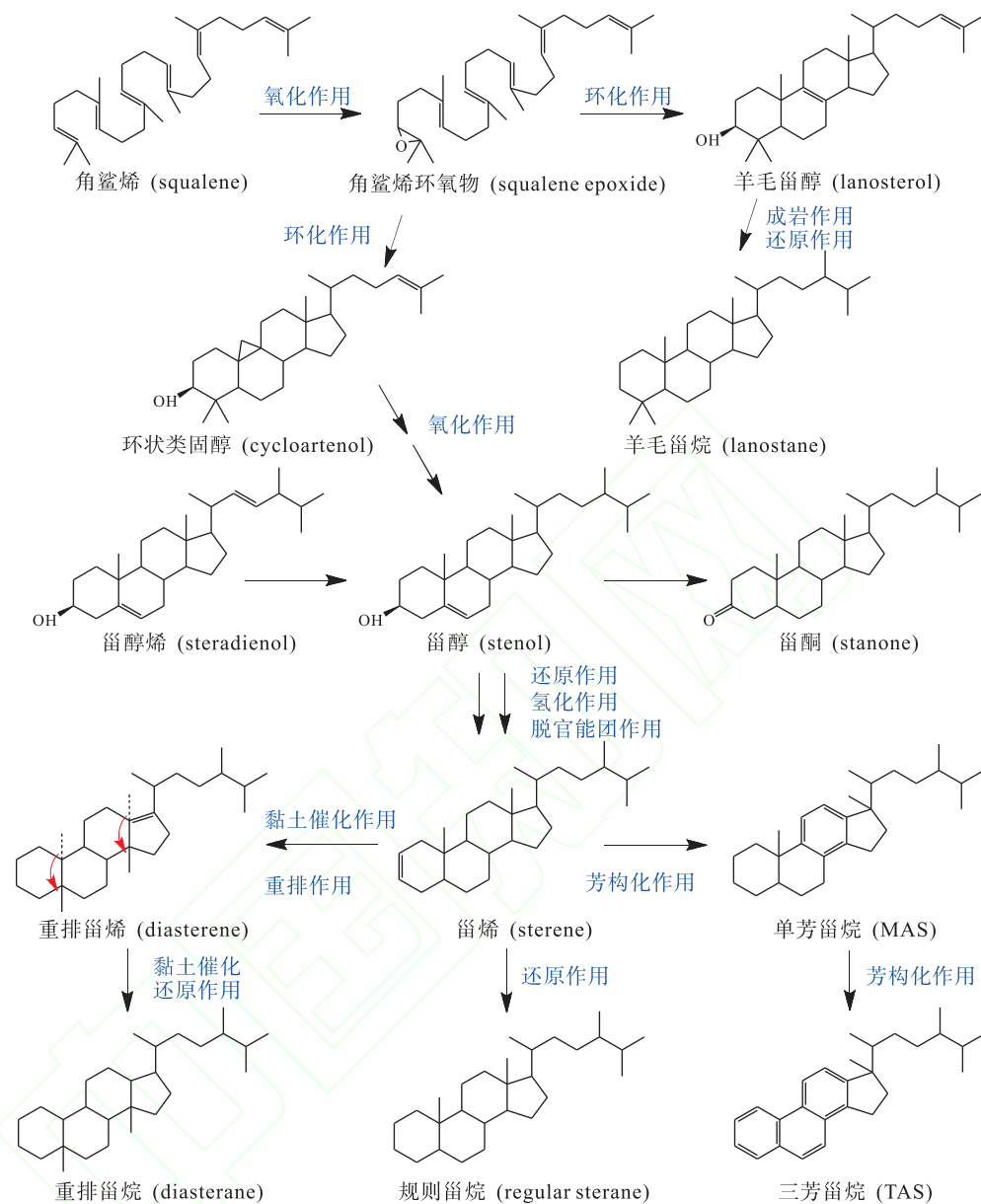
由于湖泊环境在地质历史时期可能接受多个方向的有机质来源, 因此湖相沉积物往往表现出复杂而又独特的生物标志化合物分布特征 (Chen and Summons, 2001)。与此同时, 湖泊的水体化学成分变化较大, 继而引起成岩条件的变化, 从而引起有机质化合物演化的差异。准噶尔盆地玛湖凹陷二叠系风城组被认为沉积于高盐度、强还原且水体发生明显分层的环境, 其沉积水体条件非常复杂, 且沉积物组成也非常复杂 (曹剑等, 2015)。因此, 风城组沉积物中有机质来源复杂且多样, 从而可能造成其中的分子标志物分布是多样的, 这为研究其中分子标志物的分布特征、特别是甾类化合物提供了独特的天然样品。

通过对研究区风城组代表性岩石样品开展详细的基础地球化学以及有机地球化学分析, 旨在详细分析沉积物中甾类化合物分布特征, 并结合区域地质背景及前人研究成果, 阐述此类化合物的演化过程与机制及其和有机质来源的耦合关系。

2 区域地质概况

准噶尔盆地位于中国西北地区新疆维吾尔自治区西北部, 是中国重要含油气盆地之一 (图 2-a)。该盆地发育于前寒武结晶基底和海西褶皱双结晶基底之上 (Tang *et al.*, 2021a)。盆地在石炭纪末—二叠纪初形成, 其演化可概括为 4 个主要阶段 (唐勇等, 2023a): 晚石炭世—早二叠世断陷盆地阶段; 中二叠世—三叠纪前陆盆地阶段; 侏罗纪—白垩纪断陷—压扭—拗陷盆地阶段; 古近纪—第四纪盆地活化阶段 (何登发等, 2018)。玛湖凹陷位于该盆地西北缘, 其被乌—夏断裂带、克一百断裂带、中拐凸起、达巴松凸起、夏盐凸起、石英滩凸起以及英西凹陷所包围 (图 2-b), 面积约为 5000 km²。研究区内一级断层主要分布在西斜坡带, 呈 NW-SW 向 (图 2-b)。

根据露头 and 钻井等地质资料, 研究区地层自下而上依次发育为石炭系, 二叠系佳木河组、风城组、夏子街组、乌尔禾组, 三叠系百口泉组、克拉



MAS: Monoaromatic steroids; TAS: Triaromatic steroids

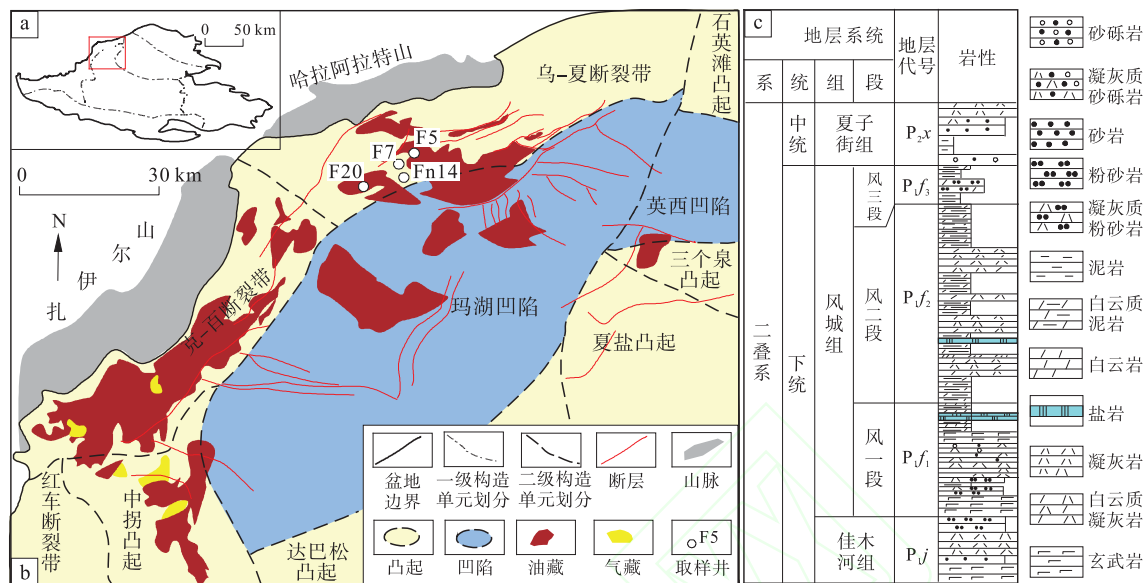
图 1 地质体中甾类化合物演化图 (据 Chen *et al.*, 1989; Summons *et al.*, 2006; Synnott *et al.*, 2023; 有修改)

Fig. 1 Generalized synthetic pathway of steranes in geological record

(modified from Chen *et al.*, 1989; Summons *et al.*, 2006; Synnott *et al.*, 2023)

玛依组、白碱滩组，上覆侏罗系、白垩系和第四系沉积（唐勇等，2023b）。除上乌尔禾组沉积物被剥蚀外，其他地层发育相对完整。晚二叠世—早三叠世期间的重大地质构造运动形成了研究区的重要不整合（Tang *et al.*, 2021b）。近年来，玛湖凹陷三叠系百口泉组砂砾岩储集层油气勘探取得重大突破，此外浅层侏罗系、深层二叠系均有油气显示。前人研究表明，该地区发现的烃类主要来源于二叠

系风城组烃源岩（王东勇等，2022；Wang *et al.*, 2023a），乌尔禾组和佳木河组烃源岩有少量贡献（Dang *et al.*, 2024）。三叠系白碱滩组和侏罗系八道湾组泥质与煤沉积为区域性盖层，阻止了烃类发生泄漏。风城组沉积早期，火山活动频发，气候炎热干旱，主要发育碳酸盐岩与硅质岩混合沉积物（汪梦诗等，2018；Yu *et al.*, 2021）。风城组沉积厚度为 200 ~ 1400 m，自下而上被分为风一段



a-研究区位置；b-玛湖凹陷区域构造图；c-玛湖凹陷风城组综合地层柱状图

图 2 准噶尔盆地玛湖凹陷构造位置与二叠系地层划分

Fig. 2 Tectonic location and the stratigraphic division of the Permian of Mahu sag, Junggar Basin

(P_{2f1})、风二段 (P_{2f2})、风三段 (P_{2f3}) (图 2-c)。其中, P_{2f1} 主要沉积火山岩、凝灰岩, 上覆频繁互层的白云质泥岩与泥岩; P_{2f2} 主要沉积频繁互层的白云岩、泥岩与白云质泥岩和泥质白云岩, 夹杂盐岩; P_{2f3} 主要沉积相对粗粒沉积物, 包括粉砂岩、白云质粉砂岩以及泥质粉砂岩。

3 样品与实验

3.1 样品

本研究共从 4 口探井中采集 17 个代表性二叠系风城组烃源岩样品。风城组岩石样品以混积岩为主, 采集的样品主要来自于 P_{2f1} 和 P_{2f2} , 岩性主要为泥岩、白云质泥岩和泥质白云岩 (表 1)。

3.2 有机碳含量测定与岩石热解分析

首先, 利用岩石碎样机将岩心样品粉碎至小于 100 目。取大约 100 mg 岩石粉末样品, 利用盐酸去除岩样中的无机碳。利用 LECO CS-230 碳硫分析仪测定岩样中有机碳含量, 实验操作严格按照 GB/T19145-2022 执行。岩石热解分析在 OGE-II 仪器上进行, 升温程序是: 初始温度为 300 °C 并持续保持 3 min, 然后以 25 °C/min 的速率升温至 600 °C, 该实验操作严格按照 GB/T18062-2012 执

行。表 1 列出了样品的基础地球化学特征, 结果表明烃源岩具有较强的生烃潜力, 是潜在的烃源岩样品。

3.3 族组分分离

取 60 g 左右岩石粉末样品和大约 500 mL 分析纯二氯甲烷, 采用索氏抽提法获取岩石中可溶有机质, 执行标准为 SY/T 5118-2021。利用 50 mL 石油醚沉淀可溶有机质中的沥青质并过滤, 所得滤液经过硅胶/氧化铝 (体积比 2:1) 层析柱依次用 60 mL 石油醚、40 mL 二氯甲烷与石油醚混合溶剂 (体积比 2:1) 和二氯甲烷和甲醇混合溶剂 (体积比 2:1) 冲洗出饱和烃、芳香烃和非烃馏分。该项实验操作严格执行 SY/T 5119-2016 行业标准。

3.4 饱和烃气相色谱—质谱

饱和烃气相色谱—质谱实验在安捷伦 6890-5975A 气相色谱—质谱联用仪上分析, 并配备 HP-5MS (长 60 m, 宽 0.25 mm, 薄膜厚度 0.25 μm) 熔融石英毛细管柱。色谱初始温度为 50 °C (保持 1 min), 并以 20 °C/min 的速率升温至 120 °C, 继续以 3 °C/min 的升温速率加热至 310 °C (保持 20 min)。质谱采用电子轰击方式获得碎片离子, 电离能为 70 eV。载气为 99.999% 纯度的氦气。采用全扫描和多离子检测方式采集数据。该实验过程

表 1 玛湖凹陷二叠系风城组岩心样品信息与基础地球化学特征表
Table 1 The samples information and bulk geochemical characteristics for the selected core samples of Permian Fengcheng Formation from Mahu sag

样品 编号	井号	深度 /m	岩性	TOC /%	S ₁ /mg·g ⁻¹	S ₂ /mg·g ⁻¹	PG /mg·g ⁻¹	HI /mg·g ⁻¹	T _{max} /℃	R ₀ /%	δ ¹³ C /‰
F1		3214.70	白云质泥岩	0.64	0.40	2.49	2.89	390	435	0.96	/
F2		3226.90	白云质泥岩	1.30	0.36	6.96	7.32	537	436	1.11	/
F3		3233.38	白云质泥岩	1.02	0.65	6.15	6.80	602	438	1.14	/
F4	F5	3249.50	白云质泥岩	1.01	0.35	5.37	5.72	531	436	/	/
F5		3288.70	白云质泥岩	1.21	0.26	7.07	7.33	583	437	/	/
F6		3354.20	白云质泥岩	1.22	0.32	9.08	9.40	744	438	1.01	/
F7		3470.90	白云质泥岩	0.63	0.54	7.05	7.59	817	441	0.89	-29.52
F8		3473.60	泥岩	0.73	0.86	2.99	3.85	794	447	1.01	-28.25
F9		3476.10	白云质泥岩	0.40	0.34	1.11	1.45	662	454	1.15	/
F10		3156.16	泥质白云岩	1.74	0.90	8.51	9.41	490	436	/	-29.25
F11		3157.50	白云质泥岩	3.60	0.51	33.47	33.98	806	442	1.05	-28.83
F12	F7	3182.90	泥质白云岩	1.34	0.85	6.66	7.51	499	433	/	-30.47
F13		3189.29	白云质泥岩	2.93	1.66	25.7	27.36	877	435	/	/
F14		3220.55	白云质泥岩	0.44	1.40	7.89	9.29	586	438	0.96	/
F15		3222.30	白云质泥岩	3.43	2.32	39.9	42.24	688.46	440	1.11	/
F16	F14	4065.19	泥质白云岩	2.40	1.03	13.93	14.96	635.25	440	/	-28.40
F17	F20	3268.00	白云质泥岩	2.40	2.73	20.1	22.83	836	438	/	/

注：TOC：总有机碳；S₁：残留烃量；S₂：生烃量，；PG：生烃潜量；HI：氢指数；T_{max}：最高热解峰温；R₀：镜质组反射率；/：无数据；δ¹³C：干酪根碳同位素。

严格遵守 GB/T 18606-2017 标准执行。

3.5 芳烃气相色谱—质谱

芳烃气相色谱—质谱实验在安捷伦 6890-5970A 气相色谱—质谱联用仪上分析，并配备 HP-5MS（30 m 长，0.25 mm 宽，0.25 μm 薄膜厚度）熔融石英毛细管柱。色谱初始温度为 50℃（保持 1 min），并以 3℃/min 的速率迅速升温至 310℃（保持 20 min）。质谱采用电子轰击方式获得碎片离子，电离能为 70 eV。载气为 99.999% 纯度的氦气。同样采用全扫描和多离子检测方式采集数据。该实验操作同样严格按照 GB/T 18606-2017 标准执行。

3.6 单体烃同位素

用尿素络合法分离饱和烃组分中正构烷烃组分和其他化合物组分。化合物单体烃同位素采用气相色谱—同位素比值质谱仪测定（GC-IR MS），其中 7890 气相色谱配备 HP-5MS 毛细管柱（30 m × 0.25 mm × 0.25 μm）。载气为氦气（纯度

>99.999%）且流速为 1.0 mL/min。气相色谱系统升温程序为：初始温度为 100℃ 并保持 1 min，随后以 5℃/min 速率升温至 300℃ 并恒温保持 20 min。同位素比值质谱仪用电子能量为 70 eV 的电子轰击的方式，其中燃烧炉（包括 CuO 和 Pt 丝）的温度为 850℃。质量范围设定为 1~96 Da 和扫描周期为 90 min。化合物 δ¹³C 数据是通过每一化合物在色谱分离过程中氧化产生的 CO₂ 的 44、45 和 46 的离子流进行积分得到的。该实验测试方法执行 SY/T 5238-2008 行业标准。

4 结果与讨论

4.1 正构烷烃与类异戊二烯烃

沉积有机质中正构烷烃分布模式往往与有机质来源相关，低碳数正构烷烃（<nC₂₀）主要来源于低等水生生物，而高碳数正构烷烃（>nC₂₀）以高等植物来源为主（Brooks and Smith, 1967）。风城组沉积物中正构烷烃主峰碳为 nC₁₇，指示其有机

质来源可能以低等水生生物为主。姥植比通常被用于评价有机质沉积环境，一般而言，姥植比 <1.0 指示明显还原沉积环境，而姥植比 >3.0 指示明显氧化沉积环境 (Brooks *et al.*, 1969)。本研究风城组沉积物中类异戊二烯烃中以植烷占优势，以低姥植比为特征 (图 3)，姥植比分布在 $0.36 \sim 0.80$ 之间，平均为 0.61 (表 2)，反映了有机质沉积于明显还原的水体中。 β -胡萝卜素通常被认为是沉积于强还原水体中的特定有机质贡献，如蓝细菌 (Ding *et al.*, 2020)。风城组烃源岩中富含 β -胡萝卜素 (图 3)，高 β -胡萝卜素指数 (β -胡萝卜素/主峰碳) 同样反映了强还原的沉积环境 (表 2)。在 TIC 图谱上显示出高丰度的甾烷和藿烷，可能指示高含量的微生物贡献。

4.2 甾类化合物

三环甾烷 (TT) 普遍分布于地质体中，并被广泛用于有机质沉积环境判别、成熟度评价、有机质来源特征与油-源对比 (Anders and Robinson, 1971; Simoneit *et al.*, 1993; Tao *et al.*, 2015; 肖洪等, 2019)。沉积物水体条件对短链三环甾烷分布模式具有明显影响，海相和咸水湖相有

机质一般呈现出 C_{23} TT 优势，而形成于淡水环境的有机质富含 C_{21} TT (Tao *et al.*, 2015; 肖洪等, 2019; Xiao *et al.*, 2024)。玛湖凹陷风城组沉积物以高丰度 C_{23} TT 为特征， C_{19} TT 和 C_{20} TT 相对含量较低 (图 4; 表 2)，这表明风城组有机质沉积于较强还原条件的水体。这与风城组沉积物低姥植比结果一致 (图 3)。

风城组烃源岩中含有极低含量的 Ts 和高丰度的 Tm (图 4)。Ts 可能是由于三降藿烷的氢原子在黏土矿物的催化作用下形成 (Philp and Fan, 1987; Xiao *et al.*, 2019)。前人研究表明风城组矿物组成以石英和碳酸盐岩矿物为主，含量超过 90%；黏土矿物含量极低或不发育 (姜福杰等, 2022; 何文军等, 2023)。因此，风城组沉积物中 Ts 相对丰度较低，推测可能与风城组岩石中黏土矿物含量较低有关。风城组烃源岩中含有高丰度的伽马蜡烷 (图 4)，伽马蜡烷指数 (伽马蜡烷/ C_{30} 藿烷) 分布在 $0.27 \sim 1.10$ 之间，平均值为 0.78 (表 2)，表明有机质形成于 1 个强还原、水体发生明显分层的沉积环境 (Damsté *et al.*, 1995)。风城组中含有高丰度的藿烷类化合物，指示着大量微生物和细菌的存在 (盛国英等, 2019)。此外，升藿烷

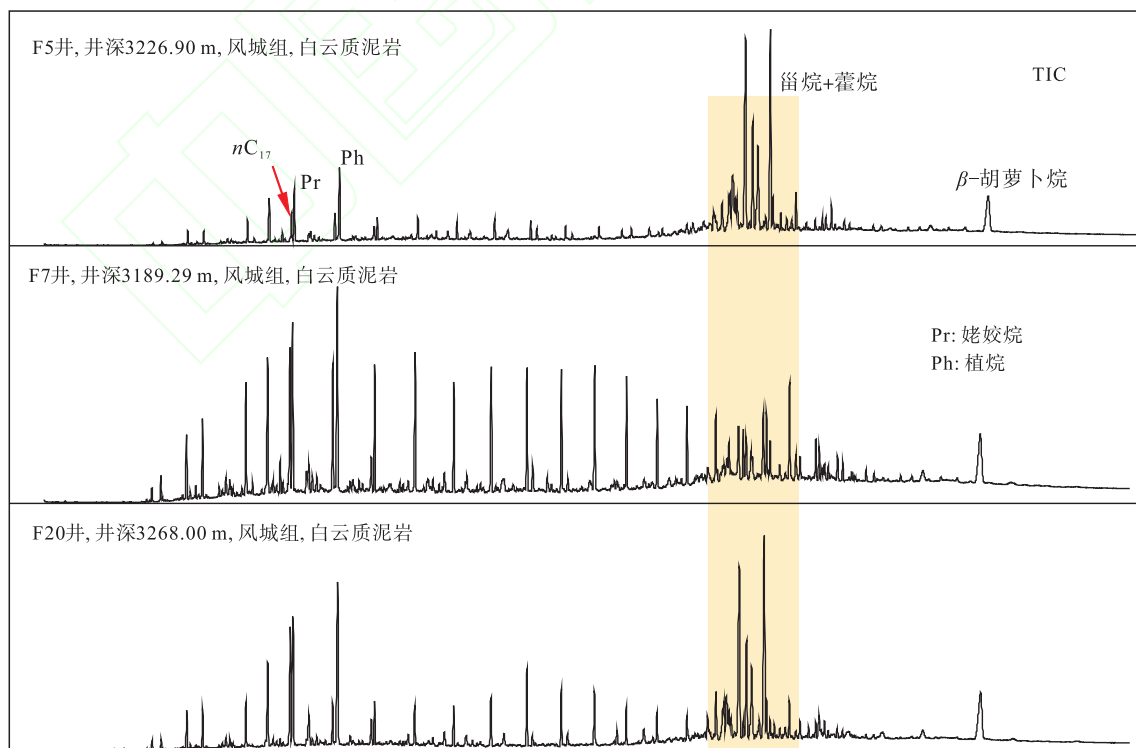


图 3 玛湖凹陷风城组烃源岩样品饱和烃馏分总离子流图

Fig. 3 Total ion current (TIC) of saturated fraction in the Fengcheng Formation source rock samples from Mahu sag

表 2 玛湖凹陷二叠系风城组岩心样品烷烃与萜烷相关参数

Table 2 Geochemical parameters for alkane and terpanes in core samples of the Permian Fengcheng Formation from Mahu sag

样品 编号	烷烃参数			萜烷参数									
	C_{max}	Pr/Ph	β/C_{max}	C_{19+20}	C_{21}	C_{23}	G	20S	$C_{31}H$	$C_{32}H$	$C_{33}H$	$C_{34}H$	$C_{35}H$
				$/C_{19+20+21+23}TT$	$/C_{19+20+21+23}TT$	$/C_{19+20+21+23}TT$	$/C_{30}H$	(S+R)	/%	/%	/%	/%	/%
F1	nC_{17}	0.59	0.02	28.65	27.76	43.59	1.01	0.51	39.37	22.60	14.91	14.07	9.05
F2	nC_{17}	0.60	2.69	29.79	27.24	42.96	1.01	0.52	33.53	21.84	16.93	13.91	13.80
F3	nC_{17}	0.60	7.82	26.85	27.38	45.76	0.79	0.50	31.94	21.84	16.73	14.28	15.21
F4	nC_{17}	0.67	2.44	29.87	27.90	42.23	0.88	0.53	35.82	23.07	16.04	12.70	12.38
F5	nC_{17}	0.78	0.99	27.97	29.67	42.35	0.90	0.52	32.08	22.28	16.64	14.35	14.64
F6	nC_{17}	0.54	1.71	28.48	26.48	45.04	1.67	0.53	26.53	22.56	18.31	14.46	18.14
F7	nC_{17}	0.44	2.30	26.02	25.84	48.14	1.10	0.59	27.09	22.99	16.17	16.17	17.57
F8	nC_{17}	0.44	1.52	25.66	27.66	46.68	1.06	0.59	28.24	22.64	15.94	16.09	17.10
F9	nC_{17}	0.52	9.27	23.18	25.18	51.64	0.96	0.56	24.55	22.79	16.77	15.67	20.22
F10	nC_{17}	0.64	4.83	29.84	27.59	42.57	0.35	0.55	37.62	21.77	14.77	11.68	14.16
F11	nC_{17}	0.80	0.59	34.79	30.09	35.13	0.47	0.58	39.10	24.06	15.43	11.16	10.26
F12	nC_{17}	0.57	0.48	34.20	31.29	34.51	0.34	0.55	42.14	27.85	13.63	9.63	6.75
F13	nC_{17}	0.76	0.74	23.39	31.77	44.84	0.40	0.55	44.58	26.17	13.87	8.32	7.07
F14	nC_{17}	0.63	0.85	30.33	28.33	41.35	0.68	0.60	33.63	23.44	16.34	12.73	13.85
F15	nC_{17}	0.36	4.15	22.22	25.83	51.95	0.64	0.64	29.62	21.25	17.22	14.16	17.74
F16	nC_{17}	0.83	2.14	30.05	34.35	35.60	0.27	0.55	46.44	25.04	13.47	8.44	6.61
F17	nC_{17}	0.58	0.69	34.41	32.05	33.54	0.68	0.52	48.43	26.36	12.59	7.20	5.42

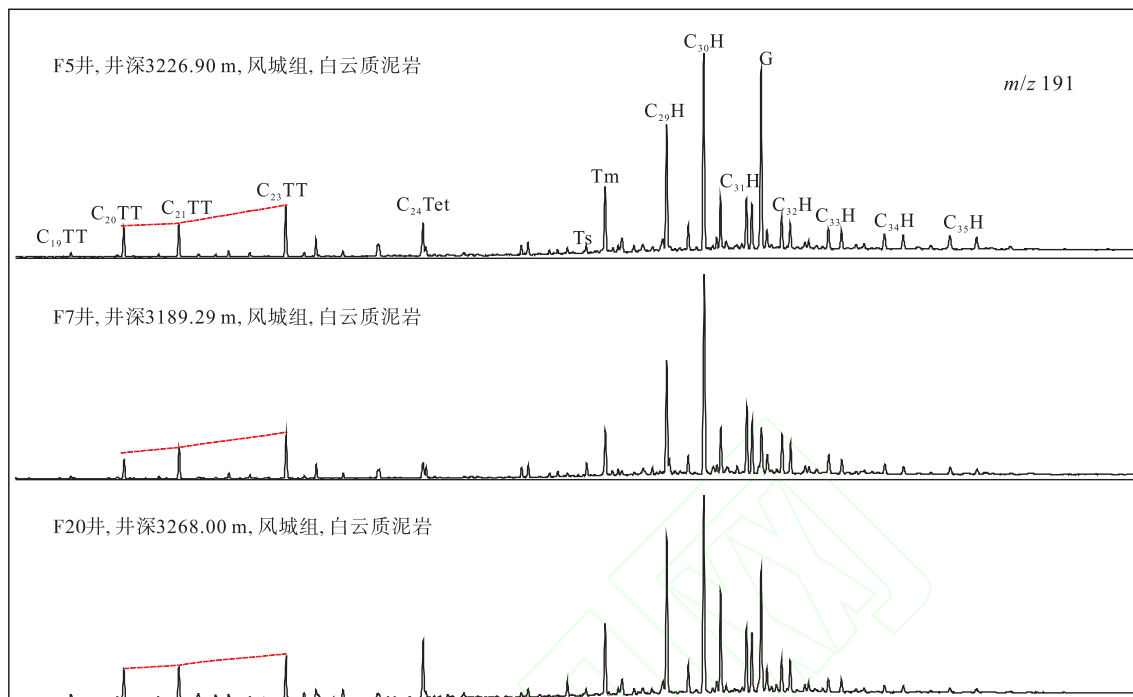
注： C_{max} ：主峰碳；Pr/Ph：姥鲛烷/植烷； β/C_{max} ： β -胡萝卜烷/主峰碳； $C_{19+20}/C_{19+20+21+23}TT$ ： $(C_{19}+C_{20})/(C_{19}+C_{20}+C_{21}+C_{23})$ 三环萜烷； $C_{21}/C_{19+20+21+23}TT$ ： $C_{21}/(C_{19}+C_{20}+C_{21}+C_{23})$ 三环萜烷； $C_{23}/C_{19+20+21+23}TT$ ： $C_{23}/(C_{19}+C_{20}+C_{21}+C_{23})$ 三环萜烷； $G/C_{30}H$ ：伽马蜡烷/ C_{30} 藿烷； $20S/(S+R)$ ： $20S/(20S+20R)$ C_{31} 藿烷； $C_{31}H(%)$ ： $C_{31}/(C_{31}-C_{35})$ 藿烷； $C_{32}H(%)$ ： $C_{32}/(C_{31}-C_{35})$ 藿烷； $C_{33}H(%)$ ： $C_{33}/(C_{31}-C_{35})$ 藿烷； $C_{34}H(%)$ ： $C_{34}/(C_{31}-C_{35})$ 藿烷； $C_{35}H(%)$ ： $C_{35}/(C_{31}-C_{35})$ 藿烷。

中 $C_{31} \sim C_{35}$ 藿烷分布模式没有明显“翘尾”现象（图 4）， C_{35} 升藿烷相对含量分布在 5.42% ~ 20.02% 之间（表 2）。这与常见的硫酸盐型盐湖有所不同，可能是由于微生物种类不同（Cao *et al.*, 2020）。但是，值得注意的是，尽管没有“翘尾型”藿烷分布模式，相较于传统的湖相沉积物，风城组沉积物中 C_{35} 升藿烷比较高，指示一个强还原的沉积水体环境。

4.3 规则甾烷

$C_{27} \sim C_{29}$ 规则甾烷普遍存在于沉积物和原油中，被广泛应用于确定有机质输入类型和评价成熟度。一般而言， C_{27} 规则甾烷主要来源于细菌和藻类等低等水生生物，而 C_{29} 规则甾烷主要来源于陆源高等植物（Huang and Meinschein, 1979）。但是，一些特殊的藻类，如褐藻和绿藻等，也是沉积有机质中 C_{29} 规则甾烷的来源（Volkman, 1986；Wang *et al.*, 2023b）。图 5 代表性风城组沉积物中

m/z 217 质量色谱图展示甾烷化合物分布特征。结果表明，风城组烃源岩甾烷中 C_{28} 和 C_{29} 规则甾烷含量极其高，其相对含量分别分布于 43.34% ~ 51.59% 之间（平均为 47.23%）和 38.13% ~ 52.45% 之间（平均为 47.21%）；而 C_{27} 规则甾烷含量极其低，相对含量分布在 2.36% ~ 7.06% 之间（平均为 5.56%）（表 3）。前人研究表明，风城组有机质中高等植物来源极少（曹剑等, 2015；陈哲龙等, 2017），因此推测其中高含量 C_{29} 规则甾烷归因于特殊有机质的贡献（Chen *et al.*, 2022；Wang *et al.*, 2023b），如褐藻和绿藻等。 $C_{27} \sim C_{29}$ 规则甾烷的相对丰度可以表示各种类型藻类贡献的相对比例。根据源岩有机碳同位素组成和 C_{27}/C_{29} 甾烷比值交汇图（孟凡巍等, 2006），风城组有机质可能以浮游绿藻贡献为主，可能混有少量红藻有机质（图 6-a）。 C_{28} 和 C_{29} 规则甾烷总含量超过 90%，表明有机质中绿藻来源占主导地位（表 3）（Xia *et al.*, 2020, 2021, 2022）。 C_{28}/C_{29} 规则甾烷比值



TT—三芳甾烷；Tet—四环甾烷；Ts— 18α (H) - 22, 29, 30-三降藿烷；Tm— 17α (H) - 22, 29, 30-三降藿烷；H—藿烷；G—伽马蜡烷

图 4 玛湖凹陷风城组烃源岩样品饱和烃馏分 m/z 191 质量色谱图

Fig. 4 m/z 191 mass spectrometry of saturated fraction in the Fengcheng Formation source rock samples from Mahu sag

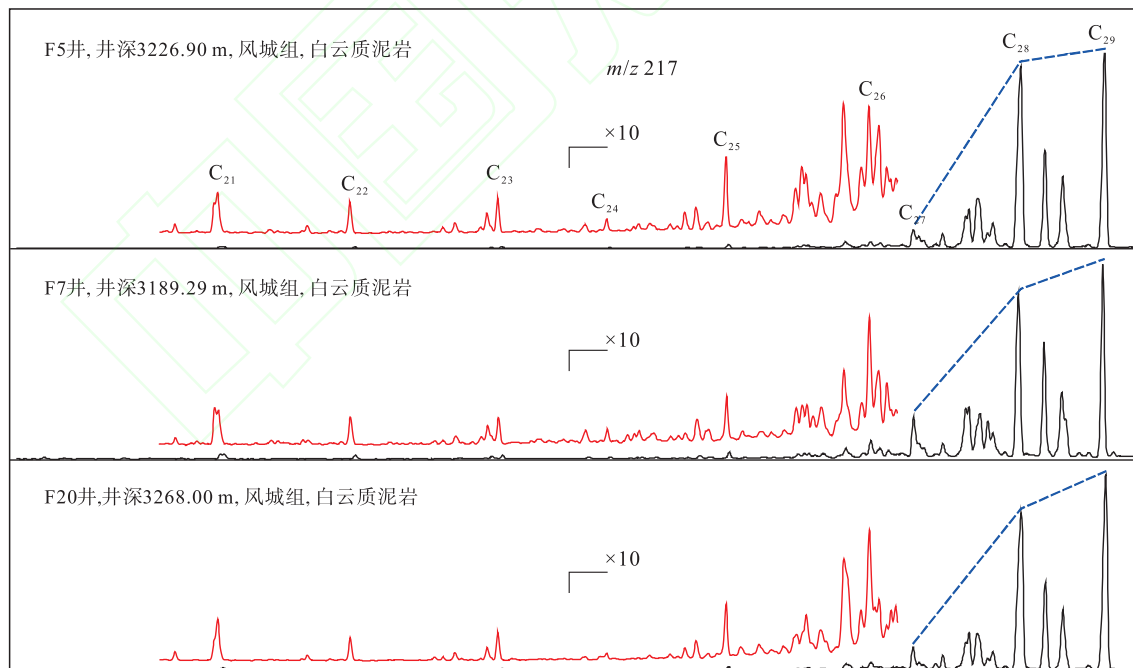


图 5 玛湖凹陷风城组烃源岩样品饱和烃馏分 m/z 217 质量色谱图

Fig. 5 m/z 217 mass spectrometry of saturated fraction in the Fengcheng Formation source rock samples from Mahu sag

被认为与地层时代有关，而且古生代沉积物中该比值通常小于 0.6 (Schwark and Empt, 2006)。但是，风城组沉积物中 C_{28}/C_{29} 值较高，介于 0.81 ~

1.51 之间，明显高于晚石炭世—早二叠世沉积物。但是，由于古生代沉积物中不发育叶绿素 (chlorophyll) a 和 c 藻 (Xia et al., 2022)，因此研究区风

表 3 玛湖凹陷二叠系风城组岩心样品甾烷相关参数

Table 3 Geochemical parameters for alkane and terpanes in studied samples of the Permian Fengcheng Formation from Mahu sag

样品 编号	C ₂₇ Sat /%	C ₂₈ Sat /%	C ₂₉ Sat /%	ββ/(ββ+αα)	S/(S+R)	Dia/Sat	C ₂₆ /C ₂₈ TAS	C ₂₇ /C ₂₈ TAS	C ₂₆ TAS /%	C ₂₇ TAS /%	C ₂₈ TAS /%
F1	4.06	57.81	38.13	0.19	0.30	0.04	0.01	0.20	0.14	16.95	82.92
F2	2.36	51.59	46.05	0.20	0.27	0.11	0.02	0.28	1.12	21.85	77.03
F3	7.06	46.50	46.44	0.24	0.34	0.08	0.04	0.34	3.54	24.58	71.88
F4	5.34	51.23	43.43	0.23	0.31	0.06	0.02	0.26	0.98	20.59	78.43
F5	7.02	44.65	48.33	0.26	0.34	0.08	0.05	0.43	4.41	28.54	67.06
F6	5.34	45.61	49.05	0.21	0.32	0.05	0.03	0.31	1.03	23.34	75.63
F7	6.33	47.35	46.32	0.20	0.35	0.02	0.06	0.54	4.04	32.38	63.59
F8	6.89	47.20	45.91	0.19	0.35	0.01	0.08	0.63	5.02	34.90	60.08
F9	6.66	48.66	44.69	0.21	0.36	0.03	0.08	0.59	4.74	34.49	60.78
F10	3.40	43.34	53.26	0.33	0.42	0.05	0.09	0.82	4.78	42.45	52.76
F11	5.56	46.07	48.36	0.37	0.46	0.08	0.11	0.88	5.54	43.94	50.53
F12	3.15	44.40	52.45	0.26	0.32	0.03	0.03	0.54	2.18	32.99	64.82
F13	9.28	45.73	44.99	0.24	0.37	0.11	0.09	0.82	4.37	43.07	52.56
F14	5.71	44.87	49.42	0.20	0.30	0.09	0.07	0.58	4.17	34.30	61.53
F15	6.46	43.66	49.88	0.25	0.36	0.03	0.05	0.62	2.79	36.45	60.76
F16	5.37	47.91	46.73	0.42	0.47	0.15	0.07	0.74	3.89	42.01	54.10
F17	4.53	46.38	49.08	0.18	0.25	0.02	0.05	0.70	3.34	39.65	57.00

备注：C₂₇Sat：C₂₇/（C₂₇~C₂₉）规则甾烷；C₂₈Sat：C₂₈/（C₂₇~C₂₉）规则甾烷；C₂₉Sat：C₂₉/（C₂₇~C₂₉）规则甾烷；ββ/（ββ+αα）：ββ/（ββ+αα）C₂₉规则甾烷；S/（S+R）：S/（S+R）C₂₉规则甾烷；Dia/Sat：（C₂₇~C₂₉）重拍甾烷/规则甾烷；C₂₆/C₂₈TAS：20S-C₂₆/20S-C₂₈三芳甾烷；C₂₇/C₂₈TAS：20R-C₂₇/20R-C₂₈三芳甾烷；C₂₆TAS：C₂₆/（C₂₆~C₂₈）三芳甾烷；C₂₇TAS：C₂₇/（C₂₆~C₂₈）三芳甾烷；C₂₈TAS：C₂₈/（C₂₆~C₂₈）三芳甾烷。

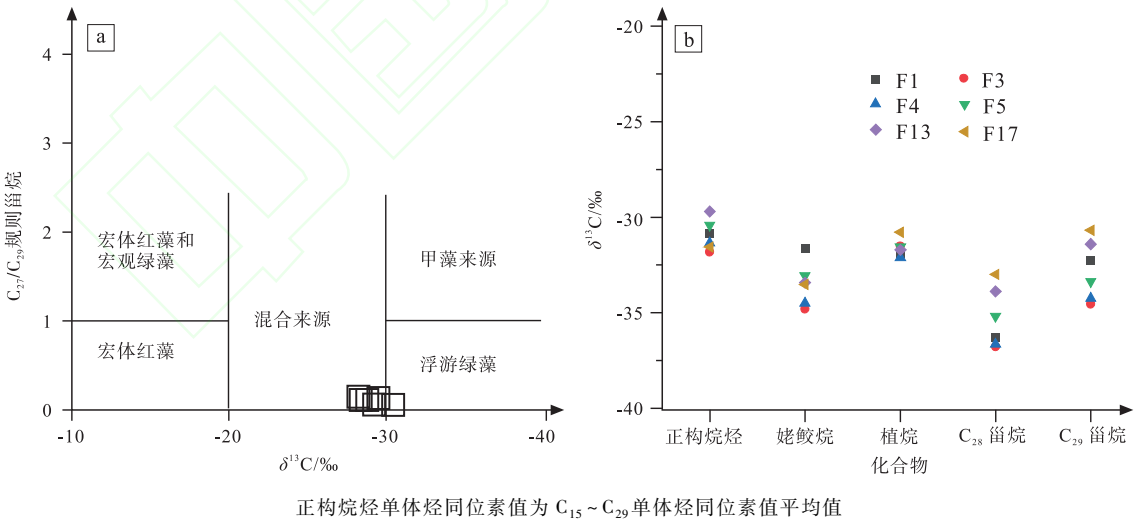


图 6 玛湖凹陷二叠系烃源岩样品中干酪根有机碳同位素与 C₂₇/C₂₉甾烷交汇图 (a) 和生物标志化合物单体碳同位素分布图 (b)

Fig. 6 Cross plot of δ¹³C vs C₂₇/C₂₉steranes values (a) and compound-specific carbon isotope of some biomarkers (b) in the Fengcheng Formation source rock samples from Mahu sag

城组沉积物中高 C₂₈/C₂₉值可能归因于一些特殊的绿藻种属来源。另外，沉积物中 C₂₈规则甾烷不仅

丰度高，而且富集轻碳同位素(图 6-b)。C₂₈甾烷同位素值比其他藻类来源的脂质化合物同位素值低

约 5‰，如姥鲛烷和正构烷烃。这种差异可能指向不同藻类的起源 (Zhang *et al.*, 2020)。

此外， C_{29} 规则甾烷异构化参数被用来评价成熟度 (Xiao *et al.*, 2022)。但是， $C_{29}-\beta\beta/(\beta\beta+\alpha\alpha)$ 和 $C_{29}-S/(S+R)$ 比值分别分布在 0.18 ~ 0.37 和 0.25 ~ 0.47 之间 (表 3)，指示有机质热演化处于未成熟—低成熟阶段。而镜质组反射率、 C_{31} 藿烷异构化参数以及芳烃成熟度参数均表明风城组烃源岩有机质以进入生油窗，处于大量生烃阶段 (Wang *et al.*, 2023b)。因此， C_{29} 规则甾烷异构化参数发生反转，不再能够准确有效地评价有机质成熟度。

4.4 短链甾烷

除了规则甾烷外，短链甾烷也有在烃源岩和原油中被检测到，碳数主要分布在 $C_{19} \sim C_{26}$ 之间 (潘志清等, 1991; 王作栋等, 2009)，但相关报道较少。前人在准噶尔盆地东部上二叠统沉积物中检测到 $C_{19} \sim C_{26}$ 短链甾烷，并推测该系列化合物可能与古环境中低等水生生物贡献有关，如海绵、红藻和黏球形藻等 (梁明亮等, 2014)。此外，这些沉积物有机质热演化程度不高，认为该化合物可能受沉积有机质早期的生物降解作用影响。同时，这些沉积物形成于干旱条件下的咸化湖相沉积背景。因此，该系列化合物被认为东疆盆地特殊沉积演化的产物，是特殊沉积环境下微生物贡献并参与有机质改造的产物 (梁明亮等, 2014)。研究区风城组沉积物中同样检测出 $C_{21} \sim C_{26}$ 短链甾烷 (图 5)，推测此类化合物与风城组沉积高盐度强还原的沉积背景下的特殊有机质输入有关，这些有机质以藻类等低等水生生物为主。同时，此类化合物的检出指示玛湖凹陷风城组可能与东疆主要盆地二叠统具有相似的沉积演化与动力学背景，但仍需进一步研究。

4.5 重排甾烷

重排甾烷是广泛存在于地质记录中的一系列甾类化合物。此类化合物可能形成于甾醇在有机质成岩作用早期所形成的甾烯在黏土矿物催化下发生重排作用 (de Leeuw *et al.*, 1989)。因此，此类化合物分布特征往往被用来判识沉积有机质输入类型 (Ensminger *et al.*, 1978)。随着成熟度的增加，重排甾烷的相对丰度逐渐增加，重排甾烷与规则甾烷比值增大 (van Kaam-Peters *et al.*, 1998; 孙涛和段

毅, 2011)。此外，前人研究表明重排甾烷丰度还与沉积环境有关 (朱扬明等, 1997)，高盐还原沉积背景下的烃源岩及其原油中几乎不含重排甾烷，而煤系地层中往往富含此类化合物 (Teng *et al.*, 2019)。通过对研究区代表性样品 m/z 217 色质图分析，研究发现风城组烃源岩中几乎不含重排甾烷，重排甾烷/规则甾烷比值极低 (0.01 ~ 0.15) (表 3)。结合研究区区域地质背景，推测极低丰度的重排甾烷可能与风城组中低含量黏土矿物与高盐度强还原的沉积水体密切相关。

4.6 甲基及二甲基甾烷

甲基甾烷是甾类化合物中重要的一系列化合物，其包括 2-甲基甾烷、3-甲基甾烷和 4-甲基甾烷 (Dahl *et al.*, 1995)。其中，备受关注且研究较多的化合物为 4-甲基甾烷，其前驱体可能是沟鞭藻，也包含某些特殊细菌种属 (Boon *et al.*, 1979; 傅家谟等, 1985; 黄第藩等, 1989)。淡水湖相沉积物中富含沟鞭藻化石，被认为是 4-甲基甾烷的主要贡献者 (傅家谟等, 1985; Brassell *et al.*, 1986)。而海相和咸水湖相沉积物中沟鞭藻化石分布较少，但富含甾醇和甾酮等细菌还原产物，被认为是 4-甲基甾烷的主要来源 (黄第藩等, 1989)。此外，有研究表明，4-甲基甾烷丰度也可能与沉积环境有关，其中高盐度环境下的沉积物中 4-甲基甾烷含量较低，而淡水沉积下的有机质中 4-甲基甾烷含量较高 (Jiamo *et al.*, 1990)，可能是因为高盐度和强还原的沉积水体不利于 4-甲基甾烷生物前驱体的生活繁衍。相比于规则甾烷，风城组沉积物中 4-甲基甾烷的丰度远远低于规则甾烷，推测是不同生物种属的贡献 (图 7)。此外，风城组样品中以高碳数 ($C_{28} \sim C_{30}$) 同系物为主。其中，与 C_{29} 4-甲基甾烷和 C_{30} 甾烷相比， C_{28} 4-甲基甾烷丰度较低，可能指示着高盐沉积水体条件 (图 7-a)。4, 4-二甲基甾烷可能与 4-甲基甾烷具有相似的生物成因与来源。类似地，风城组沉积物中以高碳数 ($C_{29} \sim C_{31}$) 4, 4-二甲基甾烷为主 (图 7-b)。这与 4-甲基甾烷分布特征一致，推测 2 个系列化合物可能具有相似的成因，即可能与高盐度沉积背景下的特殊有机质贡献有关。

4.7 24-丙基胆甾烷

一直以来， C_{30} 24-正丙基胆甾烷 (C_{30} 24-

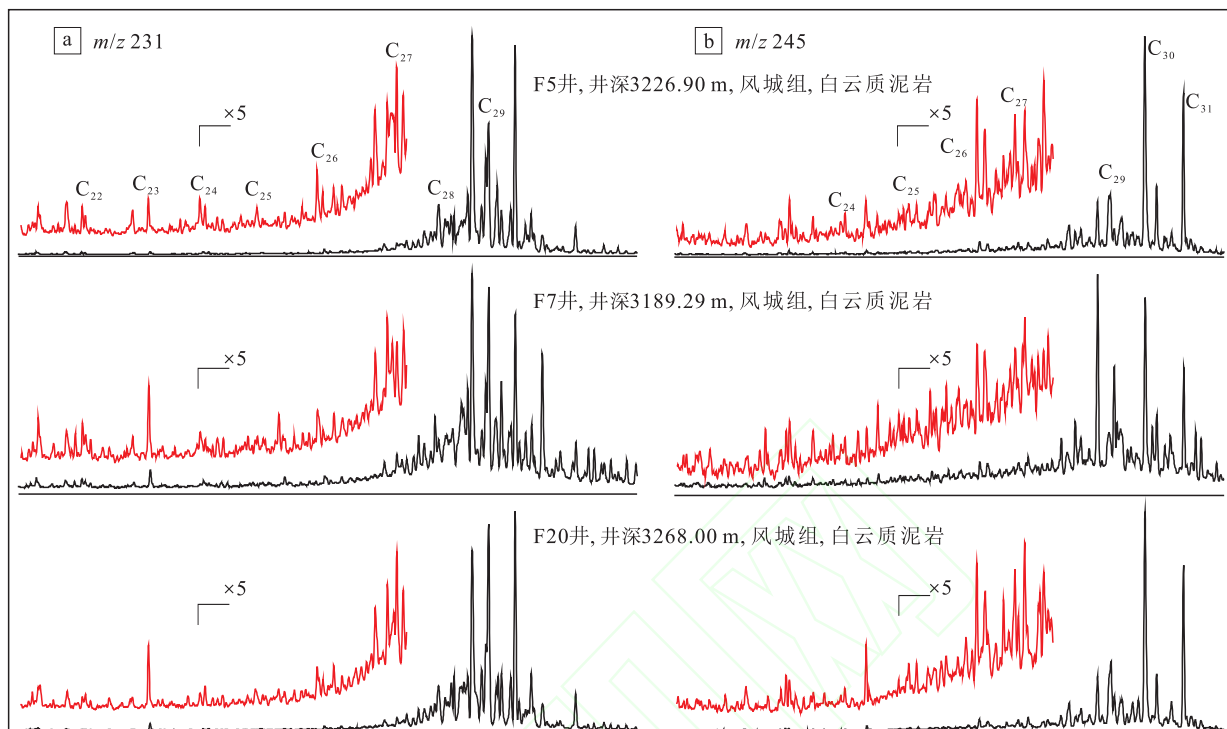


图 7 玛湖凹陷风城组烃源岩样品饱和和馏分 m/z 231 和 245 质量色谱图

Fig. 7 m/z 231 and m/z 245 mass spectrometry of saturated fraction in the Fengcheng Formation source rock samples from Mahu sag

NPC) 被认为源自于正丙基胆甾醇, 是海相沉积环境的专属指标 (Moldowan, 1984; Volkman, 2003)。因此, 认为此类化合物是陆相沉积环境遭受海侵的一个间接证据。张瑞杰等 (2024) 通过双质谱在风城组沉积物中首次检测出 C_{30} 24-NPC (图 8), 并发现 C_{30} 24-NPC 指数与样品中红藻孢子相对丰度具有正相关关系, 推测此类化合物可能指示着红藻的来源。研究表明风城组形成于高盐度、强还原且水体发生明显分层的碱性湖泊, 因此推测风城组沉积有机质中的红藻生存环境并非海相。据此推断, 红藻属于“海退遗种”, 是古亚洲洋关闭的重要生物化石指示标志。另一方面, 通过热模拟实验, 结果表明风城组中红藻型烃源岩对研究区已发现油气具有一定的贡献, 尤其是在凹陷的边缘区 (张瑞杰等, 2024)。但是, 原油中尚未检测出此类化合物。 C_{30} 24-NPC 可能是研究区潜在的有效油源对比指标。

4.8 羊毛甾烷

羊毛甾烷是一类四环三萜类化合物, 被首次检出中国泌阳凹陷富含白云质样品 (Chen *et al.*,

1989, 1990)。此后, 长链 $C_{30} \sim C_{32}$ 羊毛甾烷相继在陆相富硫原油 (Peng *et al.*, 1998)、松辽盆地白垩系沉积物 (Feng *et al.*, 2011)、玛湖凹陷风城组碱湖沉积物 (王东勇等, 2021) 中检测与鉴定。目前, 羊毛甾烷指示高盐度、强还原与强蒸发的沉积环境这一观点已经达到共识。但是, 该系列化合物是一类特殊的化合物, 相关报道较少, 其生物来源与成因仍处于研究初始阶段。Lu 等 (2011) 首次在金县凹陷高硫原油中检测出短链 ($C_{23} \sim C_{25}$) 羊毛甾烷, 并指出原核甲基营养细菌可能是羊毛甾烷的生物来源。Wang 等 (2023a) 在玛湖凹陷风城组碱湖相沉积物检测到丰富的 $C_{23} \sim C_{25}$ 和 $C_{30} \sim C_{32}$ 羊毛甾烷, 并认为它们可能具有共同的生物来源。结合同位素数据与高丰度胡萝卜烷和 7-甲基直链烷烃和 8-甲基直链烷烃分布, 推测蓝绿藻可能是其生物来源, 但不排除其他藻类生物贡献。图 9 为代表性烃源岩样品 m/z 259 质谱图展示了风城组沉积物中羊毛甾烷分布。此类化合物的检出, 一方面指示风城组发育高盐度、强还原且水体发生明显分层的水体环境; 另一方面可能指示风城组中特殊沉积背景下的特殊有机质贡献。

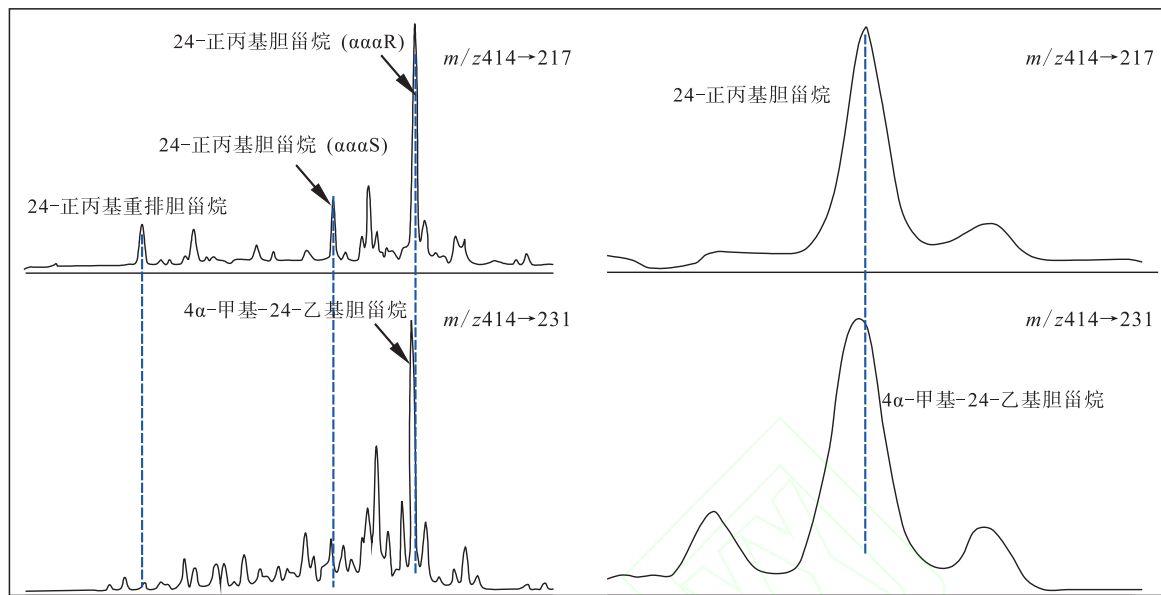


图 8 玛湖凹陷 X76 井 3455.6 m 风城组烃源岩样品饱和烃馏分 m/z 414→217 和 m/z 414→231 质量色谱图
(据张瑞杰等, 2024, 有修改)

Fig. 8 m/z 414→217 and m/z 414→231 mass spectrometry of saturated fraction in the Fengcheng Formation source rock samples in 3455.6 m of Well X76 from Mahu sag (modified from Zhang *et al.*, 2024)

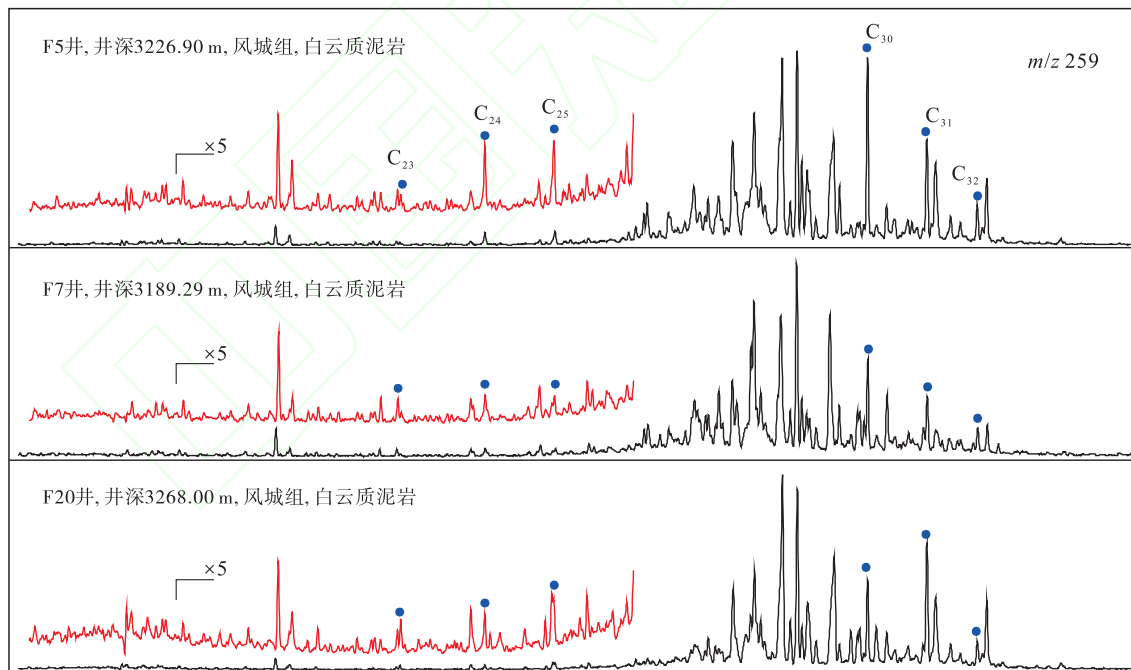


图 9 玛湖凹陷风城组烃源岩样品饱和烃馏分 m/z 259 质量色谱图

Fig. 9 m/z 259 mass spectrometry of saturated fraction in the Fengcheng Formation source rock samples from Mahu sag

4.9 三芳甾烷及甲基三芳甾烷

三芳甾 (TAS) 系列化合物可能源自于单芳甾烷类芳构化和去甲基, 普遍存在于沉积有机质芳烃馏分中 (Riolo and Albrecht, 1985; Riolo *et al.*,

1986)。C₂₆、C₂₇和 C₂₈ TAS 可能类似于 C₂₇、C₂₈和 C₂₉规则甾烷, 能够提供重要的沉积有机质的来源信息 (Moldowan and Fago, 1986)。C₂₆/C₂₈ 20S TAS 和 C₂₇/C₂₈ 20R TAS 已经被用于油气系统分析研究 (Li *et al.*, 2012; 李美俊等, 2012; 杨福林

等, 2017)。但是, 受限于常规技术分析, C_{26} 20R 和 C_{27} 20S 在 m/z 231 质谱图上发生共溢, 无法准确计算 C_{26} 、 C_{27} 和 C_{28} TAS 相对丰度 (Moldowan and Fago, 1986)。尽管如此, 三芳甾烷分布特征已经被广泛用来划分原油族群、进行油源对比以及判别成熟度等。三芳甲甾烷是一系列来源于甲藻甾醇重要的分子化石, 而甲藻甾醇被认为是广泛存在的沟鞭藻的天然产物 (Moldowan *et al.*, 1996)。中生代早期以来的沉积地层中往往含有高浓度的三芳甲甾烷。但是, Moldowan 和 Talyzina (1998) 根据生物标志物证据, 研究发现沟鞭藻的祖先可能被追溯到早寒武世。Zhang 等 (2002) 在塔里木盆地寒武纪和前寒武纪沉积物抽提物中检测到高丰度的 24-降胆甾烷、甲藻甾烷和三芳甲甾烷。早寒武世沉积物中就存在报道沟鞭藻祖先的地球化学证据, 同时分子证据表明囊状沟鞭藻与前三叠纪祖先有密切联系 (Moldowan and Talyzina, 1998)。这些研究成果表明鞭毛藻和硅藻等浮游生物起源可能早于中生代 (Ogbesejana, 2018)。风城组沉积物中含有极低丰度的 C_{26} -20S TAS (图 10-a), C_{26} -20S/ C_{28} -20S TAS 比值极低 (0.01~0.09), 且以 C_{28} TAS 为主。通过计算 C_{26} 、 C_{27} 和 C_{28} TAS 相对丰度, 结果表明 3 种化合物相对丰度平均为 3.30%、32.50% 和 64.20% (表 3)。这似乎与样品

中极低 C_{27} 规则甾烷和极高 C_{29} 规则甾烷结果一致 (图 5)。此外, 风城组沉积物中几乎不含三芳甲甾烷, 以甲基三芳甾烷为主 (图 10-b)。这可能与风城组沉积有机质中特殊有机质贡献有关 (王东勇等, 2022)。同时, 前人研究表明盐湖相不发育 24-降胆甾烷和三芳甲甾烷 (王广利等, 2008), 推测风城组高盐度沉积环境不适宜沟鞭藻类生物大量繁殖, 导致沉积物中缺失此类化合物分布。

5 结论

1) 玛湖凹陷下二叠统风城组沉积物具有高含量的姥鲛烷、 β -胡萝卜素、 C_{23} 三环萜烷和伽马蜡烷, 表明沉积时期发育高盐度、强还原且水体发生明显分层的湖泊水体条件。同时, 沉积时期特殊复杂的有机质来源以及低黏土矿物含量的矿物组成特征共同形成了此套沉积物中丰富的甾烷类化合物分布。

2) 与沉积有机质来源贡献有关的甾烷类化合物分布特征主要表现为: 极高丰度的 C_{28} 和 C_{29} 规则甾烷以及极低丰度的 C_{27} 规则甾烷可能指示绿藻等特殊藻类贡献; C_{30} 24-正丙基胆甾烷的检出可能指示着红藻有机质的输入; 高丰度的羊毛甾烷表明可能有蓝绿藻或其他特殊藻类的输入; 低丰度的烷基甾烷和极低含量的三芳甲甾烷可能暗示其他特殊有

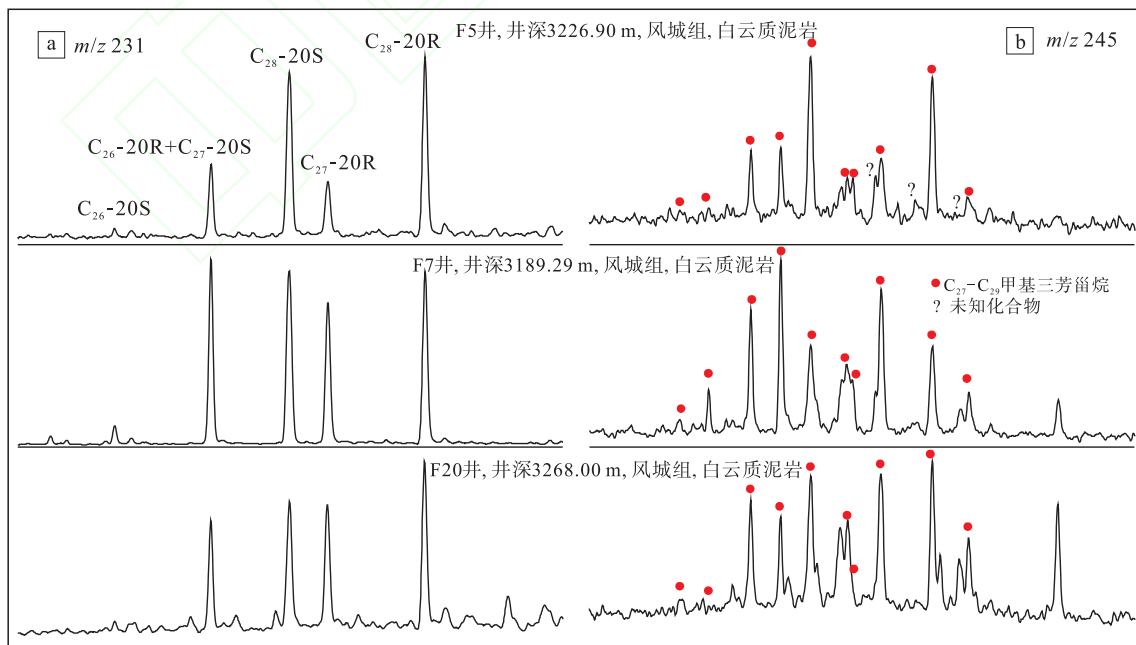


图 10 玛湖凹陷风城组烃源岩样品芳烃馏分 m/z 231 和 245 质量色谱图

Fig. 10 m/z 231 and m/z 245 mass spectrometry in aromatic fractions of the Fengcheng Formation source rock samples from Mahu sag

机质的输入或沟鞭藻的贡献比例较低。

3) 与沉积水体条件有关的甾类化合物分布特征主要表现为: C_{29} 规则甾烷异构化参数分布异常, 可能不能准确反映有机质热演化水平; 相对于规则甾烷, 4-甲基甾烷丰度极低; 相对于 C_{29} 4-甲基甾烷和 C_{30} 甾烷, C_{28} 4-甲基甾烷相对丰度很低以及完整的羊毛甾烷分布。此外, 极低丰度的重排甾烷与沉积物中极低含量的黏土矿物有关。

致谢 本文是在加拿大阿尔伯塔大学 (University of Alberta) 联合培养期间完成的。作者感谢 Zhehui Jin 副教授及国家留学基金委对王东勇博士生在加拿大访学期间生活和学习上的帮助与资助。感谢师生宝老师和朱雷老师在实验过程中提供的帮助。特别感谢审稿专家对文章初稿提出了许多建设性的意见。

参考文献 (References)

- 曹剑, 雷德文, 李玉文, 唐勇, 阿布力米提, 常秋生, 王婷婷. 2015. 古碱湖优质烃源岩: 准噶尔盆地二叠统风城组. 石油学报, 36(7): 781-790. [Cao J, Lei D W, Li Y W, Tang Y, Abulimit, Chang Q S, Wang T T. 2015. Ancient high-quality alkaline lacustrine source rocks discovered in the Lower Permian Fengcheng Formation, Junggar Basin. *Acta Petrolei Sinica*, 36(7): 781-790]
- 陈哲龙, 柳广弟, 卫延召, 高岗, 任江玲, 杨帆, 马万云. 2017. 准噶尔盆地玛湖凹陷二叠系烃源岩三环萜烷分布样式及影响因素. 石油与天然气地质, 38(2): 311-322. [Chen Z L, Liu G D, Wei Y Z, Gao G, Ren J L, Yang F, Ma W Y. 2017. Distribution pattern of tricyclic terpanes and its influencing factors in the Permian source rocks from Mahu Depression in the Junggar Basin. *Oil & Gas Geology*, 38(2): 311-322]
- 傅家谟, 徐芳芳, 陈德玉, 刘德汉, 胡成一, 贾蓉芬, 徐世平, Brassell A C, Eglinton G. 1985. 茂名油页岩中生物输入的标志化合物. 地球化学, (2): 299-314. [Fu J, Xu F F, Chen D Y, Liu D H, Hu C Y, Jia R F, Xu S P, Brassell A C, Eglinton G. 1985. Biomarker compounds of biological inputs in Maoming oil shale. *Geochimica*, (2): 299-314]
- 何登发, 张磊, 吴松涛, 李涤, 甄宇. 2018. 准噶尔盆地构造演化阶段及其特征. 石油学报, 39(5): 845-861. [He D F, Zhang L, Wu S T, Li D, Zhen Y. 2018. Tectonic evolution stages and features of the Junggar Basin. *Acta Petrolei Sinica*, 39(5): 845-861]
- 何文军, 吴和源, 杨森, 吴伟涛, 李娜, 白玉彬, 王然, 赵毅, 戚艳平, 赵辛楣. 2023. 准噶尔盆地玛湖凹陷风城组页岩油储层岩相划分与类型评价. 西北地质, 56(1): 217-231. [He W J, Wu H Y, Yang S, Wu W T, Li N, Bai Y B, Wang R, Zhao Y, Qi Y P, Zhao X M. 2023. Lithofacies division and type evaluation of shale oil reservoir in Fengcheng Formation of Mahu sag, Junggar Basin. *Northwestern Geology*, 56(1): 217-231]
- 黄第藩, 张大江, 李晋超. 1989. 论 4-甲基甾烷和孕甾烷的成因. 石油勘探与开发, (3): 8-15. [Huang D F, Zhang D J, Li J C. 1989. On origin of 4-methyl steranes and pregnanes. *Petroleum Exploration and Development*, (3): 8-15]
- 姜福杰, 黄任达, 胡涛, 吕佳豪, 黄立良, 姜振学, 胡美玲, 张晨曦, 吴冠昀, 吴育平. 2022. 准噶尔盆地玛湖凹陷风城组页岩油地质特征与分级评价. 石油学报, 43(7): 899-911. [Jiang F J, Huang R D, Hu T, Lü J H, Huang L L, Jiang Z X, Hu M L, Zhang C X, Wu G Y, Wu Y P. 2022. Geological characteristics and classification evaluation of shale oil in Fengcheng Formation in Mahu sag, Junggar Basin. *Acta Petrolei Sinica*, 43(7): 899-911]
- 李美俊, 王铁冠, 王春江, 张卫彪. 2012. 塔河油田奥陶系原油三芳甾分布及原油族群划分. 中国石油大学学报 (自然科学版), 36(5): 20-24. [Li M J, Wang T G, Wang T G, Zhang W B. 2012. Distribution of triaromatic steroids and oil family classification of Ordovician oils in Tahe Oilfield. *Journal of China University of Petroleum (Natural Science)*, 36(5): 20-24]
- 梁明亮, 王作栋, 何晶, 陶明信, 李晓斌, 李中平, 钱宇, 王有孝. 2014. 东疆上二叠统烃源岩中的短链甾烷. 沉积学报, 32(4): 784-789. [Liang M L, Wang Z D, He J, Tao M X, Li X B, Li Z P, Qian Y, Wang Y X. 2014. Research on short-chain steranes in source rocks from Upper Permian, eastern Xinjiang. *Acta Sedimentologica Sinica*, 32(4): 784-789]
- 孟凡巍, 周传明, 燕夔, 袁训来, 尹磊明. 2006. 通过 C_{27}/C_{29} 甾烷和有机碳同位素来判断早古生代和前寒武纪的烃源岩的生物来源. 微体古生物学, 23(1): 51-56. [Meng F W, Zhou C P, Yan K, Yuan X L, Yin L M. 2006. Biological origin of Early Paleozoic and Precambrian hydrocarbon source rocks based on C_{27}/C_{29} sterane ratio and organic carbon isotope. *Acta Micropalaeontologica Sinica*, 23(1): 51-56]
- 潘志清, 黄第藩, 林壬子. 1991. 原油和生油岩中完整短链甾类系列化合物 ($C_{20}-C_{26}$) 的发现及其意义. 沉积学报, 9(2): 106-113. [Pan Z Q, Huang D F, Lin R Z. 1991. Identification of a complete series of short side chain steroids ($C_{20}-C_{26}$) in crude oil and source rock and its geochemical significance. *Acta Sedimentologica Sinica*, 9(2): 106-113]
- 盛国英, 卢鸿, 廖晶, 彭平安. 2019. 地质体中藿烷类新化合物研究进展. 地球化学, 48(5): 421-446. [Sheng G Y, Lu H, Liao J, Peng P A. 2019. Advances on novel hopanoids present in geological bodies. *Geochimica*, 48(5): 421-446]
- 孙涛, 段毅. 2011. 煤系有机质生成烃类中甾烷系列化合物地球化学特征: 以高温封闭体系下热模拟实验为例. 天然气地球科学, 22(6): 1082-1807. [Sun T, Duan Y. 2011. Geochemical characteristics of steranes of coal generated hydrocarbons: a case of high temperature and fined simulated experiment. *Natural Gas Geoscience*, 22(6): 1082-1807]
- 唐勇, 何文军, 姜懿洋, 费李莹, 单祥, 赵毅, 郑孟林, 曹剑, 秦志军, 杨森, 王然, 朱涛, 高岗. 2023a. 准噶尔盆地二叠系咸化湖相页岩油气富集条件与勘探方向. 石油学报, 44(1): 125-143. [Tang Y, He W J, Jiang Y Y, Fei L Y, Shan X, Zhao Y, Zheng M L, Cao J, Qin Z J, Yang S, Wang R, Zhu T, Gao G. 2023a. Enrichment condi-

- tions and exploration direction of Permian saline lacustrine shale oil and gas in Junggar Basin. *Acta Petrolei Sinica*, 44(1): 125–143]
- 唐勇, 吕正祥, 何文军, 卿元华, 李响, 宋修章, 杨森, 曹勤明, 钱永新, 赵辛楣. 2023b. 准噶尔盆地玛湖凹陷二叠系风城组白云质岩储集层白云石成因. *石油勘探与开发*, 50(1): 38–50. [Tang Y, Lü Z X, He W J, Qing Y H, Li X, Song X Z, Yang S, Cao Q M, Qian Y X, Zhao X M. 2023b. Origin of dolomites in the Permian dolomitic reservoirs of Fengcheng Formation in Mahu sag, Junggar Basin, NW China. *Petroleum Exploration and Development*, 50(1): 38–50]
- 汪梦诗, 张志杰, 周川闽, 袁选俊, 林敏捷, 刘银河, 成大伟. 2018. 准噶尔盆地玛湖凹陷二叠统风城组碱湖岩石特征与成因. *古地理学报*, 20(1): 147–162. [Wang M S, Zhang Z J, Zhou C M, Yuan J X, Lin M J, Liu Y H, Cheng D W. 2018. Lithological characteristics and origin of alkaline lacustrine of the Lower Permian Fengcheng Formation in Mahu sag, Junggar Basin. *Journal of Palaeogeography* (Chinese Edition), 20(1): 147–162]
- 王东勇, 邹贤利, 李美俊, 陈刚强, 马春苗, 秦慧强. 2021. 准噶尔盆地乌尔禾地区二叠系风城组碱湖烃源岩中 $C_{30} \sim C_{32}$ 羊毛甾烷的检测及其地球化学意义. *地球化学*, 50(6): 591–601. [Wang D Y, Zou X L, Li M J, Chen G Q, Ma C M, Qin H Q. 2021. The detection and geochemical significance of $C_{30} \sim C_{32}$ lanostane from Permian alkaline source rocks in the Fengcheng Formation, in Wuerhe, Junggar Basin. *Geochimica*, 50(6): 591–601]
- 王东勇, 李美俊, 杨禄, 杨远峰, 李二庭, 靳军, 邹贤利, 徐伯东. 2022. 准噶尔盆地玛湖凹陷二叠系烃源岩三芳甾烷分布特征及油源对比. *天然气地球科学*, 33(11): 1862–1873. [Wang D Y, Li M J, Yang L, Yang Y F, Li E T, Jin J, Zou X L, Xu B D. 2022. The distribution of triaromatic steroids in Permian source rocks and implications for oil-source correlations in the Mahu sag, Junggar Basin, NW China. *Natural Gas Geoscience*. 33(11): 1862–1873]
- 王广利, 王铁冠, 陈致林, 张林晔, 徐金鲤. 2008. 济阳拗陷古近纪沟鞭藻分子化石的分布与控制因素. *沉积学报*, 26(1): 100–104. [Wang G L, Wang T G, Chen Z L, Zhang L Y, Xu J L. 2008. Distribution and controlling factors of molecular fossils derived from dinoflagellates in the Paleogene lacustrine Jiyang Super-depression. *Acta Sedimentologica Sinica*, 26(1): 100–104]
- 王作栋, 孟仟翔, 陶明信, 王晓锋, 李中平, 徐永昌. 2009. 烃源岩中 $C_{19} \sim C_{29}$ 甾烷系列和 25-降藿烷系列的检出及其地质意义. *沉积学报*, 27(1): 180–185. [Wang Z D, Meng Q X, Tao M X, Wang X F, Li Z P, Xu Y C. 2009. Identification of $C_{19} \sim C_{29}$ steranes and 25-norhopanes in source rock and geological significance. *Acta Sedimentologica Sinica*, 27(1): 180–185]
- 肖洪, 李美俊, 杨哲, 朱志立. 2019. 不同环境烃源岩和原油中 $C_{19} \sim C_{23}$ 三环萜烷的分布特征及地球化学意义. *地球化学*, 48(2): 161–170. [Xiao H, Li M J, Yang Z, Zhu Z L. 2019. Distribution patterns and geochemical implications of $C_{19} \sim C_{23}$ tricyclic terpanes in source rocks and crude oils occurring in various depositional environments. *Geochemistry*, 48(2): 161–170]
- 杨福林, 云露, 王铁冠, 丁勇, 李美俊. 2017. 塔里木盆地寒武系源岩地化特征及与典型海相原油对比. *石油与天然气地质*, 38(5): 851–861. [Yang F L, Yun L, Wang T G, Ding Y, Li M J. 2017. Geochemical characteristics of the Cambrian source rocks in the Tarim Basin and oil-source correlation with typical marine crude oil. *Oil & Gas Geology*, 38(5): 851–861]
- 张瑞杰, 曹剑, 边立曾, 胡文瑄, 夏刘文, 张宾, 唐勇, 何文军. 2024. 古亚洲洋关闭期准噶尔湖发现“海退遗产”红藻及其成烃有效性. *中国科学: 地球科学*, 54(9): 2898–2916. [Zhang R J, Cao J, Bian L Z, Hu W X, Xia L W, Zhang B, Tang Y, He W J. 2024. Red algal evidence for a marine regression during closure of the Paleo-Asian Ocean in the Junggar Basin and its linkage to hydrocarbon generation. *Science China: Earth Sciences*, 54(9): 2898–2916]
- 朱扬明, 张春明, 张敏, 梅博文, 金迪威, 肖乾华. 1997. 沉积环境的氧化还原性对重排甾烷形成的作用. *沉积学报*, 15(4): 105–110. [Zhu Y M, Zhang C M, Zhang M, Mei B W, Jin D W, Xiao Q H. 1997. The effect of oxidation reduction nature of depositional environments on the formation of diasteranes. *Acta Sedimentologica Sinica*, 15(4): 105–110]
- Anders D E, Robinson W E. 1971. Cycloalkane constituents of the bitumen from Green River Shale. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 35(7): 661–678.
- Boon J J, Irene W, Rijpstra C, de Lange F, de Leeuw J W, Yoshioka M, Shimizu Y. 1979. Black Sea sterol: a molecular fossil for dinoflagellate blooms. *Nature*, 277(5692): 125–127.
- Brassell S C, Comet P A, Eglinton G, Isaacson P J, McEvoy J, Maxwell J R, Thomson I D, Tibbetts P J C, Volkman J K. 1980. The origin and fate of lipids in the Japan Trench. *Physics and Chemistry of the Earth*, 12: 375–392.
- Brassell S C, Mcevoy J, Hoffmann C F, Lamb N A, Peakman T M, Maxwell J R. 1984. Isomerisation, rearrangement and aromatisation of steroids in distinguishing early stages of diagenesis. *Organic Geochemistry*, 6: 11–23.
- Brassell S C, Eglinton G, Mo F J. 1986. Biological marker compounds as indicators of the depositions! history of the Maoming oil shale. *Organic Geochemistry*, 10(4): 927–941.
- Brooks J D, Smith J W. 1967. The diagenesis of plant lipids during the formation of coal, petroleum and natural gas—I: changes in the n-paraffin hydrocarbons. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 31(12): 2389–2397.
- Brooks J D, Gould K, Smith J W. 1969. Isoprenoid hydrocarbons in coal and petroleum. *Nature*, 222(5190): 257–259.
- Cao J, Xia L W, Wang T T, Zhi D M, Tang Y, Li W. 2020. An alkaline lake in the Late Paleozoic Ice Age (LPIA): a review and new insights into paleoenvironment and petroleum geology. *Earth-Science Reviews*, 202: 103091.
- Chen G Q, Wang D Y, Yang F, Tang Y T, Zou X L, Ma W Y, Li M H. 2022. Organic geochemistry and controlling factors of alkaline source rocks within sequence stratigraphic framework in the Fengcheng Formation, Mahu sag, Junggar Basin, NW China. *Energy Exploration & Exploitation*, 40(3): 1057–1077.
- Chen J H, Summons R E. 2001. Complex patterns of steroidal biomarkers in Tertiary lacustrine sediments of the Biyang Basin, China. *Organic Geochemistry*, 32(1): 115–126.
- Chen J H, Philp R P, Fu J M, Sheng G Y. 1989. The occurrence and i-

- dentification of C_{30} – C_{32} lanostanes: a novel series of tetracyclic triterpenoid hydrocarbons. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 53(10): 2775–2779.
- Chen J H, Fu J M, Sheng G Y, Philp R P, Ma W. 1990. A novel series of tetracyclic triterpenoid hydrocarbons: lanostanes (C_{30} – C_{32}), 6: 632–638.
- Dahl J, Moldowan J M, Summons R E, McCaffrey M A, Lipton P, Watt D S, Hope J M. 1995. Extended 3β -alkyl steranes and 3-alkyl triaromatic steroids in crude oils and rock extracts. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 59(18): 3717–3729.
- Damsté J S S, Kenig F, Koopmans M P, Köster J, Schouten S, Hayes J M, de Leeuw J W. 1995. Evidence for gammacerane as an indicator of water column stratification. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 59(9): 1895–1900.
- Dang W L, Gao G, You X, Fan K, Wu J, Lei D, He W, Tang Y. 2024. Geochemical identification of a source rock affected by migrated hydrocarbons and its geological significance: Fengcheng Formation, southern Mahu sag, Junggar Basin, NW China. *Petroleum Science*, 21(1): 100–114.
- de Leeuw J W, Cox H C, van Graas G, van de Meer F W, Peakman T M, Baas J M A, van de Graaf B. 1989. Limited double bond isomerisation and selective hydrogenation of sterenes during early diagenesis. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 53(4): 903–909.
- Ding W J, Hou D J, Jiang L, Jiang Y H, Wu P. 2020. High abundance of carotanes in the brackish-saline lacustrine sediments: a possible cyanobacteria source? *International Journal of Coal Geology*, 219: 103373.
- Ensminger A, Joly G, Albrecht P. 1978. Rearranged steranes in sediments and crude oils. *Tetrahedron Letters*, 19(18): 1575–1578.
- Feng Z H, Fang W, Li Z G, Wang X, Huo Q L, Huang C Y, Zhang J H, Zeng H S. 2011. Depositional environment of terrestrial petroleum source rocks and geochemical indicators in the Songliao Basin. *Science China Earth Sciences*, 54(9): 1304–1317.
- Huang W, Meinschein W G. 1979. Sterols as ecological indicators. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 43(5): 739–745.
- Jiamo F, Guoying S, Jiayou X, Eglinton G, Gouar A P, Rongfen J, Shanfa F, Pingan P. 1990. Application of biological markers in the assessment of paleoenvironments of Chinese non-marine sediments. *Organic Geochemistry*, 16(4): 769–779.
- Leider A, Richter-Brockmann S, Nettersheim B J, Achten C, Hallmann C. 2019. Low-femtogram sensitivity analysis of polyaromatic hydrocarbons using GC-APLI-TOF mass spectrometry: extending the target window for aromatic steroids in early Proterozoic rocks. *Organic Geochemistry*, 129: 77–87.
- Li M J, Wang T G, Lillis P G, Wang C J, Shi S B. 2012. The significance of 24-norcholestanes, triaromatic steroids and dinosteroids in oils and Cambrian-Ordovician source rocks from the cratonic region of the Tarim Basin, NW China. *Applied Geochemistry*, 27(8): 1643–1654.
- Lu H, Sheng G Y, Peng P A, Ma Q, Lu Z. 2011. Identification of C_{24} and C_{25} lanostanes in Tertiary sulfur rich crude oils from the Jinxian sag, Bohai Bay Basin, Northern China. *Organic Geochemistry*, 42(2): 146–155.
- Mackenzie A S, McKenzie D. 1983. Isomerization and aromatization of hydrocarbons in sedimentary basins formed by extension. *Geological Magazine*, 120(5): 417–470.
- Mackenzie A S, Patience R L, Maxwell J R, Vandenbroucke M, Durand B. 1980. Molecular parameters of maturation in the Toarcian shales, Paris Basin, France—I. Changes in the configurations of acyclic isoprenoid alkanes, steranes and triterpanes. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 44(11): 1709–1721.
- Mackenzie A S, Brassell S C, Eglinton G, Maxwell J R. 1982. Chemical fossils: the geological fate of steroids. *Science*, 217(4559): 491–504.
- Moldowan J M. 1984. C_{30} -steranes, novel markers for marine petroleum and sedimentary rocks. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 48(12): 2767–2768.
- Moldowan J M, Fago F J. 1986. Structure and significance of a novel rearranged monoaromatic steroid hydrocarbon in petroleum. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 50(3): 343–351.
- Moldowan J M, Talyzina N. 1998. Biogeochemical evidence for dinoflagellate ancestors in the Early Cambrian. *Science*, 281(5380): 1168–1170.
- Moldowan J M, Dahl J, Jacobson S R, Huizinga B J, Fago F J, Shetty R, Watt D S, Peters K E. 1996. Chemostratigraphic reconstruction of biofacies: molecular evidence linking cyst-forming dinoflagellates with pre-Triassic ancestors. *Geology*, 24(2): 159–162.
- Ogbesejana A B. 2018. The distributions and geochemical significance of triaromatic steroids and aromatic dinosteroids in crude oils from Niger Delta Basin, Nigeria. *Fupre Journal of Scientific and Industrial Research*, 2(1): 55–70.
- Peng P A, Morales-Izquierdo A, Fu J M, Sheng G Y, Jiang J G, Hogg A, Strausz O P. 1998. Lanostane sulfides in an immature crude oil. *Organic Geochemistry*, 28(1): 125–134.
- Peters K E, Walters C C, Moldowan J M. 2005. *The Biomarker Guide Volume 2: Biomarkers and Isotopes in Petroleum Systems and Earth History*. Cambridge: Cambridge University Press.
- Philp R P, Fan Z. 1987. Geochemical investigation of oils and source rocks from Qianjiang depression of Jiangnan Basin, a terrigenous saline basin, China. *Organic Geochemistry*, 11(6): 549–562.
- Riolo J, Albrecht P. 1985. Novel rearranged ring C monoaromatic steroid hydrocarbons in sediments and petroleum. *Tetrahedron Letters*, 26(22): 2701–2704.
- Riolo J, Hussler G, Albrecht P, Connan J. 1986. Distribution of aromatic steroids in geological samples: their evaluation as geochemical parameters. *Organic Geochemistry*, 10(4–6): 981–990.
- Schwark L, Emt P. 2006. Sterane biomarkers as indicators of Paleozoic algal evolution and extinction events. *Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology*, 240(1): 225–236.
- Seifert W K, Moldowan J M. 1981. Paleoreconstruction by biological markers. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 45(6): 783–794.
- Sieskind O, Joly G, Albrecht P. 1979. Simulation of the geochemical transformations of sterols: superacid effect of clay minerals. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 43(10): 1675–1679.

- Simoneit B R T, Schoell M, Dias R F, de Aquino Neto F R. 1993. Unusual carbon isotope compositions of biomarker hydrocarbons in a Permian tasmanite. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 57(17): 4205–4211.
- Summons R E, Bradley A S, Jahnke L L, Waldbauer J R. 2006. Steroids, triterpenoids and molecular oxygen. *Philosophical Transactions of the Royal Society B: Biological Sciences*, 361(1470): 951–968.
- Synnot D P, Schwark L, Dewing K, Percy E L, Pedersen P K. 2023. The diagenetic continuum of steroid hydrocarbon transformation from early diagenesis into the oil window. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 342: 137–155.
- Tang W B, Zhang Y Y, Pe-Piper G, Piper D J W, Guo Z J, Li W. 2021a. Permian to early Triassic tectono-sedimentary evolution of the Mahu sag, Junggar Basin, western China: sedimentological implications of the transition from rifting to tectonic inversion. *Marine and Petroleum Geology*, 123: 104730.
- Tang W B, Zhang Y Y, Pe-Piper G, Piper D J W, Guo Z J, Li W. 2021b. Permian rifting processes in the NW Junggar Basin, China: implications for the post-accretionary successor basins. *Gondwana Research*, 98: 107–124.
- Tao S Z, Wang C Y, Du J G, Liu L, Chen Z. 2015. Geochemical application of tricyclic and tetracyclic terpanes biomarkers in crude oils of NW China. *Marine and Petroleum Geology*, 67: 460–467.
- ten Haven H L, Rullkötter J, Welte D H. 1989a. Steroid biological marker hydrocarbons as indicators of organic matter diagenesis in Deep Sea sediments: geochemical reactions and influence of different heat flow regimes. *Geologische Rundschau*, 78(3): 841–850.
- ten Haven H L, Rullkötter J, Welte D H. 1989b. Steroid biological marker hydrocarbons as indicators of organic matter diagenesis in deep sea sediments: geochemical reactions and influence of different heat flow regimes. *Geologische Rundschau*, 78(3): 841–850.
- Teng L, Zhang M, Yi C. 2019. Influence of changes in paleosedimentary environment on sterane composition and distribution. *Arabian Journal of Geosciences*, 12(18): 587.
- Tissot B P, Welte D H. 1984. *Petroleum Formation and Occurrence*. Heidelberg: Springer Verlag.
- van Kaam-Peters H M E, Köster J, van der Gaast S J, Dekker M, de Leeuw J W, Sinninghe Damsté J S. 1998. The effect of clay minerals on diasterane/sterane ratios. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 62(17): 2923–2929.
- Volkman J K. 1986. A review of sterol markers for marine and terrigenous organic matter. *Organic Geochemistry*, 9(2): 83–99.
- Volkman J K. 2003. Sterols in microorganisms. *Applied Microbiology and Biotechnology*, 60(5): 495–506.
- Wang D Y, Li M J, Chen J F, Xiao H, Zou X L, Yang L, Chen H C, Qin H Q. 2023a. The biological source and paleoenvironment implication of rare short-chain lanostanes in alkaline lacustrine sediments. *Organic Geochemistry*, 186: 104705.
- Wang D Y, Li M J, Zhou Y, Yang L, Yang Y F, Li E T, Jin J, Zou X L, Xu B D. 2023b. Petroleum geochemistry and origin of shallow-buried saline lacustrine oils in the slope zone of the Mahu sag, Junggar Basin, NW China. *Petroleum Science*, 20(6): 3363–3378.
- Xia L W, Cao J, Stüeken E E, Zhi D M, Wang T T, Li W. 2020. Unsynchronized evolution of salinity and pH of a Permian alkaline lake influenced by hydrothermal fluids: a multi-proxy geochemical study. *Chemical Geology*, 541: 119581.
- Xia L W, Cao J, Hu W X, Zhi D M, Tang Y, Li E T, He W J. 2021. Coupling of paleoenvironment and biogeochemistry of deep-time alkaline lakes: a lipid biomarker perspective. *Earth-Science Reviews*, 213: 103499.
- Xia L W, Cao J, Jin J, Xiang B L, Ma W Y, Wang T T. 2022. Response of nitrogen isotopes to paleo-environment and organic carbon accumulation in a Late Paleozoic alkaline lake, Junggar Basin. *Chemical Geology*, 602: 120884.
- Xiao H, Li M J, Wang W Q, You B, Liu X Q, Yang Z, Liu J G, Chen Q, Uwiringiyimana M. 2019. Identification, distribution and geochemical significance of four rearranged hopane series in crude oil. *Organic Geochemistry*, 138: 103929.
- Xiao H, Li M J, Wang T G, Chen D X, Kang W J, Wang Y S. 2022. Discovery of a new Proterozoic paleo-reservoir and its oil source in the Jianchang Sag, Yanliao Faulted-Depression Zone, North China. *Petroleum Science*, 19(5): 1927–1938.
- Xiao H, Li M J, Nettersheim B J. 2024. Short chain tricyclic terpanes as organic proxies for paleo-depositional conditions. *Chemical Geology*, 652: 122023.
- Yu K H, Zhang Z J, Cao Y C, Qiu L W, Zhou C M, Cheng D W, Sun P P, Yang Y Q. 2021. Origin of biogenic-induced cherts from Permian alkaline saline lake deposits in the NW Junggar Basin, NW China: implications for hydrocarbon exploration. *Journal of Asian Earth Sciences*, 211(104712): 104712.
- Zhang S C, Moldowan J M, Li M W, Bian L Z, Zhang B M, Wang F Y, He Z H, Wang D R. 2002. The abnormal distribution of the molecular fossils in the pre-Cambrian and Cambrian: its biological significance. *Science in China Series D: Earth Sciences*, 45(3): 193–200.
- Zhang Y D, Sun Y G, Chen J P. 2020. Stable carbon isotope evidence for the origin of C₂₈ steranes in lacustrine source rocks from the Qikou sag, Bohai Bay Basin, Eastern China. *Organic Geochemistry*, 145: 104028.

(责任编辑 郑秀娟)