

准中地区二叠系咸化湖盆烃源岩 沉积环境及发育模式

徐 敏^{1,2} 林会喜^{1,2} 胡瀚文^{1,2} 冷佳宣^{1,2} 曲彦胜³ 刘德志³

1 中国石化深部地质与资源重点实验室, 北京 102206

2 中国石化石油勘探开发研究院, 北京 102206

3 中国石化胜利油田分公司勘探开发研究院, 山东东营 257088

摘 要 准噶尔盆地中央坳陷 (简称“准中地区”)是继玛湖凹陷和吉木萨尔凹陷后寻找第 3 个咸化湖盆优质烃源灶的重要目标区。基于岩石学、元素地球化学及有机地球化学等综合分析, 对准中地区二叠系烃源岩开展系统研究, 结果表明: 早二叠世风城组沉积时期 (P_1f), 沙湾凹陷发育干旱碱湖沉积体系, 指示强还原-高盐度水体环境; 向北至盆 1 井西凹陷, 盐度降低但仍属咸水环境。中二叠世夏子街组 (P_2x) 和下乌尔禾组 (P_2w) 沉积时期, 环沙湾凹陷边缘带呈现协同演化特征, 处于微咸水-淡水过渡环境, 盐度呈“盆缘→凹陷”增加的正梯度分布, 推测凹陷中心深湖-半深湖相带仍维持咸化湖盆环境。基于此, 提出 2 类烃源岩发育模式: (1) 风城组“湖深扇小高咸水”模式, 干旱气候与咸化水体协同保障有机质保存; (2) 夏子街组和下乌尔禾组“湖浅扇大微咸水”模式, 表现为受较湿润气候影响, 陆源碎屑输入增加, 造成初级生产力保存效率下降, 烃源岩品质鲜有达到“很好”级别。(3) 沙湾凹陷风城组深湖-半深湖相咸化水体为有机质保存提供了有利条件, 其烃源岩以 II 型有机质为主, 生烃潜力评价达到“极好”级别, 处于高-过成熟演化阶段, 具备大规模生气能力, 有望成为准噶尔盆地深层-超深层油气勘探战略接替领域。

关键词 沉积环境 烃源岩发育模式 深层-超深层 咸化湖盆 二叠系 准噶尔盆地

第一作者简介 徐敏, 女, 1993 年生, 助理研究员, 2023 年毕业于中国地质大学 (北京), 获博士学位, 现从事油-气-源地球化学与成藏地质研究。E-mail: xumin2023.syky@sinopec.com。

通讯作者简介 林会喜, 男, 1969 年生, 正高级工程师, 博士, 长期从事勘探综合研究及管理工作。E-mail: linhx80.syky@sinopec.com。

中图分类号: P618.13 文献标志码: A

Sedimentary environment and development model of source rocks in the Permian saline lacustrine basin in Central Depression of Junggar Basin

XU Min^{1,2} LIN Huixi^{1,2} HU Hanwen^{1,2} LENG Jiaxuan^{1,2} QU Yansheng³ LIU Dezhi³

1 Key Laboratory of Geology and Resources in Deep Stratum, SINOPEC, Beijing 102206, China

2 Petroleum Exploration and Production Research Institute, SINOPEC, Beijing 102206, China

3 Exploration and Development Research Institute, SINOPEC Shengli Oilfield Company, Shandong Dongying 257088, China

Abstract The Central Depression of Junggar Basin (hereinafter referred to as “central Junggar Basin”) has become a key target area for identifying the third high-quality hydrocarbon-generation kitchen

within saline lacustrine basins, following the discoveries in the Mahu and Jimsar sags. Based on integrated analyses of petrology, elemental geochemistry, and organic geochemistry, a systematic research was conducted targeting Permian source rocks in the central Junggar Basin. Key findings reveal that the Lower Permian Fengcheng Formation (P_{1f}) in Shawan sag developed under an arid alkaline lacustrine depositional system, evidenced by diagnostic proxies, including elevated Sr/Ba ratios (>1), γ -waxane/ C_{31} hopane ratios averaging 1.14, and $\delta^{15}N$ values exceeding 10‰. These parameters collectively indicate hypersaline water conditions and intense reducing environments. Northward into the West Well Pen 1 sag, paleosalinity decreases while maintaining mesosaline characteristics. The Middle Permian Xiazijie Formation (P_{2x}) and Lower Wuerhe Formation (P_{2w}) exhibit co-evolutionary characteristics along depression margins under brackish-to-freshwater transitional settings. A radial paleosalinity gradient is observed(“periphery→depression”), with deep to semi-deep lacustrine facies at the depression center sustaining saline lacustrine conditions. Two distinct source rock development models are established: (1) P_{1f} “deep lake-small fan-hypersaline water”: synergistic effects of arid climate and hypersaline water preservation facilitated organic matter accumulation; (2) P_{2w}/P_{2x} “shallow lake-large fan-low salinity” model: enhanced terrigenous input under relatively humid climate reduced preservation efficiency of primary productivity, limiting hydrocarbon potential to suboptimal levels. (3) P_{1f} deep-to-semi-deep lacustrine facies in the Shawan sag provide exceptional organic matter preservation under hypersaline settings. These source rocks are dominated by Type II kerogen, exhibit “excellent” hydrocarbon generation potential, and have progressed to high-overmature thermal stages with significant gas-generating capacity. This saline lacustrine system represents a promising strategic replacement domain for deep-to-ultra-deep hydrocarbon exploration in the Junggar Basin.

Key words sedimentary environment, development model of source rock, deep and ultra-deep strata, saline lacustrine basin, Permian, Junggar Basin

About the first author XU Min, born in 1993, an assistant research fellow, graduated from China University of Geosciences (Beijing) in 2023 with a Ph.D. degree. She is engaged in researches on oil-gas-source geochemistry and hydrocarbon accumulation. E-mail: xumin2023.syky@sinopec.com.

About the corresponding author LIN Huixi, born in 1969, a senior engineer with a Ph.D. degree, is engaged in comprehensive exploration research and management. E-mail: linhx80.syky@sinopec.com.

0 引言

咸化湖盆烃源岩作为油气资源生成的重要物质基础,已引起全球地质学界广泛关注,相关研究在理论认知与勘探实践层面均取得显著突破。国内的研究主要集中于2类典型的构造背景:(1)东部断陷咸化湖盆,以渤海湾盆地济阳坳陷和东濮凹陷为典型代表(朱德燕等,2015;张洪安等,2017),其中济阳坳陷古近系沙河街组三段、四段烃源岩呈现咸化环境富有机质及早期生烃、排烃特征(倪良田等,2024),为该区亿吨级油田群形成提供了关键物质保障;(2)西部叠合盆地,更多地关注于柴达木盆地西部下干柴沟组及准噶尔盆地玛湖凹陷

风城组两大咸化烃源岩体系(舒豫川等,2021;王波等,2023;冯允献等,2025;王东勇等,2025),其中前者因多类型有机质共存及显著的生烃潜力而闻名,其较高的初级生产力与良好的保存条件被认为是有机质富集的关键因素(尹嘉等,2025),而后者则被认为是全球最古老的碱湖沉积之一(曹剑等,2015),特殊的矿物组合与地球化学特征为揭示咸化湖盆演化规律提供了关键证据。此外,对鄂尔多斯盆地延长组二段—三段(金强等,2008)、银额盆地巴音戈壁组(李继东等,2022)及宁南盆地清水营组(吴小力等,2022)等多套层系的研究,亦证实中国咸化湖盆优质烃源

岩发育具有多时代分布特征。在国际上,北美绿河组是碱湖烃源岩研究的典型案例(孟庆涛等, 2011; Burton *et al.*, 2014; French *et al.*, 2020), 该套页岩岩相垂向旋回特征显著, TOC 含量可达 10%~25% (French *et al.*, 2020)。干旱气候驱动下的水体分层机制与碳酸盐岩台地发育模式共同促进了有机质的保存与发育 (Burton *et al.*, 2014)。

近年来, 咸化湖盆烃源岩的成因机制与分布规律, 已成为全球油气地质领域的重要科学命题。中国西部叠合盆地特殊的地质构造演化背景与多期次沉积旋回特征, 使其成为揭示陆相咸化湖盆烃源灶发育规律的关键研究对象。准噶尔盆地为国内重要的含油气盆地, 二叠系已被证实发育玛湖凹陷和吉木萨尔凹陷两大咸化湖盆优质烃源灶。通过持续开展地质理论创新与勘探技术攻关, 盆地东部吉木萨尔凹陷中二叠统芦草沟组陆相混积岩型页岩油藏已建成为中国首个国家级陆相页岩油示范基地, 其有机质富集模式呈现出典型的咸化湖盆沉积特征(王剑等, 2020; 刘兵兵等, 2022; 张宸嘉等, 2022; 谢再波等, 2023)。盆地西部玛湖凹陷风城组发现广覆式分布、全球迄今最古老的碱湖相优质烃源灶, 实现全含油气系统全面突破, 推动建成了十亿吨级大油区(李晓慧等, 2022; 唐勇等, 2022; 姜福杰等, 2023; 倪敏婕等, 2023; 冯允献等, 2025)。

前人研究表明, 早—中二叠世准噶尔盆地咸化沉积体系具有显著的时空分异特征, 垂向演化呈现由深湖相向浅湖相渐变的趋势, 平面展布则受控于古地貌格局的西高东低配置关系。该演化过程与同期残余洋盆闭合动力学过程及沉积充填响应存在密切成因联系, 共同控制着咸化湖盆的形成和迁移及烃源灶的空间配置规律(曹正林等, 2024)。目前, 关于准中地区是否存在第 3 个咸化湖盆优质烃源灶以及该区域是否具备资源战略接替区的物质基础等核心科学问题亟待深入论证。本研究聚焦准中地区二叠系主力烃源岩层系, 通过建立多参数沉积环境对比格架, 刻画层间沉积环境差异; 基于烃源岩地球化学特征系统解析, 对不同条件水体环境中形成的烃源岩进行生烃潜力评价, 建立烃源岩发育模式, 从而揭示准中地区潜在的优质烃源灶。

1 区域地质特征

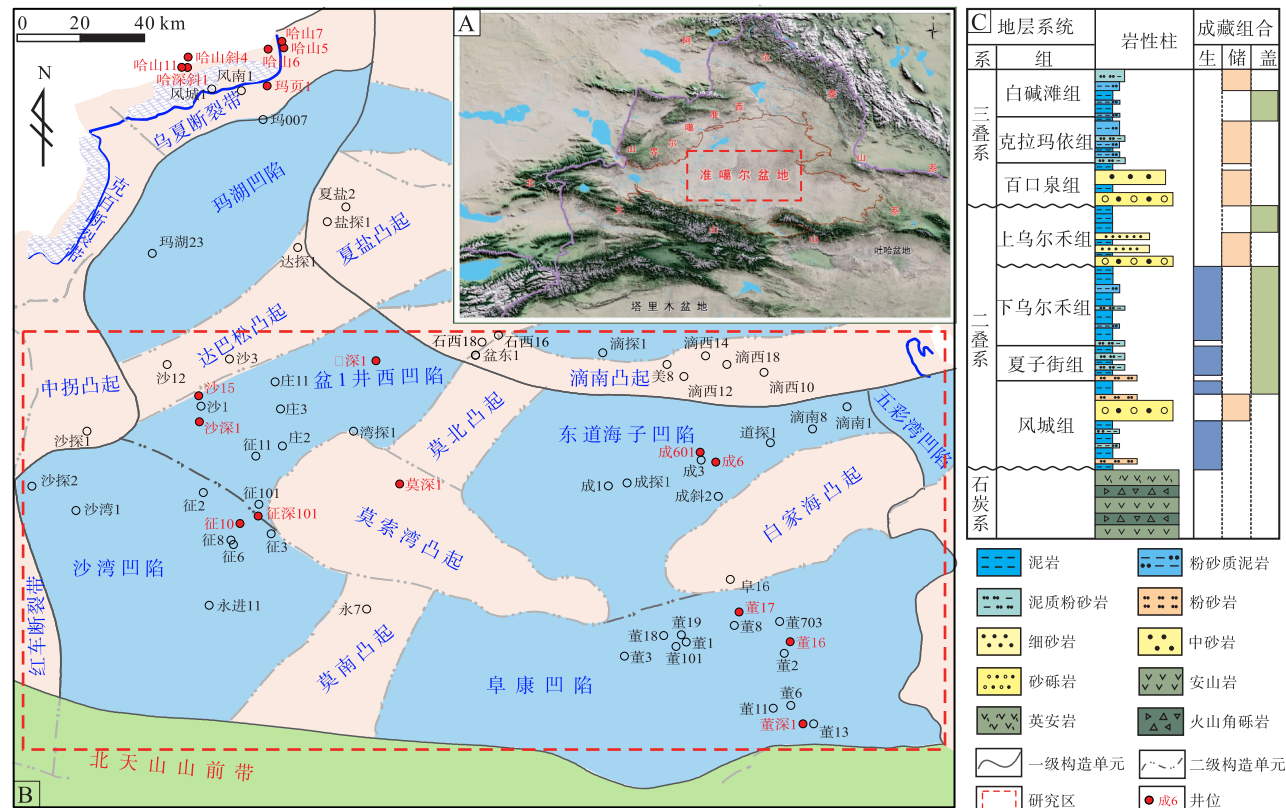
准噶尔盆地处于塔里木板块、哈萨克斯坦板块和西伯利亚板块的交汇处, 经历了海西期、印支期、燕山期和喜马拉雅期 4 个构造旋回的演化, 形成了现今具有明显旋回性和阶段性的多期叠合盆地。现今准噶尔盆地范围被盆缘造山带所围限(图 1-A)(王小军等, 2022)。

准噶尔盆地是在石炭系基底之上形成的陆内沉积盆地, 其中准中地区二叠系呈现“西厚东薄”的旋回结构, 该时期咸化湖盆中心的迁移受控于哈萨克斯坦板块的拼合及古亚洲洋的闭合过程(曹正林等, 2024)。准噶尔盆地二叠纪处于前陆盆地剧烈发育期: 早二叠世晚期(风城组沉积时期), 在西北缘冲断带与南缘逆冲推覆体系双重控制作用下形成两大前陆盆地格架, 发育以碱湖—咸湖沉积为主的湖相沉积体系, 且玛湖凹陷保存着迄今最古老的碱湖优质烃源灶(曹剑等, 2015); 进入中二叠世后, 残留海闭合, 构造活动转入平静期, 盆地进入热沉降主导的稳定发育阶段, 芦草沟组(P_2l)和平地泉组(P_2p)沉积于陆相咸化湖盆体系, 完整记录了湖盆演化的 2 个阶段, 即早期受控于陆源供给而形成滨浅湖沉积组合, 后期因水体循环阻滞逐渐演化为以内生化学沉积为主的高盐度封闭湖盆系统(支东明等, 2019)。

准中地区共包含 4 个次级凹陷, 具“东西分块”特征, 西部是盆 1 井西凹陷和沙湾凹陷, 东部是东道海子凹陷和阜康凹陷, 东、西凹陷之间被莫北凸起—莫索湾凸起—莫南凸起分隔(图 1-B)。西部凹陷下组合地层发育较齐全(图 1-C), 玛湖凹陷—盆 1 井西凹陷—沙湾凹陷以风城组(P_{lf})为主力烃源岩。东道海子凹陷中上二叠统暴露剥蚀, 缺失佳木河组(P_{lj})、风城组(P_{lf})和夏子街组(P_{2x}), 以中二叠统下乌尔禾组(P_{2w})大型湖泊沉积体系为凹陷内主要烃源岩层系, 与下伏巴塔玛依内山组(C_2b)呈不整合接触, 为继承性沉降。

2 样品与测试

本研究共采集了包括成 6 井、庄深 1 井和征深 101 井等在内 11 口井的 P_{lf} 、 P_{2x} 和 P_{2w} 层位共计 69 块岩心样品, 并从胜利油田勘探开发研究院收



A—准噶尔盆地地形示意图；B—准中地区构造单元划分；C—下组组合地层综合柱状图（据苏东旭等，2024，有修改）

图 1 准中地区综合地质图

Fig. 1 Comprehensive geological map of Central Depression of Junggar Basin

集了另外 10 口井部分岩心和岩屑样品的有机地球化学实验数据。21 口井的分布位置参见图 1-B。

实验测试分析包括样品前处理（碎样、研磨成粉）、岩石总有机碳分析、岩石热解、镜质体反射率测定、全岩矿物 X 衍射分析、生物标志化合物检测等，均由中国石化石油勘探开发研究院无锡石油地质研究所实验测试中心承接完成。岩石主量元素、微量元素和稀土元素分析以及岩石稳定氮同位素测定在国家地质实验测试中心完成。

总有机碳分析利用 CS230 碳硫分析仪完成；测试过程中，将岩心样品用碳化钨研磨盘碎样后再研磨成 100 目的粉末上机测试，每测定 20 个样品插入标样检测仪器，执行标准参考 GB/T 19145-2022。岩石热解在 Rock eval 7 热解仪上完成；测试过程中，将 80 目以下的样品粉末放入热解炉中，按预置的升温过程进行热解，检测依据为 GB/T 18602-2012。镜质体反射率检测仪器采用 DM4500P 偏光显微镜、显微光度计，依据 SY/T

5124-2012 进行检测。全岩矿物 X 衍射分析则需要将样品研磨至 200 目以下，检测仪器是 D8 A25 型 X 射线衍射仪，检测依据参考 SY/T 5163-2018。

生物标志化合物分析采用 Agilent 7890-5977 型色谱-质谱联用仪进行，搭载 HP-5MS 色谱柱（30 m × 0.25 mm i. d., 内径 250 μm, 膜厚 0.25 μm），汽化温度设定为 300 ℃，以氦气为载气，执行标准参照 GB/T 18606-2017。样品检测选择离子模式。

主量元素、微量元素、稀土元素测试采用国家地质实验测试中心自主研发的国家级标准方法完成，方法要点包括：称取试样 0.65 g，用偏硼酸锂—四硼酸锂（22：12）混合熔剂混匀，试样与熔剂比例为 1：9，于 1200 ℃ 左右熔融制成玻璃片，使用 X-荧光光谱仪（XRF，型号为帕纳科 X 射线荧光光谱 PW4400）测定主量元素；微量元素和稀土元素分析需准确称取试样于封闭溶样器的 Teflon 内罐中，加入 HF、HNO₃；装入钢套中，于 190 ℃

保温 24 h; 取出冷却后, 在电热板上 165 °C 蒸干, 加入 (1:1) HNO₃ 再次封闭溶样复溶 3 h; 溶液转入容量瓶中, 使用等离子质谱仪 ICP-MS (PerkinElmer NexIon PE300Q) 测定。

全岩氮同位素测定采用 EA-IRMS 联用系统开展, 测试仪器由元素分析仪 (型号为 Vario MICRO cube) 和同位素比质谱仪 (型号为 Elementar isoprime precision) 组成。实验过程中, 需根据样品含氮量不同而调整其进样量。实验载气采用氮气, 燃烧气体为高纯度氧气。将反应炉的燃烧管温度设定为 1150 °C, 还原管温度设定为 600 °C。在每组 10 个样本分析结束后, 采用实验标样 USGS61 ($\delta^{15}\text{N} = -2.87\text{‰} \pm 0.04\text{‰}$)、USGS62 ($\delta^{15}\text{N} = 20.17\text{‰} \pm 0.06\text{‰}$) 和 USGS64 ($\delta^{15}\text{N} = 1.76\text{‰} \pm 0.06\text{‰}$) 进行 3 点氮同位素校准。

3 结果与讨论

3.1 二叠系烃源岩沉积环境

3.1.1 生物标志化合物特征

姥鲛烷 (Pr) 和植烷 (Ph) 是最常见的类异戊二烯型烷烃。Pr/Ph 值常被用于定量表征古沉积环境的氧化还原程度 (徐敏, 2023), 但在一定程度上受热成熟度的影响。Peters 等 (2004) 认为: Pr/Ph < 0.8, 表征高盐环境或与碳酸盐沉积有关的高还原水体环境; Pr/Ph > 3, 指示氧化沉积环境下典型的陆源有机质输入。研究区二叠系烃源岩样品的 Pr/Ph 值分布在 0.20 ~ 1.38 之间, 平均 0.83, 指示还原性沉积环境。

β -胡萝卜素主要来源于藻类, 与缺氧条件或局限海域以及咸化湖盆环境有关。 γ -蜡烷是指示水体分层的生物标志化合物, 由生活在分层水体界面处的食菌鞭毛虫中的四膜虫醇转化而来, 其中高 γ -蜡烷也是指示咸化沉积环境的典型生标 (Tulipani *et al.*, 2015)。孕甾烷和升孕甾烷是在高盐度水体沉积物中识别出的主要甾烷化合物, 但孕甾烷的相对丰度随热演化程度升高而增加, 不利于表征高成熟样品的沉积古盐度。 γ -蜡烷指数 ($\text{GI} = \gamma\text{-蜡烷}/\text{C}_{30}\text{H}$)、 γ -蜡烷/ C_{31}H 、 β -胡萝卜素指数 ($\beta\text{-胡萝卜素}/\text{C}_{\text{max}}$)、规则甾烷/藿烷等均可作为评价水体盐度的指标。 γ -蜡烷/ C_{31}H 值大于 0.3, 被认为是咸水沉积环境 (Jiang *et al.*, 2024; 王祥

等, 2024)。藿烷系列化合物 Ts 和 Tm 除了常被用作成熟度指标 Ts/(Ts+Tm) 外, 其相对含量还与沉积时的氧化还原环境有关, 还原环境中 Tm 具备明显的优势, 而 Ts 在氧化环境中更为显著。

在前人的研究中, 玛湖凹陷 P₁f 烃源岩抽提物的生物标志化合物具有高甾/藿比和高峰度的 β -胡萝卜素特征, 表明该时期藻类勃发, 而藻类正是 P₁f 烃源岩主要的有机质来源 (曹剑等, 2015; Xia *et al.*, 2021)。在准中地区主力烃源岩层系代表井位的岩石样品可溶有机质的 m/z 191 质量色谱图 (图 2) 上, 可见明显的 γ -蜡烷峰, C₂₀、C₂₁ 和 C₂₂ 孕甾烷的峰型呈“山峰型”分布, 以 C₂₁ 孕甾烷为主峰, 规则甾烷原始构型 C₂₇-、C₂₈-、C₂₉ $\alpha\alpha\alpha$ 20R 指纹呈“L”型, 指示水生生物供给优势。

本研究用作生物标志化合物分析的样品共计 168 个, 其中岩心样品 19 个, 其余为岩屑样品。反映水体盐度的生标参数特征 (图 3) 表明, 准中地区二叠系烃源岩沉积环境层间差异明显, 纵向上水体盐度具有随埋深减小而逐渐降低的趋势 (图 4)。

以成 6 井和成 601 井为代表的东道海子凹陷, P₂w 烃源岩的 γ -蜡烷指数介于 0.13 ~ 0.19 之间, 平均值 0.16; γ -蜡烷/C₃₁H 值分布在 0.30 ~ 0.39 之间, 平均值 0.34; Pr/Ph 值介于 0.20 ~ 0.99 之间, 平均值 0.68, 指示微咸水—咸水条件下的还原沉积环境; 规则甾烷 (C₂₇₋₂₉)/藿烷 (C₂₉₋₃₃) 介于 0.36 ~ 0.90 之间, 平均值 0.55; Ts/(Ts+Tm) 值介于 0.29 ~ 0.61 之间, 平均值 0.46。以庄深 1 井为代表的盆 1 井西凹陷, P₂w 烃源岩岩屑样品的 γ -蜡烷指数介于 0.11 ~ 0.20 之间, 平均值 0.17; γ -蜡烷/C₃₁H 值分布在 0.24 ~ 0.30 之间, 平均值 0.27; Ts/(Ts+Tm) 值介于 0.41 ~ 0.63 之间, 平均值 0.47。以莫深 1 井为代表的准中地区中部莫西庄凸起, P₂w 烃源岩的 γ -蜡烷指数介于 0.12 ~ 0.35 之间, 平均值 0.17; γ -蜡烷/C₃₁H 值分布在 0.21 ~ 0.65 之间, 平均值 0.30, 属于淡水—微咸水环境; Pr/Ph 值介于 0.74 ~ 1.38 之间, 多处于弱还原沉积环境; β -胡萝卜素指数范围为 0.018 ~ 0.097, 平均值 0.045; 规则甾烷 (C₂₇₋₂₉)/藿烷 (C₂₉₋₃₃) 介于 0.16 ~ 0.62 之间, 平均值 0.40; Ts/(Ts+Tm) 值介于 0.26 ~ 0.41 之间, 平均值 0.38。阜康凹陷和沙湾凹陷 P₂w 烃源岩样品寥寥, 个别样品的 γ -蜡烷指数为 0.2 左右。

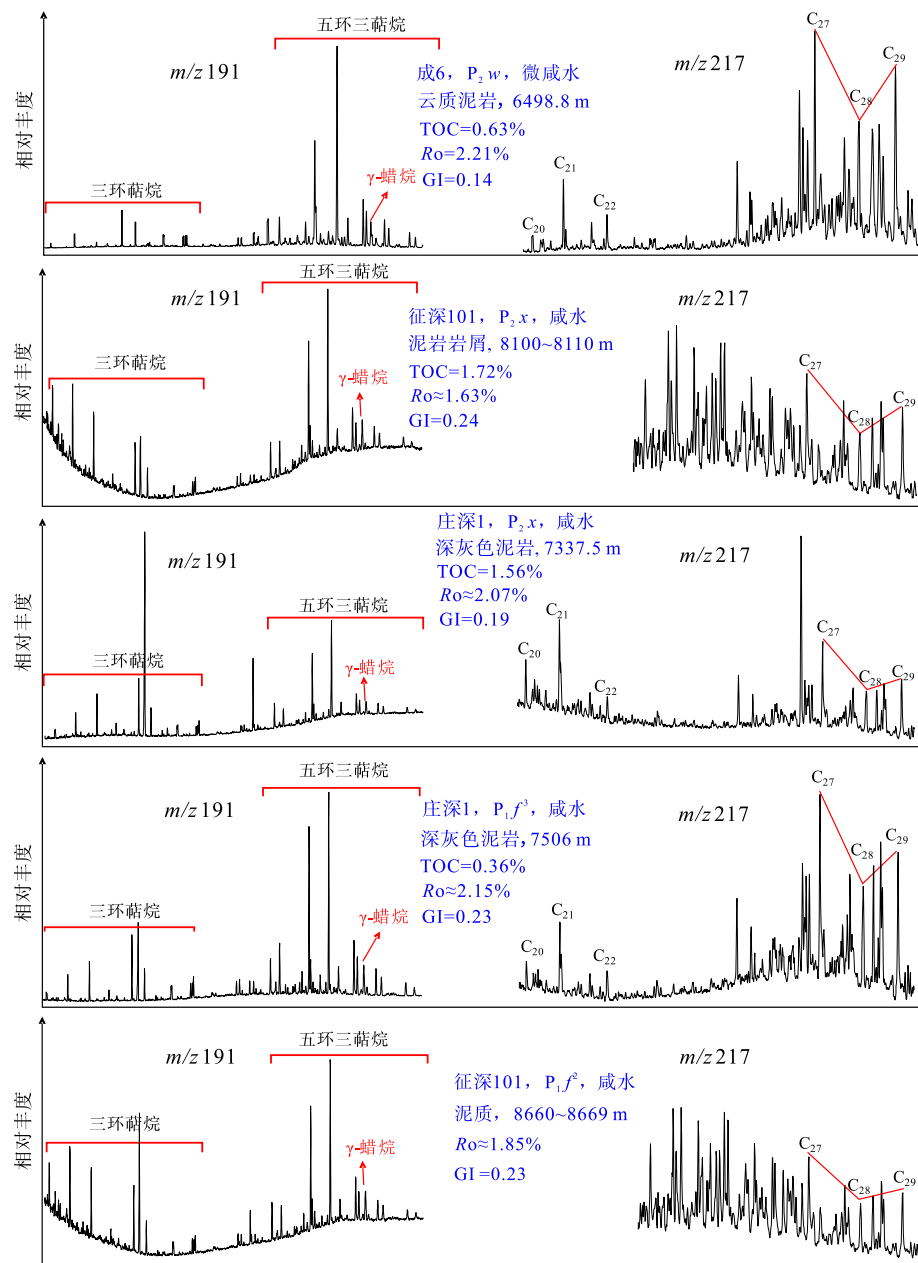


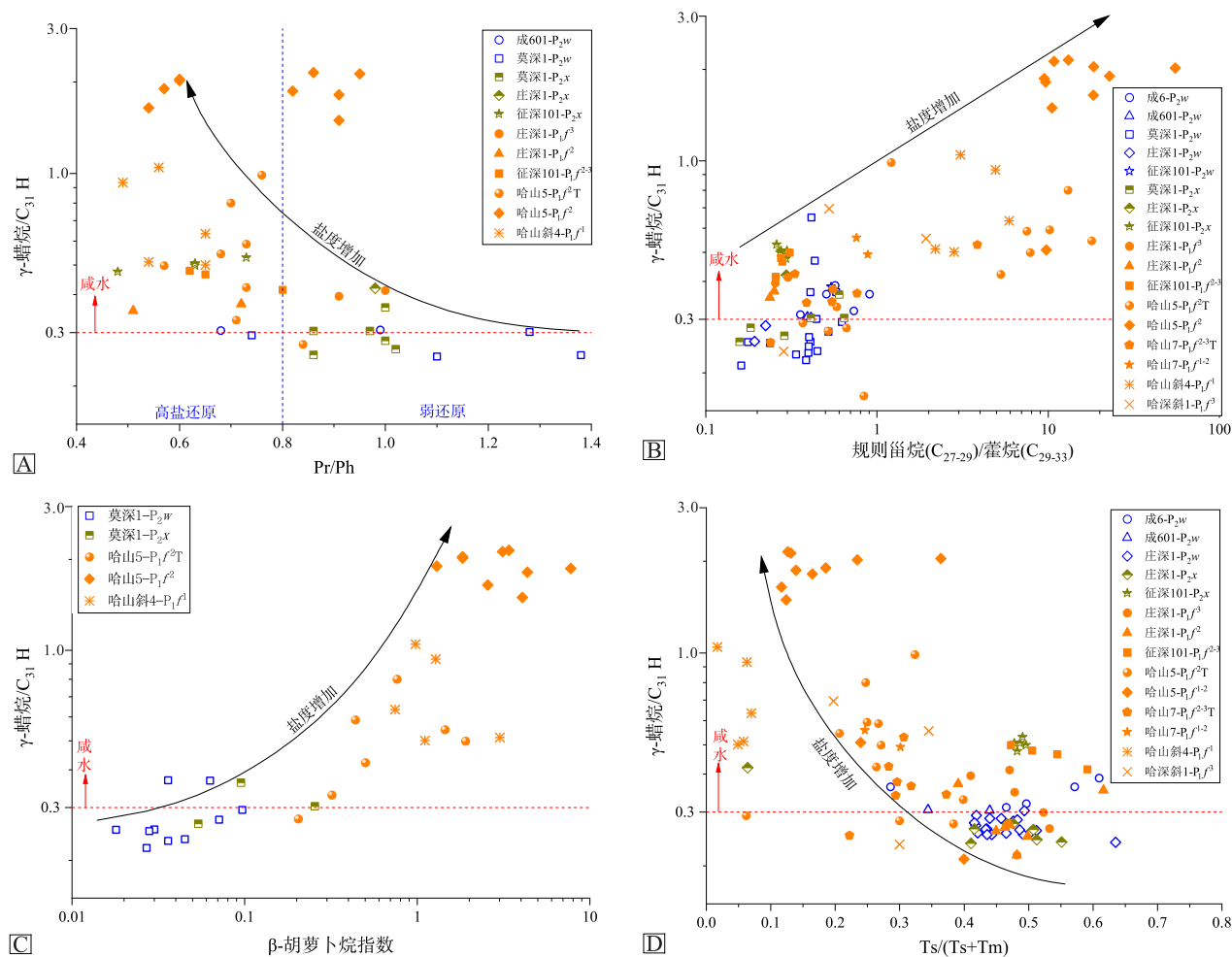
图 2 准中地区二叠系烃源岩典型样品饱和烃质量色谱图

Fig. 2 Mass chromatograms of saturated hydrocarbons from typical samples of the Permian source rock in Central Depression of Junggar Basin

P_2x 烃源岩样品来自莫西庄凸起的莫深 1 井、盆 1 井西凹陷的庄深 1 井和沙湾凹陷的征深 101 井。莫深 1 井 P_2x 泥岩岩屑样品的 γ -蜡烷指数范围为 0.14~0.20, 平均值 0.17; γ -蜡烷/ $C_{31}H$ 范围为 0.25~0.36, 平均值 0.29; Pr/Ph 值分布在 0.86~1.02 之间, 属于弱还原环境。庄深 1 井 P_2x 烃源岩 γ -蜡烷指数范围为 0.14~0.19, 平均值 0.16; γ -蜡烷/ $C_{31}H$ 值普遍低于 0.3, 范围为 0.24~0.42, 平均

值 0.28, 且值得注意的是, 其中唯一 1 个岩心样品的 γ -蜡烷指数为 0.19, γ -蜡烷/ $C_{31}H$ 值为 0.42, 指示咸水环境, 说明岩屑样品表征的水体盐度可能被低估了。征深 101 井 P_2x 烃源岩岩屑样品的 γ -蜡烷均高于 0.23, γ -蜡烷/ $C_{31}H$ 值普遍大于 0.3, 介于 0.48~0.53 之间, Pr/Ph 值普遍低于 0.8, 处于高盐还原环境(图 3)。

来自哈山地区以及庄深 1 井和征深 101 井 P_1f



A—Pr/Ph 与 γ -蜡烷/ $C_{31}H$ 关系图；B—规则甾烷 (C_{27-29})/藿烷 (C_{29-33}) 与 γ -蜡烷/ $C_{31}H$ 关系图；

C— β -胡萝卜素指数与 γ -蜡烷/ $C_{31}H$ 关系图；D— $Ts/(Ts+Tm)$ 与 γ -蜡烷/ $C_{31}H$ 关系图

图 3 准中地区二叠系主力烃源岩盐度生标参数关系图

Fig. 3 Relationship diagrams showing salinity biomarker parameters for the Permian principal hydrocarbon source rocks in Central Depression of Junggar Basin

的 77 个样品中,反映盐度的生标参数均指示哈山地区准原地沉积的 P_1f 烃源岩形成于高盐还原环境: γ -蜡烷指数范围为 0.11 ~ 1.57, 平均值达 0.73; γ -蜡烷/ $C_{31}H$ 值分布在 0.21 ~ 2.15 之间, 平均值 1.14, 远高于咸水阈值 0.3; Pr/Ph 值介于 0.49 ~ 0.95 之间, 平均值 0.66; β -胡萝卜素指数范围为 0.199 ~ 7.762, 平均值 2.042; 规则甾烷 (C_{27-29})/藿烷 (C_{29-33}) 介于 0.28 ~ 22.82 之间, 平均值 8.14; $Ts/(Ts+Tm)$ 值介于 0.02 ~ 0.40 之间, 平均值 0.18, 具有显著的 Tm 优势。而来自哈山地区 P_1f 推覆体 (P_{1fT}) 的样品生标参数表征推覆体的原生沉积环境中水体盐度低于 P_1f 准原地沉积环境: γ -蜡烷/ $C_{31}H$ 值介于 0.25 ~ 0.99 之间, 平均

值 0.46; Pr/Ph 值介于 0.57 ~ 0.84 之间, 平均值 0.72。上述特征可能主要归因于推覆体来自盆缘, 水体盐度从凹陷中心向盆缘逐渐降低。征深 101 井 P_1f 烃源岩埋深大, 水体盐度虽不及哈山地区, 但也是准中地区咸化程度最高的烃源岩层系: 有限的岩屑样品的 γ -蜡烷指数均高于 0.2; γ -蜡烷/ $C_{31}H$ 范围为 0.41 ~ 0.50, 平均值 0.46; Pr/Ph 值普遍低于 0.8, 处于咸化还原水体环境。而地处沙湾凹陷和玛湖凹陷之间的盆 1 井西凹陷则沉积于过渡水体环境中, 代表井庄深 1 井 P_1f 烃源岩样品生标参数呈咸淡参半的特征: γ -蜡烷指数在 0.14 ~ 0.23 之间, 平均值 0.17; γ -蜡烷/ $C_{31}H$ 值介于 0.22 ~ 0.41 之间, 平均值 0.30; $Ts/(Ts+Tm)$ 值介于 0.39 ~

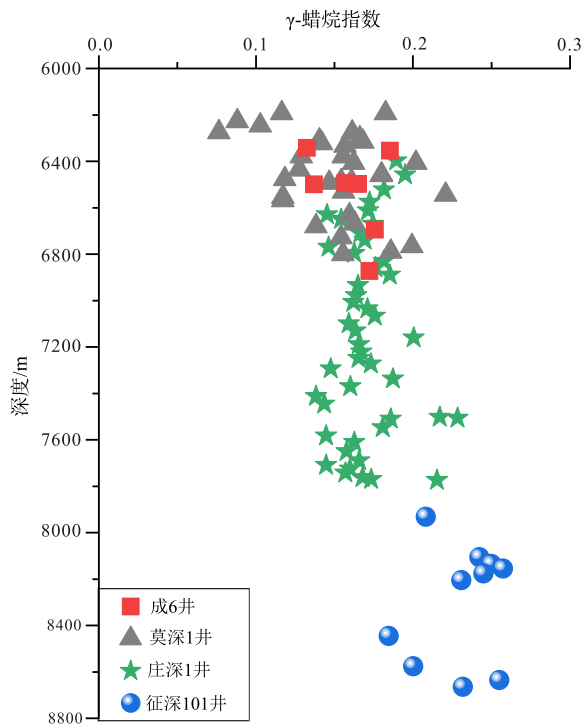


图 4 准中地区二叠系主力烃源岩 γ -蜡烷指数随深度变化散点图

Fig. 4 Scatter plot showing γ -waxane index variation with depth of the Permian principal hydrocarbon source rocks in Central Depression of Junggar Basin

0.62 之间, 平均值 0.48。

3.1.2 元素地球化学特征

准中凹陷二叠纪构造相对稳定。在构造稳定的条件下, 气候会通过降水量、湖盆蒸发速率、湖流等变化控制盆地沉积充填, 还会影响到水体盐度, 因此从某种程度上来说, 气候变化会影响碱性湖泊的形成。不同气候条件下的沉积物中富集的金属元素含量常呈现规律性变化, 古气候指数 $C = [\sum \text{喜湿型金属元素丰度} / \sum \text{喜干型金属元素丰度}] = \Sigma(\text{Fe} + \text{Mn} + \text{Ni} + \text{Cr} + \text{Co} + \text{V}) / \Sigma(\text{Ca} + \text{Mg} + \text{K} + \text{Sr} + \text{Ba})$ 、 $\text{Al}_2\text{O}_3/\text{MgO}$ 值为反映古气候的常用参数, 其中古气候指数 $C < 0.2$ 指示干旱气候 (李浩等, 2017), 而 $\text{Al}_2\text{O}_3/\text{MgO}$ 值越大则气候越湿润, 反之越干旱 (谢建磊等, 2015; 张天福等, 2016)。Sr 含量对水体盐度变化较为敏感, 可作为水体盐度指标, 其中 Sr 含量越低表明气候越潮湿, 反之则气候越干旱; Ba 含量可能与海洋古生产力以及沉积时期水体蒸发作用有关; Sr/Ba 值与古盐度具有良好的正相关关系, 大于 1.0 指示咸水环境, 小于 0.6 属于淡水环

境 (彭治超等, 2018; 徐敏, 2023)。

准噶尔盆地二叠系各层段古气候指数 C 、 $\text{Al}_2\text{O}_3/\text{MgO}$ 和 Sr/Ba 值变化趋势 (图 5) 表明, 二叠纪由早到晚气候逐渐变得湿润, 水体盐度呈持续下降趋势。 P_1f 沉积时期, 气候干旱炎热, 水体处于高盐还原状态, 具有明显分层现象, 具备形成咸化湖盆的条件。

综合其他反映古气候、沉积物成分成熟度、古水深、古生产力和水体盐度的主、微量元素指标, 绘制了准中地区二叠系烃源岩层系多维度参数雷达图 (图 6), 整体特征表明 P_1f 与 P_2x 、 P_2w 烃源岩沉积水体和气候条件存在显著差异 (图 6-A, 6-B), 尤其是气候指标 Sr/Cu 、 Rb/Sr 、气候指数 “C”、 $\text{Al}_2\text{O}_3/\text{MgO}$ 、 FeO/MnO 、CIA 和成分成熟度指标 ICV 、 $\text{SiO}_2/\text{Al}_2\text{O}_3$, 以及盐度指标 Sr/Ba 。相比之下, P_1f 沉积时期气候更加干旱, 水体咸化程度也更高; P_2w 和 P_2x 烃源岩沉积时期水体和气候条件较为相似 (图 6-C), 纵向变化特征参见图 5。

曹剑等 (2023) 发现烃源岩中的氮元素与有机质聚集之间的成因联系, 并以氮同位素 $\delta^{15}\text{N}$ 值 10‰ 作为划分近中性组和碱性组的界限。本研究采取的样品中, 哈山地区 P_1f 和征深 101 井 P_1f 烃源岩 $\delta^{15}\text{N} > 10\text{‰}$, 表明 P_1f 烃源岩沉积水体环境与哈山地区相似, 属于碱湖沉积, 而 P_2x 和 P_2w 样品则主要集中在近中性组中 (图 7-A); 结合全岩矿物 X 衍射含量三角图 (图 7-B), 沉积于碱湖环境的 P_1f 烃源岩黏土含量较低 ($< 25\%$), 而近中性组的 P_2x 和 P_2w 烃源岩黏土含量偏高但碳酸盐矿物含量低。进一步研究发现, 烃源岩 $\delta^{15}\text{N}$ 与碳酸盐矿物含量呈正相关 (图 7-C), 因此 $\delta^{15}\text{N}$ 为一个判断水体碱度的有效参数。

综上所述, 准中地区水体咸化程度从凹陷边缘向凹陷中心呈增强趋势。西部深湖一半深湖相发育的 P_1f 以碱湖沉积为主, 沉积时期气候干旱, 发育厚层白云质泥岩与凝灰质粉砂岩互层, 整体具有 $\text{Pr}/\text{Ph} < 1$ 、 γ -蜡烷/ $\text{C}_{31}\text{H} > 0.3$ 、 β -胡萝卜素丰度高的特征, 指示强还原咸化水体环境; P_2x 和 P_2w 气候条件相似, P_2x 由南向北水体咸度逐渐降低, 靠近凹陷中心的深湖一半深湖相以咸水沉积为主, 而在湖盆边缘的三角洲相则为淡水沉积 (庄深 1 井), 以莫深 1 井为代表的莫索湾凸起上则过渡为淡水—微咸水环境; P_2w 在东部东道海子凹陷形成

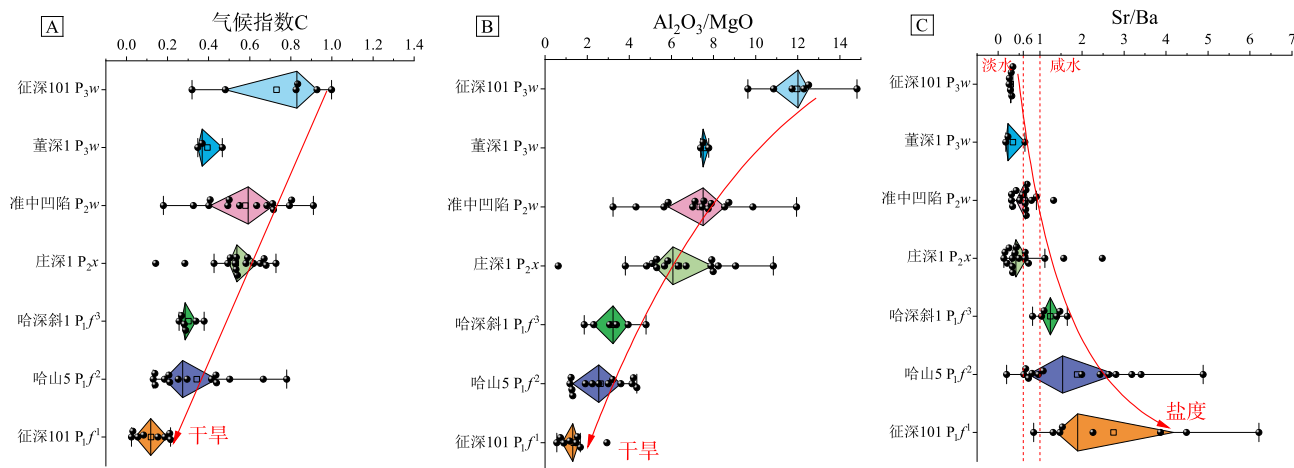


图 5 主量元素、微量元素反映的准噶尔盆地二叠纪古气候和古盐度变化特征

Fig. 5 Major and trace element constraints on the Permian paleoclimate and paleosalinity evolution in Junggar Basin

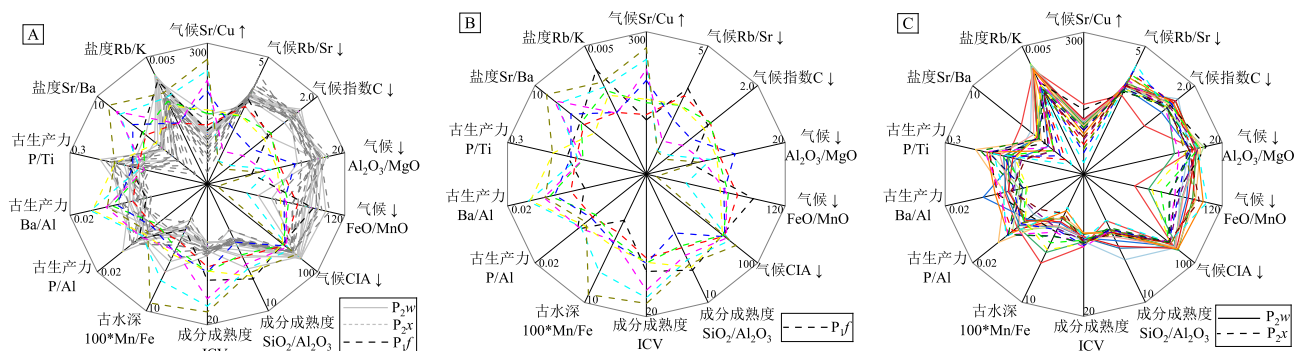
A— P_{1f} 、 P_{2x} 、 P_{2w} 烃源岩样品参数对比雷达图；B— P_{1f} 烃源岩样品参数雷达图；C— P_{2x} 、 P_{2w} 烃源岩样品参数对比雷达图

图 6 准中二叠系主力烃源岩主量元素、微量元素指标雷达图

Fig. 6 Radar chart showing major and trace element parameters for the Permian principal source rocks in Central Depression of Junggar Basin

于微咸水—咸水环境 ($Pr/Ph > 1$, γ -蜡烷/ $C_{31}H$ 略大于 0.3), 在以征深 101 为代表的沙湾凹陷形成于咸水环境, 在盆 1 井西凹陷则沉积于淡水环境 (γ -蜡烷/ $C_{31}H < 0.3$)。

3.2 烃源岩评价

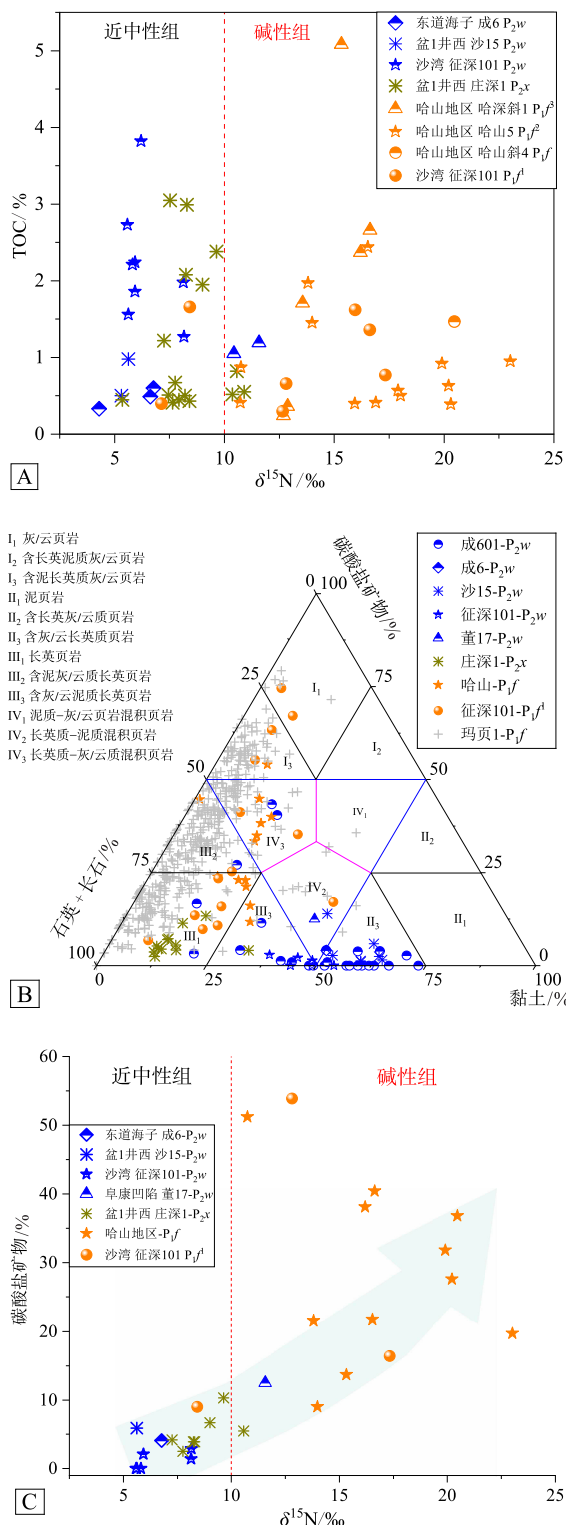
3.2.1 有机质丰度和成熟度

准中地区不同凹陷主力烃源岩层系沉积水体环境差异较大, 烃源岩评价标准不可一概而论。本研究采用了“陆相烃源岩地球化学评价方法”(SY/T 5735-2019) 和白玉彬等 (2024) 一文中对淡水—半咸水和咸水—超咸水湖盆水体环境的烃源岩有机质丰度评价标准(表 1)。

西部坳陷二叠系烃源岩有机质丰度整体差异较小, 但由于沉积水体环境不同导致烃源岩评价等级

有所差异。基于前文的分析, 明确了准中地区钻遇二叠系烃源岩目的层的单井所属的沉积环境, 分别对咸水—超咸水环境和淡水—微咸水环境下发育的烃源岩进行评价, 发现咸化水体环境下形成的烃源岩相比淡水—微咸水环境沉积的烃源岩具有明显等级优势。咸水环境沉积的 P_{1f} 烃源岩能达到“很好—极好”级别, 而淡水—半咸水沉积的 P_{2x} 和 P_{2w} 烃源岩略差, 仅少部分达到“很好”烃源岩级别(图 8)。

具体地, 咸水条件下发育的“极好”烃源岩集中分布在准中地区西部的沙湾凹陷, 以征深 101 井和征 10 井样品为代表(图 8-A), 其烃源岩品质优于盆 1 井西凹陷的庄深 1 井, 主要原因是: 沙湾凹陷二叠系烃源岩沉积时期处于深湖—半深湖亚相, 水体咸化、碱度高, 利于水体分层、有机质保



A— $\delta^{15}\text{N}$ 与 TOC 关系图; B—全岩矿物 X 衍射黏土-碳酸盐矿物-石英长石含量三角图; C— $\delta^{15}\text{N}$ 与碳酸盐矿物含量关系图

图 7 准中地区二叠系烃源岩沉积环境碱度判别图版

Fig. 7 Alkalinity discrimination chart for depositional environments of the Permian source rocks in Central Depression of Junggar Basin

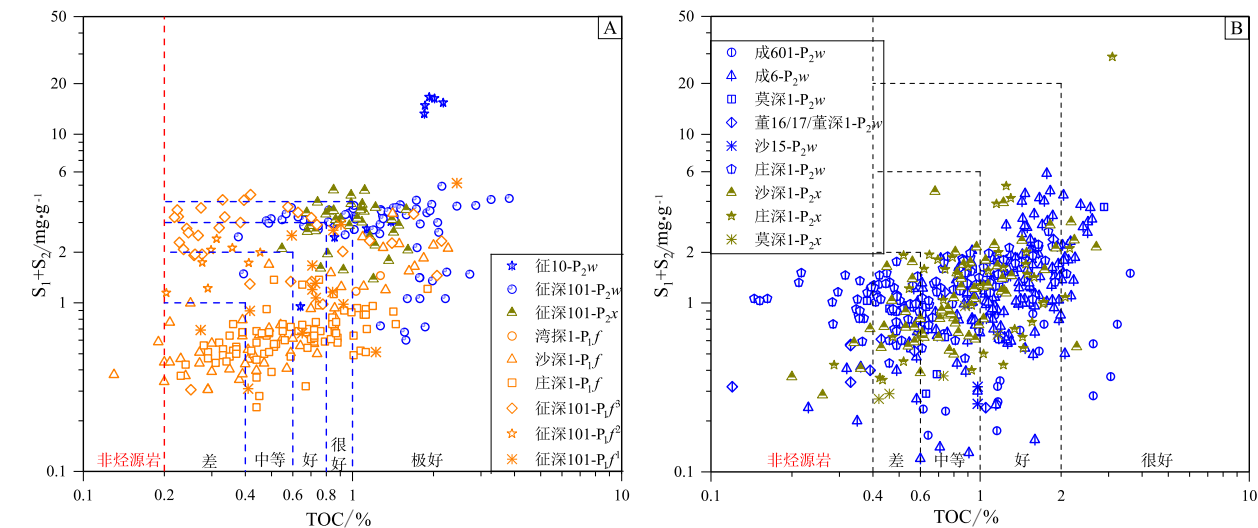
存;而盆1井西凹陷的庄深1井持续处于三角洲平原—前缘亚相,水体较浅,有机质品质不及深湖—半深湖亚相烃源岩。淡水—微咸水环境下,烃源岩品质集中在“中等—好”范围(图8-B),东道海子凹陷部分P_{2w}烃源岩以及盆1井西凹陷沙深1井的部分P_{2x}烃源岩能达到“很好”级别,整体特征符合自盆缘向凹陷中心烃源岩品质逐渐改善的特征,这与水体环境向凹陷中心咸化程度增加的趋势一致。

二叠系烃源岩样品的 $\lg R_0$ 与深度成正比,烃源岩热演化程度集中在成熟—高成熟阶段(图9-A)。CPI或OEP值除用作成熟度指标外,也用于判断母质来源类型。当烃源岩CPI或OEP值明显大于1.0(通常以1.2为界)时表征较低热演化程度或者陆源高等植物供给,而值约为1.0则指示海相藻类贡献或热演化程度达到成熟阶段(Peters *et al.*, 2004)。准中地区二叠系烃源岩可溶有机质中,饱和烃的奇偶碳优势指数(OEP_{max})介于0.56~1.24之间,平均值1.02,无明显的碳奇偶优势,而CPI₂₂₋₃₂范围在0.85~1.19之间,平均值1.04,两者均反映有机质母质来源不具备显著的陆源高等植物贡献,且有机质主体均已成熟(图9-B)。甾烷异构体参数C₂₉ $\alpha\alpha\alpha$ 20S/(20R+20S)和C₂₉ $\alpha\beta\beta$ /($\alpha\alpha\alpha$ + $\alpha\beta\beta$)对评估未成熟到成熟阶段的岩石样品的成熟度具有高度专属性(Peters *et al.*, 2004)。在成岩作用过程中,甾烷前系物C-20位发生可逆性外消旋反应,初始生物合成的R构型优势态(20R>99%)通过热驱动过程逐步向R/S=1的热力学平衡态过渡,致使C₂₉ $\alpha\alpha\alpha$ 20S/(20R+20S)值随热演化程度增加从生油窗顶部($R_0 \approx 0.3\%$)的初始值0持续增加至高成熟阶段($R_0 \approx 1.0\%$)的平衡值 0.52 ± 0.03 ;当甾烷分子中C-22不对称中心位于非桥接碳位点时,随着热演化程度增加, α -甲基取代态($\alpha\alpha\alpha$)通过[1,2]-氢迁移机制向 β -甲基取代态($\alpha\beta\beta$)不可逆转化,导致C₂₉ $\alpha\beta\beta$ /($\alpha\alpha\alpha$ + $\alpha\beta\beta$)值自低成熟阶段($R_0 \approx 0.5\%$)起始值0.35开始单调递增,最终收敛于 0.67 ± 0.04 的热力学平衡值。准中二叠系烃源岩主体已达到成熟阶段,且C₂₉ $\alpha\alpha\alpha$ 20S/(20R+20S)和C₂₉ $\alpha\beta\beta$ /($\alpha\alpha\alpha$ + $\alpha\beta\beta$)均趋近平衡值(图9-C),与 R_0 特征相一致,表明烃源岩成熟度达到成熟—高成熟阶段,具备极好的轻质油和天

表 1 陆相烃源岩有机质丰度评价标准

Table 1 Evaluation criteria for organic matter abundance in terrestrial hydrocarbon source rocks

湖盆水体盐度	评价指标	烃源岩等级					
		非烃源岩	差	中等	好	很好	极好
淡水—半咸水	TOC/%	< 0.4	0.4~0.6	0.6~1.0	1.0~2.0	> 2.0	
	Pg/mg·g ⁻¹	—	< 2.0	2.0~6.0	6.0~20	> 20	
咸水—超咸水	TOC/%	< 0.2	0.2~0.4	0.4~0.6	0.6~0.8	0.8~1.0	> 1.0
	Pg/mg·g ⁻¹	—	0.4~1.0	1.0~2.0	2.0~3.0	3.0~4.0	> 4.0



A—咸水-超咸水环境；B—淡水-微咸水环境

图 8 准中地区二叠系烃源岩不同水体环境有机质丰度评价图

Fig. 8 Evaluation diagram showing organic matter abundance of the Permian source rocks under different aquatic environments in Central Depression of Junggar Basin

然气潜力，凹陷中心甚至达到高成熟—过成熟阶段，利于天然气勘探。

3.2.2 有机质类型和母质来源

依据岩石热解法，准中地区二叠系烃源岩有机质类型以Ⅱ-Ⅲ型为主(图 10-A)，但阜康凹陷和沙湾凹陷二叠系烃源岩热演化程度较高，常规的岩石热解法已无法判别其有机质类型。根据对烃源岩可溶有机质中 Pr/nC₁₇、Ph/nC₁₈ 以及规则甾烷 C₂₇-、C₂₈-、C₂₉ ααα 20R 生标特征的分析(图 10-B, 10-C)，准中地区二叠系烃源岩母质来源以还原环境下的Ⅱ型有机质为主，集中分布在“混合型”母质类型区域，且从沙湾凹陷→盆 1 井西凹陷→莫索湾凸起→东道海子凹陷东北斜坡区，具有向Ⅱ/Ⅲ混合型有机质过渡的特征，烃源岩类型主要由沉积相控制。

3.3 烃源岩发育模式

受莫北凸起—莫索湾凸起的分隔作用影响，准

中地区的 4 个次级凹陷呈东西分块的“田”字格局分布，其中西部凹陷以 P₁f 为主力烃源岩，而东部凹陷则以 P₂w 供烃为主。早二叠世准中地区处于典型的前陆盆地演化阶段，以碱湖—咸湖沉积为主，在干旱气候背景下，持续蒸发作用促使水体咸化并形成密度分层结构。生物标志化合物组合(β-胡萝卜烷、γ-蜡烷)的检出证实其形成于高盐度强还原沉积环境。纵向演化特征显示，自 P₁f 到 P₂w 存在渐进式的咸化程度衰减过程：西部凹陷 P₁f 呈现典型的中心强碱湖向边缘弱咸湖过渡的空间分异特征，垂向序列上则表现为自下而上的盐度递减特征。早二叠世 P₁f 烃源岩发育期受控于残余洋盆萎缩的背景下的干旱气候，形成了“湖深扇小高咸水”的烃源岩发育模式。深层咸水环境有效抑制了有机质降解，母质来源以水生浮游生物(藻类、细菌)为主导，陆源高等植物输入有限，有机地球化学参数显示干酪根类型以Ⅱ型为主。这

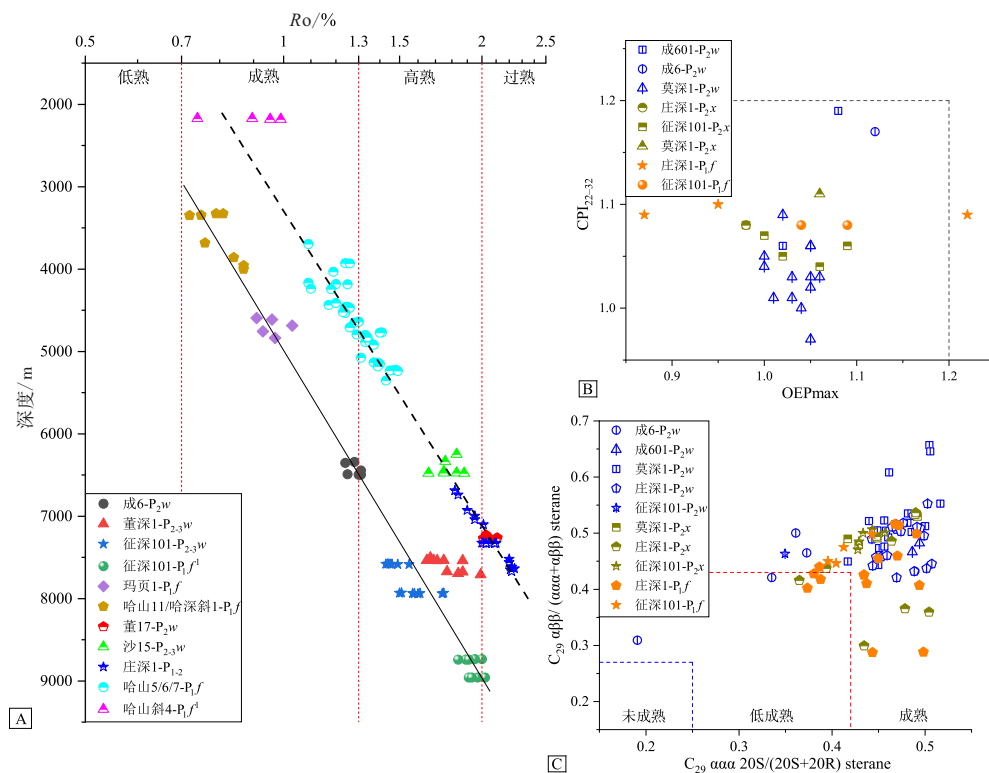


图 9 准中地区二叠系烃源岩成熟度分布图

Fig. 9 Maturity distribution of the Permian source rocks in Central Depression of Junggar Basin

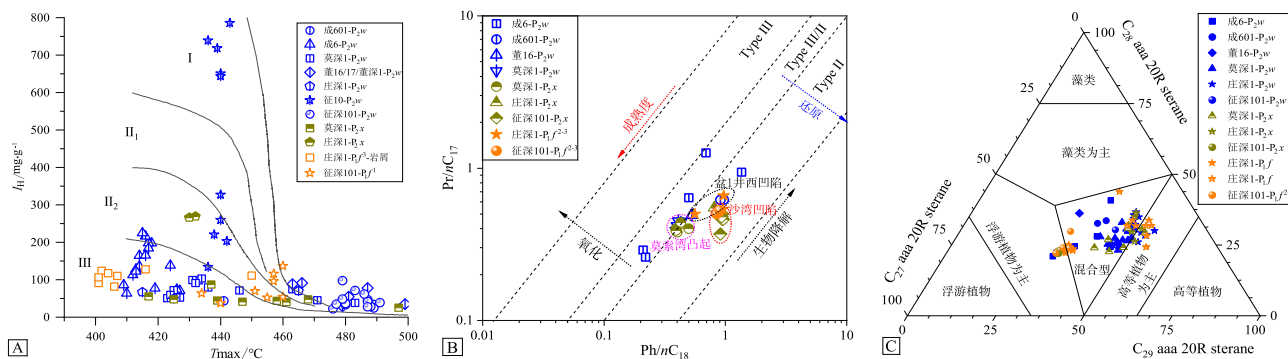
A—烃源岩有机质类型；B—烃源岩有机质 Pr/nC_{17} 与 Ph/nC_{18} 关系图；C—烃源岩有机质 C_{27-} 、 C_{28-} 、 C_{29} $\alpha\alpha$ 20R 甾烷三角图

图 10 准中地区二叠系烃源岩类型及母质来源

Fig. 10 Organic matter types and origins of the Permian source rocks in Central Depression of Junggar Basin

种封闭的高盐度水体系统通过限制氧化剂补给，实现了有机质的有效保存。

中二叠世构造活动趋于平静，盆地转入稳定沉降阶段，整体构造格局转变为“北隆南坳”的斜坡型样式。受暖湿气候的影响，盆地周缘发育大型退覆式扇三角洲体系，填平补齐式沉积致使湖盆扩张，盆缘陆源碎屑输入量显著增强，导致湖盆水体浑浊度升高和水动力条件强化。一方面悬浮颗粒持续沉降形成机械稀释效应，另一方面强烈水体扰动加剧

了沉积界面氧化条件，双重作用下初级生产力产物的保存效率大幅下降。与此同时，陆源有机质与水生有机质在混合过程中因吸附竞争和氧化暴露时间延长，最终导致复合有机质体系的整体埋藏效率呈现非线性衰减特征。陆源有机质输入占比提升导致有机质类型向Ⅲ型倾斜，最终保存下来的有机质以Ⅱ-Ⅲ型为主。 P_2x/P_2w 水体盐度较 P_1f 呈淡化趋势，水体盐度由凹陷中心向盆缘斜坡呈负梯度变化，形成“湖浅扇大微咸水”的烃源岩发育模式(图 11)。

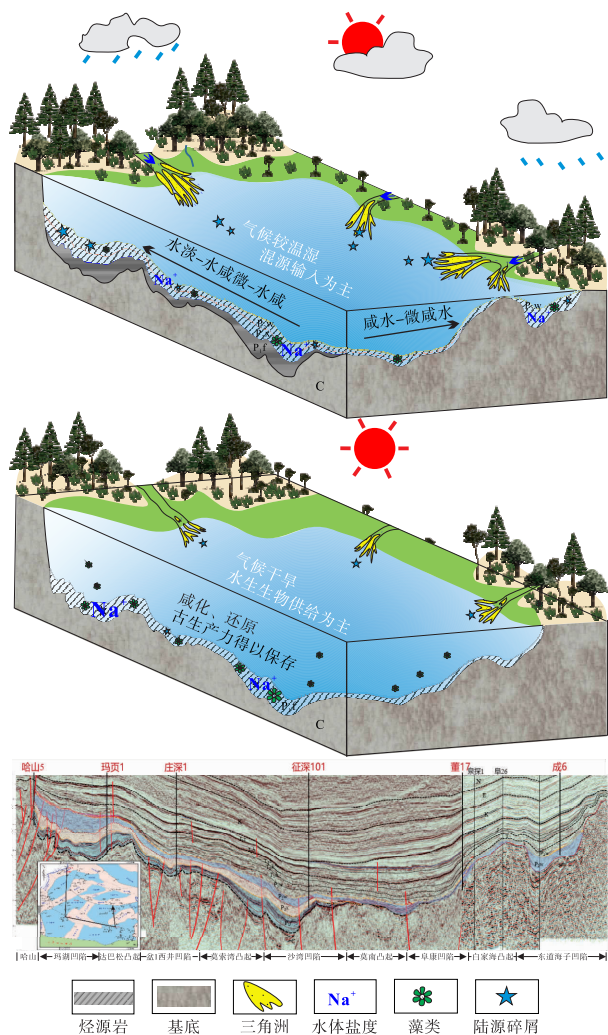


图 11 准中地区二叠系烃源岩发育模式

Fig. 11 Development pattern diagram of the Permian source rocks in central Depression of Junggar Basin

4 结论

1) 二叠纪, 准中地区水体咸化程度由凹陷中心深湖一半深湖相向盆缘三角洲相逐级递减; 垂向上, 水体盐度由深及浅呈下降趋势, 气候由干旱向湿润演变。风城组发育于干旱气候下的深湖半深湖碱湖环境, 水体具高盐强还原特征 ($Pr/Ph < 1$, $\gamma\text{-蜡烷}/C_{31}H > 0.3$); 夏子街组和下乌尔禾组沉积时期气候条件相似, 中心相带的深湖一半深湖亚相为微咸水—咸水环境, 边缘三角洲相带则过渡为淡水环境 ($\gamma\text{-蜡烷}/C_{31}H < 0.3$)。

2) 沙湾凹陷风城组形成于气候干旱的碱湖环境, 其水体咸化有利于有机质保存, 烃源岩潜力达到“极好”级别 ($TOC > 1.0\%$), 烃源岩热演化程度整体达到高成熟—过成熟阶段, 具备大规模生成

轻质油或凝析油以及天然气的潜力。沙湾凹陷咸化湖盆有望成为准噶尔盆地深层—超深层油气勘探战略接替区。

3) 通过沉积环境对比和生烃潜力评价建立了“湖深扇小高咸水”(风城组)和“湖浅扇大微咸水”(夏子街组/下乌尔禾组)2类烃源岩发育模式。前者受干旱气候与咸化环境协同作用, 实现了有机质的有效保存; 后者受湿润气候影响和陆源输入增加, 初级生产力产物的保存效率大幅下降。

参考文献 (References)

- 白玉彬, 李梦瑶, 朱涛, 赵靖舟, 任海蛟, 吴伟涛, 吴和源. 2024. 玛湖凹陷二叠系风城组烃源岩地球化学特征及页岩油“甜点”评价. 岩性油气藏, 36(6): 110–121. [Bai Y B, Li M Y, Zhu T, Zhao J Z, Ren H J, Wu W T, Wu H Y. 2024. Geochemical characteristics of source rocks and evaluation of shale oil “sweet spot” of Permian Fengcheng Formation in Mahu sag. Lithologic Reservoirs, 36(6): 110–121]
- 曹剑, 雷德文, 李玉文, 唐勇, 阿布力米提, 常秋生, 王婷婷. 2015. 古老碱湖优质烃源岩: 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]
- 曹剑, 夏刘文, 胡文瑄, Eva E Stüeken, 支东明, 唐勇, 向宝力, 何文军. 2023. 中国陆相烃源岩氮同位素组成与有机质聚集. 石油实验地质, 45(5): 912–925. [Cao J, Xia L W, Hu W X, Stüeken E E, Zhi D M, Tang Y, Xiang B L, He W J. 2023. Nitrogen isotope compositions and organic matter accumulation in terrestrial hydrocarbon source rocks in China. Petroleum Geology & Experiment, 45(5): 912–925]
- 曹正林, 周川闽, 龚德瑜, 王瑞菊, 丁立华, 杨春, 张志杰. 2024. 准噶尔盆地中一下二叠统构造—岩相古地理特征与烃源岩分布. 石油学报, 45(9): 1349–1371. [Cao Z L, Zhou C M, Gong D Y, Wang R J, Ding L H, Yang C, Zhang Z J. 2024. Tectono-lithofacies paleogeographic characteristics and source rock distribution of the Middle–Lower Permian in Junggar Basin. Acta Petrolei Sinica, 45(9): 1349–1371]
- 冯允献, 唐勇, 秦志军, 杨森, 周圆全, 阿布力米提·依明, 王维, 白雨. 2025. 准噶尔盆地玛湖凹陷北斜坡带风城组沉积特征及古环境演化. 石油学报, 46(7): 1308–1326. [Feng Y X, Tang Y, Qin Z J, Yang S, Zhou Y Q, Abulimit Y B, Wang W, Bai Y. 2025. Sedimentary characteristics and palaeoenvironmental evolution of Fengcheng Formation in the northern slope zone of Mahu sag, Junggar Basin. Acta Petrolei Sinica, 46(7): 1308–1326]
- 姜福杰, 胡美玲, 胡涛, 吕佳豪, 黄立良, 刘成林, 姜振学, 黄任达, 张晨曦, 吴冠昀, 吴育平. 2023. 准噶尔盆地玛湖凹陷风城组页岩油富集主控因素与模式. 石油勘探与开发, 50(4): 706–718. [Jiang F J, Hu M L, Hu T, Lü J H, Huang L L, Liu C L, Jiang Z X, Huang R D, Zhang C X, Wu G Y, Wu Y P. 2023. Controlling factors and models of shale oil enrichment in Lower Permian Fengcheng

- Formation, Mahu sag, Junggar Basin, NW China. *Petroleum Exploration and Development*, 50(4): 706-718]
- 金强, 朱光有, 王娟. 2008. 咸化湖盆优质烃源岩的形成与分布. *中国石油大学学报(自然科学版)*, 32(4): 19-23. [Jin Q, Zhu G Y, Wang J. 2008. Deposition and distribution of high-potential source rocks in saline lacustrine environments. *Journal of China University of Petroleum (Edition of Natural Science)*, 32(4): 19-23]
- 李浩, 陆建林, 李瑞磊, 王保华, 徐文, 左宗鑫, 王苗, 刘娅昭. 2017. 长岭断陷下白垩统湖相烃源岩形成古环境及主控因素. *地球科学*, 42(10): 1774-1786. [Li H, Lu J L, Li R L, Wang B H, Xu W, Zuo Z X, Wang M, Liu Y Z. 2017. Generation paleoenvironment and its controlling factors of Lower Cretaceous lacustrine hydrocarbon source rocks in Changling Depression, south Songliao Basin. *Earth Science*, 42(10): 1774-1786]
- 李继东, 付玉鑫, 蒋飞虎, 李姐, 王亚明, 刘云龙, 郑伟, 邢智峰. 2022. 银额盆地下白垩统巴音戈壁组泥岩地球化学特征及其古环境意义. *河南理工大学学报(自然科学版)*, 41(3): 48-56, 65. [Li J D, Fu Y X, Jiang F H, Li D, Wang Y M, Liu Y L, Zheng W, Xing Z F. 2022. Geochemical characteristics and their paleoenvironmental significance of the mudstones from the Lower Cretaceous Bayingebi Formation in the Yin'e Basin. *Journal of Henan Polytechnic University (Natural Science)*, 41(3): 48-56, 65]
- 李慧晓, 姜振黄, 黄立良, 何文军, 高之业, 陈志祥, 宋嘉楠, 郑国伟, 段龙飞, 张原豪. 2022. 玛湖凹陷风城组页岩油富集主控因素及有利富集层段. *东北石油大学学报*, 46(2): 33-44. [Li X H, Jiang Z X, Huang L L, He W J, Gao Z Y, Chen Z X, Song J N, Zheng G W, Duan L F, Zhang Y H. 2022. Main controlling factors of shale oil enrichment and optimization of favorable enrichment intervals of Fengcheng Formation in Mahu sag. *Journal of Northeast Petroleum University*, 46(2): 33-44]
- 刘兵兵, 马东正, 秦臻, 王天海, 刘军, 陶辉飞. 2022. 准噶尔盆地吉木萨尔南部中上二叠统沉积古环境分析: 来自泥页岩生物标志化合物和元素地球化学方面的证据. *天然气地球科学*, 33(10): 1571-1584. [Liu B B, Ma D Z, Qin Z, Wang T H, Liu J, Tao H F. 2022. Analysis of sedimentary paleoenvironment of Middle and Upper Permian in southern Jimsar, Junggar Basin: evidence from biomarkers and elemental geochemistry of mudstone. *Natural Gas Geoscience*, 33(10): 1571-1584]
- 孟庆涛, 刘招君, 柳蓉, 孙平昌, 胡菲, 张京. 2011. 桦甸盆地桦甸组与美国犹他盆地绿河组油页岩生物标志化合物特征对比. *吉林大学学报(地球科学版)*, 41(2): 391-399. [Meng Q T, Liu Z J, Liu R, Sun P C, Hu F, Zhang J. 2011. Comparison on the characteristics of biomarkers of oil shale between Huadian Formatin in Huadian Basin and Green River Formation in Uinta Basin of western United States. *Journal of Jilin University (Earth Science Edition)*, 41(2): 391-399]
- 倪良田, 杜玉山, 蒋龙, 孙红霞, 程紫燕, 刘祖鹏, 钟建华, 曹增辉, 马存飞. 2024. 渤海湾盆地济阳坳陷陆相断陷湖盆中一低成熟度页岩“富烃—成储—富集—高产”的理论认识与开发实践. *石油与天然气地质*, 45(5): 1417-1430. [Ni L T, Du Y S, Jiang L, Sun H X, Cheng Z Y, Liu Z P, Zhong J H, Cao Z H, Ma C F. 2024. Medium-to-low maturity shales in the faulted lacustrine basin in Jiyang Depression, Bohai Bay Basin: theoretical understanding of their hydrocarbon generation, reservoir formation, and shale oil enrichment and high-yield nature and exploitation practices. *Oil & Gas Geology*, 45(5): 1417-1430]
- 倪敏婕, 祝贺喧, 何文军, 杨森, 邹阳, 张元元. 2023. 准噶尔盆地玛湖凹陷风城组沉积环境与沉积模式分析. *现代地质*, 37(5): 1194-1207. [Ni M J, Zhu H X, He W J, Yang S, Zou Y, Zhang Y Y. 2023. Depositional environment and sedimentary model of the Fengcheng Formation in Mahu sag, Junggar Basin. *Geoscience*, 37(5): 1194-1207]
- 彭治超, 李亚男, 张孙玄琦, 付星辉. 2018. 主微量元素地球化学特征在沉积环境中的应用. *西安文理学院学报(自然科学版)*, 21(3): 108-111. [Peng Z C, Li Y N, Zhang S X Q, Fu X H. 2018. Application of the geochemical characteristics of the major and trace elements in the sedimentary environment. *Journal of Xi'an University (Natural Science Edition)*, 21(3): 108-111]
- 舒豫川, 胡广, 庞谦, 胡朝伟, 夏青松, 谭秀成. 2021. 柴达木盆地咸湖相烃源岩特征: 以英西地区下干柴沟组上段为例. *断块油气田*, 28(2): 179-186. [Shu Y C, Hu G, Pang Q, Hu C W, Xia Q S, Tan X C. 2021. Characteristics of source rocks of salt lake facies in Qaidam Basin: taking upper Member of Xiaganchaigou Formation in Yingxi region as an example. *Fault-Block Oil & Gas Field*, 28(2): 179-186]
- 苏东旭, 朱永才, 刘龙松, 钱海涛, 陈海龙, 蒋中发, 张天环. 2024. 准噶尔盆地盆1井西凹陷及周缘石炭系—二叠系天然气成藏条件及勘探方向. *中国石油勘探*, 29(4): 82-96. [Su D X, Zhu Y C, Liu L S, Qian H T, Chen H L, Jiang Z F, Zhang T H. 2024. Gas accumulation conditions and exploration orientation of the Carboniferous-Permian in West Well Pen 1 sag and its periphery in Junggar Basin. *China Petroleum Exploration*, 29(4): 82-96]
- 唐勇, 郑孟林, 王霞田, 王韬, 谢再波, 秦臻, 黑晨露, 成虎, 高远, 陶辉飞. 2022. 准噶尔盆地玛湖凹陷风城组烃源岩沉积古环境. *天然气地球科学*, 33(5): 677-692. [Tang Y, Zheng M L, Wang X T, Wang T, Xie Z B, Qin Z, Hei C L, Cheng H, Gao Y, Tao H F. 2022. Sedimentary paleoenvironment of source rocks of Fengcheng Formation in Mahu sag, Junggar Basin. *Natural Gas Geoscience*, 33(5): 677-692]
- 王波, 吴志雄, 周飞, 李雅楠, 张皓, 崔海栋, 曾旭, 徐文君. 2023. 柴达木盆地西北区新近系咸化湖盆生烃母质类型与有机质富集机理. *天然气地球科学*, 34(3): 496-509. [Wang B, Wu Z X, Zhou F, Li Y N, Zhang H, Cui H D, Zeng X, Xu W J. 2023. The types of hydrocarbon source rocks and the mechanism of organic matter enrichment in the saline lacustrine basin of the Neogene in the north-western of Qaidam Basin. *Natural Gas Geoscience*, 34(3): 496-509]
- 王东勇, 陈践发, 李美俊, 王文强, 肖洪, 邹贤利, 孙彪, 秦慧强. 2025. 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. *古地理学报*, 27(4): 1026-1043. [Wang D Y, Chen J F, Li M J, Wang W Q, Xiao H, Zou X L, Sun B, Qin H Q. 2025. Distributions of steroidal biomarkers in alkaline sediments of the Permian Fengcheng Formation, Mahu sag, NW China: implications for palaeoenvironment and organic matter source. *Journal of Palaeogeography (Chinese Edition)*, 27(4): 1026-1043]
- 王剑, 李二庭, 陈俊, 米巨磊, 马聪, 雷海艳, 谢礼科. 2020. 准噶尔盆地吉木萨尔凹陷二叠系芦草沟组优质烃源岩特征及其生烃机制研究. *地质论评*, 66(3): 755-764. [Wang J, Li E T, Chen J, Mi J

- L, Ma C, Lei H Y, Xie L K. 2020. Characteristics and hydrocarbon generation mechanism of high-quality source rocks in Permian Lucaogou Formation, Jimsar sag, Junggar Basin. *Geological Review*, 66(3): 755–764]
- 王祥, 张慧芳, 张文, 凡闪, 卢玉红. 2024. 塔里木盆地库车坳陷东部煤系泥岩地球化学特征: 对生烃母质和沉积环境的指示意义. *天然气地球科学*, 35(10): 1876–1885. [Wang X, Zhang H F, Zhang W, Fan S, Lu Y H. 2024. Geochemical characteristics of coal measures mudstone in the eastern part of Kuqa Depression: implication for parent material and sedimentary environment. *Natural Gas Geoscience*, 35(10): 1876–1885]
- 王小军, 宋永, 郑孟林, 郭旭光, 吴海生, 任海蛟, 王韬, 常秋生, 何文军, 王霞田, 郭建辰, 霍进杰. 2022. 准噶尔西部陆内盆地构造演化与油气聚集. *地质前缘*, 29(6): 188–205. [Wang X J, Song Y, Zheng M L, Guo X G, Wu H S, Ren H J, Wang T, Chang Q S, He W J, Wang X T, Guo J C, Huo J J. 2022. Tectonic evolution of and hydrocarbon accumulation in the western Junggar Basin. *Earth Science Frontiers*, 29(6): 188–205]
- 吴小力, 李荣西, 胡建民, 刘福田, 赵帮胜, 覃小丽, 罗静, 乔博, 王建广. 2022. 小型断陷咸化湖盆烃源岩发育特征与形成机制: 以宁南盆地古近系清水营组为例. *兰州大学学报(自然科学版)*, 58(4): 465–474. [Wu X L, Li R X, Hu J M, Liu F T, Zhao B S, Qin X L, Luo J, Qiao B, Wang J G. 2022. Developmental characteristics and formation mechanism of the source rock in a small faulted saline lacustrine: a case study of Palaeogene Qingshuiying Formation in the Ningnan Basin. *Journal of Lanzhou University (Natural Sciences)*, 58(4): 465–474]
- 谢建磊, 赵宝成, 战庆, 李晓. 2015. 元素地球化学在古环境和古生态研究中的应用综述. *上海国土资源*, 36(3): 64–70. [Xie J L, Zhao B C, Zhan Q, Li X. 2015. Review of geochemical applications for paleoenvironmental and paleoecological analyses. *Shanghai Land & Resources*, 36(3): 64–70]
- 谢再波, 曲永强, 吴涛, 王天海, 刘雨桐, 黑晨露, 陶辉飞. 2023. 准噶尔盆地吉木萨尔凹陷二叠系芦草沟组沉积古环境与生物来源探讨. *天然气地球科学*, 34(8): 1328–1342. [Xie Z B, Qu Y Q, Wu T, Wang T H, Liu Y T, Hei C L, Tao H F. 2023. Discussion on the sedimentary paleoenvironment and biological source of Permian Lucaogou Formation in Jimusar sag, Junggar Basin. *Natural Gas Geoscience*, 34(8): 1328–1342]
- 徐敏. 2023. 琼东南盆地古植被组成及古气候演变对陆源海相有机质富集的影响. 中国地质大学(北京)博士学位论文. [Xu M. 2023. Effects of paleovegetation composition and paleoclimate evolution on terrigenous-marine organic matter enrichment in the Qiongdongnan Basin, South China Sea. Doctoral dissertation of China University of Geosciences(Beijing)]
- 尹嘉, 邹才能, 吴松涛, 伍坤宇, 邢浩婷, 魏琳, 赵正福, 路冠文, 袁铭, 符芳亮, 华柑霖, 荆振华. 2025. 咸化湖盆优质烃源岩发育机制与页岩油富集过程: 以柴达木盆地地下干柴沟组上段为例. *地球科学*, 50(7): 2875–2898. [Yin J, Zou C N, Wu S T, Wu K Y, Xing H T, Wei L, Zhao Z F, Lu G W, Yuan M, Fu F L, Hua G L, Jing Z H. 2025. Development mechanism of high-quality source rock and enrichment processes of shale oil in saline lacustrine basin: a case study of upper Member of Lower Ganchaigou Formation, Qaidam Basin. *Earth Science*, 50(7): 2875–2898]
- 张宸嘉, 曹剑, 王俞策, 支东明, 向宝力, 李二庭. 2022. 准噶尔盆地吉木萨尔凹陷芦草沟组页岩油富集规律. *石油学报*, 43(9): 1253–1268. [Zhang C J, Cao J, Wang Y C, Zhi D M, Xiang B L, Li E T. 2022. Enrichment law of shale oil of Lucaogou Formation in Jimusar sag, Junggar Basin. *Acta Petrolei Sinica*, 43(9): 1253–1268]
- 张洪安, 徐田武, 张云献. 2017. 东濮凹陷咸化湖盆优质烃源岩的发育特征及意义. *断块油气田*, 24(4): 437–441. [Zhang H A, Xu T W, Zhang Y X. 2017. Development characteristics and significance of high quality source rocks of salty lake in Dongpu Depression. *Fault-Block Oil & Gas Field*, 24(4): 437–441]
- 张天福, 孙立新, 张云, 程银行, 李艳锋, 马海林, 鲁超, 杨才, 郭根万. 2016. 鄂尔多斯盆地北缘侏罗纪延安组、直罗组泥岩微量、稀土元素地球化学特征及其古沉积环境意义. *地质学报*, 90(12): 3454–3472. [Zhang T F, Sun L X, Zhang Y, Cheng Y X, Li Y F, Ma H L, Lu C, Yang C, Guo G W. 2016. Geochemical characteristics of the Jurassic Yan'an and Zhiluo Formations in the northern margin of Ordos Basin and their paleoenvironmental implications. *Acta Geologica Sinica*, 90(12): 3454–3472]
- 支东明, 宋永, 何文军, 贾希玉, 邹阳, 黄立良. 2019. 准噶尔盆地中一下二叠统页岩油地质特征、资源潜力及勘探方向. *新疆石油地质*, 40(4): 389–401. [Zhi D M, Song Y, He W J, Jia X Y, Zou Y, Huang L L. 2019. Geological characteristics, resource potential and exploration direction of shale oil in Middle–Lower Permian, Junggar Basin. *Xinjiang Petroleum Geology*, 40(4): 389–401]
- 朱德燕, 王勇, 银燕, 杨万芹, 朱德顺, 宁方兴. 2015. 断陷湖盆咸化环境沉积与页岩油气关系: 以东营凹陷、渤南地区为例. *油气地质与采收率*, 22(6): 7–13. [Zhu D Y, Wang Y, Yin Y, Yang W Q, Zhu D S, Ning F X. 2015. Study on the relationship between saline environmental deposition and shale oil-gas in faulted basin: a case study of areas of Dongying sag and Bonan subsag. *Petroleum Geology and Recovery Efficiency*, 22(6): 7–13]
- Burton D, Woolf K, Sullivan B. 2014. Lacustrine depositional environments in the Green River Formation, Uinta Basin: expression in outcrop and wireline logs. *AAPG Bulletin*, 98(9): 1699–1715.
- French K L, Birdwell J E, Vanden Berg M D. 2020. Biomarker similarities between the saline lacustrine Eocene Green River and the Paleoproterozoic Barney Creek Formations. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 274: 228–245.
- Jiang L, Li L, Nytoft H P, Wang Y P, George S C. 2024. Five series of benzohopanes in Early Cretaceous sediments from the Chaoyang Basin, NE China. *Organic Geochemistry*, 195: 104843.
- Peters K E, Walters C C, Moldowan J M. 2004. *The Biomarker Guide: Biomarkers and Isotopes in the Environment and Human History* (2nd ed). Cambridge, UK: Cambridge University Press.
- Tulipani S, Grice K, Greenwood P F, Schwark L, Böttcher M E, Summons R E, Foster C B. 2015. Molecular proxies as indicators of freshwater incursion-driven salinity stratification. *Chemical Geology*, 409: 61–68.
- Xia L W, Cao J, Lee C, Stüeken E E, Zhi D M, Love G D. 2021. A new constraint on the antiquity of ancient haloalkaliphilic green algae that flourished in a Ca. 300 Ma Paleozoic lake. *Geobiology*, 19(2): 147–161.

(责任编辑 张西娟)