

青藏高原玛曲地区上三叠统巴贡组泥页岩 有机地球化学特征及生烃潜力

卢坤杰¹⁾, 施立志¹⁾, 王卓卓²⁾, 黄静宜³⁾, 崔新宇¹⁾, 程靖涛³⁾

1) 中国地质科学院, 北京, 100037; 2) 北京市工程地质研究所, 北京, 100048;
3) 防灾科技学院, 河北三河, 065201



内容提要:青藏高原羌塘盆地晚三叠世发育了一套分布面积较广, 厚度较大的灰黑色泥页岩, 具有一定的生烃潜力。为了揭示该套泥页岩的有机地球化学特征及生烃潜力, 笔者等开展了总有机碳、氯仿沥青“A”、岩石热解分析、镜质体反射率、干酪根碳同位素及生物标志物等测试分析工作。研究表明: 巴贡组泥页岩样品总有机碳含量(TOC)介于0.54%~2.32%(平均值为1.37%), 氯仿沥青“A”含量介于0.0206%~0.1821%(平均值为0.0786%), 生烃潜力(S_1+S_2)介于0.12~2.21 mg/g(平均值为0.95 mg/g), 综合判别有机质丰度为“中等—好”级别; 干酪根碳同位素($\delta^{13}C_{PDB}$)介于-29.8‰~-27.3‰(平均值为-28.6‰), Pr/nC_{17} 值介于0.13~0.49(平均值为0.26), Ph/nC_{18} 值介于0.13~0.38(平均值为0.21), 结合其显微组分, 综合判别有机质类型以II₁-II₂型为主。 R_o 介于1.13~1.57(平均值为1.39), T_{max} 介于455~480℃(平均值为462.5℃), $\beta\alpha C_{30}$ 藓烷/ $\alpha\beta C_{30}$ 藓烷值介于0.02~0.28(平均值为0.16), C_{31} 升藓烷 $22S/(22S+22R)$ 值介于0.51~0.79(平均值为0.58), Ts/Tm 介于0.84~1.95(平均值为1.34), 表明有机质成熟度处于成熟—高成熟阶段。正构烷烃、甾烷、萜类与伽马蜡烷参数进一步表明有机质来源以水生生物(藻类、浮游生物)为主, 伴有显著陆源高等植物输入。沉积水体具有弱还原—亚氧化特征, 总体应属于受陆源供给影响的浅海陆棚环境。综合表明: 青藏高原玛曲地区上三叠统巴贡组泥页岩为一套“中等—好”级别的烃源岩, 具有较好的生烃潜力。

关键词: 青藏高原; 玛曲地区; 巴贡组; 烃源岩; 地球化学特征; 生烃潜力

位于青藏高原腹地的羌塘盆地是中国最大的中生代海相沉积盆地, 面积约为 20×10^4 km², 与世界上含油气最丰富的中东油气区同属于特提斯构造域(王剑等, 2009; 何治亮等, 2023)。盆地内广泛分布的古油藏带、丰富的沥青及液态油苗等油气显示, 充分证实了其经历了显著的油气生成与聚集过程(南征兵等, 2008; 王剑等, 2020)。已辨识的多套优质烃源岩层系涵盖上侏罗统索瓦组、中侏罗统布曲组与夏里组, 以及上三叠统波里拉组、巴贡组等(南征兵等, 2008; 曾胜强等, 2021)。前人多认为侏罗系为羌塘盆地主要勘探目标(沈安江等, 2023; 伊海生, 2025), 然而, 近年来的油气地质勘探进展揭示, 上三叠统同样具备高度的勘探潜力。

其中, 上三叠统巴贡组泥页岩被认为是羌塘盆地最具潜力的烃源岩层系之一(陈文彬等, 2015;

宋春彦等, 2018; 王忠伟等, 2022; 宁生伟等, 2024; 王剑等, 2025)。该层系及其同期地层在北羌塘拗陷(藏夏河、沃若山、雀莫错等地区)和南羌塘拗陷(土门等地区)广泛出露(图1a), 其岩性以泥岩、碳酸盐岩及砂岩为主, 厚度介于数十米至数百米之间(陈文彬等, 2015; 王剑等, 2020; 占王忠等, 2020)。在玛曲地区的多口地质调查井中, 巴贡组普遍显示出显著的气测异常和沥青油苗(宋春彦等, 2018; 张帅等, 2020; 曾胜强等, 2021; 沈安江等, 2023; 王剑等, 2025), 此外, 流体包裹体分析表明该层系经历了多期次烃类充注(程乐利等, 2021), 证实巴贡组具备有利的生储盖配置及油气成藏条件。然而, 作为热点的巴贡组在羌塘盆地内烃源岩特征差异较大, 前人研究多侧重于巴贡组生储盖组合、沉积保存条件、有机质富集机理及泥页岩

注: 本文为地球深部探测与矿产资源勘查国家科技重大专项(编号: 2025ZD1006605)与中国地质调查项目(编号: DD20230200102)的成果。

收稿日期: 2025-09-14; 改回日期: 2025-12-20; 网络首发: 2026-02-15; 责任编辑: 刘志强。Doi: 10.16509/j.georeview.2026.02.041

作者简介: 卢坤杰, 男, 2001年生, 硕士研究生, 地质资源与地质工程专业; Email: lukunjie2001@163.com。通讯作者: 施立志, 男, 1976年生, 博士, 正高级工程师, 博士生导师, 主要从事油气调查和石油地质综合研究工作; Email: 86547864@qq.com。

物源等方面 (Wang Zhongwei et al., 2017, 2021b; Yu Fei et al., 2019; Fu Xiugen et al., 2020; Wang Jian et al., 2024; Lin Fei et al., 2025), 针对玛曲等沉积构造较为复杂的关键区带, 目前仍缺乏系统的有机地球化学特征描述及生烃潜力定量评价研究。

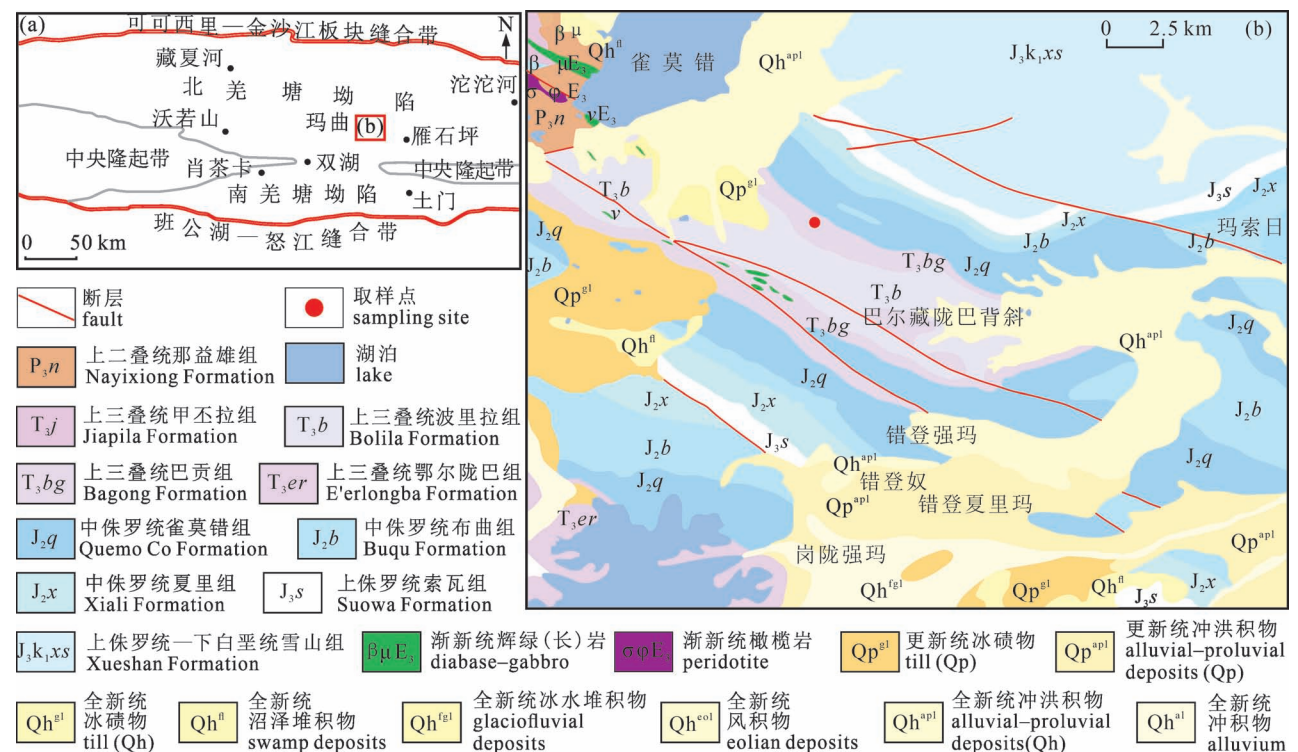
1 地质背景

羌塘盆地是一个建立在前奥陶系结晶基底之上的大型复杂叠合盆地 (Zhang Kaijun et al., 2002, 2007; 王剑等, 2020)。盆地南缘与班公湖—怒江缝合带紧密相连, 北侧则毗邻可可西里—金沙江缝合带, 位于昌都区块、昆仑区块、松潘—甘孜区块和拉萨区块的构造交汇区 (Zhang Kaijun et al., 2011; Song Peiping et al., 2015; Wang Jian et al., 2024)。盆地内自北向南依次展布着北羌塘拗陷、中央隆起带和南羌塘拗陷 3 个次级构造单元, 构成“两拗夹一隆”的独特构造格局 (图 1a) (Zhang Kaijun et al., 2006; 王剑等, 2020; 李亚林等, 2024)。

玛曲地区位于北羌塘拗陷东部 (王剑等, 2020), 区域内发育大量褶皱与逆冲断层, 其中最为典型的构造为波尔藏陇巴背斜, 背斜内形成的褶皱遭受了多期叠加变形, 枢纽总体分布呈 NW-SE 方向 (李亚林等, 2008)。主要发育中、新生代地层, 野外实测剖面中主要发育上三叠统波里拉组 (T_3b)、巴贡组 (T_3bg)、鄂尔陇巴组 (T_3e)、雀莫错组 (J_2q)、

布曲组 (J_2b)、夏里组 (J_3x)、索瓦组 (J_3s)、雪山组 (J_3x) 以及第四系 (Q) 地层 (图 1b) (陈文彬等, 2015; 王剑等, 2020; Ma Anlin et al., 2023)。

目的层巴贡组富含多种化石, 涵盖双壳类、菊石类、腕足类及丰富的植物化石, 属晚三叠世诺利—瑞替期的沉积产物 (汤朝阳等, 2007)。岩性主要表现为灰—深灰色泥岩、灰黑色炭质泥岩、暗色含煤泥页岩、灰黑色粉砂质泥岩、粉砂岩 (图 2a、2b)。沉积构造较为发育, 可见水平层理、平行层理、微斜层理等, 主要呈薄层状或中层状构造, 页理尤其发育 (图 1c)。部分泥岩的微变质迹象, 如细小点状白云母的出现, 暗示了后期地质作用的影响。岩石薄片及镜下观察显示, 主要矿物为长英质碎屑、长条状云母、黏土矿物、有机质、微晶方解石及黄铁矿, 大量长条状云母类矿物集中呈纹层状分布, 黏土矿物和有机质常混合形成絮凝结构, 大量黄铁矿呈粒状沿纹层分布 (图 2c、2d)。综合岩性组合与沉积构造特征, 巴贡组整体表现为浅海陆棚相沉积, 与羌塘盆地广泛发育海相沉积环境相符 (丁文龙等, 2011; Wang Jian et al., 2024; Zhang Qian et al., 2024)。沉积环境中的盐度分层与贫氧条件对有机质保存具有关键控制作用 (王岚等, 2022), 通过对多元地球化学指标的深入分析, 多认为巴贡组泥页岩主要形成于浅海咸水至半咸水环境 (Wang Zhongwei et al., 2021a; Peng Qinghua et al., 2025)。



系	统	组	层号	柱状图	厚度 (m)	岩性描述	沉积构造	沉积相
三叠系	上三叠统	鄂尔陇巴组	28		9.33	风化面紫红色, 新鲜面灰绿色凝灰质细砂岩, 层理不清晰		火山喷发
			27		37.70	灰绿色薄层状粉砂岩, 粉砂质泥岩		
					1.73	灰绿色薄层状细砂岩		
			26		18.95	风化面棕黄色, 新鲜面青灰色生物碎屑灰岩		
			25		60.51	灰绿色薄层状泥岩, 岩石风化面上见细小点状白云母, 岩石微变质	水平层理	
					3.51	青灰色-深灰色生物碎屑灰岩, 含大量双壳类、海百合茎化石, 几乎整体灰岩都为生物碎屑灰岩		
			24		12.94	灰绿色粉砂质泥岩		
			23		25.20	风化面灰白色, 新鲜面青灰色生物碎屑灰岩, 含双壳类、藻类化石。灰岩中发育方解石脉, 脉宽1mm。向上为泥晶灰岩, 中层状构造, 层理清晰		
					8.99	风化面灰绿色, 新鲜面灰绿-浅灰色细砂岩、粉砂岩		
			21		39.93	风化面灰绿色, 新鲜面浅灰-灰褐色粉砂岩。薄层状构造, 层理较清晰	平行层理	
					1.78	黑色薄层状泥质粉砂岩、粉砂岩, 层理清晰		
					19.18	黑色泥岩, 炭质泥岩		
					1.42	风化面棕褐色, 新鲜面青灰色-灰黑色微晶灰岩、生物碎屑灰岩, 薄-中层状构造, 见菊石化石		
			19		9.03	深灰色-黑色泥岩夹灰黑色粉砂质泥岩		
		18		28.82	灰黑色-黑色页岩, 泥岩	水平层理		
					灰黑色粉砂岩, 薄层状构造, 层理较清晰			
		17		11.13	灰黑色页岩, 层理清晰, 夹含粉砂质泥岩			
		16		16.87	灰黑色炭质页岩, 条痕为褐色, 层理较清晰, 页理发育	水平层理		
				1.62	深灰色-灰黑色粉砂质泥岩, 层理清晰, 薄层状构造, 新鲜面深褐色			
		15		6.03	黑色泥岩、页岩			
		14		26.40	风化面灰绿色, 新鲜面深灰-灰黑色薄层状细砂岩、粉砂岩, 层理不清晰, 节理发育、砂岩被风化成薄板状		陆棚相	
		13		11.59	黑色炭质泥岩, 层理不清晰, 见冻土, 将泥岩碎块胶结在一起			
		12		25.72	黑色炭质泥岩			
		11		17.50	黑色炭质泥岩			
				12.50	黑色粉砂质泥岩、页岩, 层理清晰			
		10		23.50	黑色炭质页岩、泥岩, 页理清晰			
				45.16	黑色炭质页岩	水平层理		
					黑色炭质泥岩, 粉砂质泥岩, 薄层状构造			
		7.74	绿色薄板状粉砂岩					
9		19.96	黑色炭质泥岩, 能污手	平行层理				
8		6.87	灰绿色薄板状钙质粉砂岩、粉砂质泥岩、泥岩					
7		7.55	黑色泥岩、页岩	微斜层理				
		7.20	黑色泥岩、页岩, 能污手, 条痕呈褐色, 炭质泥岩					
6		16.15	中-薄层状灰绿色细砂岩, 长石石英砂岩					
		61.74	风化面灰褐色, 新鲜面灰绿色、中层状细砂岩, 砂岩风化面呈球状风化					
5		66.71	风化面灰白-浅灰色, 新鲜面青灰-灰黑色, 中层状泥晶灰岩夹薄层状微晶灰岩					
			青灰色-灰黑色中层状泥晶灰岩夹薄层状青灰色-深灰色微晶灰岩, 层理清晰, 灰岩中发育方解石脉。薄层状灰岩, 新鲜面灰黑色, 沿层面呈棕黑-棕褐色, 有油气味。					
			青灰色-深灰色薄层状泥晶灰岩, 灰岩中发育多组方解石脉, 岩石单层厚1-5cm	宽缓褶皱				
		3.04	青灰色中层状泥晶灰岩, 发育大量白色方解石脉					
4		16.88	深灰色薄层状泥晶灰岩					
		5.53	深灰色薄层状泥晶灰岩					
3		14.54	深灰色薄层状泥晶-微晶灰岩, 层面呈棕黑色, 能污手, 有油气味	顺层节理	台地前缘斜坡相			
2		10.85	灰白-黄棕色中层状层泥晶灰岩, 单层厚10-20cm, 岩石节理较发育。					
		9.24	沿层面灰黑色, 含油, 能污手, 有油气味					
1		21.21	深灰色中-薄层状泥晶灰岩、灰岩中发育大量的方解石脉, 有油气味					

(c)

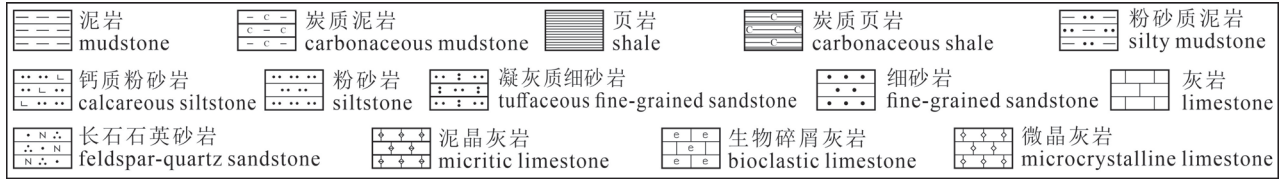


图 1 (a) 羌塘盆地构造单元划分图; (b) 玛曲地区地质图 (据王剑等, 2025 修改); (c) 玛曲地区地层柱状图

Fig. 1 (a) Division of tectonic units in the Qiangtang Basin; (b) Geological map of the Maqu area (modified from Wang Jian et al., 2025&); (c) Stratigraphic column of the Maqu area

2 实验与方法

本研究中的 13 件样品均采自玛曲地区石油沟剖面的上三叠统巴贡组 (图 1b、图 2c), 剖面厚度为 661.60 m, 采集的烃源岩样品均为野外露头剖面新鲜、颜色较深的泥页岩样品。

所有泥页岩样品的测试分析均在中国地质科学院国家地质实验测试中心完成。其中, 普通薄片鉴定和全岩干酪根镜鉴均应用 ZEISS A1 偏反荧光显微镜完成, 检测方法分别依据 SY/T 5368-2016 和 SY/T 6414-2014; 热解分析应用 ROCK EVAL6 热解仪完成, 检测方法依据 GB/T 18602-2012; 总有机碳分析应用 CS744 碳硫仪完成, 检测方法依据 GB/T 19145-2022; 可溶有机质 (氯仿沥青“*A*”) 应用索氏抽提器/电子天平完成, 检测方法依据 SY/T 5118-2021; 镜质体反射率应用 CRAIC20/20 PV 显微分光光度计完成, 检测方法依据 SY/T 5124-2012; 干酪根碳同位素应用 ISOPRIME PRECISION 同位素质谱仪完成, 检测方法依据 SY/T 5238-2019; 所有生物标志物均应用 GCMS 2010 PLUS 气相色谱—质谱仪完成, 检测方法依据 GB/T 18606-2017。

3 有机地球化学特征

3.1 有机质丰度

有机质丰度是衡量单位质量烃源岩中有机质含量的核心参数。常用指标包括总有机碳含量 (*TOC*)、氯仿沥青“*A*”与生烃潜量 (S_1+S_2) 等。结合国际通用标准 (Peters et al., 2007) 与针对羌塘盆地泥质烃源岩所提出的评价标准 (付修根等, 2020), 核心指标 *TOC* 阈值需大于 0.5%。因此, 本研究将 *TOC*>0.5% 定义

为有效烃源岩最低标准 (表 1)。

巴贡组泥页岩样品 *TOC* 分布范围为 0.54%~2.32%, 平均值为 1.37%。其中, 4 件样品的 *TOC* 质量分数介于 0.5%~1.0%, 属于一般烃源岩, 6 件样品的 *TOC* 质量分数介于 1.0%~2.0%, 属于中等烃源岩, 3 件样品的 *TOC* 质量分数大于 2.0%, 属于好烃源岩 (表 2)。氯仿沥青“*A*”含量在 0.0206%~0.1821%, 平均值为 0.0786%。生烃潜量 (S_1+S_2) 在 0.12~2.21 mg/g, 平均值为 0.95 mg/g。所有样品分布在一般—好烃源岩范围内, 少数样品达优质级别, 总体达到“中等—好”烃源岩标准。氯仿沥青“*A*”、生烃潜量 (S_1+S_2) 与 *TOC* 之间呈现良好的正

表 1 羌塘盆地烃源岩有机质丰度评价标准 (据付修根等, 2020)

Table 1 Evaluation standards for organic matter abundance in source rocks of the Qiangtang Basin (from Fu Xiugen et al., 2020&)

评价指标	一般烃源岩	一般烃源岩	中等烃源岩	好烃源岩
有机碳 (%)	<0.5	0.5~1.0	1.0~2.0	>2.0
氯仿沥青“ <i>A</i> ” (%)	<0.01	0.01~0.10	0.10~0.15	>0.15
生烃潜量 (mg/g)	<0.5	0.5~2.0	2.0~6.0	>6.0

表 2 玛曲地区巴贡组烃源岩有机质丰度和类型参数

Table 2 Organic matter abundance and type parameters of source rocks in the Bagong Formation, Maqu area

样品	氯仿沥青“ <i>A</i> ” (%)	<i>TOC</i> (%)	S_1 (mg/g)	S_2 (mg/g)	S_1+S_2 (mg/g)	T_1	$\delta^{13}C_{PDB}$ (‰)
SPM02-(3)-4	0.1096	1.86%	0.09	1.08	1.17	26.88	-29.6
SPM02-(5)-3	0.0658	1.09%	0.05	0.48	0.53	31.85	-29.8
SPM02-(7)-2	0.0867	1.79%	0.06	1.07	1.13	31.03	-27.8
SPM02-(8)-1	0.0366	0.79%	0.02	0.24	0.26	43.95	-29.3
SPM02-(10)-1	0.0841	1.63%	0.14	0.90	1.04	85.60	-29.3
SPM02-(11)-1	0.0409	0.93%	0.02	0.19	0.21	31.58	-29.4
SPM02-(12)-2	0.0261	0.54%	0.01	0.11	0.12	9.08	-28.7
SPM02-(13)-1	0.0206	0.59%	0.08	0.12	0.2	-45.18	-28.8
SPM02-(14)-1	0.0829	1.17%	0.11	0.61	0.72	63.23	-27.3
SPM02-(16)-3	0.1180	2.05%	0.16	0.97	1.13	75.20	-27.4
SPM02-(17)-2	0.0415	1.47%	0.14	0.79	0.93	10.03	-27.3
SPM02-(18)-4	0.1454	2.32%	0.32	1.89	2.21	76.33	-28.0
SPM02-(20)-1	0.1821	2.08%	0.35	1.83	2.18	86.63	-29.1

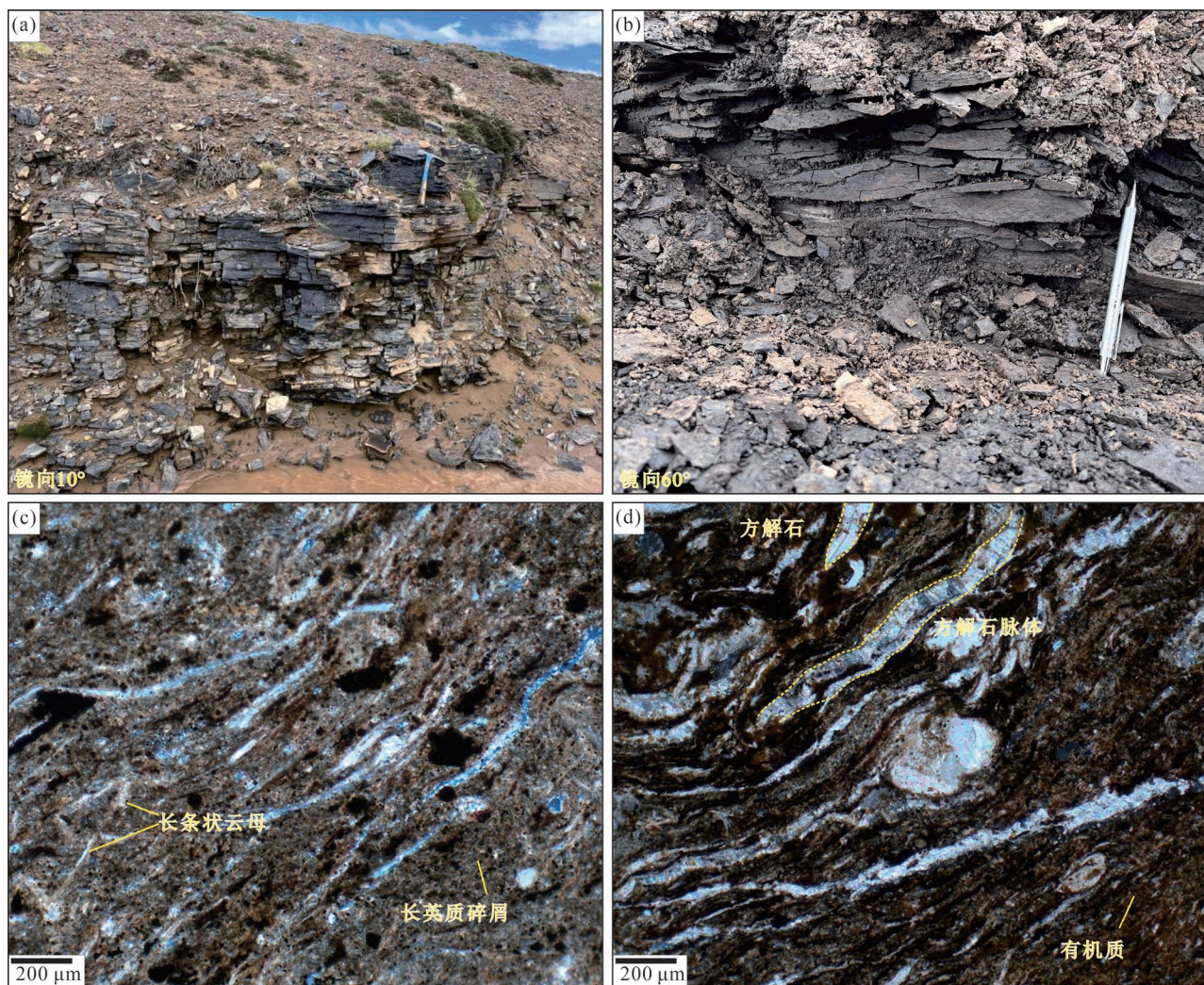


图2 玛曲地区上三叠统巴贡组野外露头及镜下薄片

Fig. 2 Field outcrops and photomicrographs in the Upper Triassic Bagong Formation, Maqu area

- (a) 玛曲地区石油沟附近巴贡组页岩、泥岩露头(镜向 10°);(b) 玛曲地区 SPM02 剖面巴贡组灰黑色炭质页岩露头(镜向 60°);(c) 样品 SPM02-(5)-3,玛曲地区巴贡组纹层状炭质页岩镜下薄片;(d) 样品 SPM02-(3)-4,玛曲地区巴贡组纹层状泥岩镜下薄片
- (a) Outcrop of shale and mudstone of the Bagong Formation near Shiyougou, Maqu area (viewing direction 10°); (b) Outcrop of gray-black carbonaceous shale of the Bagong Formation in the SPM02 section, Maqu area (viewing direction 60°); (c) Photomicrograph of laminated carbonaceous shale from sample SPM02-(5)-3, Bagong Formation, Maqu area; (d) Photomicrograph of laminated mudstone from sample SPM02-(3)-4, Bagong Formation, Maqu area

相关关系,表明随着 TOC 含量的增加,生烃潜力也随之增强(图 3a,b)。部分烃源岩丰度一般,主要是地表露头烃源岩样品长时间遭受风化淋滤作用导致有机质流失,或岩浆侵入作用和构造运动导致的热蚀变作用(Dewey et al., 1988; Zeng Yuhong et al., 2013)。区域对比显示,研究区及周边地区烃源岩总有机碳含量总体在 0.5%~2.0%,个别高达 2.5%以上,进一步佐证中等—好生烃潜力(沈安江等, 2023; 宁生伟等, 2024)。

3.2 有机质类型

有机质类型是评判烃源岩生烃潜力的关键指

标,其分类已从传统的干酪根显微组分分析发展为多参数综合判别体系(秦建中等, 2005; 付修根等, 2020; 李亚林等, 2024)。巴贡组样品显微组分主要包括腐泥组、镜质组、惰质组。其中,腐泥组主要源于藻类、浮游生物和细菌等水生有机质,在缺氧还原环境中经成岩作用转化形成(Tissot, 1979)。在热演化作用下,富氢的腐泥组(特别是无定形体)易进一步生成次生的沥青质体,在油浸反射光下呈褐色—褐黑色,具内反射,无固定形态,呈絮状产出,反映出较高的生油潜力(图 4d)。镜质组则来源于高等陆生植物的木质组织(如纤维素和木质素),通过胶化

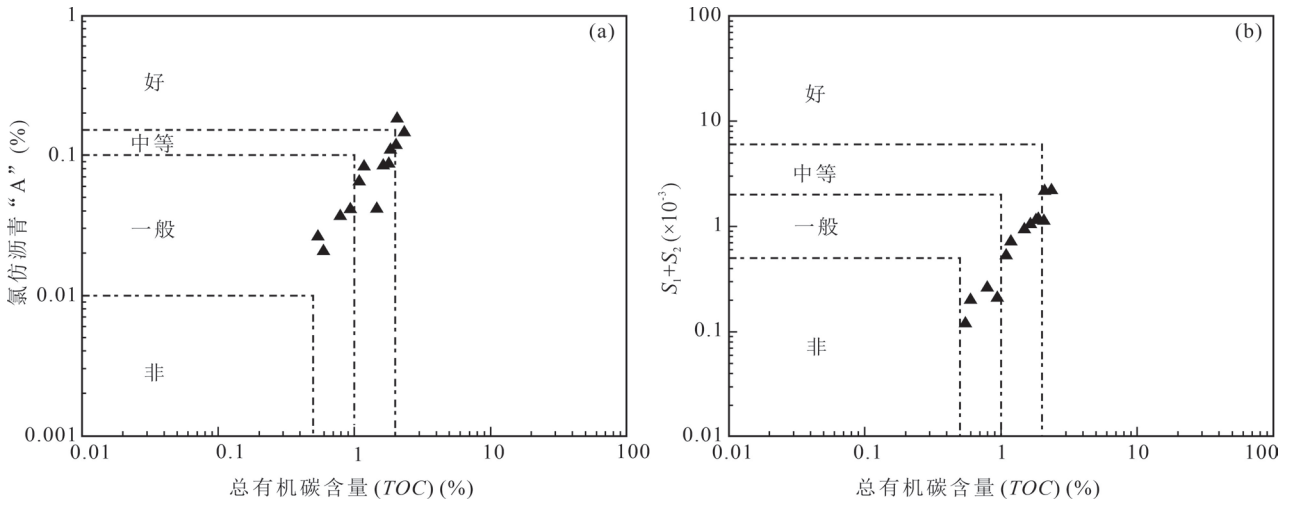


图3 玛曲地区上三叠统巴贡组有机质丰度判别图

Fig. 3 Discriminant diagram of organic matter abundance in the Upper Triassic Bagong Formation, Maqu area

(a) 玛曲地区巴贡组 TOC 与氯仿沥青“ A ”关系; (b) 玛曲地区巴贡组 TOC 与生烃潜力 (S_1+S_2) 关系

(a) Relationship between TOC and chloroform bitumen “ A ” in the Bagong Formation, Maqu area; (b) Relationship between TOC and hydrocarbon potential (S_1+S_2) in the Bagong Formation, Maqu area

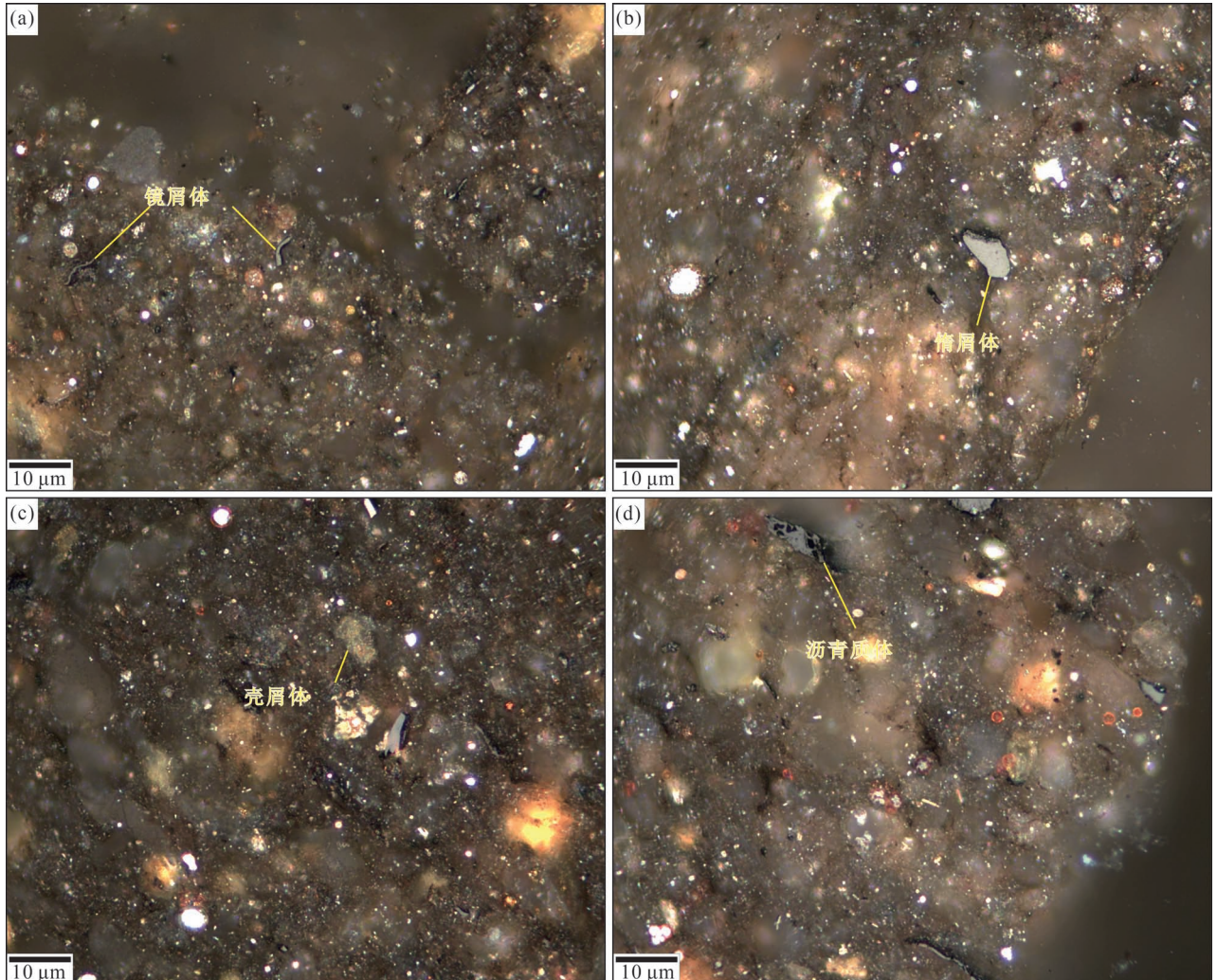


图4 玛曲地区上三叠统巴贡组显微组分类型反射光照片

Fig. 4 Reflected light photomicrographs of maceral types in the Upper Triassic Bagong Formation, Maqu area

(a) 样品 SPM02-(3)-4, 玛曲地区巴贡组镜屑体油浸反射光照片; (b) 样品 SPM02-(5)-3, 玛曲地区巴贡组惰屑体油浸反射光照片; (c) 样品 SPM02-(14)-1, 玛曲地区巴贡组壳屑体油浸反射光照片; (d) 样品 SPM02-(17)-2, 玛曲地区巴贡组沥青质体油浸反射光照片

(a) Photomicrograph of vitrodetrinite in sample SPM02-(3)-4 from the Bagong Formation, Maqu area, under oil-immersion reflected light; (b) Photomicrograph of inertodetrinite in sample SPM02-(5)-3 from the Bagong Formation, Maqu area, under oil-immersion reflected light; (c) Photomicrograph of liptodetrinite in sample SPM02-(14)-1 from the Bagong Formation, Maqu area, under oil-immersion reflected light; (d) Photomicrograph of bituminite in sample SPM02-(17)-2 from the Bagong Formation, Maqu area, under oil-immersion reflected light

和腐殖化过程转化而成,其主要显微组分镜屑体在油浸反射光下呈灰黑色,颗粒状或不规则形状(图4a)。惰屑体是惰质组中难以辨认的碎屑或碎片,呈不规则颗粒状,反射光下亮白色,高突起(图4b)。

干酪根类型指数(T_1)是判别有机质类型的常用参数之一。一般认为, $T_1 > 80.0$ 时,表征I型干酪根;II₁型与II₂型干酪根的 T_1 范围分别为80.0~40.0和40.0~0;当 $T_1 < 0$ 时,则指示III型干酪根(李亚林等,2024)。巴贡组13个样品中(表2),大部分为II₁-II₂型干酪根,含有少量I型和III型,综合表明巴贡组有机质类型为II₁-II₂型。

干酪根碳同位素组成($\delta^{13}C_{PDB}$)受热演化程度影响较小(Tissot, 1979),依据 $\delta^{13}C_{PDB}$ 值主要划分标准分为(黄籍中,1988):I型(-35‰~-30‰)、II₁型(-30‰~-27.5‰)、II₂型(-27.5‰~-25‰)、III型(>-25‰),该差异主要源于陆生植物与水生生物碳同位素组成的显著分馏(卢双舫等,2008)。本研究13个样品 $\delta^{13}C_{PDB}$ 值介于-29.8‰~-27.3‰,平均值为-28.6‰,其中10个样品的值介于-30‰~-27.5‰,有机质类型为II₁型。3个样品的值介于-27.5‰~-25‰,有机质类型为II₂型(图5)。

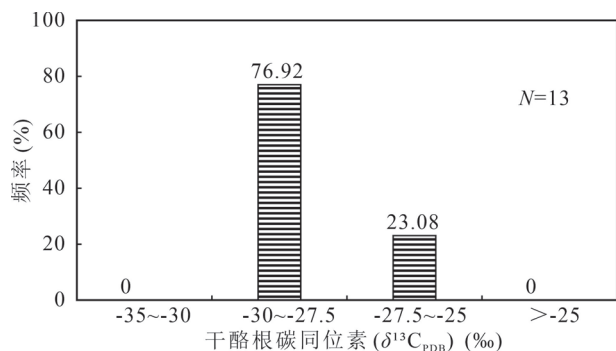


图5 玛曲地区晚三叠世巴贡组干酪根碳同位素($\delta^{13}C_{PDB}$)分布图

Fig. 5 Distribution of kerogen carbon isotopic composition ($\delta^{13}C_{PDB}$) in the Upper Triassic Bagong Formation, Maqu area

姥鲛烷/ nC_{17} (Pr/nC_{17})和植烷/ nC_{18} (Ph/nC_{18})值是判别有机质来源(如藻类、高等植物输入比例)和沉积古环境氧化还原条件的常见指标(Didyk et al., 1978)。分析结果显示(表3),13个泥页岩样品 Pr/nC_{17} 值介于0.13~0.49(平均值为0.26), Ph/nC_{18} 值介于0.13~0.38(平均值为0.21)。整体偏低的比值特征表明,研究区泥页岩的有机质主要来源于藻类、水生浮游生物与陆源有机质的混合输入,其中藻类和水生浮游生物的贡献略大(卢双舫等,2008)。同时,该特征指示沉积时期水体可能处于弱还原—亚氧化环境(Peters et al., 2007)。结合 Ph/nC_{18} - Pr/nC_{17} 交会图分析(图6),可判定研究区泥页岩的有机质类型以II₁-II₂型为主。孢粉组合分析亦显示该时期气候温暖湿润,陆源植物繁盛,与水生生物共同构成了混合型有机质来源(Yu Fei et al., 2019)。

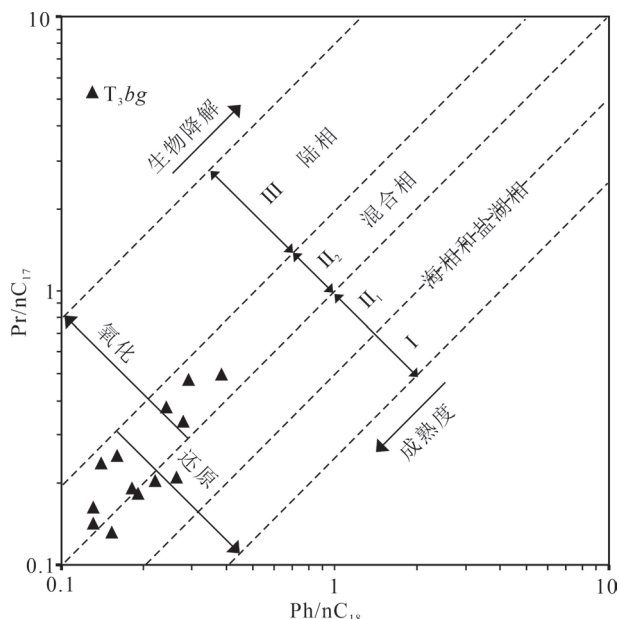


图6 玛曲地区晚三叠世巴贡组有机质类型和来源判别图

Fig. 6 Diagnostic diagrams of organic matter type and origin in the Upper Triassic Bagong Formation, Maqu area

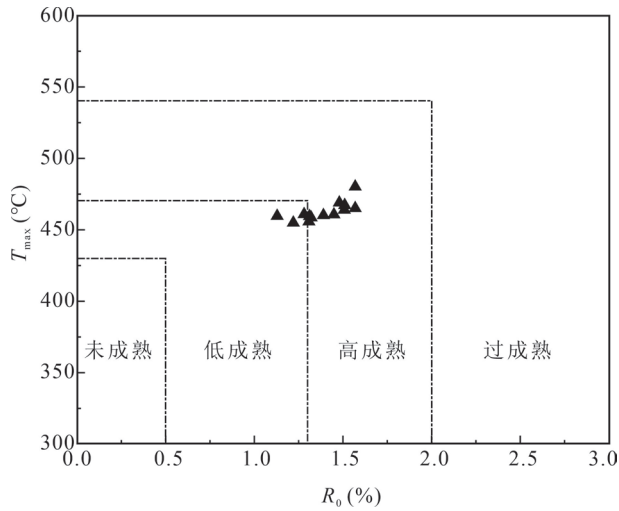


图7 玛曲地区上三叠统巴贡组有机质成熟度判别图

Fig. 7 Evaluation diagram of organic matter maturity in the Upper Triassic Bagong Formation, Maqu area

综合显微组分、 $\delta^{13}\text{C}_{\text{PDB}}$ 值分布特征及生物标志物比值 (Pr/nC_{17} , Ph/nC_{18}) 表明, 研究区有机质类型以 II_1 - II_2 型为主, 各指标数值相对集中。

3.3 有机质成熟度

镜质体反射率 (R_0) 与热解峰顶温度 (T_{max}) 为传统的有机质成熟度指标。当 R_0 值介于 0.5% ~ 1.3% 时为生油窗 (主要液态烃生成阶段), 介于 1.3% ~ 2.0% 为凝析油—湿气阶段 (热裂解作用增强, 气态烃比例增加), $R_0 > 2.0\%$ 进入干气阶段 (以甲烷为主) (卢双舫等, 2008)。13 个样品的 R_0 值在 1.13 ~ 1.57, 平均值为 1.39。 T_{max} 在 455 ~ 480°C, 平均值为 462.5°C (表 4)。数据分布相对集中, 且随着热成熟度增加, R_0 与 T_{max} 同步升高, 两者存在较好的正相关性 (图 7)。结合 R_0 与 T_{max} 值的对应关系, 表明有机质处于成熟—高成熟阶段。藿烷是一类主要源于细菌的五环三藿烷类生物标志物, 其骨架结构和立体构型在成岩—成烃演化过程中会随温度与时间系统性变化, 因此常用于指示有机质热成熟度 (Moldowan et al., 1985)。随着热成熟度增高, 莫烷 ($\beta\alpha$ 构型) 会向更稳定的藿烷 ($\alpha\beta$ 构型) 的转化, $\beta\alpha\text{C}_{30}$ 莫烷/ $\alpha\beta\text{C}_{30}$ 藿烷值逐渐降低; T_s (18 α (H)-22, 29, 30-三降新藿烷) 比 T_m (17 α (H)-22, 29, 30-三降藿烷) 更具热稳定性, T_s/T_m 值通常随成

熟度升高而增大; 藿烷侧链 (C_{31} 升藿烷的 C-22 位) 手性中心会由 R 构型向 S 构型转化, C_{31} 升藿烷 $22\text{S}/(22\text{S}+22\text{R})$ 值逐步趋近热力学平衡区间 (0.57 ~ 0.62) (Moldowan et al., 1985; Peters et al., 2007)。巴贡组 13 个泥页岩样品 (表 4) 的 $\beta\alpha\text{C}_{30}$ 莫烷/ $\alpha\beta\text{C}_{30}$ 藿烷值为 0.02 ~ 0.28 (平均值为 0.16), C_{31} 升藿烷 $22\text{S}/(22\text{S}+22\text{R})$ 值为 0.51 ~ 0.79 (平均值为 0.58), T_s/T_m 为 0.84 ~ 1.95 (平均值为 1.34), 表明样品中的藿烷系列化合物已经历了显著的异构化作用, 进一步证实巴贡组有机质已进入较高成熟阶段。

4 有机质来源及沉积环境

4.1 正构烷烃

正构烷烃是沉积有机质和石油研究中的关键生物标志化合物, 能有效揭示有机质的来源及其沉积环境特征 (Peters et al., 2007)。在研究区泥页岩样品中, 正构烷烃系列化合物的分布模式以单峰型前峰态为主 (图 8a, c, e), 碳数范围为 C_{12} ~ C_{35} , 主峰碳主要分布在 C_{17} ~ C_{20} 之间, 指示有机质以藻类、水生浮游生物等低等生物贡献为主。此外, $\text{C}_{21-}/\text{C}_{22+}$ 值介于 0.50 ~ 0.84 (平均值为 0.67), 整体小于 1, 表明中长链烷烃相对发育, 陆源高等植物输入较为明显。 $\text{C}_{21+22}/\text{C}_{28+29}$ 值介于 0.83 ~ 1.64 (平均值为 1.21), 多数样品大于 1 (表 3), 指示总体上藻类、水生浮游生物有机质略占优势, 而个别样品比值接近或小于 1, 则反映局部层段陆源高等植物贡献增强。有机质来源总体表征为藻类、水生浮游生物、陆源有机质的

表 3 玛曲地区巴贡组烃源岩有机质成熟度参数

Table 3 Organic matter maturity parameters of source rocks in the Bagong Formation, Maqu area

样品	T_{max} (°C)	R_0 (%)	$\frac{\beta\alpha\text{C}_{30}\text{M}}{\alpha\beta\text{C}_{30}\text{H}}$	$\frac{\text{C}_{31}\text{H}22\text{S}}{(22\text{S}+22\text{R})}$	$\frac{T_s}{T_m}$	$\frac{T_s}{T_s+T_m}$	$\frac{G}{C_{30}\text{H}}$
SPM02-(3)-4	455	1.22	0.16	0.55	1.24	0.55	0.13
SPM02-(5)-3	456	1.31	0.02	0.54	1.06	0.51	0.23
SPM02-(7)-2	461	1.28	0.13	0.51	1.26	0.56	0.12
SPM02-(8)-1	469	1.48	0.16	0.60	0.89	0.47	0.20
SPM02-(10)-1	464	1.51	0.16	0.59	0.84	0.46	0.12
SPM02-(11)-1	460	1.31	0.14	0.55	1.02	0.51	0.18
SPM02-(12)-2	467	1.51	0.13	0.53	1.61	0.62	0.12
SPM02-(13)-1	480	1.57	0.12	0.51	1.73	0.63	0.23
SPM02-(14)-1	461	1.45	0.16	0.55	1.09	0.52	0.12
SPM02-(16)-3	460	1.39	0.22	0.54	1.74	0.63	-
SPM02-(17)-2	465	1.57	0.17	0.68	1.95	0.66	-
SPM02-(18)-4	459	1.32	0.21	0.62	1.66	0.62	-
SPM02-(20)-1	460	1.13	0.28	0.79	-	-	-

表4 玛曲地区巴贡组烃源岩生物标志化合物参数

Table 4 Biomarker parameters of source rocks in the Bagong Formation, Maqu area

样品	主峰 碳数	Pr Ph	Pr nC ₁₇	Ph nC ₁₈	三环萜烷 C ₃₀ H	C ₂₁ - C ₂₂₊	C ₂₁₊₂₂ C ₂₈₊₂₉	规则甾烷(%)		
								C ₂₇	C ₂₈	C ₂₉
SPM02-(3)-4	19	1.07	0.19	0.18	0.58	0.65	1.31	0.34	0.25	0.41
SPM02-(5)-3	20	1.10	0.16	0.13	0.73	0.76	1.57	0.41	0.21	0.38
SPM02-(7)-2	20	0.62	0.20	0.22	0.34	0.50	1.21	0.37	0.29	0.34
SPM02-(8)-1	20	0.97	0.14	0.13	0.13	0.56	1.25	0.31	0.31	0.38
SPM02-(10)-1	19	1.40	0.33	0.28	0.15	0.78	1.09	0.40	0.18	0.42
SPM02-(11)-1	27	0.95	0.13	0.15	0.46	0.51	0.83	0.46	0.27	0.27
SPM02-(12)-2	20	0.88	0.21	0.26	0.86	0.63	1.21	0.52	0.15	0.33
SPM02-(13)-1	20	1.57	0.47	0.29	0.44	0.72	1.39	0.25	0.15	0.60
SPM02-(14)-1	17	0.96	0.18	0.19	0.83	0.63	1.07	0.44	0.30	0.26
SPM02-(16)-3	17	1.75	0.23	0.14	0.25	0.63	0.95	0.58	0.19	0.23
SPM02-(17)-2	20	1.40	0.25	0.16	0.69	0.72	1.64	0.30	0.27	0.43
SPM02-(18)-4	19	1.78	0.37	0.24	1.21	0.84	1.20	0.37	0.28	0.35
SPM02-(20)-1	19	1.52	0.49	0.38	0.69	0.74	1.08	-	-	-

混合输入,其中藻类和水生浮游生物的贡献略大(Didyk et al., 1978; Peters et al., 2007; Yang Dan et al., 2024)。

4.2 甾烷

甾烷主要源自真核生物的甾醇,在沉积过程中经微生物作用和热成熟转化为 C₂₇ 至 C₃₀ 的甾烷系列,是判断烃源岩有机质来源的重要生物标志物(Volkman, 1986)。其中, C₂₇ 甾烷主要来源于海洋浮游藻类和动物, C₂₈ 甾烷常反映特定藻类(如硅藻或绿藻)贡献, C₂₉ 甾烷则多源于陆生高等植物。 C₂₇-C₂₈-C₂₉ 甾烷的相对含量可反映有机质中水生生物与陆源植物的比例(Moldowan et al., 1985)。本

研究样品中(表3), C₂₇ 甾烷含量介于 25.0%~58.0%(平均值为 39.6%), C₂₉ 介于 23.0%~60.0%(平均值为 36.7%), C₂₈ 最低(平均值为 23.8%)。

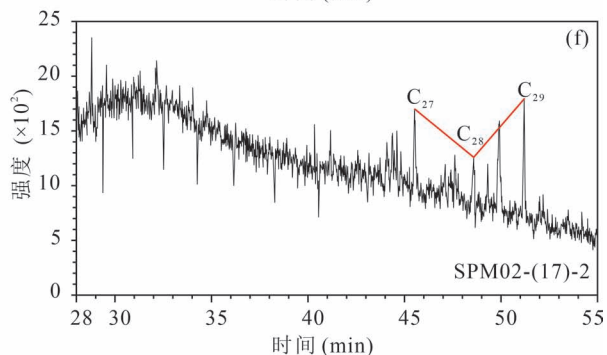
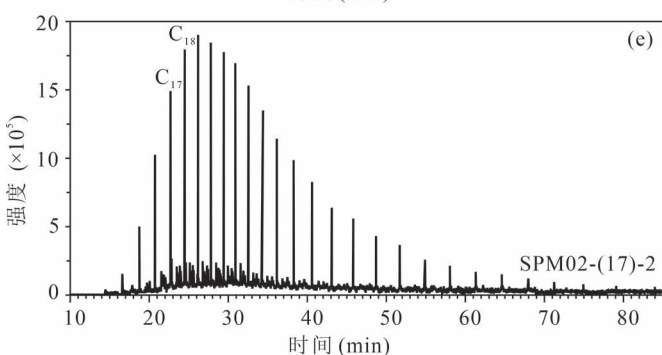
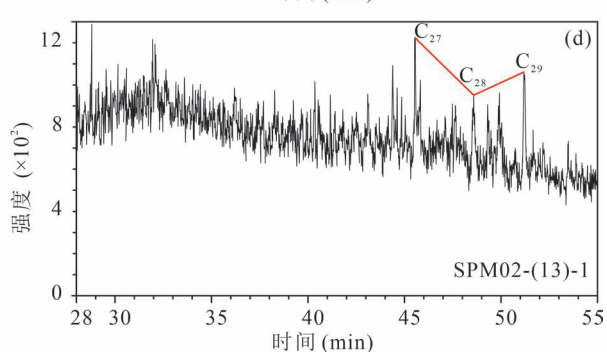
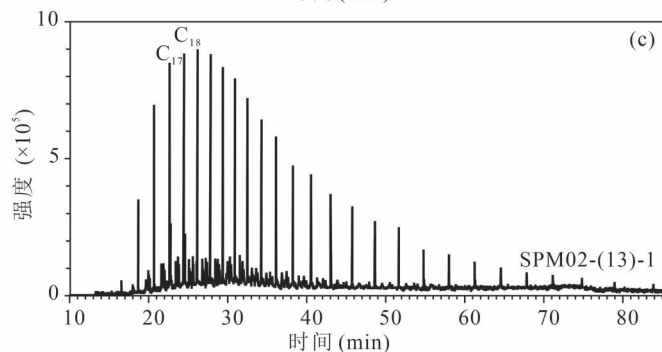
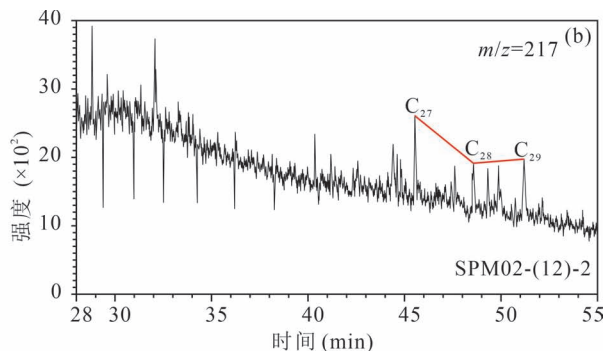
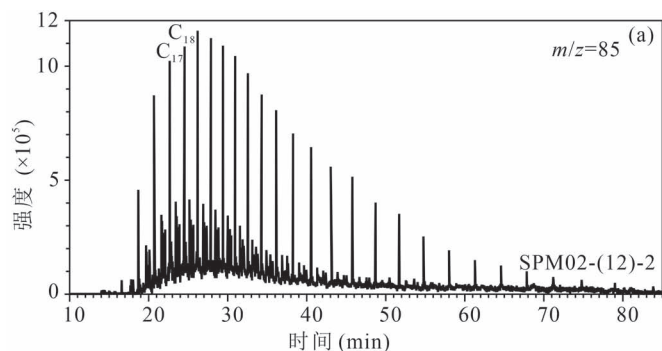


图8 玛曲地区上三叠统巴贡组正构烷烃($m/z=85$)与甾烷($m/z=217$)质谱—色谱特征图

Fig. 8 Mass chromatograms of n-alkanes ($m/z=85$) and steranes ($m/z=217$) in the Upper Triassic Bagong Formation, Maqu area
 ((a) 样品 SPM02-(12)-2 正构烷烃图谱; (b) 样品 SPM02-(12)-2 甾烷图谱; (c) 样品 SPM02-(13)-1 正构烷烃图谱;
 (d) 样品 SPM02-(13)-1 甾烷图谱; (e) 样品 SPM02-(17)-2 正构烷烃图谱; (f) SPM02-(17)-2 甾烷图谱
 (a) (a) N-alkane spectrum of sample SPM02-(12)-2; (b) Sterane spectrum of sample SPM02-(12)-2; (c) N-alkane spectrum of sample SPM02-(13)-1; (d) Sterane spectrum of sample SPM02-(13)-1; (e) N-alkane spectrum of sample SPM02-(17)-2; (f) Sterane spectrum of sample SPM02-(17)-24.2 甾烷

甾烷分布模式在色谱图上呈现出典型的“L”型和“V”型峰高特征(图8b、d、f),表明有机质为混合来源,低等水生生物贡献略高于陆源植物,部分样品以陆源植物为主导输入(Peters et al., 2007)。并且C27-C28-C29甾烷相对含量三角图表明(图9),研究区巴贡组烃源岩的有机质类型主要为II₁-II₂型,其母质来源体现了低等水生生物和陆源高等植物的双重贡献。

4.3 甾烷与伽马蜡烷

泥页岩样品($n=13$)的甾烷类化合物组成特征相似,表明有机质来源相对稳定(Peters et al., 2007)。三环甾烷含量中等(表4),三环甾烷/C₃₀藿烷值为0.13~1.21(平均值为0.57),反映了水生生物(藻类、细菌)和陆源植物的共同贡献(Tissot, 1979; Peters et al., 2007)。作为古环境判别的辅助指标,Pr/Ph>1.0常指示氧化性沉积环境,Pr/Ph<1.0多指示还原性环境(Didyk et al., 1978)。研究区样品Pr/Ph为0.62~1.78(平均值为1.23),少数样品<1,显示局部具有还原性条件,多数样品>1,结合Pr/nC₁₇、Ph/nC₁₈数据(表3),表明沉积水体总体处于弱还原—亚氧化条件。检出伽马蜡烷的9件样品,伽马蜡烷/C₃₀藿烷值(G/C₃₀H)为0.12~0.23(平均值为0.16),属于低—中等水平,指示沉积时期水体具有一定盐度和分层;4件样品未检测出伽马蜡烷,可能为淡水或低盐度环境,表明沉积环境相对复杂。综合Pr/Ph、Pr/nC₁₇、Ph/nC₁₈、伽马蜡烷等生物标志物参数与沉积学特征,研究区泥页岩总体形成于受陆源供给影响的海相环境中,以弱还原—亚氧化条件为主,并存在一定程度的水体分层和盐度差异(Moldowan et al., 1985)。

5 生烃潜力评价

在玛曲地区巴贡组13个样品中,总有机碳含量在0.54%~2.32%(平均值为1.37%),氯仿沥青“A”含量在0.0206%~0.1821%(平均值为0.0786%),生烃潜力在0.12~2.21 mg/g(平均值为

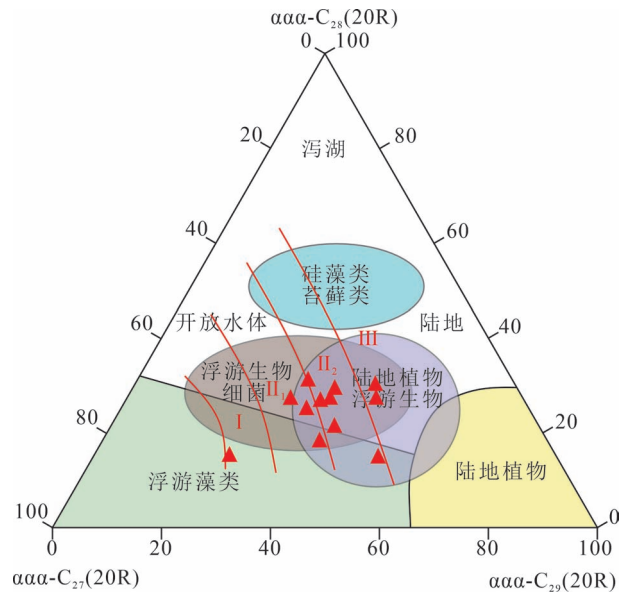


图9 玛曲地区上三叠统巴贡组C₂₇-C₂₈-C₂₉甾烷三角判别图

Fig. 9 Ternary diagram of C₂₇-C₂₈-C₂₉ regular steranes in the Upper Triassic Bagong Formation, Maqu area

0.95 mg/g),所有样品均达到了烃源岩标准,综合判定有机质丰度达“中等—好”烃源岩级别;显微组分主要包含腐泥组、镜质组、惰质组,干酪根碳同位素值 $\delta^{13}C_{PDB}$ 介于-29.8‰~-27.3‰(平均值为-28.6‰),Pr/nC₁₇值介于0.13~0.49(平均值为0.26),Ph/nC₁₈值介于0.13~0.38(平均值为0.21),综合判定有机质类型为II₁-II₂型;R₀值在1.13~1.57(平均值为1.39),T_{max}在455~480℃(平均值为462.5℃), $\beta\alpha C_{30}$ 藿烷/ $\alpha\beta C_{30}$ 藿烷值为0.02~0.28(平均值为0.16),C₃₁升藿烷22S/(22S+22R)值为0.51~0.79(平均值为0.58),Ts/Tm为0.84~1.95(平均值为1.34),综合判定有机质成熟度处于成熟—高成熟阶段。正构烷烃系列化合物的分布模式以单峰型前峰态为主,C₂₁₋₁/C₂₂₊和C₂₁₊₂₂/C₂₈₊₂₉的平均值分别为0.67和1.21,指示海藻、水生浮游生物与陆源有机质混合输入,且以水生生物为主。甾烷以C₂₇(25.0%~58.0%)和C₂₉(23.0%~

表5 玛曲地区巴贡组泥页岩有机地球化学参数

Table 5 Organic geochemical parameters of source rocks in the Bagong Formation, Maqu area

钻井/剖面	TOC (%)	氯仿沥青“A” (%)	S ₁ +S ₂ (mg/g)	T _{max} (°C)	R ₀ (%)	δ ¹³ C _{PDB} (‰)	T ₁	有机质类型	厚度 (m)	范围值
										平均值 (样品数)
QZ-16井 (王剑等, 2025)	0.12 ~ 1.09 0.47(30)	0.0005 ~ 0.0019 0.0013(8)	0.05 ~ 0.90 0.36(13)	536 ~ 602 580(4)	2.44 ~ 2.77 2.62(8)		8.75 ~ 18.5 13.4(8)	II ₂	445.3	
QK-9井 (Wang Rui et al., 2025)	0.07 ~ 2.27 0.71(27)			498 ~ 557 513(13)	1.87 ~ 2.25 2.06(13)		14 ~ 29 21.13(13)	II ₂	524	
QK-8井 (张帅等, 2020)	0.50 ~ 2.42 1.37(17)			366 ~ 532 466(17)	1.27 ~ 1.43 1.37(17)			II ₂	465	
QZ-8井 (Lin Fei et al., 2025)	0.8 ~ 4.7 1.36(48)				1.00 ~ 1.29 1.17(10)			III	166.4	
QZ-7井 (宋春彦等, 2018)	0.32 ~ 1.29 0.69(14)	0.0096 ~ 0.0585 0.0194(14)	0.04 ~ 0.17 0.10(14)	470 ~ 551 504(14)	1.46 ~ 1.90 1.62(14)	-24.5 ~ -28.4 -26.2(14)	-33.5 ~ 11.25 -5.73(14)	II ₂ -III	241.2	
QS-9井 (Chen Cheng et al., 2025)	0.29 ~ 2.20 1.13(18)		0.01 ~ 1.60 0.34(18)	446 ~ 524 465(11)	1.07 ~ 1.8 1.4(10)			II ₂ -III	431.99	
SYG01井 (宁生伟等, 2024)	0.15 ~ 5.81 0.89(61)	0.01 ~ 0.17 0.08(6)	0.04 ~ 3.46 0.71(32)	363 ~ 506 454(32)	1.22 ~ 1.37 1.31(5)		36.0 ~ 70.0 56.0(9)	II ₁ -II ₂	80 (下部)	
SYG02井 (沈安江等, 2023)	0.65 ~ 1.65 1.21(3)	0.32 ~ 0.34 0.33(3)	0.70 ~ 1.62 1.16(2)					II ₁ -II ₂	52.1 (下部)	
鄂尔托陇巴剖面 (刘翔等, 2024)	0.06 ~ 3.46 1.14(92)	0.02 ~ 0.17 0.06(17)	0.28 ~ 1.86 0.75(28)	440 ~ 478 461(29)	0.95 ~ 1.46 1.33(20)	-25.2 ~ -27.4 -26.1(11)	-8.0 ~ 34.0 23.0(11)	II ₂	523	
冬曲剖面 (王忠伟等, 2022)	0.67 ~ 1.72 1.04(17)	0.0016 ~ 0.0040 0.0026(5)	0.08 ~ 0.11 0.284(5)	594 ~ 613 601(5)	1.27 ~ 1.42 1.33(5)		-9.5 ~ 14.0 5.2(5)	II ₂ -III	668.93	
铁龙剖面 (Peng Qinghua et al., 2025)	0.47 ~ 1.73 0.87(31)								326.45	

注:表中的数据为

范围值

60.0%)为主, C₂₈最低, 反映低等水生生物和陆源高等植物的双重贡献。三环萜烷/17α-藿烷值为0.13~1.21(平均值为0.57), Pr/Ph为0.62~1.78(平均值为1.23), 伽马蜡烷含量低—中等(伽马蜡烷/C₃₀藿烷值为0.12~0.23, 平均值为0.16), 显示部分样品形成于较高盐度环境, 其他为淡水或低盐度环境。沉积水体总体具有弱还原—亚氧化特征, 结合沉积学特征, 应属于受陆源供给影响的浅海陆棚环境。

结合玛曲地区近年来巴贡组烃源岩各钻井和剖面的有机质丰度、有机质类型、有机质成熟度和厚度等关键参数(表5), 总有机碳含量大部分都达到了烃源岩标准, 含量最高达5.81%, 但是氯仿沥青“A”、生烃潜力均较低, 有机质类型主要为II₁-III型, R₀平均值介于1.17~2.62, T_{max}平均值介于454~601°C, 有机质成熟度较高。综合判定玛曲地区巴贡组属于“中等—好”烃源岩, 油气生烃潜力较大, 对羌塘盆地油气勘探具有重要意义。

6 结论

(1) 玛曲地区巴贡组样品(n=13)基于总有机碳含量(TOC)、氯仿沥青“A”与生烃潜力(S₁+S₂), 判识有机质丰度为“中等—好”级别; 基于显微组分、干酪根碳同位素值(δ¹³C_{PDB})、Pr/nC₁₇与Ph/nC₁₈值, 判识有机质类型为II₁-II₂型; 基于R₀、T_{max}及藿烷参数, 判识有机质成熟度处于成熟—高成熟阶段。

(2) 基于正构烷烃、甾烷、萜烷及伽马蜡烷分布特征与沉积学特征, 判识有机质来源以水生生物(藻类、浮游生物)为主, 伴有显著陆源高等植物输入。沉积水体具有弱还原—亚氧化特征, 总体应属于受陆源供给影响的浅海陆棚环境。

(3) 综合评价表明玛曲地区巴

贡组为一套“中等—好”级别的烃源岩,具有较好的生烃潜力,勘探前景优质。

参 考 文 献 / References

(The literature whose publishing year followed by a “&” is in Chinese with English abstract; The literature whose publishing year followed by a “#” is in Chinese without English abstract)

陈文彬, 付修根, 谭富文, 冯兴雷, 曾胜强. 2015. 藏北羌塘盆地上三叠统典型剖面烃源岩地球化学特征研究. 中国地质, 42(4): 1151~1160.

程乐利, 陈文彬, 王剑, 陈恭洋, 万友利, 李学仁. 2021. 羌塘盆地雀莫错地区巴贡组包裹体特征及充注期次. 地质通报, 40(9): 1493~1501.

丁文龙, 李超, 苏爱国, 何忠华. 2011. 西藏羌塘盆地中生界海相烃源岩综合地球化学剖面研究及有利生烃区预测. 岩石学报, 27(3): 878~896.

付修根, 陈文彬, 曾胜强, 孙伟, 王剑. 2020. 羌塘盆地石油地质特征——来自地质调查钻井的信息. 北京: 科学出版社: 100~130.

何治亮, 金之钧, 李双建, 白国平, 吕雪雁, 郭金瑞, 高键, 殷进垠, 李英强, 郑定业. 2023. 特提斯演化控制下盆地原型、改造与油气差异富集——基于波斯湾盆地与四川盆地的比较分析. 中国科学: 地球科学, 53(12): 2914~2936.

黄籍中. 1988. 干酪根的稳定碳同位素分类依据. 地质地球化学, 16(3): 66~68.

李亚林, 付修根, 毕文军, 贺海洋. 2024. 羌塘盆地构造演化与油气生成和保存. 北京: 科学出版社: 200~270.

李亚林, 王成善, 黄继钧. 2008. 羌塘盆地褶皱变形特征、定型时间及其与油气的关系. 石油与天然气地质, 29(3): 283~289+296.

刘栩, 刘中戎, 庄新兵, 范志伟, 马泽良, 彭金宁, 李风勋, 李吉鹏, 李兴强. 2024. 羌塘盆地东部三叠系阿堵拉组烃源岩古沉积环境的地球化学证据. 石油实验地质, 46(3): 601~613.

卢双舫, 张敏. 2008. 油气地球化学. 北京: 石油工业出版社: 100~310.

南征兵, 李永铁, 郭祖军. 2008. 羌塘盆地油气显示及油源对比. 石油实验地质, 30(5): 503~507.

宁生伟, 谢渊, 付小东, 宋春彦, 刘琪, 熊绍云. 2024. 北羌塘坳陷东缘上三叠统巴贡组海相烃源岩特征及勘探启示. 海相油气地质, 29(1): 45~56.

秦建中, 刘宝泉. 2005. 海相不同类型烃源岩生排烃模式研究. 石油实验地质, 27(1): 74~80.

沈安江, 付小东, 张建勇, 魏学斌, 胡安平, 王剑, 熊绍云, 付修根, 谢渊, 刘思琪, 李茜, 王鑫, 贺训云, 乔占峰, 郑剑锋, 段军茂. 2023. 羌塘盆地上三叠统一下侏罗统海相页岩油特征及发现意义. 石油勘探与开发, 50(5): 962~974.

宋春彦, 王剑, 付修根, 陈文彬, 谢尚克, 何利. 2018. 羌塘盆地东部上三叠统巴贡组烃源岩特征及意义. 东北石油大学学报, 42(5): 104~114+131+132.

汤朝阳, 姚华舟, 牛志军, 段其发, 赵小明, 王建雄. 2007. 长江源各拉丹冬地区上三叠统巴贡组双壳类组合与环境初探. 古地理学报, 9(1): 59~68.

王剑, 丁俊, 王成善, 谭富文, 陈明, 胡平. 2009. 青藏高原油气资源战略选区调查与评价. 北京: 地质出版社: 420~500.

王剑, 付修根, 沈利军, 谭富文, 宋春彦, 陈文彬. 2020. 论羌塘盆地油气勘探前景. 地质论评, 66(5): 1091~1113.

王剑, 刘中戎, 王忠伟, 付修根, 范志伟, 何志勇, 曾胜强, 易建全. 2025. 北羌塘坳陷上三叠统黑色泥页岩有机地球化学特征与生烃潜力分析. 中国地质, 52(1): 61~77.

王岚, 周海燕, 商斐, 周学先. 2022. 松辽盆地北部白垩纪青山口组黑色页岩元素地球化学特征及沉积古环境恢复. 地质科学, 57(1): 156~171.

王忠伟, 肖杨, 占王忠, 余飞. 2022. 羌塘盆地东部上三叠统巴贡组泥岩特征及油气地质意义. 东北石油大学学报, 46(2): 1~12+131.

伊海生. 2025. 侏罗纪全球古海洋演变历程及其对西藏羌塘盆地油气勘探的启示. 地球学报, 46(3): 623~636.

曾胜强, 王剑, 陈文彬, 付修根, 宋春彦, 孙伟, 王东. 2021. 羌塘盆地东部晚三叠世—早中侏罗世沉积环境转变研究——来自地质浅钻岩芯的证据. 地质论评, 67(5): 1231~1244.

占王忠, 谭富文. 2020. 羌塘盆地晚三叠世岩相古地理特征与烃源岩. 沉积学报, 38(4): 876~885.

张帅, 祝有海, 王平康, 付修根, 王大勇, 伍新和, 庞守吉, 肖睿. 2020. 羌塘盆地雀莫错地区天然气水合物成藏条件分析. 中国地质调查, 7(4): 10~19.

Chen Cheng, Wu Zhenhan, Wang Li, Ji Changjun, Chen Yun. 2025. Geochemical characteristics and controlling factors of organic matter enrichment in the bagong formation source rocks, eastern Qiangtang Basin. Acta Geologica Sinica - English Edition, 99(6): 1804~1818.

Chen Wenbin, Fu Xiugen, Tan Fuwen, Feng Xinglei, Zeng Shengqiang. 2015&. Geochemical characteristics of Upper Triassic source rocks from typical sections in Qiangtang Basin, northern Tibet. Geology in China, 42(4): 1151~1160.

Cheng Leli, Chen Wenbin, Wang Jian, Chen Gongyang, Wan Youli, Li Xueren. 2021&. Organic inclusion and hydrocarbon charging events of the Bagong Formation in the Quemoco area, Qiangtang Basin. Geological Bulletin of China, 40(9): 1493~1501.

Dewey J F, Shackleton R M, Chengfa C, Yiyin S. 1988. The tectonic evolution of the Tibetan Plateau. Philosophical Transactions of the Royal Society of London. Series A, Mathematical and Physical Sciences, 327(1594): 379~413.

Didyk B M, Simoneit B R T, Brassell S C, Eglinton G. 1978. Organic geochemical indicators of Palaeoenvironmental conditions of sedimentation. Nature, 272(5650): 216~222.

Ding Wenlong, Li Chao, Su Aiguo, He Zhonghua. 2011&. Study on the comprehensive geochemical cross section of Mesozoic marine source rocks and prediction of favorable hydrocarbon generation area in Qiangtan basin, Tibeta. Acta Petrologica Sinica, 27(3): 878~896.

Fu Xiugen, Chen Wenbin, Zeng Shengqiang, Sun Wei, Wang Jian. 2020&. Petroleum geological characteristics of Qiangtang Basin—Information from geological survey drilling. Beijing: Science Press: 100~130.

Fu Xiugen, Wang Jian, Wen Huaguo, Wang Zhongwei, Zeng Shengqiang, Song Chunyan, Chen Wenbin, Wan Youli. 2020. A possible link between the Carnian Pluvial Event, global carbon-cycle perturbation, and volcanism: New data from the Qinghai-Tibet Plateau. Global and Planetary Change, 194: 103300.

He Zhiliang, Jin Zhijun, Li Shuangjian, Bai Guoping, Lü Xueyan, Guo Jinrui, Gao Jian, Yin Jinyin, Li Yingqiang, Zheng Dingye. 2023&. Prototypes, modifications, and hydrocarbon enrichment variations in basins influenced by Tethyan evolution: A comparative analysis of the Persian Gulf Basin and the Sichuan Basin. Scientia

- Sinica (Terrae), 53(12): 2914~2936.
- He Zhiliang, Jin Zhijun, Li Shuangjian, Bai Guoping, Lü Xueyan, Guo Jinrui, Gao Jian, Yin Jinyin, Li Yingqiang, Zheng Dingye. 2023. Prototypes, modifications, and hydrocarbon enrichment variations in basins influenced by Tethyan evolution: A comparative analysis of the Persian Gulf Basin and the Sichuan Basin. *Science China Earth Sciences*, 66(12): 2871~2897.
- Huang Jizhong. 1988. Classification basis of stable carbon isotope of kerogen. *Geology-geochemistry*, 16(3): 66~68.
- Li Yalin, Fu Xiugen, Bi Wenjun, He Haiyang. 2024. Tectonic evolution and hydrocarbon generation and preservation in Qiangtang basin. Beijing: Science Press: 200~270.
- Li Yalin, Wang Chengshan, Huang Jijun. 2008. Deformation characteristics and finalizing age of the folds in the Qiangtang Basin and their relations to oil and gas accumulation. *Oil & Gas Geology*, 29(3): 283~289+296.
- Lin Fei, Wang Jian, Mansour A, Fu Xiugen, Su Shaohua, Nie Ying, Ahmed M S, Zeng Shengqiang, Li Xueren. 2025. Deoxygenation preceding the Carnian Pluvial Episode (Late Triassic) in the Qiangtang Basin (Tibetan Plateau): Implications for organic and inorganic geochemistry and petrography. *Marine and Petroleum Geology*, 173: 107289.
- Liu Xu, Liu Zhongrong, Zhuang Xinbing, Fan Zhiwei, Ma Zeliang, Peng Jinning, Li Fengxun, Li Jipeng, Li Xingqiang. 2024. Geochemical evidence of paleo-depositional environment of Triassic Adula Formation source rocks of eastern Qiangtang Basin. *Petroleum Geology & Experiment*, 46(3): 601~613.
- Lu Shuangfang, Zhang Min. 2008. Oil and Gas Geochemistry. Beijing: Petroleum Industry Press: 100~310.
- Ma Anlin, Hu Xiumian, Garzanti E, Boudagher-Fadel M, Xue Weiwei, Han Zhong, Wang Ping. 2023. Paleogeographic and tectonic evolution of Mesozoic Qiangtang basins (Tibet). *Tectonophysics*, 862: 229957.
- Moldowan J M, Seifert W K, Gallegos E J. 1985. Relationship between petroleum composition and depositional environment of petroleum source rocks. *AAPG Bulletin*, 69(8): 1255~1268.
- Nan Zhengbing, Li Yongtie, Guo Zujun. 2008. Hydrocarbon show and correlation between oil and source rock in the Qiangtang basin. *Petroleum Geology & Experiment*, 30(5): 503~507.
- Ning Shengwei, Xie Yuan, Fu Xiaodong, Song Chunyan, Liu Qi, Xiong Shaoyun. 2024. Characteristics of marine source rock of Bagong Formation and exploration significance in the eastern margin of North Qiangtang Depression, Qiangtang Basin. *Marine Origin Petroleum Geology*, 29(1): 45~56.
- Peng Qinghua, Du Baiwei, Peng Jie, Liu Zhenfeng, Danzeng Pingcuo. 2025. Geochemical characteristics of the Upper Triassic Bagong formation mudstones in the eastern North Qiangtang depression and their constraints on the provenance, Palaeoclimate and Palaeoenvironment. *Frontiers in Earth Science*, 13: 1596376.
- Peters K E, Walters C C, Moldowan J M. 2007. The biomarker guide: Volume 1, biomarkers and isotopes in the environment and human history. Cambridge: Cambridge University Press: 270~350.
- Qin Jianzhong, Liu Baoquan. 2005. Study on hydrocarbon generation and expulsion models of different types of marine source rocks. *Petroleum Geology & Experiment*, 27(1): 74~80.
- Shen Anjiang, Fu Xiaodong, Zhang Jianyong, Wei Xuebin, Hu Anping, Wang Jian, Xiong Shaoyun, Fu Xiugen, Xie Yuan, Liu Siqi, Li Xi, Wang Xin, He Xunyun, Qiao Zhanfeng, Zheng Jianfeng, Duan Junmao. 2023. Characteristics and discovery significance of the Upper Triassic-Lower Jurassic marine shale oil in Qiangtang Basin, NW China. *Petroleum Exploration and Development*, 50(5): 962~974.
- Song Chunyan, Wang Jian, Fu Xiugen, Chen Wenbin, Xie Shangke, He Li. 2018. Geochemical characteristics and the significance of the Upper Triassic hydrocarbon source rocks of the Bagong formation in the eastern Qiangtang basin. *Journal of Northeast Petroleum University*, 42(5): 104~114+131+132.
- Song Peiping, Ding Lin, Li Zhenyu, Lippert P C, Yang Tianshui, Zhao Xixi, Fu Jiajun, Yue Yahui. 2015. Late Triassic paleolatitude of the Qiangtang block: Implications for the closure of the Paleo-Tethys Ocean. *Earth and Planetary Science Letters*, 424: 69~83.
- Tang Zhaoyang, Yao Huazhou, Niu Zhijun, Duan Qifa, Zhao Xiaoming, Wang Jianxiong. 2007. Preliminary discussion on bivalves assemblages and their environments of the Bagong Formation of Upper Triassic in Geladandong area, Yangtze Source Region. *Journal of Palaeogeography*, 9(1): 59~68.
- Tissot B. 1979. Effects on prolific petroleum source rocks and major coal deposits caused by sea-level changes. *Nature*, 277(5696): 463~465.
- Volkman J K. 1986. A review of sterol markers for marine and terrigenous organic matter. *Organic Geochemistry*, 9(2): 83~99.
- Wang Jian, Ding Jun, Wang Chengshan, Tan Fuwen, Chen Ming, Hu Ping. 2009. Investigation and evaluation of strategic selection of oil and gas resources in Qinghai-Tibet Plateau. Beijing: Geological Publishing House: 420~500.
- Wang Jian, Fu Xiugen, Shen Lijun, Tan Fuwen, Song Chunyan, Chen Wenbin. 2020. Prospect of the potential of oil and gas resources in Qiangtang Basin, Xizang (Tibet). *Geological Review*, 66(5): 1091~1113.
- Wang Jian, Fu Xiugen, Wei Hengye, Zheng Bo, Wang Zhongwei, Shen Lijun, Mansour A. 2024. An overview of the Qiangtang Basin: Geology, hydrocarbon resources and the role of the Tethyan evolution. *Journal of Asian Earth Sciences*, 266: 106128.
- Wang Jian, Liu Zhongrong, Wang Zhongwei, Fu Xiugen, Fan Zhiwei, He Zhiyong, Zeng Shengqiang, Yi Jianquan. 2025. Organic geochemical characteristics and hydrocarbon generation potential of Upper Triassic black shales in the North Qiangtang Depression. *Geology in China*, 52(1): 61~77.
- Wang Lan, Zhou Haiyan, Shang Fei, Zhou Xuexian. 2022. Element geochemical characteristics of black shale and paleo-sedimentary environmental restoration of Qingshankou Formation of the Cretaceous in the northern Songliao Basin. *Chinese Journal of Geology (Scientia Geologica Sinica)*, 57(1): 156~171.
- Wang Rui, Zhang Shuai, Zhang Guoqiang, Wu Xinhe, Song Jizheng, Pang Shouji, Yin Jianguo. 2025. The paleoenvironmental characteristics of the Upper Triassic Bagong Formation in the northern Qiangtang basin and its control action on organic matter enrichment. *Frontiers in Earth Science*, 13: 1580088.
- Wang Zhongwei, Wang Jian, Fu Xiugen, Zhan Wangzhong, Yu Fei, Feng Xinglei, Song Chunyan, Chen Wenbin, Zeng Shengqiang. 2017. Organic material accumulation of Carnian mudstones in the North Qiangtang Depression, eastern Tethys: Controlled by the paleoclimate, paleoenvironment, and provenance. *Marine and Petroleum Geology*, 88: 440~457.
- Wang Zhongwei, Wang Jian, Yu Fei, Fu Xiugen, Chen Wenbin, Zhan Wangzhong, Song Chunyan. 2021a. Geochemical characteristics of

- the Upper Triassic black mudstones in the eastern Qiangtang Basin, Tibet: Implications for petroleum potential and depositional environment. *Journal of Petroleum Science and Engineering*, 207: 109180.
- Wang Zhongwei, Xiao Yang, Zhan Wangzhong, Yu Fei. 2022&. Geochemical characteristics of the Upper Triassic Bagong Formation mudstones in Eastern Qiangtang Basin and its petroleum geological significance. *Journal of Northeast Petroleum University*, 46(2): 1~12+131.
- Wang Zhongwei, Yu Fei, Wang Jian, Fu Xiugen, Chen Wenbin, Zeng Shengqiang, Song Chunyan. 2021b. Palaeoenvironment evolution and organic matter accumulation of the Upper Triassic mudstones from the eastern Qiangtang Basin (Tibet), eastern Tethys. *Marine and Petroleum Geology*, 130: 105113.
- Yang Dan, Chen Wenshen, Huang Wenhao, Zhang Haisheng, Han Zhengbing, Lu Bing, Zhao Jun. 2024. Spatial and historical patterns of sedimentary organic matter sources and environmental changes in the Ross Sea, Antarctic: Implication from bulk and n-alkane proxies. *Frontiers in Marine Science*, 11: 1474189.
- Yi Haisheng. 2025&. Historical evolution of Jurassic paleo-ocean as a reference for petroleum exploration of the Qiangtang Basin in Tibetan Plateau. *Acta Geoscientica Sinica*, 46(3): 623~636.
- Yu Fei, Fu Xiugen, Xu Guang, Wang Zhongwei, Chen Wenbin, Zeng Shengqiang, Song Chunyan, Feng Xinglei, Wan Youli, Li Xueren. 2019. Geochemical, palynological and organic matter characteristics of the Upper Triassic Bagong Formation from the North Qiangtang Basin, Tibetan Plateau. *Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology*, 515: 23~33.
- Zeng Shengqiang, Wang Jian, Chen Wenbin, Fu Xiugen, Song Chunyan, Sun Wei, Wang Dong. 2021&. Late Triassic to Early—Middle Jurassic depositional environment transformation process study in the eastern Qiangtang Basin: Evidence from the record by the core samples. *Geological Review*, 67(5): 1231~1244.
- Zeng Yuhong, Fu Xiugen, Zeng Shengqiang, Du Gang. 2013. Upper Triassic potential source rocks in the Qiangtang basin, Tibet: Organic geochemical characteristics. *Journal of Petroleum Geology*, 36(3): 237~255.
- Zhang Kaijun, Xia Bangdong, Liang Xiwen. 2002. Mesozoic-Paleogene sedimentary facies and paleogeography of Tibet, western China: Tectonic implications. *Geological Journal*, 37(3): 217~246.
- Zhang Kaijun, Zhang Yuxiu, Xia Bangdong, He Youbin. 2006. Temporal variations of Mesozoic sandstone compositions in the Qiangtang block, northern Tibet (China): Implications for provenance and tectonic setting. *Journal of Sedimentary Research*, 76(8): 1035~1048.
- Zhang Kaijun, Zhang Yuxiu, Li Bing, Zhong Lifeng. 2007. Nd isotopes of siliciclastic rocks from Tibet, western China: Constraints on provenance and pre-Cenozoic tectonic evolution. *Earth and Planetary Science Letters*, 256(3~4): 604~616.
- Zhang Kaijun, Tang Xianchun, Wang Yang, Zhang Yuxiu. 2011. Geochronology, geochemistry, and Nd isotopes of early Mesozoic bimodal volcanism in northern Tibet, western China: Constraints on the exhumation of the central Qiangtang metamorphic belt. *Lithos*, 121(1~4): 167~175.
- Zhan Wangzhong, Tan Fuwen. 2020&. Lithofacies Palaeogeography and source rock of the Late Triassic in the Qiangtang basin. *Acta Sedimentologica Sinica*, 38(4): 876~885.
- Zhang Qian, Fu Xiugen, Wang Jian, Mansour A, Wei Hengye, Zhang Tan, Wang Meng. 2024. Orbitally-paced climate change during the carnian pluvial episode. *Earth and Planetary Science Letters*, 626: 118546.
- Zhang Shuai, Zhu Youhai, Wang Pingkang, Fu Xiugen, Wang Dayong, Wu Xinhe, Pang Shouji, Xiao Rui. 2020&. Analysis of the gas hydrate accumulation condition in Quemocuo area of Qiangtang Basin. *Geological Survey of China*, 7(4): 10~19.

Organic geochemical characteristics and hydrocarbon generation potential evaluation of the Upper Triassic Bagong Formation mudstones and shales in the Maqu Area, Tibetan Plateau

LU Kunjie¹⁾, SHI Lizhi¹⁾, WANG Zhuozhuo²⁾, HUANG Jingyi³⁾, CUI Xinyu¹⁾, CHENG Jingtao³⁾

1) Chinese Academy of Geological Sciences, Beijing, 100037; 2) Beijing Institute of Engineering Geology, Beijing, 100048;

3) Institute of Disaster Prevention, Sanhe, Hebei, 065201

Objective: The Late Triassic period in the Qiangtang Basin on the Tibetan Plateau saw the development of a widely distributed, thick sequence of dark gray to black mudstone and shale, exhibiting significant hydrocarbon generation potential. This study aims to elucidate the organic geochemical characteristics and hydrocarbon generation potential of this mudstone sequence.

Methods: To investigate the organic geochemical properties, a comprehensive set of analyses was conducted, including total organic carbon (TOC) content, chloroform bitumen “A” extraction, Rock-Eval pyrolysis, vitrinite reflectance measurements, kerogen carbon isotope analysis, and biomarker analysis.

Results: TOC values range from 0.54% to 2.32% (average 1.37%), chloroform bitumen “A” ranges from 0.0206% to 0.1821% (average 0.0786%), and hydrocarbon potential (S_1+S_2) varies from 0.12 to 2.21 mg/g (average 0.95 mg/g), indicating moderate to good organic matter abundance. Kerogen $\delta^{13}C_{PDB}$ values range from –

29.8‰ to -27.3‰ (average -28.6‰), with Pr/nC₁₇ values ranging from 0.13 to 0.49 (average 0.26) and Ph/nC₁₈ values ranging from 0.13 to 0.38 (average 0.21); combined with maceral data, these point to predominantly Type II₁-II₂ kerogen. R_o values range from 1.13% to 1.57% (average 1.39%), T_{max} values range from 455 to 480°C (average 462.5°C), βαC₃₀moretane/αβC₃₀hopane ratios range from 0.02 to 0.28 (average 0.16), C₃₁ homohopane 22S/(22S+22R) ratios range from 0.51 to 0.79 (average 0.58), and Ts/Tm ratios range from 0.84 to 1.95 (average 1.34), confirming mature to highly mature stages. The n-alkane, sterane, terpane, and gammacerane parameters further suggest that the primary source of organic matter is aquatic organisms (algae, plankton), with significant input from terrestrial higher plants. The depositional water environment exhibits weakly reducing to suboxic characteristics, suggesting that the overall environment is a shallow marine shelf influenced by terrestrial input.

Conclusions: Based on key parameters such as organic matter abundance, maturity, and type in the source rocks, together with insights into organic matter provenance and depositional setting, the Bagong Formation in the Maqu area of the Tibetan Plateau is evaluated as a "fair to good" source rock with substantial hydrocarbon generation potential.

Keywords: Tibetan Plateau; Maqu area; Bagong Formation; source rock; geochemical characteristics; hydrocarbon generation potential

Acknowledgement: This research was funded by the China Geological Survey Project (No. DD20230200102) and Deep Earth Probe and Mineral Resources Exploration—National Science and Technology Major Project (No. 2025ZD1006605)

First author: LU Kunjie, male, born in 2001, master's degree student, geological resources and geological engineering major; lukunjie2001@163.com

Corresponding author: SHI Lizhi, male, born in 1976, senior engineer, and doctoral supervisor, is mainly engaged in oil and gas exploration and comprehensive petroleum geology studies; 86547864@qq.com

Manuscript received on: 2025-09-14; Accepted on: 2025-12-20; Published online on: 2026-02-15

Doi: 10.16509/j.georeview.2026.01.041

Edited by: LIU Zhiqiang

