

引用本文: 刘栩, 刘中戎, 庄新兵, 等. 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[J]. 石油实验地质, 2024, 46(3): 601-613. DOI: 10.11781/sysydz202403601.

LIU Xu, LIU Zhongrong, ZHUANG Xinbing, et al. Geochemical evidence of paleo-depositional environment of Triassic Adula Formation source rocks of eastern Qiangtang Basin[J]. Petroleum Geology & Experiment, 2024, 46(3): 601-613. DOI: 10.11781/sysydz202403601.

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

刘 栩^{1,2}, 刘中戎³, 庄新兵^{1,2}, 范志伟³, 马泽良^{1,2},
彭金宁^{1,2}, 李风勋^{1,2}, 李吉鹏^{1,2}, 李兴强^{1,2}

1. 中国石化油气成藏重点实验室, 江苏 无锡 214126;

2. 中国石化 石油勘探开发研究院 无锡石油地质研究所, 江苏 无锡 214126;

3. 中国石化 勘探分公司, 成都 610041

摘要: 上三叠统阿堵拉组泥岩是羌塘盆地重要烃源岩系之一, 目前对其古沉积环境的认识存在较大争议。通过对羌塘盆地东部雀莫错地区鄂尔托陇巴剖面阿堵拉组开展岩石学、有机地球化学和元素地球化学分析等系统研究, 探讨阿堵拉组烃源岩古沉积环境及其对烃源岩发育的影响。阿堵拉组泥岩总有机碳 (TOC) 含量为 0.27%~3.46%, 平均为 1.60%, 总体为好烃源岩, 局部发育优质烃源岩; 阿堵拉组下段陆棚相泥岩形成于海平面上升时期, 水体较深且贫氧, 古气候为半干燥—半湿润气候, 化学风化程度中等, 陆源输入较低, 水体盐度较高; 上段泥岩沉积期处于盆地萎缩消亡阶段, 沉积环境逐渐由陆棚相转变为三角洲相, 水体较浅且富氧, 经历了干燥—半干燥—半湿润的古气候变化, 陆源输入相应增多, 为咸水—半咸水环境, 受到淡水输入的影响。阿堵拉组的源岩为长英质火山岩, 源区构造背景以大陆岛弧为主, 可能来自早—中三叠世金沙江缝合带岛弧源区。阿堵拉组下段陆棚相泥岩 TOC 含量与氧化还原条件指标具有较好的正相关性, 表明烃源岩发育主要受到海平面上升时贫氧水体控制; 上段陆棚—三角洲相泥岩 TOC 含量与古环境参数无明显相关性, TOC 含量大于 2% 的泥岩沉积期具有较高陆源输入和相对湿润的古气候, 综合分析认为烃源岩发育受到古气候、陆源输入等多种因素综合影响。

关键词: 古沉积环境; 源区构造背景; 烃源岩; 阿堵拉组; 羌塘盆地

中图分类号: TE121.1

文献标识码: A

DOI: 10.11781/sysydz202403601

Geochemical evidence of paleo-depositional environment of Triassic Adula Formation source rocks of eastern Qiangtang Basin

LIU Xu^{1,2}, LIU Zhongrong³, ZHUANG Xinbing^{1,2}, FAN Zhiwei³, MA Zeliang^{1,2},

PENG Jinning^{1,2}, LI Fengxun^{1,2}, LI Jipeng^{1,2}, LI Xingqiang^{1,2}

1. Key Laboratory of Hydrocarbon Accumulation, SINOPEC, Wuxi, Jiangsu 214126, China;

2. Wuxi Research Institute of Petroleum Geology, SINOPEC, Wuxi, Jiangsu 214126, China;

3. SINOPEC Exploration Company, Chengdu, Sichuan 610041, China

Abstract: The mudstone within the Upper Triassic Adula Formation constitutes a crucial hydrocarbon source rock reservoir in the Qiangtang Basin, yet there is considerable debate regarding its paleo-depositional environment. Through systematic studies, including petrology, organic geochemistry, and elemental geochemistry analyses of the Adula Formation at the Eertuolongba section in the Quemocuo area of the eastern Qiangtang Basin, this study investigated the paleo-depositional environment of the Adula Formation source rocks and its impact on hydrocarbon source rock development. The total organic carbon (TOC) content of the Adula Formation mudstone ranges from 0.27% to 3.46%, with an average of 1.60%, indicating overall favorable source rocks with locally developed high-quality source rocks. The shelf facies mudstone in the lower section of the Adula Formation was formed

收稿日期 (Received): 2023-10-24; 修订日期 (Revised): 2024-04-09; 出版日期 (Published): 2024-05-28.

作者简介: 刘栩 (1996—), 男, 硕士, 从事烃源岩评价研究。E-mail: liux96.syky@sinopec.com.

基金项目: 中国石化科技攻关项目 (P22197, P22198) 资助。

© Editorial Office of Petroleum Geology & Experiment. This is an open access article under the CC BY-NC-ND license.

during a phase of sea-level rise, characterized by deeper, oxygen-poor water, a semi-arid to semi-humid paleoclimate, moderate chemical weathering, minimal terrigenous input, and higher salinity. The deposition of the upper section occurred during a phase of basin contraction and demise, suggesting a transition from shelf facies to delta facies. This period was marked by relatively shallower, oxygen-rich water and a shift from arid to semi-arid to semi-humid paleoclimate, with increased terrigenous input and a saline to semi-saline water environment influenced by freshwater input. The source rocks of the Adula Formation are felsic volcanic rocks, primarily from a continental island arc tectonic setting, likely sourced from the island arc source domain in the Jinsha River suture zone during the Early to Middle Triassic. In the lower section of the Adula Formation, the TOC content of shelf facies mudstone shows a robust positive correlation with redox condition indicators, suggesting that source rock development was mainly controlled by oxygen-poor water conditions during sea-level rise period. In contrast, no significant correlation was observed between TOC content and paleo-environmental parameters in the upper shelf delta facies mudstones. Mudstones with TOC content greater than 2% were likely deposited during periods of high terrigenous input and relatively humid paleoclimate, indicating that source rock development was influenced by multiple factors such as paleoclimate and terrigenous input.

Key words: paleo-depositional environment; source area tectonic background; source rock; Adula Formation; Qiangtang Basin

羌塘盆地位于全球油气富集区特提斯构造域东段,是我国最大的中生代海相残留盆地,其油气地质条件与特提斯构造域西段中东油气富集区相似,具备大型油气田形成的物质基础及地质背景,油气资源前景备受关注^[1-3]。晚三叠世羌塘盆地内普遍沉积了厚 40~650 m 的暗色泥页岩层系,平均厚度可达 100~200 m,是研究区内主要烃源岩之一^[4-6]。目前认为北羌塘坳陷上三叠统泥页岩主要发育于阿堵拉组^[7],对应原肖茶卡组(或巴贡组)。前人围绕阿堵拉组泥页岩开展了大量野外露头观测、岩心观察、烃源岩评价等研究,认识到其有机碳(TOC)含量、有机质类型、有机质热演化程度非均质性极强,在北羌塘坳陷内,烃源岩品质总体较好^[8-9]。近年来多口地质浅钻井、地表露头揭示北羌塘坳陷东部地区阿堵拉组黑色泥岩厚度在 250~350 m,TOC 含量最高达 3.56%,其中 TOC 含量大于 2% 的泥岩厚度可达 30 m 以上,有机质类型以 II 型为主^[4,10-12]。由此可见,北羌塘坳陷东部地区阿堵拉组泥页岩是羌塘盆地内最重要的烃源岩之一,是羌塘盆地当前研究重点。

烃源岩的发育与古沉积环境密切相关^[13-16],但目前对阿堵拉组泥页岩古沉积环境的认识存在较大分歧。例如,占王忠等^[17]依据羌塘盆地东部冬曲地区阿堵拉组中发现了深海—半深海复理石标志 *Paleodictyon* 古网迹遗迹化石,认为冬曲地区在晚三叠世属于深海、贫氧、高盐度沉积环境;而王忠伟等^[18]则依据元素地球化学、岩石学等特征认

为该区阿堵拉组泥岩具有半咸水、氧化水体沉积特征,为三角洲沉积环境。宋春彦等^[11]依据有机地球化学特征认为羌塘盆地东部雀莫错地区阿堵拉组泥页岩形成于超盐度还原环境,为前三角洲沉积。而 YU 等^[19]则认为该区上阿堵拉组泥页岩形成于氧化—贫氧的咸水环境。

泥页岩中主、微量元素(包括稀土元素)特征在成岩后期和风化作用中相对稳定,因而在恢复古沉积环境和源区构造背景等方面得到了有效应用^[20-23]。针对上述存在问题,本文以羌塘盆地东部地区鄂尔托陇巴剖面上三叠统泥页岩为研究对象,通过薄片观察、有机碳含量和元素地球化学分析等对羌塘盆地东部地区晚三叠世古气候、古盐度、古氧化还原条件、陆源输入、物源类型及源区构造背景等进行系统研究,进而探讨古沉积环境演化及对烃源岩发育的影响,为羌塘盆地油气勘探提供基础地质依据。

1 地质概况

羌塘盆地位于青藏高原中部,面积为 22×10^4 km²,是在前寒武系结晶基底和古生界褶皱基底之上发育的中生代海相沉积盆地,包含完整的中生界地层序列^[24]。羌塘盆地南、北部分别以班公湖—怒江缝合带和可可西里—金沙江缝合带为界(图 1a),自北向南依次划分为北羌塘坳陷、中央隆起带和南羌塘坳陷 3 个次级构造单元^[25],研究区位于北羌塘坳陷东部(图 1a)。

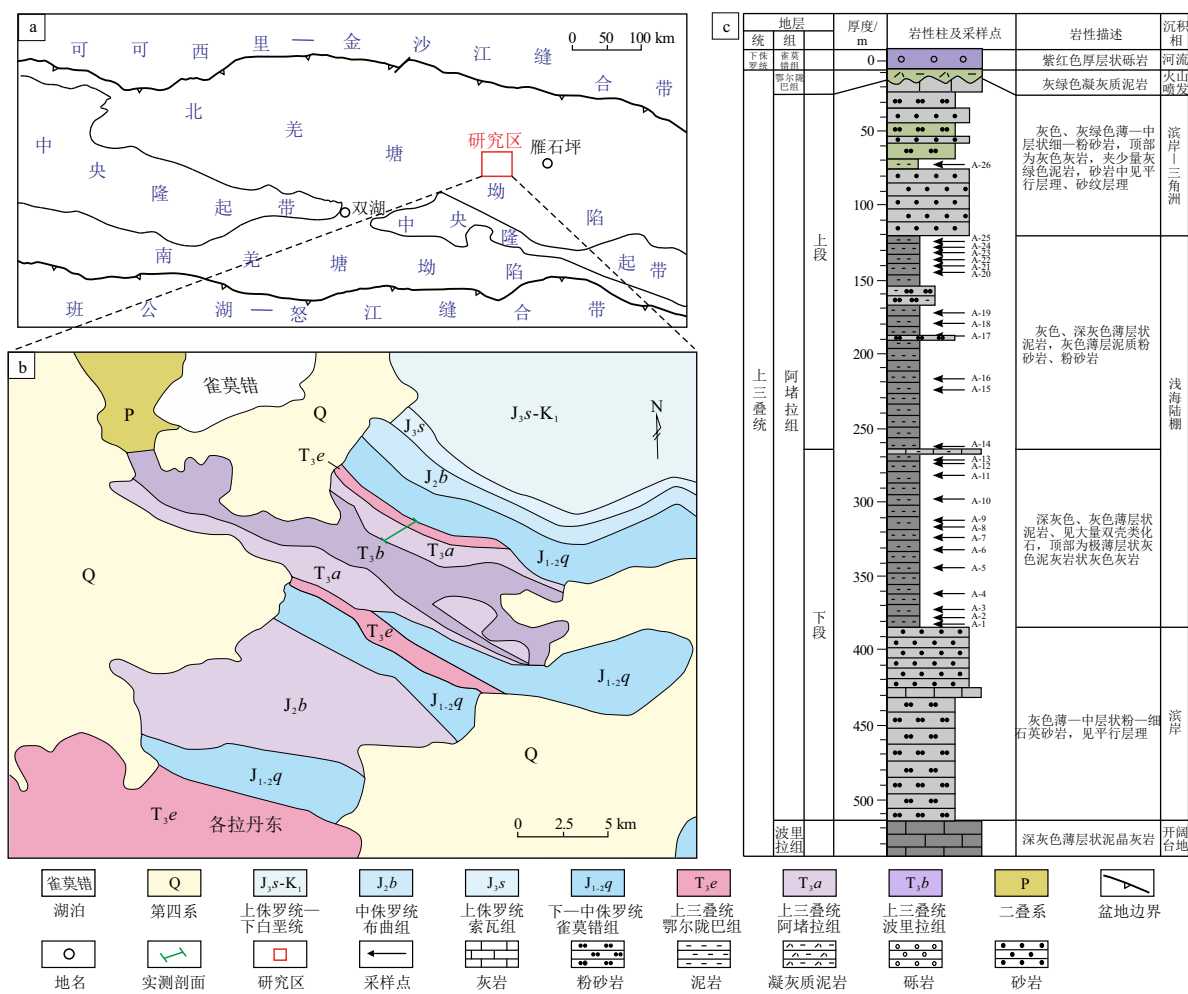


图1 羌塘盆地构造单元(a),研究区地表地层分布(b)及鄂尔托陇巴剖面地层柱状图(c)
图b修改自参考文献[23]。

Fig.1 Tectonic units of Qiangtang Basin (a), surface stratigraphic distribution in study area (b) and lithology column of Eertuolongba section (c)

晚三叠世,金沙江洋向南俯冲、闭合控制了北羌塘前陆盆地的形成^[26]。羌塘盆地东部上三叠统自下而上依次为甲丕拉组(T_{3j}),波里拉组(T_{3b}),阿堵拉组(T_{3a})和鄂尔托陇巴(T_{3e})组。卡尼期—诺利期,在盆地东部,甲丕拉组沉积期主要为扇三角洲环境,沉积了灰色、紫红色砂岩、砾岩;波里拉组沉积期,对应裂谷活动间歇期,受到海平面上升影响,缺乏陆源碎屑供给,沉积了缓坡相深灰色、灰黑色泥晶灰岩、泥质灰岩;阿堵拉组沉积期,沉积环境再次转换,早期以滨岸相环境为主,沉积了薄—中层状粉细石英砂岩,见平行层理,随后在海平面上升影响下发育了大套黑色、深灰色泥页岩,晚期海平面下降,发育滨岸相薄—中层状粉细石英砂岩;诺利期晚期羌塘盆地构造性质全面反转,北羌塘坳陷全面隆升为剥蚀区,结束了前陆盆地演化;中—一晚瑞替期北羌塘坳陷发生裂谷作用,沉积了一套火山喷发—火山碎屑岩,随后

三叠纪沉积结束^[27-30]。

2 样品与方法

研究样品采集于羌塘盆地东部雀莫错地区鄂尔托陇巴剖面(图1a,b)。该剖面全长523 m,底部为灰色中薄层状粉—细石英砂岩,与下伏波里拉组呈整合接触(图1c);中部发育大套陆棚相深灰色泥岩夹薄层泥灰岩、泥质粉砂岩、粉砂岩,累计厚253 m,由中部泥灰岩夹层为界可分为上段和下段;顶部为灰色、灰绿色薄—中层状细—粉砂岩,夹少量灰绿色泥岩、灰色灰岩,与上覆鄂尔托陇巴组呈不整合接触。共采集泥岩28件(图1c),所有样品均通过挖探坑采集,以尽量减少风化作用影响。样品处理及元素分析在中国石化油气成藏重点实验室完成。

通过碳化钨研磨盘碎样后将其研磨成粒度为200目的粉末,并选用同一批次处理的样品分别进

行分析测试。TOC 含量分析采用 LECO CS-230 碳硫分析仪,测试流程遵循国标《沉积岩中总有机碳的测定:GB/T19145—2003》^[31],测试精度优于 3%。薄片鉴定使用 Axio Imager A2m 偏光显微镜,鉴定依据《岩石薄片鉴定:SY/T5368-2016》^[32]。主量元素、微量元素和稀土元素测试采用美国 Thermo Scientific 公司的 X Series 2 型高分辨率电感耦合等离子质谱仪(ICP-MS),首先准确称取同一批次 200 mg 烘干的样品粉末经过浓硝酸和氢氟酸溶液在 180 °C 下消解后,再将样品在 130 °C 进行赶酸,然后加入 1:1 的浓硝酸复溶。测试过程共设计 6 个平行样和 5 个空白样,选用国家标准参考物质 GBW07112、GBW07114 和 SGR-1B 作为标样进行质量监控。测试流程遵循国标《硅酸盐岩石化学分析方法:GB/T14506.30—2010》^[33],测试精度优于 8%。主量元素、微量元素分析结果见表 1,稀土元素分析结果详见表 2。

3 分析结果

3.1 岩石学特征

野外观察鄂尔托陇巴剖面阿堵拉组发育于波里拉组灰黑色泥晶灰岩之上(图 2a),泥岩段以黑色、深灰色薄片状泥岩为主(图 2b),泥岩段上部为薄板状泥质粉砂岩(图 2c)。镜下观察阿堵拉组泥

岩主要成分为黏土矿物,含方解石和粉砂,见少量有机质和氧化铁质。顶部泥岩粉砂碎屑含量较多,碎屑颗粒主要含石英、长石类矿物,短细条状白云母类半定向性排列,泥质中富含有机质(呈浸染状较均匀与泥质混生),有机质或呈细小斑点状零星分布(图 2d-f);中部、底部泥岩中见丰富方解石,方解石多为生屑类重结晶充填,有机质多呈顺层状均匀分布,少许呈斑点状(图 2g-i),反映静水低能的环境。

3.2 有机碳含量

阿堵拉组泥岩 TOC 含量为 0.27%~3.46%(表 1),平均为 1.60%。下段泥岩 TOC 含量为 0.36%~1.78%,平均为 1.27%,上段泥岩 TOC 含量为 0.96%~3.23%,平均为 1.91%。在 136~146 m 处泥岩 TOC 含量均大于 2.0%。依据《烃源岩评价标准:SY/T 5735-2019》^[34],阿堵拉组泥岩以好烃源岩为主,局部发育优质烃源岩。

3.3 元素地球化学特征

阿堵拉组泥岩 Al_2O_3 和 CaO 含量相对较高,其中 Al_2O_3 含量介于 8.90%~19.71%之间(表 1),平均为 15.50%,CaO 介于 0.49%~26.33%之间,平均为 11.34%,其次为 Fe_2O_3 、 K_2O 和 MgO,平均分别为 4.94%、3.03%和 1.44%,MnO、 Na_2O 和 TiO_2 含量低于 1%。泥岩微量元素中 Ba、Sr 含量相对较高,

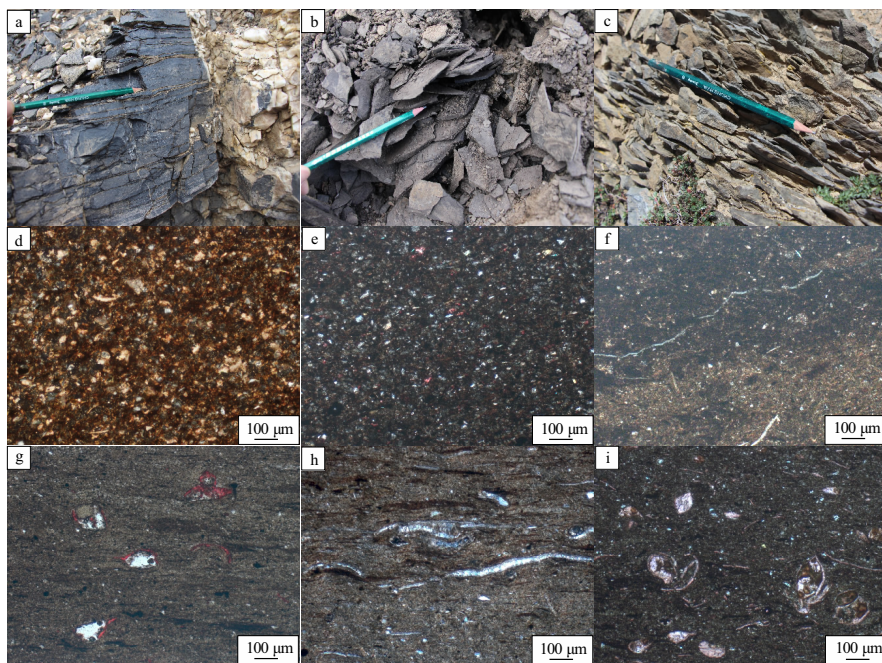


图 2 羌塘盆地东部鄂尔托陇巴剖面三叠系阿堵拉组岩性特征

a.波里拉组深灰色泥晶灰岩;b.阿堵拉组深灰色薄片状泥岩;c.阿堵拉组灰色薄板状粉砂岩;d.样品 A-26,含灰粉砂质泥岩,128.04 m;e.样品 A-25,含灰粉砂质泥岩,130.55 m;f.样品 A-15,含灰残余生屑泥岩,263.31 m;g.样品 A-9,泥岩,312.66 m;h.样品 A-6,泥岩,331.61 m;i.样品 A-1,残余生屑泥岩,383.25 m。

Fig.2 Lithologic characteristics of Triassic Adula Formation in Eertulongba section of eastern Qiangtang Basin

平均分别为 580.06 μg/g 和 320.54 μg/g, 其次为 Rb、Zr、V、Cr, 平均含量分别为 171.19、148.54、106.85、53.88 μg/g, 其他微量元素平均含量低于 50 μg/g(表 1)。

阿堵拉组泥岩稀土元素总量(ΣREE)为 131.87~201.18 μg/g, 平均值为 160.77 μg/g, 高于上地壳(UCC)稀土元素总量(146.37 μg/g)^[35], 低于澳大利亚后太古代平均页岩(PAAS)稀土元素总量(184.77 μg/g)^[36]。样品轻/重稀土比值(LREE/HREE)为 6.28~8.05, 平均 6.95。根据 PAAS 进行标准化后的阿堵拉组泥岩上、下段稀土元素配分模式, 重稀土元素相对富集(图 3a, b), 泥岩(La/Yb)_N 为 0.70~0.92, 平均为 0.80; δCe 为 0.90~1.15, 平均为 0.96, Ce 无显著异常; δEu 为 0.77~1.27, 平均为 0.92, Eu 主体为弱负异常(表 2)。

4 讨论

4.1 古气候

化学蚀变指数(CIA)被广泛用于化学风化作用的研究, 计算方法为 $CIA = Al_2O_3 / (Al_2O_3 + CaO * + Na_2O + K_2O) \times 100$, 式中主成分均为摩尔分数表示, CaO* 仅指硅酸盐矿物中的 CaO, 通常采用 MCLENNAN 提出的方法进行校正^[37], 若 $CaO < Na_2$

O, 则采用 CaO 作为样品 CaO*, 反之则采用 Na₂O 作为 CaO*。化学风化作用较强的气候条件下, K、Na、Ca 相对于 Al 过量散失, 使得 CIA 值较高, 反之风化作用较弱的气候条件下, CIA 值较低。通常 CIA 值为 50~65 指示微弱化学风化作用, CIA 值为 65~85 指示中等风化作用, CIA 值为 85~100 指示强风化作用^[37]。阿堵拉组泥岩 CIA 值为 62.72~77.75(图 4), 仅上段泥岩 1 个样品低于 65, 指示沉积期中等化学风化作用。

由于 Mn、Fe、Ni、Cr、Co、V 在潮湿条件下相对富集, 而 Mg、Ca、Ba、K、Sr 和 Na 在干旱条件下因蒸发作用而浓缩富集, 因此, 可以使用 C 值反映古气候的变化, 其计算方法为 $C 值 = \Sigma (Mn + Fe + Ni + Co + V) / \Sigma (Mg + Ca + Ba + K + Sr + Na)$ ^[38]。一般而言, C 值小于 0.2 指示干燥的古气候, C 值介于 0.2~0.8 指示半干燥—半湿润的古气候, C 值大于 0.8 指示湿润的古气候。阿堵拉组泥岩 C 值为 0.12~0.65(图 4), 大部分样品 C 值为 0.2~0.8, 指示半干燥—半湿润气候, 少数样品为干燥气候。

沉积物中微量元素受古沉积气候影响, 不同的古气候条件下元素的富集程度存在差异^[39], 通常认为 Cu 元素在湿润气候下容易富集, Sr 在干旱气候下容易富集, 故可以利用 Sr/Cu 比反映古气候,

表 1 北羌塘坳陷东部鄂尔托陇巴剖面三叠系阿堵拉组泥岩主量和微量元素含量
Table 1 Contents of major and trace elements in mudstones of Triassic Adula Formation of Eertulongba section in eastern area of North Qiangtang Depression

样号	$\omega(ToC)/\omega(TS)/\%$		主量元素含量/%										微量元素含量/(μg/g)											
	%	%	Al ₂ O ₃	CaO	Fe ₂ O ₃	K ₂ O	MgO	MnO	Na ₂ O	TiO ₂	Ba	Co	Cr	Cu	Ni	Sr	V	Mo	Zr	Th	U	Ga	Rb	Sc
A-28	1.13	0.11	15.73	0.49	4.30	3.61	1.15	0.03	1.01	0.72	648.70	7.82	66.98	31.62	20.55	104.52	93.84	1.40	242.98	22.21	3.40	26.03	172.81	10.89
A-27	1.79	0.14	17.10	5.07	5.17	3.40	1.46	0.07	0.91	0.59	245.72	10.00	58.67	33.80	27.22	143.95	97.43	2.77	189.65	24.44	3.56	21.83	174.46	13.34
A-26	2.21	0.17	16.64	6.61	5.47	3.23	1.56	0.08	0.90	0.55	989.91	10.58	56.26	44.85	36.42	208.01	138.15	7.25	179.58	24.73	4.17	28.60	182.07	13.52
A-25	1.84	0.18	16.67	4.45	4.69	3.17	1.40	0.05	1.16	0.58	260.68	12.21	63.38	41.29	33.74	137.46	93.24	3.15	204.46	24.90	3.95	21.25	165.76	13.65
A-24	3.23	0.15	16.41	6.44	4.31	3.30	1.41	0.05	0.82	0.50	273.98	5.70	57.73	57.69	21.58	177.92	83.77	2.59	169.94	24.35	3.57	21.52	178.49	13.06
A-23	2.60	0.17	17.76	3.63	4.11	3.66	1.29	0.04	0.79	0.53	379.01	10.37	53.48	50.54	28.18	160.12	91.32	3.40	187.66	25.30	4.34	24.93	171.60	13.01
A-22	2.45	0.17	16.40	6.14	5.01	3.23	1.38	0.05	0.96	0.50	251.22	8.38	48.63	44.53	24.87	188.75	70.17	2.55	168.84	26.71	3.72	21.07	170.59	13.37
A-21	2.24	0.17	10.09	26.33	3.03	2.02	0.91	0.12	0.54	0.31	264.50	5.92	32.34	42.30	21.13	322.75	51.99	1.48	100.70	14.06	2.35	14.01	114.75	9.18
A-20	1.93	0.13	16.21	8.57	4.15	3.12	1.30	0.06	1.03	0.45	246.95	8.84	66.79	39.31	21.43	223.23	85.37	1.08	153.59	26.58	3.31	20.82	179.73	13.76
A-19	2.34	0.32	14.79	12.14	4.05	2.74	1.40	0.05	0.89	0.38	268.78	5.56	61.37	38.28	20.35	341.48	74.83	2.02	126.07	22.72	3.18	19.05	161.75	12.63
A-18	0.96	0.14	8.90	21.74	3.20	1.68	0.96	0.09	1.06	0.30	827.77	5.30	29.24	24.09	15.04	325.88	40.19	0.80	114.90	16.08	2.57	19.71	98.75	9.29
A-17	1.18	0.14	11.94	18.47	3.65	2.14	1.13	0.10	0.74	0.34	234.24	4.68	35.20	33.38	17.64	302.68	47.50	1.08	118.69	18.74	2.81	16.43	126.75	10.81
A-16	1.65	0.19	16.02	11.90	4.80	3.12	1.37	0.09	0.58	0.44	271.70	8.59	63.33	43.17	32.01	285.83	118.20	6.27	135.23	22.03	3.61	21.09	191.91	14.58
A-15	1.13	0.16	14.95	15.43	4.29	2.86	1.44	0.10	0.64	0.39	632.74	13.42	35.54	37.96	26.21	401.63	61.01	2.03	132.22	18.67	3.28	23.44	173.61	13.63
A-14	0.36	0.19	19.58	3.55	6.37	3.57	1.94	0.03	0.53	0.57	257.91	20.38	56.32	28.83	34.01	174.32	103.55	0.50	177.83	22.62	3.42	26.34	174.69	16.26
A-13	1.19	0.23	12.20	20.62	4.02	2.14	1.36	0.10	0.64	0.33	771.08	5.28	34.19	33.01	19.58	452.89	50.64	1.43	110.09	16.69	3.15	22.15	131.93	11.54
A-12	1.05	0.13	9.56	24.22	3.70	1.89	1.23	0.10	0.63	0.30	1062.15	6.74	29.49	26.22	20.70	463.65	46.07	1.56	100.84	14.58	2.90	23.07	116.13	10.28
A-11	0.84	0.25	18.68	4.19	6.24	3.46	1.63	0.12	0.66	0.62	475.50	16.66	73.16	32.81	38.10	182.75	129.24	2.20	179.99	22.86	3.74	26.16	187.39	16.07
A-10	1.73	0.21	17.24	6.96	5.54	3.29	1.53	0.10	0.70	0.48	785.69	12.83	78.17	44.66	46.42	255.22	180.20	5.73	149.57	22.97	4.35	28.32	194.66	13.86
A-09	1.08	0.11	19.71	3.04	5.72	3.93	1.64	0.08	0.57	0.57	234.20	19.36	64.47	34.91	40.43	154.85	138.38	3.70	174.76	25.16	3.99	25.81	197.09	15.73
A-08	1.64	0.19	17.10	9.46	5.83	3.37	1.63	0.15	0.56	0.48	509.65	15.08	64.58	41.39	50.02	315.36	176.75	10.30	145.27	22.85	4.54	24.35	210.27	13.93
A-07	1.56	0.11	13.87	18.63	5.41	2.68	1.43	0.25	0.36	0.35	598.01	8.49	58.85	38.54	35.48	985.29	179.12	9.15	111.92	18.05	4.60	21.81	170.21	11.88
A-06	0.96	0.11	18.05	9.55	5.84	3.61	1.71	0.14	0.43	0.48	183.99	16.99	59.48	36.49	40.15	287.95	136.19	4.17	147.76	23.46	4.29	22.90	227.05	15.71
A-06	1.41	0.19	15.46	14.08	6.04	2.94	1.63	0.19	0.42	0.42	575.02	10.46	56.16	46.82	37.85	452.39	149.34	7.14	124.41	20.03	4.22	23.67	178.71	12.69
A-04	1.45	0.09	18.84	6.49	7.31	3.81	1.73	0.41	0.43	0.48	448.81	35.42	56.12	65.63	94.07	248.68	150.11	8.08	160.44	24.67	4.24	26.67	213.20	16.72
A-03	1.62	0.12	14.60	16.59	5.29	2.91	1.44	0.14	0.45	0.37	711.24	7.56	50.60	39.52	30.45	653.30	146.26	4.49	119.74	20.48	4.12	23.75	172.69	11.80
A-02	1.78	0.17	16.16	13.78	5.70	3.39	1.61	0.16	0.37	0.39	2530.29	13.14	59.69	50.12	50.05	446.09	191.78	6.00	124.61	20.89	5.24	44.66	214.16	14.33
A-01	1.17	0.19	13.38	19.01	5.22	2.71	1.56	0.20	0.39	0.36	1302.36	10.67	38.57	37.12	28.55	578.31	67.20	2.47	107.34	17.00	3.79	28.13	158.81	11.23

表 2 北羌塘坳陷东部地区鄂尔托陇巴剖面三叠系阿堵拉组泥岩稀土元素含量
Table 2 Contents of rare earth elements in mudstones of Triassic Adula Formation of Eertuolongba section in eastern area of North Qiangtang Depression

Table with 19 columns: Sample No., REE concentrations (La, Ce, Pr, Nd, Sm, Eu, Gd, Tb, Dy, Ho, Er, Tm, Yb, Lu), ΣREE, LREE/HREE, and PAAS standardization (δCe, δEu, (La/Yb)N).

注: PAAS 标准值据 MCLENNAN[36], ΣREE=La+Ce+Pr+Nd+Sm+Eu+Gd+Tb+Dy+Ho+Er+Tm+Yb+Lu, LREE/HREE=(La+Ce+Pr+Nd+Sm+Eu)/(Gd+Tb+Dy+Ho+Er+Tm+Yb+Lu), δCe=CeN/(LaN×PrN)1/2, δEu=EuN/(SmN×GdN)1/2, 下标 N 表示计算使用 PAAS 标准化。

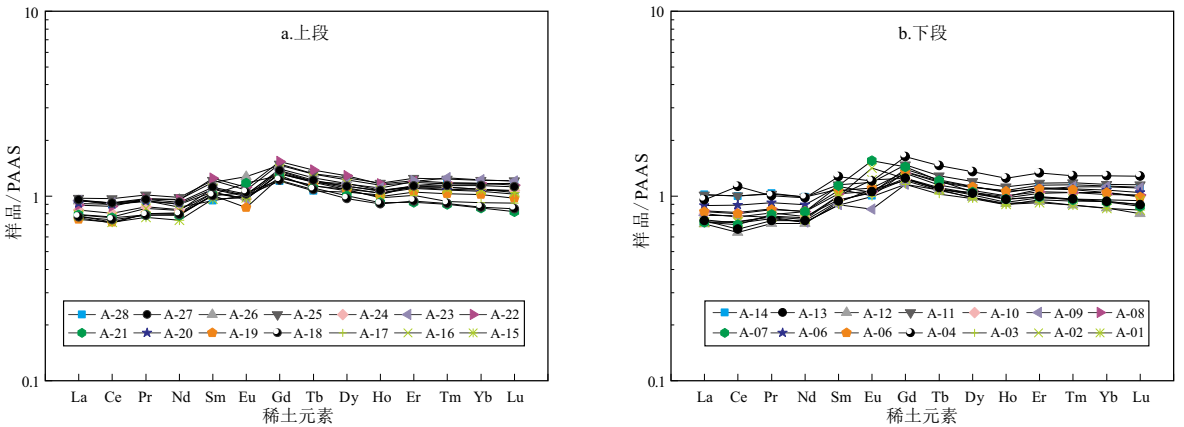


图 3 羌塘盆地东部鄂尔托陇巴剖面三叠系阿堵拉组泥岩 PAAS 标准化稀土元素配分模式
PAAS 标准值参考 MCLENNAN[36]。

Fig.3 Post Australia Archean Shale-normalized REE distribution patterns of mudstone in Triassic Adula Formation of Eertuolongba section in eastern Qiangtang Basin

Sr/Cu 比越大指示气候越干燥[39]。阿堵拉组下段泥岩样品 Sr/Cu 比值为 3.79~25.57,泥岩 Sr/Cu 呈减小趋势,上段泥岩 Sr/Cu 比值介于 3.08~13.53 (图 4),呈增大—减小趋势,特别是上段泥岩在 190 m 往上 Sr/Cu 显著减小,对应 CIA 和 C 值增

大,指示该时期古气候湿润程度增加。

综合 CIA、C 值、Sr/Cu 变化特征,阿堵拉组泥岩沉积期化学风化程度中等,古气候应介于干燥和湿润之间,总体为半干燥—半湿润气候,下段泥岩沉积期古气候较稳定,上段泥岩沉积期古气候经历

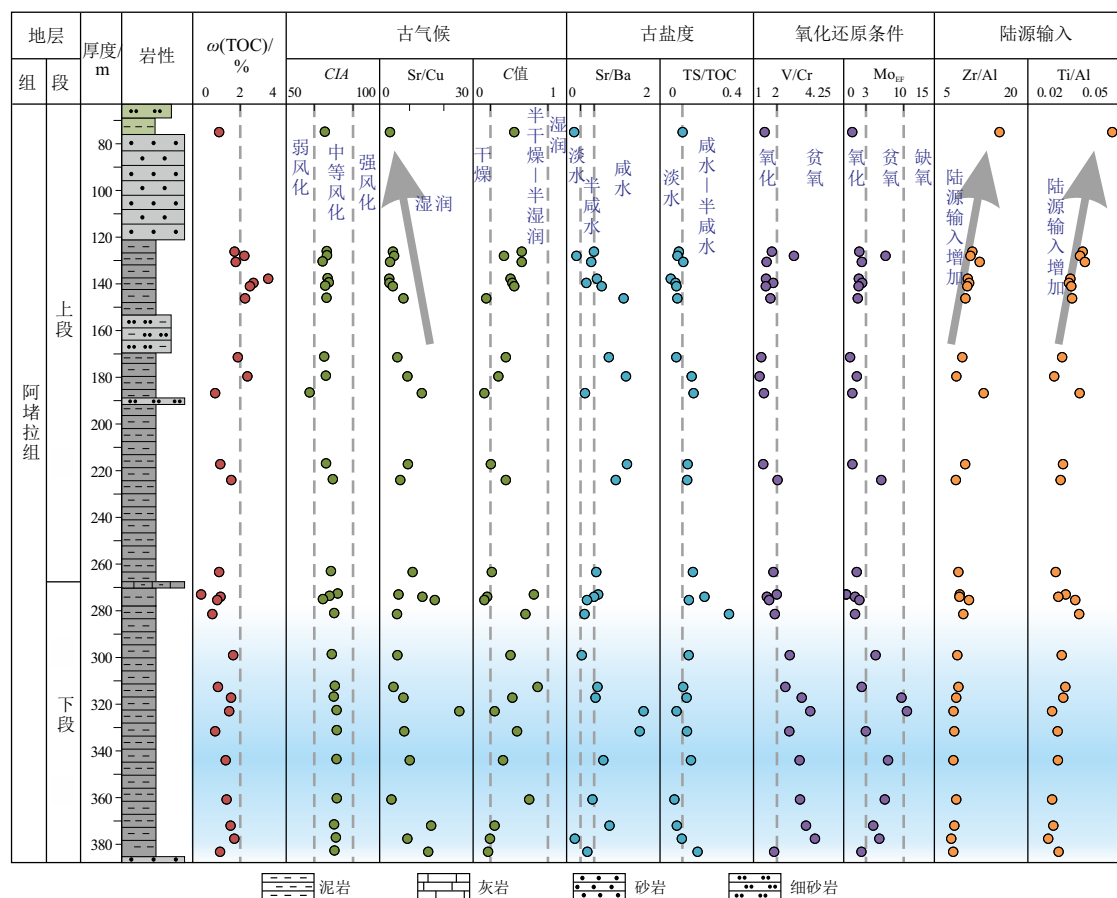


图4 羌塘盆地东部鄂尔托陇巴剖面三叠系阿堵拉组泥岩古环境参数

Fig.4 Paleoenvironmental parameters of mudstones in Triassic Adula Formation of Eertuolongba section of eastern Qiangtang Basin

干燥—半干燥—半湿润变化。

4.2 古盐度

Sr/Ba 比常用于指示古水体盐度, WEI 等^[40]对不同海域的水体盐度和沉积物地球化学数据研究表明, Sr/Ba 低于 0.2 指示沉积水体为陆相淡水, Sr/Ba 介于 0.2~0.5 之间指示海陆过渡相半咸水, Sr/Ba 高于 0.5 时指示海相咸水。阿堵拉组下段泥岩 Sr/Ba 为 0.18~1.65, 平均为 0.70(图4), 指示沉积期主要为海相咸水。上段泥岩 Sr/Ba 为 0.16~1.27, 自下向上 Sr/Ba 呈增大—减小趋势, 指示咸水—半咸水, 仅顶部 1 个样品指示淡水。

此外, 沉积物中的总硫和总有机碳含量比值(TS/TOC)可以区分淡水和半咸水—咸水, 通常 TS/TOC<0.1 指示淡水, TS/TOC≥0.1 指示受海水作用的半咸水或咸水^[40]。下段泥岩 TS/TOC 为 0.06~0.54, 平均为 0.16, 大部分样品 TS/TOC 大于 0.1(图4), 总体指示海相咸水或半咸水环境, 上段泥岩 TS/TOC 介于 0.05~0.14 之间, 平均为 0.095。由于上段泥岩 TS/TOC 均值十分接近 0.1, 对淡水和咸水—半咸水的定性判识有待商榷, 但仍然可

以反映古盐度相对降低, 与 Sr/Ba 比值变化一致, 共同表明上段泥岩沉积晚期可能受到淡水输入影响。

综合认为, 阿堵拉组下段泥岩沉积于海相咸水环境, 古盐度较高, 而上段泥岩沉积之初仍为海相咸水环境, 后期受到淡水输入影响, 盐度下降, 为咸水—半咸水环境。

4.3 古氧化还原条件

泥岩的 V/Cr 可以有效地区分氧化、贫氧和缺氧水体环境^[41], V/Cr<2.0 指示氧化环境, 2.0<V/Cr<4.25 指示贫氧环境, V/Cr>4.25 指示缺氧环境。阿堵拉组泥岩 V/Cr 主要介于 1.22~3.21 之间, 自下向上泥岩 V/Cr 比值呈下降趋势, 下段泥岩 V/Cr 比平均为 2.31(图4), 指示贫氧环境为主, 向上逐渐转变为氧化环境, 上段泥岩 V/Cr 比平均为 1.57, 仅 1 个样品高于 2(图4), 指示氧化环境为主, 可能间歇性贫氧。沉积物中 Mo-U 富集主要受到海水 Mo-U 浓度及水体氧化还原状态控制, U 在铁化还原带向沉积物中转移, 而 Mo 仅当水中含有 H₂S 时才向沉积物中富集, 通常 Mo 和 U 富集系数在 3~10 时

为贫氧环境,大于 10 时为缺氧、硫化环境^[42]。阿堵拉组泥岩 Mo_{EF} 介于 0.41~10.46 之间, U_{EF} 介于 0.93~1.77 之间,下段泥岩 Mo_{EF} 相对较高, U_{EF} 相差不大, Mo_{EF} - U_{EF} 交会图(图 5)指示下段泥岩偏向贫氧环境,上段泥岩主要落入氧化环境,与 V/Cr 比值指示结果较为一致。

4.4 陆源输入

泥岩中 Al 主要来源于陆源碎屑中铝硅酸盐黏土矿物,可以指示陆源碎屑输入, Ti、Zr 不仅来源于黏土矿物,还可以来自较粗粒矿物,因此 Ti/Al、Zr/Al 比值可用于指示较粗的陆源输入^[43]。阿堵拉组泥岩下段泥岩 Zr/Al、Ti/Al 值较低且保持较为稳定(图 4),反映该时期较粗颗粒陆源输入量较低,镜下观察表明下段泥岩以黏土矿物为主(图 2g-i)。上段泥岩下部 Zr/Al、Ti/Al 值较低,至 150 m 以上

开始显著增大(图 4),反映这一沉积时期陆源碎屑供给持续增强,镜下观察到泥岩中碎屑颗粒较多(图 2d, e)。陆源输入与区域性海平面升降具有较强相关性。阿堵拉组下段泥岩沉积于海平面上升时期,水体较深,陆源输入较低且保持稳定,上段泥岩沉积期受到金沙江洋关闭影响,北羌塘盆地逐渐消亡,海平面下降导致水体较浅,陆源碎屑输入因此迅速增加。

4.5 母岩类型及源区构造背景

源区母岩在受到风化剥蚀作用后形成碎屑颗粒,再搬运至沉积区域沉积下来,在此过程一些化学性质相对稳定的金属元素(如 Co, Th, Zr, Hf, Ti, Sc, Yb 和 REE)较好地保留了原始成分信息,可用于反映源区母岩的特征和构造属性^[44]。Th/Sc 比值通常在沉积岩中保持稳定,而 Zr 会随着沉积物再循环而发生富集,导致沉积物中 Zr/Sc 值增大,因此 Th/Sc-Zr/Sc 可以用于判识沉积物再循环程度^[45]。阿堵拉组泥岩 Th/Sc 值为 1.37~2.04, Zr/Sc 值为 8.69~22.32,处于玄武岩+长英质岩石+花岗岩线上部,位于 PAAS 和 UCC 之上(图 6a),表明阿堵拉组物源成分以长英质来源为主,未经历沉积再循环。阿堵拉组泥岩 Co/Th 值为 0.23~1.44, La/Sc 值为 1.91~3.33,与长英质岩石接近(图 6b),表明研究区阿堵拉组母岩以长英质火山岩为主。

BHATIA 等^[44]对源区大洋岛弧、大陆岛弧、主动大陆边缘和被动大陆边缘的沉积岩微量元素进行了对比研究,并提出了 Ti/Zr-La/Sc、La-Th-Sc 图解用于判识源区构造背景。在 Ti/Zr-La/Sc(图 7a)和在 La-Th-Sc 图解中(图 7b),阿堵拉组上、下段泥岩主要落入大陆岛弧区域内,上段少数样品落入主动大陆边缘区域内。从当时沉积的构造古

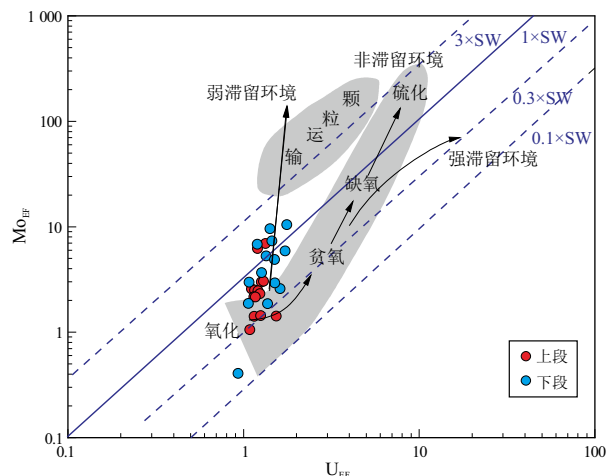


图 5 羌塘盆地东部鄂尔托陇巴剖面三叠系阿堵拉组泥岩 Mo_{EF} - U_{EF} 交会图
底图据参考文献[42]。

Fig.5 Crossplot of Mo_{EF} vs. U_{EF} of Triassic Adula Formation mudstone in Eertulongba section of eastern Qiangtang Basin

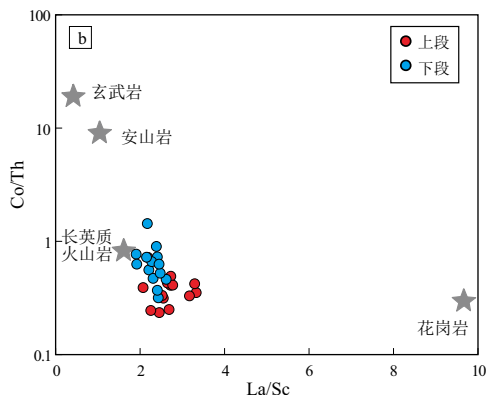
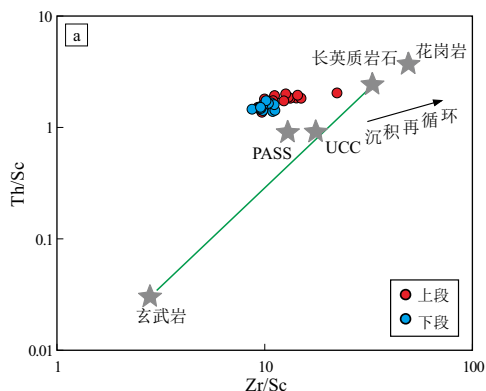


图 6 羌塘盆地东部鄂尔托陇巴剖面三叠系阿堵拉组泥岩 Zr/Sc-Th/Sc(a) 和 La/Sc-Co/Th(b) 图解
底图分别据参考文献[44]和[45]。

Fig.6 Correlation diagrams of Zr/Sc vs. Th/Sc (a) and La/Sc vs. Co/Th (b) for Triassic Adula Formation mudstone in Eertulongba section of eastern Qiangtang Basin

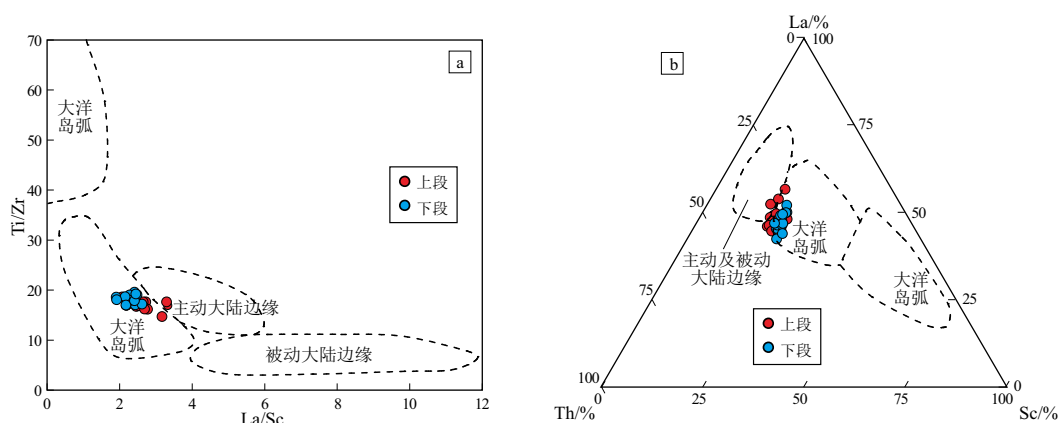


图 7 羌塘盆地东部鄂尔托陇巴剖面三叠系阿堵拉组泥岩 Ti/Zr-La/Sc (a) 和 Th-Co-Sc (b) 图解
底图据参考文献[44]。

Fig.7 Diagrams of Ti/Zr vs. La/Sc (a) and Th-Co-Sc (b) for mudstone in Triassic Adula Formation in Eertulongba section of eastern Qiangtang Basin

地理格局来看,早—中三叠世金沙江洋向南俯冲,金沙江缝合带地区为主动大陆边缘,在仰冲板块上伴生岩浆弧,可以为北美塘地区提供具有岛弧型性质火山岩物源^[46]。北美塘拗陷藏夏河、明镜湖等剖面古流向均显示由北向南^[47]。此外,藏夏河上三叠统砂岩锆石裂变径迹年龄指示物源来自早—中三叠世,微量元素特征指示母岩为大陆岛弧源区的长英质火山岩^[48]。因此,研究区阿堵拉组泥岩物源可能来自早—中三叠世金沙江缝合带地区大陆岛弧源区,北美塘盆地性质应为弧后盆地。此外,阿堵拉组上段、下段泥岩的 Zr/Sc 值和 Co/Th 值存在显著的差异,指示沉积后期物源成分和源区构造背景发生了一定变化,可能归因于晚三叠世金沙江洋关闭导致源区剥蚀范围和程度的增加。

4.6 古沉积环境演化及对烃源岩发育影响

前人依据沉积学、古生物学特征认为羌塘盆地

东部地区阿堵拉组内部沉积环境存在差异,雀莫错地区阿堵拉组沉积早期接受了短暂陆源碎屑供应后迅速进入了深水相对安静的沉积环境,下段大套深水陆棚相黑色泥页岩代表海侵体系域,泥岩中见典型缺氧或贫氧环境双壳类化石,上段灰黑色泥岩、粉砂岩、细砂岩表明浅海环境持续演化和三角洲出现,构成高位体系域^[7]。地球化学特征表明,鄂尔托陇巴剖面阿堵拉组下段泥岩沉积期,受海平面上升影响,沉积环境由滨岸快速转变为陆棚,形成较深且贫氧水体环境,古气候为半干燥—半湿润,化学风化程度中等,来自源区的长英质物源供给较少,水体盐度较高,水体安静低能,有机质保存条件较好,有利于烃源岩发育。下段烃源岩 TOC 含量与古氧化还原条件指标均具有显著正相关性(图 8e, f),与古气候、古盐度、陆源输入等指标无显著相关性(与 TS/TOC 呈较好负相关性归因于其自身比值

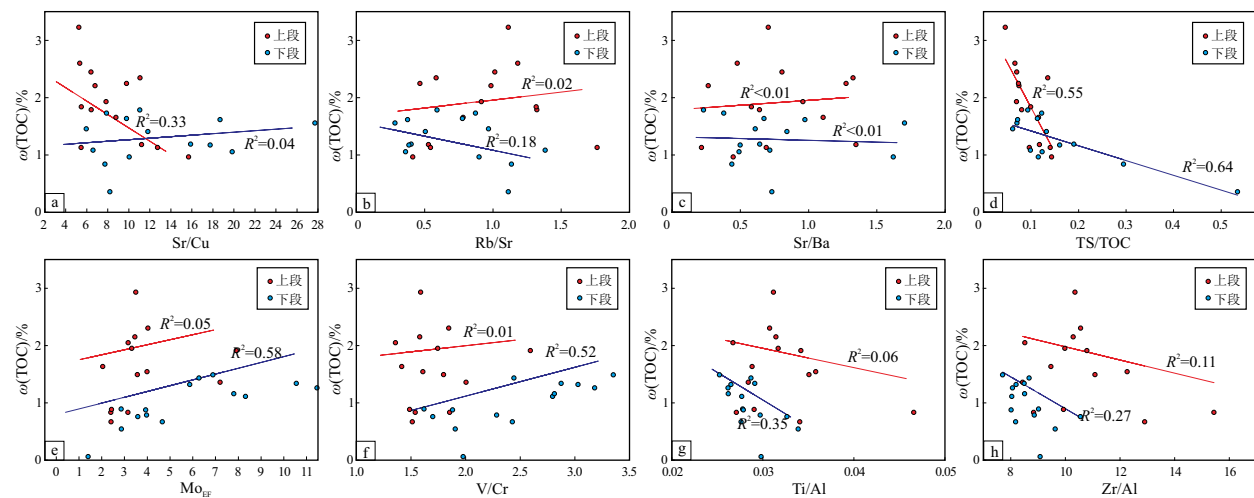


图 8 羌塘盆地东部鄂尔托陇巴剖面三叠系阿堵拉组烃源岩 TOC 含量与古环境指标交会图

Fig.8 Crossplots of TOC vs. paleo-environment parameters of Triassic Adula Formation mudstone in Eertulongba section of eastern Qiangtang Basin

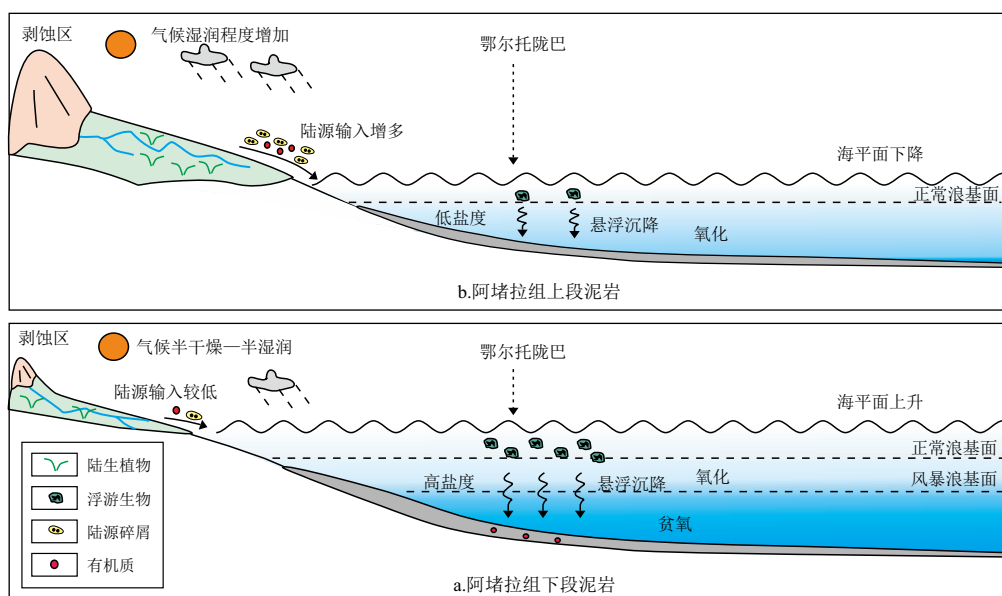


图 9 羌塘盆地东部鄂尔托陇巴剖面三叠系阿堵拉组烃源岩发育模式

Fig.9 Development patterns of source rocks in Triassic Adula Formation of Eertuolongba section in eastern Qiangtang Basin

作为横坐标),表明海平面上升时期贫氧水体是该时期烃源岩发育的控制因素。然而,相比较于四川盆地五峰组—龙马溪组页岩,后者发育于深水陆棚相缺氧—硫化环境^[46],有机质保持条件极好,而阿堵拉组下段沉积水体以贫氧为主(图 9a),可能是下段烃源岩 TOC 含量普遍不高于 2% 的原因。

上段泥岩沉积期,受金沙江洋关闭影响,盆地逐渐萎缩消亡,源区剥蚀范围进一步扩大,物源成分发生一定变化,海平面逐渐下降,这一时期沉积环境由浅海陆棚逐渐演化为三角洲,古气候先变干燥后再变为半干燥—半湿润,使得地表径流发育,水体盐度下降,陆源碎屑供给迅速增加,水体以氧化环境为主。上段泥岩 TOC 与各古环境参数(与 TS/TOC 呈较好负相关性归因其自身比值作为横坐标)均无显著相关性(图 8),表明烃源岩发育并非受到单一因素控制。薄片观察结果(图 2d, e)及 Ti/Al、Zr/Al 值特征指示上段 TOC 含量大于 2% 泥岩中陆源输入显著增多,对应古气候相对变得湿润,盐度较低(图 4),指示该时期沉积环境受到淡水、陆源输入显著影响,应为三角洲沉积环境。通常认为气候变湿润有利于生物生长繁盛,为烃源岩发育提供充足物质基础,陆源输入供给较多不仅可以大量陆生有机质搬运至沉积区^[49],同时输入营养元素进一步促进水体生产力。此外,虽然三角洲环境中底层水溶解氧含量高,但较快的沉积速率可以缩短有机质的氧化降解时间^[50]。因此,上段泥岩沉积期,尽管海平面逐渐下降,但在古气候、陆源输入等多种因素的综合影响下,也可以发育

好—优质的烃源岩(图 9b)。

5 结论

(1) 羌塘盆地东部鄂尔托陇巴剖面三叠系阿堵拉组泥岩 TOC 含量介于 0.27%~3.46% 之间,平均为 1.60%,主要为好烃源岩,局部发育优质烃源岩。

(2) 鄂尔托陇巴剖面阿堵拉组下段泥岩沉积于浅海陆棚环境,受海平面上升影响,形成较深且贫氧的水体环境,古气候为半干燥—半湿润气候,化学风化程度中等,来自源区的长英质物源供给较少,盐度较高;上段泥岩沉积环境由浅海陆棚逐渐演化为三角洲,古气候经历了干燥—半干燥—半湿润的变化,陆源碎屑供给较多,受到淡水输入影响,水体盐度下降,以咸水—半咸水的氧化环境为主。阿堵拉组泥岩物源类型为长英质火山岩,源区构造背景为大陆岛弧,上段泥岩少数样品物源来自主动大陆边缘,物源可能来自金沙江缝合带地区早—中三叠世岛弧性质火山岩。

(3) 羌塘盆地东部阿堵拉组古沉积环境演化控制了烃源岩发育,下段泥岩 TOC 含量与氧化还原条件指标具有好的正相关性,指示沉积期烃源岩发育主要受贫氧水体控制,上段泥岩 TOC 含量与古环境参数无显著相关性,TOC 含量大于 2% 泥岩沉积期具有较高陆源输入和相对湿润古气候,综合分析认为上段烃源岩发育受到古气候、陆源输入等多种因素综合影响。

致谢:中国石化勘探分公司、中国地质调查

局成都地质调查中心及相关研究人员为相关工作的开展提供了大力协助,匿名审稿专家对初稿提出了宝贵的修改意见,在此一并致以衷心感谢!

利益冲突声明/Conflict of Interests

所有作者声明不存在利益冲突。

All authors disclose no relevant conflict of interests.

作者贡献/Authors' Contributions

刘栩、庄新兵、李凤勋参与实验设计,马泽良、李兴强、李吉鹏参与样品处理与实验操作;刘栩、刘中戎、范志伟、彭金宁参与论文写作和修改。所有作者均阅读并同意最终稿件的提交。

The study was designed by LIU Xu, ZHUANG Xinbing, and LI Fengxun. The experimental operation was completed by MA Zeliang, LI Xingqiang and LI Jipeng. The manuscript was drafted and revised by LIU Xu, LIU Zhongrong, FAN Zhiwei and PENG Jinning. All authors have read the last version of the paper and consented to its submission.

参考文献:

- [1] 王成善,伊海生,李勇,等.西藏羌塘盆地地质演化与油气远景评价[M].北京:地质出版社,2001.
WANG Chengshan, YI Haisheng, LI Yong, et al. The geological evolution and prospective oil and gas assessment of the Qiangtang Basin in northern Tibetan Plateau [M]. Beijing: Geology Press, 2001.
- [2] 王剑,付修根.论羌塘盆地沉积演化[J].中国地质,2018,45(2):237-259.
WANG Jian, FU Xiugen. Sedimentary evolution of the Qiangtang Basin [J]. Geology in China, 2018, 45(2): 237-259.
- [3] 谭富文,王剑,王小龙,等.西藏羌塘盆地:中国油气资源战略选区的首选目标[J].沉积与特提斯地质,2002,22(1):16-21.
TAN Fuwen, WANG Jian, WANG Xiaolong, et al. The Qiangtang Basin in Xizang as the target area for the oil and gas resources in China [J]. Sedimentary Geology and Tethyan Geology, 2002, 22(1): 16-21.
- [4] 王剑,付修根,沈利军,等.论羌塘盆地油气勘探前景[J].地质论评,2020,66(5):1091-1113.
WANG Jian, FU Xiugen, SHEN Lijun, et al. Prospect of the potential of oil and gas resources in Qiangtang Basin, Xizang (Tibet) [J]. Geological Review, 2020, 66(5): 1091-1113.
- [5] 丁文龙,李超,苏爱国,等.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[J].岩石学报,2011,27(3):878-896.
DING Wenlong, LI Chao, SU Aiguo, et al. Study on the comprehensive geochemical cross section of Mesozoic marine source rocks and prediction of favorable hydrocarbon generation area in Qiangtang Basin, Tibeta [J]. Acta Petrologica Sinica, 2011, 27(3): 878-896.
- [6] 李高杰,夏国清,伊海生,等.西藏南羌塘坳陷泥质烃源岩评价及有利生烃区预测[J].地质论评,2020,66(5):1241-1260.
LI Gaojie, XIA Guoqing, YI Haisheng, et al. Characteristics of the Mesozoic marine argillaceous source rocks and prediction of favorable hydrocarbon generation area in South Qiangtang Depression, Xizang (Tibet) [J]. Geological Review, 2020, 66(5): 1241-1260.
- [7] 刘中戎,杨平,张国常,等.北羌塘坳陷上三叠统沉积模式及对油气勘探的启示[J].沉积与特提斯地质,2022,42(03):465-480.
LIU Zhongrong, YANG Ping, ZHANG Guochang, et al. Sedimentary model and its implications for oil and gas exploration of Upper Triassic in Northern Qiangtang Depression [J]. Sedimentary Geology and Tethyan Geology, 2022, 42(3): 465-480.
- [8] 伍新和,张丽,王成善,等.西藏羌塘盆地中生界海相烃源岩特征[J].石油与天然气地质,2008,29(3):348-354.
WU Xinhe, ZHANG Li, WANG Chengshan, et al. Characteristics of the Mesozoic marine source rocks in the Qiangtang Basin, Tibet [J]. Oil & Gas Geology, 2008, 29(3): 348-354.
- [9] 陈文彬,付修根,谭富文,等.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[J].中国地质,2015,42(4):1151-1160.
CHEN Wenbin, FU Xiugen, TAN Fuwen, et al. Geochemical characteristics of Upper Triassic source rocks from typical sections in Qiangtang Basin, northern Tibet [J]. Geology in China, 2015, 42(4): 1151-1160.
- [10] 占王忠,谭富文.羌塘盆地晚三叠世岩相古地理特征与烃源岩[J].沉积学报,2020,38(4):876-885.
ZHAN Wangzhong, TAN Fuwen. Lithofacies palaeogeography and source rock of the Late Triassic in the Qiangtang Basin [J]. Acta Sedimentologica Sinica, 2020, 38(4): 876-885.
- [11] 宋春彦,王剑,付修根,等.羌塘盆地东部上三叠统巴贡组烃源岩特征及意义[J].东北石油大学学报,2018,42(5):104-114.
SONG Chunyan, WANG Jian, FU Xiugen, et al. Geochemical characteristics and the significance of the Upper Triassic hydrocarbon source rocks of the Bagong Formation in the eastern Qiangtang Basin [J]. Journal of Northeast Petroleum University, 2018, 42(5): 104-114.
- [12] PENG Jinning, LIU Xu, ZHUANG Xinbing, et al. Geochemical characteristics and sedimentary environment of source rocks in the Qiangtang Basin: new discoveries from the Upper Triassic Xiaochaka Formation in the Wuruoshan Mountain [J]. Unconventional Resources, 2023, 3: 103-110.
- [13] 梁狄刚,郭彤楼,边立曾,等.中国南方海相生烃成藏研究的若干新进展(三)南方四套区域性海相烃源岩的沉积相及发育的控制因素[J].海相油气地质,2009,14(2):1-19.
LIANG Digang, GUO Tonglou, BIAN Lizeng, et al. Some progresses on studies of hydrocarbon generation and accumulation in marine sedimentary regions, southern China (part 3): controlling factors on the sedimentary facies and development of Palaeozoic marine source rocks [J]. Marine Origin Petroleum Geology, 2009, 14(2): 1-19.
- [14] 韩杨,蒋文龙,杨海波,等.准噶尔盆地南缘中段侏罗系烃源岩热演化史及其对天然气成藏的影响[J].油气地质与采收率,2022,29(5):49-57.
HAN Yang, JIANG Wenlong, YANG Haibo, et al. Thermal evolution and natural gas accumulation of Jurassic source rocks in middle of southern margin of Junggar Basin [J]. Petroleum Geology and Recovery Efficiency, 2022, 29(5): 49-57.
- [15] 许露露,温雅茹,周向辉,等.鄂西黄陵背斜南缘下寒武统牛

- 蹄塘组一段古沉积环境演化特征:以秭地 1 井为例[J].石油实验地质,2022,44(3):456-465.
- XU Lulu, WEN Yaru, ZHOU Xianghui, et al. Paleo-environment of the first member of Niutitang Formation on the southern margin of Huangling anticline, western Hubei province: a case study of well ZD-1[J]. Petroleum Geology & Experiment, 2022, 44(3): 456-465.
- [16] 徐海, 周向辉, 林俊峰, 等. 鄂西宜昌地区秭地 1 井陡山沱组古沉积环境演化特征[J]. 特种油气藏, 2023, 30(6): 72-81.
- XU Hai, ZHOU Xianghui, LIN Junfeng, et al. Characteristics of paleo-sedimentary environment evolution of Doushantuo Formation in well Zidi 1 of Yichang area in west Hubei of China[J]. Special Oil & Gas Reservoirs, 2023, 30(6): 72-81.
- [17] 占王忠, 彭清华, 陈文彬. 羌塘盆地冬曲地区上三叠统巴贡组古网迹的发现及古环境意义[J]. 地质通报, 2019, 38(2/3): 208-212.
- ZHAN Wangzhong, PENG Qinghua, CHEN Wenbin. The discovery of paleodictyon in Upper Triassic Bagong Formation in Dongqu area of Qiangtang Basin and its palaeoenvironment significance[J]. Geological Bulletin of China, 2019, 38(2/3): 208-212.
- [18] 王忠伟, 肖杨, 占王忠, 等. 羌塘盆地东部上三叠统巴贡组泥岩特征及油气地质意义[J]. 东北石油大学学报, 2022, 46(2): 1-12.
- WANG Zhongwei, XIAO Yang, ZHAN Wangzhong, et al. Geochemical characteristics of the Upper Triassic Bagong Formation mudstones in eastern Qiangtang Basin and its petroleum geological significance[J]. Journal of Northeast Petroleum University, 2022, 46(2): 1-12.
- [19] YU Fei, FU Xiugen, XU Guang, et al. Geochemical, palynological and organic matter characteristics of the Upper Triassic Bagong Formation from the north Qiangtang Basin, Tibetan Plateau[J]. Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology, 2019, 515: 23-33.
- [20] 程建, 郑伦举. 川南地区金页 1 井早寒武世烃源岩沉积地球化学特征[J]. 石油与天然气地质, 2020, 41(4): 800-810.
- CHENG Jian, ZHENG Lunju. Sedimentary geochemical characteristics of the Early Cambrian source rocks in well Jinye 1 in southern Sichuan Basin[J]. Oil & Gas Geology, 2020, 41(4): 800-810.
- [21] 王亚如, 张昌民, 冀冬升, 等. 齐古断褶带头屯河组—清水河组地球化学特征及古环境[J]. 新疆石油地质, 2022, 43(5): 563-571.
- WANG Yaru, ZHANG Changmin, JI Dongsheng, et al. Geochemical characteristics and paleoenvironment of Toutunhe Formation - Qingshuihe Formation in Qigu fault-fold belt[J]. Xinjiang Petroleum Geology, 2022, 43(5): 563-571.
- [22] 李浩, 徐怀民, 王千军, 等. 准东地区平地泉组微量元素地球化学特征及油气地质意义[J]. 断块油气田, 2023, 30(2): 277-285.
- LI Hao, XU Huaimin, WANG Qianjun, et al. Geochemical characteristics and petroleum geological significance of trace elements of Pingdiqian Formation in eastern Junggar Basin[J]. Fault-Block Oil and Gas Field, 2023, 30(2): 277-285.
- [23] 马骥. 北天山依林黑比尔根断裂带充填物地球化学特征及构造指示意义[J]. 油气地质与采收率, 2023, 30(5): 49-56.
- MA Ji. Geochemical characteristics and tectonic significance of fillings of Yilin Heibiergen Fault Zone in Northern Tianshan Mountain[J]. Petroleum Geology and Recovery Efficiency, 2023, 30(5): 49-56.
- [24] 杨日红, 李才, 杨德明, 等. 西藏羌塘盆地中生代构造岩相演化及油气远景[J]. 长春科技大学学报, 2000(3): 237-242.
- YANG Rihong, LI Cai, YANG Deming, et al. Mesozoic tectonic-petrographic evolution and oil-gas perspective in Qiangtang Basin, Tibet[J]. Journal of Changchun University of Science and Technology, 2000(3): 237-242.
- [25] 李勇, 王成善, 伊海生, 等. 青藏高原中侏罗世—早白垩世羌塘复合型前陆盆地充填模式[J]. 沉积学报, 2001, 19(1): 20-27.
- LI Yong, WANG Chengshan, YI Haisheng, et al. Fill models of in the Qiangtang composite foreland basin in Qinghai - Xizang Plateau, China[J]. Acta Sedimentologica Sinica, 2001, 19(1): 20-27.
- [26] 黄继钧, 伊海生, 林金辉. 羌塘盆地构造特征及油气远景初步分析[J]. 地质科学, 2004, 39(1): 1-10.
- HUANG Jijun, YI Haisheng, LIN Jinhui. Structural features of the Qiangtang Basin and preliminary analysis on oil-gas potentials[J]. Chinese Journal of Geology, 2004, 39(1): 1-10.
- [27] 谭富文, 王剑, 付修根, 等. 藏北羌塘盆地基底变质岩的锆石 SHRIMP 年龄及其地质意义[J]. 岩石学报, 2009, 25(1): 139-146.
- TAN Fuwen, WANG Jian, FU Xiugen, et al. U-Pb zircon SHRIMP age of metamorphic rocks from the basement of the Qiangtang Basin, northern Tibet, and its geological significance[J]. Acta Petrologica Sinica, 2009, 25(1): 139-146.
- [28] 刘若涵, 何碧竹, 郑孟林, 等. 羌塘盆地东部晚三叠世—侏罗纪构造—沉积演化[J]. 岩石学报, 2019, 35(6): 1857-1874.
- LIU Ruohan, HE Bizhu, ZHENG Menglin, et al. Tectonic-sedimentary evolution during Late Triassic - Jurassic period in the eastern part of the Qiangtang Basin, Tibet[J]. Acta Petrologica Sinica, 2019, 35(6): 1857-1874.
- [29] 曾胜强, 王剑, 陈文彬, 等. 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[J]. 地质论评, 2021, 67(5): 1231-1244.
- ZENG Shengqiang, WANG Jian, CHEN Wenbin, et al. Late Triassic to Early - Middle Jurassic depositional environment transformation process study in the eastern Qiangtang Basin: evidence from the record by the core samples[J]. Geological Review, 2021, 67(5): 1231-1244.
- [30] 王剑, 付修根, 谭富文, 等. 羌塘中生代(T_3-K_1)盆地演化新模式[J]. 沉积学报, 2010, 28(5): 884-893.
- WANG Jian, FU Xiugen, TAN Fuwen, et al. A new sedimentary model for the Qiangtang Basin[J]. Acta Sedimentologica Sinica, 2010, 28(5): 884-893.
- [31] 中华人民共和国国家质量监督检验检疫总局. 沉积岩中总有机碳的测定: GB/T 19145-2003[S]. 北京: 中国标准出版社, 2003.
- General Administration of Quality Supervision, Inspection and Quarantine of the People's Republic of China. Determination of

- total organic carbon in sedimentary rock; GB/T 19145-2003[S]. Beijing: Standards Press of China, 2003.
- [32] 国家能源局. 岩石薄片鉴定; SY/T 5368-2016[S]. 北京: 石油工业出版社, 2016.
National Energy Administration. Identification for thin section of rocks; SY/T 5368-2016[S]. Beijing: Petroleum Industry Press, 2016.
- [33] 中华人民共和国国家质量监督检验检疫总局, 中国国家标准化管理委员会. 硅酸盐岩石化学分析方法第30部分: 44个元素量测定; GB/T 14506.30-2010[S]. 北京: 中国标准出版社, 2011.
General Administration of Quality Supervision, Inspection and Quarantine of the People's Republic of China, Standardization Administration of the People's Republic of China. Methods for chemical analysis of silicate rocks Part 30: determination of 44 elements; GB/T 14506.30-2010[S]. Beijing: Standards Press of China, 2011.
- [34] 国家能源局. 烃源岩地球化学评价方法; SY/T 5735-2019[S]. 北京: 石油工业出版社, 2019.
National Energy Administration. Geochemical method for source rock evaluation; SY/T 5735-2019[S]. Beijing: Petroleum Industry Press, 2019.
- [35] TAYLOR S R, MCLENNAN S M. The continental crust: its composition and evolution[M]. London: Blackwell Scientific Publications, 1985: 312.
- [36] MCLENNAN S M. Rare earth elements in sedimentary rocks: influence of provenance and sedimentary processes[J]. Reviews in Mineralogy and Geochemistry, 1989, 21(1): 169-200.
- [37] 冯连君, 储雪蕾, 张启锐, 等. 化学蚀变指数(CIA)及其在新元古代碎屑岩中的应用[J]. 地学前缘, 2003, 10(4): 539-544.
FENG Lianjun, CHU Xueli, ZHANG Qirui, et al. CIA (Chemical Index of Alteration) and its applications in the Neoproterozoic clastic rocks[J]. Earth Science Frontiers, 2003, 10(4): 539-544.
- [38] 李清山, 郭少斌, 侯泽生, 等. 柴达木盆地上新世狮子沟期古气候演化与层序地层[J]. 石油实验地质, 2020, 42(1): 28-36.
LI Qingshan, GUO Shaobin, HOU Zesheng, et al. Palaeoclimate evolution and sequence stratigraphy during Pliocene Shizigou stage, Qaidam Basin[J]. Petroleum Geology & Experiment, 2020, 42(1): 28-36.
- [39] 李振明, 熊伟, 王斌, 等. 准噶尔盆地哈山地区二叠系凤城组细粒沉积特征与演化模式[J]. 石油实验地质, 2023, 45(4): 693-704.
LI Zhenming, XIONG Wei, WANG Bin, et al. Fine-grained sedimentary characteristics and evolution model of Permian Fengcheng Formation in Hashan area, Junggar Basin[J]. Petroleum Geology & Experiment, 2023, 45(4): 693-704.
- [40] WEI Wei, ALGEO T J. Elemental proxies for paleosalinity analysis of ancient shales and mudrocks[J]. Geochimica et Cosmochimica Acta, 2020, 287: 341-366.
- [41] JONES B, MANNING D A C. Comparison of geochemical indices used for the interpretation of palaeoredox conditions in ancient mudstone[J]. Chemical Geology, 1994, 111(1/4): 111-129.
- [42] TRIBOVILLARD N, ALGEO T J, BAUDIN F, et al. Analysis of marine environmental conditions based on molybdenum-uranium covariation: applications to Mesozoic paleoceanography[J]. Chemical Geology, 2012, 324-325: 46-58.
- [43] 黄梓桑, 王兴志, 杨西燕, 等. 沉积环境对页岩中有机质富集的约束: 以蜀南地区五峰组—龙马溪组为例[J]. 沉积学报, 2021, 39(3): 631-644.
HUANG Zisang, WANG Xingzhi, YANG Xiyan, et al. Constraints of sedimentary environment on organic matter accumulation in shale: a case study of the Wufeng-Longmaxi formations in the southern Sichuan Basin[J]. Acta Sedimentologica Sinica, 2021, 39(3): 631-644.
- [44] BHATIA M R, CROOK K A W. Trace element characteristics of graywackes and tectonic setting discrimination of sedimentary basins[J]. Contributions to Mineralogy and Petrology, 1986, 92(2): 181-193.
- [45] WRONKIEWICZ D J, CONDIE K C. Geochemistry of Archean shales from the Witwatersrand Supergroup, South Africa: source-area weathering and provenance[J]. Geochimica et Cosmochimica Acta, 1987, 51(9): 2401-2416.
- [46] 王忠伟, 占王忠, 高远, 等. 羌塘盆地北缘上三叠统藏夏河组沉积物源及构造背景分析[J]. 地质论评, 2020, 66(5): 1199-1215.
WANG Zhongwei, ZHAN Wangzhong, GAO Yuan, et al. Provenance and tectonic setting analysis of the Upper Triassic Zangxiahe Formation sandstone in the northern Qiangtang Basin[J]. Geological Review, 2020, 66(5): 1199-1216.
- [47] 朱同兴, 冯心涛, 王晓飞, 等. 青藏高原晚三叠世构造—古地理综述[J]. 沉积与特提斯地质, 2020, 40(3): 59-71.
ZHU Tongxing, FENG Xintao, WANG Xiaofei, et al. Summary of the Late Triassic tectonic paleogeography in the Qinghai-Tibetan Plateau, China[J]. Sedimentary Geology and Tethyan Geology, 2020, 40(3): 59-71.
- [48] 宋春彦, 王剑, 付修根, 等. 羌塘盆地藏夏河组砂岩地球化学特征及意义[J]. 地球科学(中国地质大学学报), 2013, 38(3): 508-518.
SONG Chunyan, WANG Jian, FU Xiugen, et al. Geochemical characteristics and signatures of the sandstones from Zangxiahe Formation in Qiangtang Basin[J]. Earth Science (Journal of China University of Geosciences), 2013, 38(3): 508-518.
- [49] 熊伟, 王越, 熊峥嵘, 等. 准噶尔盆地石北凹陷岛弧环境下火山—沉积建造特征及源储发育模式: 以石炭系姜巴斯套组为例[J]. 石油实验地质, 2023, 45(4): 656-666.
XIONG Wei, WANG Yue, XIONG Zhengrong, et al. Characteristics of volcanic-sedimentary formations and developmental patterns of source and reservoir rocks in an island arc environment of Shibe Sag, Junggar Basin: taking the Carboniferous Jiangbasitao Formation as an example[J]. Petroleum Geology & Experiment, 2023, 45(4): 656-666.
- [50] 李志扬, 陆棚海泥岩的岩相特征及沉积过程: 以晚白垩世北美西部内陆海道为例[J]. 沉积学报, 2021, 39(1): 168-180.
LI Zhiyang. Facies characteristics and depositional processes of shelf mudstones: examples from the Late Cretaceous western interior seaway of North America[J]. Acta Sedimentologica Sinica, 2021, 39(1): 168-180.