

引用本文:蔡倩茹,王金铎,张关龙,等.准噶尔盆地东北缘上石炭统巴山组烃源岩沉积环境分析及物源示踪——来自泥岩地球化学的证据[J].石油实验地质,2024,46(1):146-157.DOI:10.11781/sydz202401146.
CAI Qianru, WANG Jinduo, ZHANG Guanlong, et al. Research on sedimentary environment and provenance for hydrocarbon source rocks of Upper Carboniferous Batamayineishan Formation in northeastern Junggar Basin; evidences from the geochemistry of mudstones[J]. Petroleum Geology & Experiment, 2024, 46(1): 146-157. DOI: 10.11781/sydz202401146.

准噶尔盆地东北缘上石炭统巴山组烃源岩 沉积环境分析及物源示踪

——来自泥岩地球化学的证据

蔡倩茹^{1,2}, 王金铎¹, 张关龙¹, 宋智华^{1,2}, 王圣柱¹, 熊峥嵘¹, 倪胜利¹

1. 中国石化 胜利油田分公司 勘探开发研究院, 山东 东营 257000;

2. 中国石化 胜利石油管理局 博士后科研工作站, 山东 东营 257000

摘要: 烃源岩分布规律和生烃潜力是制约准噶尔盆地东北地区油气勘探的关键因素之一, 而沉积背景和环境变化是控制烃源岩成因、分布以及有机质类型的主要因素, 沉积岩中的微量元素、稀土元素等在沉积过程中往往受古气候、古水体化学条件、古环境以及古物源的影响。因此, 通过对沉积岩中元素分布规律的全面分析, 有助于确定沉积环境和演变过程。对准噶尔盆地东北缘富蕴地区上石炭统巴山组暗色泥岩样品的主微量元素、稀土元素进行地球化学特征分析, 结合样品的岩石学特征, 揭示古沉积环境和物源区构造背景, 为烃源岩形成和发育条件提供地质约束。泥岩的化学风化作用指标、元素含量和元素比值的综合分析表明, 巴山组沉积期的古气候条件温暖湿润、水体属氧化条件下的半咸水—淡水, 且水体较浅、沉积速率相对稳定。主微量元素特征指示母岩类型主要为沉积岩和长英质火山岩, 物源来自卡拉麦里岛弧酸性火成岩区的风化产物, 反映了后碰撞阶段由挤压向伸展的构造转变。沉积环境和构造背景控制陆源高等植物输入增多, 烃源岩有机质丰度中等, 具有一定的生烃潜力。

关键词: 烃源岩; 地球化学特征; 沉积环境; 巴山组; 准东北缘

中图分类号: TE122.1

文献标识码: A

DOI: 10.11781/sydz202401146

Research on sedimentary environment and provenance for hydrocarbon source rocks of Upper Carboniferous Batamayineishan Formation in northeastern Junggar Basin:

evidences from the geochemistry of mudstones

CAI Qianru^{1,2}, WANG Jinduo¹, ZHANG Guanlong¹, SONG Zhihua^{1,2},

WANG Shengzhu¹, XIONG Zhengrong¹, NI Shengli¹

1. Exploration and Development Research Institute

of SINOPEC Shengli Oilfield Branch Company, Dongying, Shandong 257000, China;

2. Postdoctoral Research Workstation of SINOPEC Shengli Petroleum Management Bureau, Dongying, Shandong 257000, China

Abstract: The distribution rules and hydrocarbon potential of source rocks are the major factors which determine oil and gas exploration in the northeastern Junggar Basin. Sedimentary background and environmental changes are the main factors controlling the genesis, distribution, and organic matter types of hydrocarbon source rocks. The main and trace elements and rare earth elements in sedimentary rocks are often influenced by palaeoclimate, paleo water chemical conditions, palaeoenvironment, and palaeosource during sedimentation process. Therefore, a comprehensive analysis of the distribution patterns of elements in sedimentary rocks can help to determine sedimentary environment and evolution process. The geochemical characteristics of major and trace elements and rare earth elements for mudstones of the Upper Carboniferous Batamayineishan Formation from outcrops of the north-

收稿日期 (Received): 2023-05-29; 修订日期 (Revised): 2023-12-06; 出版日期 (Published): 2024-01-28.

作者简介: 蔡倩茹 (1992—), 女, 博士, 助理研究员, 从事火山岩和沉积岩地球化学研究。E-mail: cqrcqr92@163.com.

基金项目: 中国石化科技攻关项目 (P21077-1) 和中国石化胜利油田博士后项目 (YKB2301) 联合资助。

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

eastern Junggar Basin were studied to reveal the sedimentary environment and the tectonic setting of the provenance, which can provide geological constraints for the origin and development conditions of hydrocarbon source rocks. According to a comprehensive analysis on chemical weathering indicators, element contents, and ratios between various major and trace elements, the mudstones of Batamayineishan Formation were deposited in a warm and humid paleoclimate background, and the deposition process was relatively stable in a shallow water with brackish-fresh features under oxidizing environment. Major and trace elements of mudstones indicate that the parent rocks are sedimentary rocks and felsic volcanic rocks and their provenance is derived from the weathering products of acidic igneous rocks of the Karamaili Island Arc, reflecting the tectonic transition from compression to extension during the post collision stage. The depositional environment and tectonic setting controlled the increased input of terrestrial higher plants, resulting in the medium abundance of organic matter with good hydrocarbon generating potential.

Key words: hydrocarbon source rock; geochemical characteristics; sedimentary environment; Batamayineishan Formation; northeastern Junggar Basin

准噶尔盆地是自晚古生代以来经历多期构造运动改造形成的大型叠合盆地,油气资源丰富^[1-3]。目前准东北地区的油气勘探正逐渐由浅层中生界向深层石炭系一二叠系扩展,其中石炭系更是极其重要的烃源岩和储层发育层系,具有十分重要的勘探研究意义^[4-6]。近年来,随着陆梁隆起南缘滴南凸起的克拉美丽气田以及五彩湾凹陷油气藏的相继发现,证实准东北地区发育的上石炭统巴塔玛依内山组(巴山组)是有利的烃源岩发育层段^[7-8]。其中滴中1、滴西8、彩参1等20多口井钻遇巴山组烃源岩,在盆地东北缘的塔克尔巴斯他乌、扎河坝、五彩湾、白碱沟和双井子等露头区也有出露^[9-10]。巴山组烃源岩的分布受到断裂和火山岩分布的控制,呈条带状展布,与火山岩互层或形成于火山岩体之间的低洼地带,岩性为泥岩、凝灰质泥岩和碳质泥岩^[11]。沉积背景及环境变化是控制烃源岩成因、分布以及有机质类型的主要因素,并且会对储集空间类型、孔隙结构等产生重要影响。因此,沉积环境的分析对于有利烃源岩分布预测具有重要的指导作用,进而决定油气勘探进展。然而,前期研究大多侧重于火山岩成因、大地构造演化以及沉积相分析等,对巴山组沉积环境方面的研究工作较少,存在海相、海陆过渡相和陆相等争议^[12-13]。

沉积岩中的主微量、稀土元素在沉积过程中往往受古气候、古水体化学条件、古环境以及古物源的影响,因此沉积岩地化特征是指示沉积演化过程的标志^[14-15]。通过对沉积岩中元素分布规律的全方面分析,有助于确定沉积环境和演变过程。鉴于此,本文对准噶尔盆地东北缘富蕴地区发育的暗色泥岩进行系统的样品采集工作,结合岩石学特征与地球化学测试分析,恢复巴山组沉积期古气候、古水深以及水体介质的古盐度和古氧化还原条件等,

并且进一步探讨构造环境与古沉积环境之间的联系,对准噶尔盆地东北部石炭系油气勘探、开发与评价提供地质依据。

1 地质背景

东准噶尔处于新疆北部,是中亚造山带的重要组成部分。该区自古生代以来经历了多阶段的大洋俯冲、碰撞和后碰撞等复杂的构造演化历史,并形成一系列相关的火山岛弧及增生杂岩^[12-13]。上石炭统巴山组沉积时期,火山作用强烈,爆发相、溢流相与火山沉积相交交互发育,在火山喷发的间歇期,发育大量的砂、泥岩沉积^[11]。受晚古生代洋壳向北俯冲、闭合及板块边界碰撞造山作用控制,准噶尔古陆与西伯利亚板块最终拼合连为一体,准东北地区在晚石炭世之前已经进入陆内演化阶段,表现为裂谷与残留海并存,北陆南海的格局^[16-17]。本次研究区位于盆地东北缘的富蕴县,包括五彩城、帐篷沟、白碱沟、扎河坝、尖山沟以及拜尔库都克地区(图1)。该地区的巴山组根据岩性可以分为两段:下部巴一段岩性主要为中基性火山岩,玄武岩占多数,局部发育酸性流纹岩、火山角砾岩和凝灰岩;上部巴二段则以薄层砾岩、粉砂岩、粉砂质泥岩和泥岩为主。

2 样品采集与测试方法

本次研究样品均采自富蕴县出露的巴山组,主要为新鲜且未经风化的泥岩和粉砂质泥岩。这些岩石样品在野外露头中呈灰白色,新鲜面为浅灰色,块状构造,泥状结构。矿物粒度极细,手标本下肉眼难以分辨,岩石致密细腻,可见贝壳状断口。偏光显微镜下可见岩石薄片样品主要是由黏土矿物、石英以及填充其间的有机质共同组成(图2)。其中石英矿

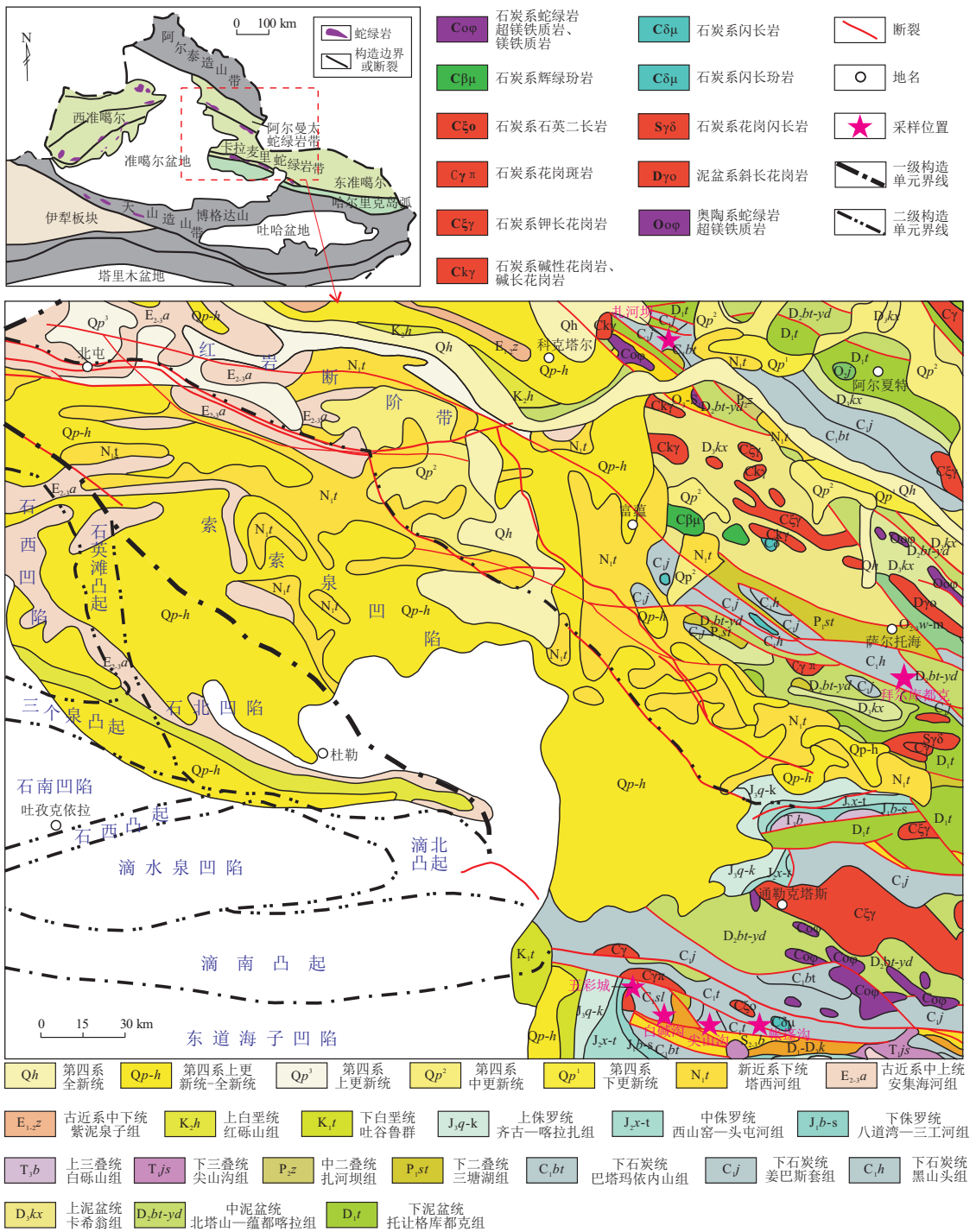


图 1 准噶尔盆地东北缘地质概况和采样位置
据参考文献[9]修改。

Fig.1 Geological sketch map of northeastern Junggar Basin with sampling locations

物自形程度较差,粒状,粒径为 0.02~0.03 mm,含量为 15%~20%,正交偏光镜下可见明显的波状消光。黏土矿物为黑色不透明颜色,形状不规则,含量约为 60%~70%。有机质物质主要呈条状或块状填充在石英与黏土矿物之间,含量约为 15%~20%。通过手标本观察和镜下薄片鉴定,重点选取主微量元素分析样品 27 件,稀土元素分析样品 8 件。样品检测在中国石油大学(北京)地球科学学院石油地质实

验室内完成。主量元素测试借助 X 射线荧光光谱仪(XRF),测试流程遵循国标《硅酸盐岩石化学分析方法:GB/T 14506.28—2010》,测试精度在 2%~4%;微量及稀土元素测试依据美国 PE 公司 DRC-E 型电感耦合等离子体质谱(ICP-MS),以国家标准参考物质(GSR3)为标样进行检测,遵循岩石、土壤、水系沉积物中微量元素的封闭酸溶 ICPMS 法测定,测试精度优于 5%。实验结果见表 1。

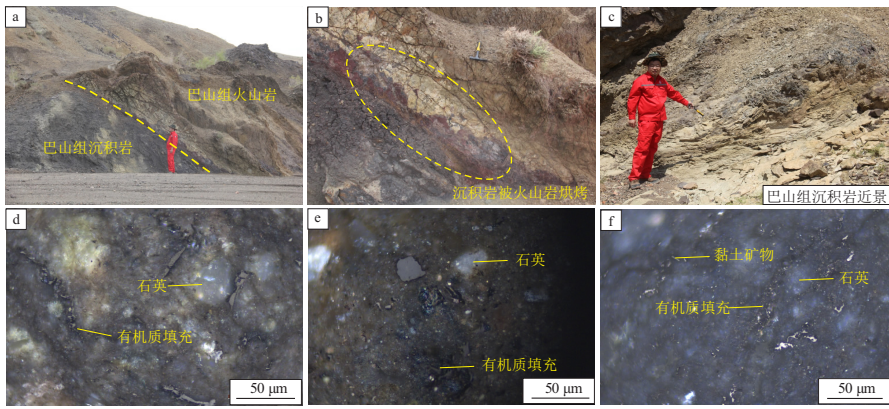


图 2 准噶尔盆地东北缘上石炭统巴山组泥岩野外特征(a-c)及岩石薄片(d-f)
 Fig.2 Characteristics for mudstones of Upper Carboniferous Batamayineshan Formation in outcrops(a-c) and rock slices(d-f) from northeastern Junggar Basin

表 1 准噶尔盆地东北缘上石炭统巴山组泥岩样品主微量元素和地球化学指标数据
 Table 1 Major and trace elements and calculated geochemical indicators of mudstones in Upper Carboniferous Batamayineshan Formation, northeastern Junggar Basin

主微量元素 与地化指标	采样地区和样品号													
	五彩城												尖山沟	
	W1	W2	W3	W4	W5	W6	W7	W8	W9	W10	W11	W12	J1	J2
SiO ₂ /%	60.2	64.5	61.7	61.3	62.0	61.4	57.6	59.1	59.1	57.1	62.8	55.3	52.5	49.6
Al ₂ O ₃ /%	14.9	15.0	15.4	17.4	15.4	15.0	15.6	17.4	17.6	11.7	17.1	18.6	17.8	17.6
CaO/%	3.1	1.3	3.4	1.1	1.2	2.1	2.4	0.6	1.0	1.0	1.2	1.1	1.6	2.1
Fe ₂ O ₃ /%	7.5	6.1	5.1	5.5	6.3	6.7	7.9	7.1	6.3	15.2	3.8	6.1	5.8	5.2
K ₂ O/%	1.4	2.3	1.9	2.8	2.6	1.9	1.8	2.2	2.1	0.7	2.2	2.4	1.4	1.3
MgO/%	1.2	1.5	1.2	1.4	1.5	0.8	0.8	0.9	0.8	1.2	0.6	0.7	0.9	1.0
Na ₂ O/%	3.8	2.1	3.4	2.5	2.4	3.2	3.0	2.6	1.8	2.0	2.3	2.0	2.3	2.3
TiO ₂ /%	0.8	0.7	0.8	0.8	0.7	0.8	0.8	0.8	0.8	0.5	0.8	0.9	0.9	0.9
Li/(μg/g)	65.2	64.2	39.4	39.3	41.0	29.3	44.3	27.6	28.9	215.0	38.6	47.8	32.8	38.5
Sc/(μg/g)	12.1	14.0	12.4	15.0	14.5	15.7	15.7	18.3	16.7	11.0	12.9	17.7	14.0	14.7
V/(μg/g)	88.3	118.0	76.5	82.0	118.0	117.0	127.0	128.0	114.0	122.0	77.1	105.0	94.6	95.6
Cr/(μg/g)	41.2	24.6	39.4	21.9	20.7	25.5	32.9	26.2	25.1	27.0	21.0	20.9	16.6	18.7
Co/(μg/g)	10.0	8.3	9.2	8.1	10.3	9.8	18.2	10.3	10.9	12.3	5.3	12.0	3.1	6.9
Ni/(μg/g)	12.7	12.7	16.3	11.1	15.2	14.3	17.3	14.1	15.9	16.6	6.1	12.7	7.7	10.3
Cu/(μg/g)	24.5	30.0	18.8	26.2	34.1	31.0	33.6	37.7	37.2	26.4	25.2	37.8	32.9	34.2
Zn/(μg/g)	74.1	66.2	62.3	81.6	77.3	78.3	82.9	94.3	89.1	92.1	63.6	98.0	63.8	79.0
Ga/(μg/g)	19.6	21.3	19.6	23.6	22.2	21.4	24.4	24.5	24.2	17.1	21.7	25.7	23.4	23.4
Rb/(μg/g)	61.8	102.0	68.9	96.3	86.3	74.7	70.6	78.5	71.8	25.7	70.2	89.0	52.7	46.6
Sr/(μg/g)	249	137	198	149	218	256	230	153	194	110	169	201	243	282
Zr/(μg/g)	236	255	242	309	256	253	266	290	282	181	246	284	268	287
Mo/(μg/g)	1.7	2.8	3.1	3.2	4.2	4.0	5.9	1.4	1.8	7.3	2.8	1.1	2.5	1.5
Ba/(μg/g)	179	270	263	410	639	356	403	376	306	137	341	309	205	181
Th/(μg/g)	4.6	7.1	5.5	7.3	7.5	6.5	7.3	8.4	8.3	5.3	6.9	8.1	7.4	7.9
U/(μg/g)	2.0	2.5	1.8	2.2	2.8	2.6	2.4	2.7	2.7	2.2	2.2	2.5	6.1	2.9
SiO ₂ /Al ₂ O ₃	4.0	4.3	4.0	3.5	4.0	4.1	3.7	3.4	3.4	4.9	3.7	3.0	2.9	2.8
CaO+Na ₂ O	6.8	3.3	6.9	3.6	3.6	5.3	5.4	3.2	2.8	3.0	3.5	3.1	3.9	4.4
Sr/Ba	1.4	0.5	0.8	0.4	0.3	0.7	0.6	0.4	0.6	0.8	0.5	0.7	1.2	1.6
Sr/Cu	10.2	4.6	10.6	5.7	6.4	8.3	6.9	4.1	5.2	4.2	6.7	5.3	7.4	8.2
V/Cr	2.1	4.8	1.9	3.7	5.7	4.6	3.9	4.9	4.6	4.5	3.7	5.0	5.7	5.1
U/Th	0.4	0.4	0.3	0.3	0.4	0.4	0.3	0.3	0.3	0.4	0.3	0.3	0.8	0.4
Ni/Co	1.3	1.5	1.8	1.4	1.5	1.5	1.0	1.4	1.5	1.4	1.2	1.1	2.5	1.5
Cu/Zn	0.3	0.5	0.3	0.3	0.4	0.4	0.4	0.4	0.4	0.3	0.4	0.4	0.5	0.4
Rb/Zr	0.3	0.4	0.3	0.3	0.3	0.3	0.3	0.3	0.3	0.1	0.3	0.3	0.2	0.2
Co/Th	2.2	1.2	1.7	1.1	1.4	1.5	2.5	1.2	1.3	2.3	0.8	1.5	0.4	0.9
CIA	65.8	74.1	64.9	74.3	72.1	69.7	69.8	78.4	79.8	80.7	76.2	78.6	77.7	76.5
CIW	70.3	83.5	70.6	84.4	82.4	76.6	75.9	86.9	87.9	84.7	84.5	87.6	82.9	81.1
PIA	68.1	81.1	67.8	81.9	79.5	74.0	73.6	85.3	86.6	83.9	82.7	86.0	81.6	79.9
F ₁	-3.9	-2.3	-1.3	-0.8	-1.4	-3.0	-4.3	-3.5	-3.7	-17.0	-1.3	-2.9	-4.1	-3.9
F ₂	-5.1	-2.7	-3.1	-2.2	-2.6	-4.9	-5.6	-4.5	-4.0	-14.0	-2.8	-3.7	-3.8	-3.4
U _{EF}	0.59	0.75	0.54	0.58	0.81	0.79	0.7	0.69	0.69	0.84	0.59	0.61	0.92	0.62
Mo _{EF}	0.73	1.23	1.31	1.2	1.76	1.76	2.48	0.51	0.65	4.07	1.08	0.4	0.2	0.2

3 测试结果分析及沉积环境讨论

3.1 古气候条件

古气候变化直接影响沉积物供应及水体分层,进而制约着水体种群密度及生物组合,间接影响着有机质富集与储存。化学蚀变指数(CIA)是反映古气候特征的重要参数, $CIA = Al_2O_3 \times 100 / (Al_2O_3 + CaO * + Na_2O + K_2O)$, 式中 $CaO *$ 指硅酸盐矿物中的 CaO 。一般情况下, CIA 值的升高通常与古气候环境的湿润程度呈正相关关系; 同样的, 化学风化指数 [$CIW, CIW = Al_2O_3 \times 100 / (Al_2O_3 + CaO *)$] 和斜长石蚀变指数 [$PIA, PIA = (Al_2O_3 - K_2O) \times 100 /$

$(Al_2O_3 + CaO * + Na_2O - K_2O)$] 值的逐渐升高也指示物源区风化程度的持续增强, 反映物源区古气候向温暖、潮湿环境转变的趋势^[12]。

研究区内, 除了扎河坝地区泥岩样品的 CIA 值介于 89~106, 反映强化学风化背景下的湿热型气候, 其余地区泥岩样品 CIA 值均介于 58~82 (平均值 76), 指示中等化学风化背景下的暖湿型气候^[19]。邻区塔克尔巴斯他乌露头和盆地内部乌伦古坳陷的巴山组泥岩 CIA 指数也反映了暖湿型或温热型古气候环境^[9, 11]。同时, 区域内 CIW 和 PIA 值也均指示源区以中等风化作用为主 (图 3)。在泥岩 A-CN-K 三角图解 (图 4) 中可以看出, 平行

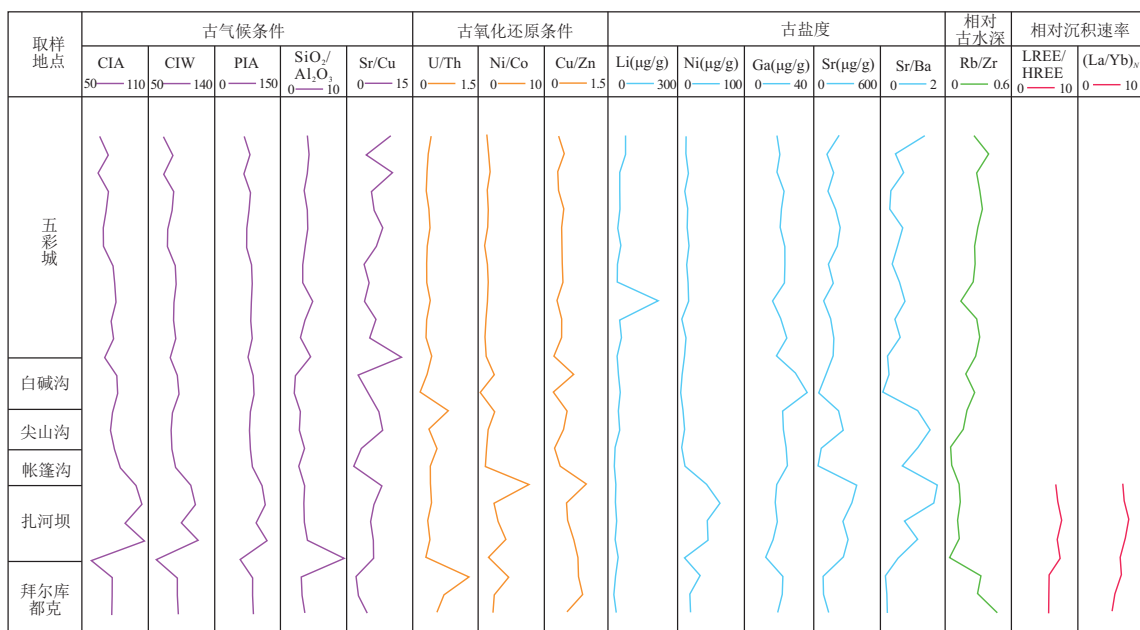


图 3 准噶尔盆地东北缘晚石炭世沉积环境地球化学参数变化

Fig.3 Geochemical variations for sedimentary environment of northeastern Junggar Basin during Late Carboniferous

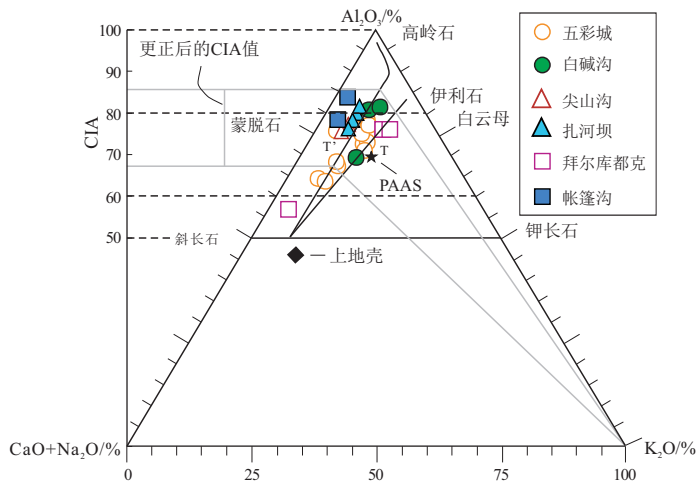


图 4 准噶尔盆地东北缘上石炭统巴山组泥岩 A-CN-K 三角图
据参考文献[21]修改; PAAS 为后太古宙澳大利亚页岩。

Fig.4 Triangular A-CN-K diagram for mudstones of Upper Carboniferous Batamayineshan Formation in northeastern Junggar Basin

于 A-CN 坐标轴的岩石预测风化趋势线 T' (剔除了钾交代作用的影响) 指示除了扎河坝个别点在强化学蚀变区, 其余大部分点落在中等化学蚀变区, 与前述观点一致。

$\text{SiO}_2/\text{Al}_2\text{O}_3$ 比值可用来反映 Si 通过化学淋溶搬运的变化情况, 当 $\text{SiO}_2/\text{Al}_2\text{O}_3 > 4$ 时, 岩石中 SiO_2 运移极少, 指示干燥的气候环境; 而当 $\text{SiO}_2/\text{Al}_2\text{O}_3 < 4$ 时, 则指示了相对湿润的气候环境导致大量的 SiO_2 迁移^[20]。研究区只有个别泥岩样品具有较高的 $\text{SiO}_2/\text{Al}_2\text{O}_3$ 比值, 而大部分样品均远低于 4, 反映了相对湿润的古气候背景。另一方面, 高的 Sr 含量是水体在干旱气候下蒸发的结果; 而在干冷条件下, 由于水体的碱性逐渐增强, 导致 Cu 大量析出。因此 Sr/Cu 被广泛用于恢复古气候, 通常 $\text{Sr}/\text{Cu} > 10$ 指示干燥气候, $\text{Sr}/\text{Cu} < 10$ 则代表温湿气候^[21]。所有的泥岩样品中除 3 个具有较高 Sr/Cu 比值外, 其余的 Sr/Cu 值均介于 2~8, 平均值为 5.93, 整体反映温暖湿润的古气候环境。

3.2 古氧化—还原条件

通常情况下, 常见的敏感元素主要包括 U、Th、Ni、Co、Cu、Zn、Mo 等, 其富集程度和相互间的比值是反映氧化—还原环境的可靠指标^[22-23]。其中, Th、U 元素之间化学性质的差异性, 导致其不同环境的赋存状态截然不同。Th 在水体中主要以 Th^{4+} 的形态赋存, 对氧化还原条件的敏感性差。相反, U 在缺氧条件下以 U^{6+} 形式与海水中的碳酸根离子结合, 导致沉积物在氧化环境中通常亏损 U。因此, U/Th 比值是指示水体氧化还原条件的重要指标, 具体表现为, $\text{U}/\text{Th} > 1.25$ 指示缺氧环境, U/Th 介于 0.75~1.25 时为贫氧环境, $\text{U}/\text{Th} < 0.75$ 则反映氧化环境^[24-25]。测试结果显示, 区域内巴山组岩石除两个样品的 U/Th 比值大于 0.75, 其余样品的 U/Th 比值均介于 0.17~0.72, 表明研究区在晚石炭世整体处于典型的氧化环境(图 3)。

在氧化水体中, Ni 大多以 Ni^{2+} 离子或 NiCO_3 形式被有机质所吸附; 在还原水体中, Ni 则可形成不溶性的 NiS, 被自生黄铁矿吸收。同时, 在还原环境中 Co 比 Ni 优先活化, 从而造成沉积物中的 Ni/Co 比值增大。因此, Ni/Co 比值也被认为是判断沉积物所在水体氧化还原程度的重要参数, 其中 $\text{Ni}/\text{Co} < 5$ 对应氧化环境, Ni/Co 介于 5~7 对应贫氧环境, 而 $\text{Ni}/\text{Co} > 7$ 则指示缺氧环境^[16]。通过对研究区巴山组泥岩 Ni/Co 比值进行计算, 除在一个样品中为 7.71, 其余样品 Ni/Co 比值介于 0.28~4.22, 均值为 2.02, 揭示了巴山组沉积岩形成于水体氧化

环境(图 3)。

类似的, Cu 在氧化水体中大多以 CuCl^+ 离子的形式存在, 而在还原水体下 Cu^{2+} 则进入黄铁矿形成 CuS。Zn 在海水氧化环境中, 以腐殖酸的络合物形式存在; 还原环境时则会以 Zn 的形式存在于黄铁矿中。因此 Cu/Zn 也常被用来指示沉积期的氧化—还原环境, 其中, $\text{Cu}/\text{Zn} < 0.21$ 对应还原环境, Cu/Zn 比值介于 0.21~0.35 时为弱还原环境, $\text{Cu}/\text{Zn} > 0.35$ 则对应氧化环境^[26]。研究区巴山组泥岩除个别样品外, 大部分样品的 Cu/Zn 比值均大于 0.35, 指示沉积时期应处于典型的氧化环境。同时, 在上述微量元素比值进行判别和分析的基础上, 进一步将以上判别指标进行交会投点, 可以发现在 Ni/Co-U/Th 图解上(图 5a), 大部分样品均投入氧化环境中, 仅少数样品位于弱氧化或缺氧区域, 同样验证了元素比值的判别结果。

缺氧环境通常会导导致 Mo 和 U 元素在沉积物中富集, 在氧化条件下含量极低, 在 Fe^{3+} 和 Fe^{2+} 的氧化—还原界面附近, U 富集快于 Mo, 而在缺氧或硫化环境中则相反^[31]。U_{EF}-Mo_{EF} 协变模式图可以很好地反映盆地沉积过程中的氧化—还原性质^[28], 其中 Mo 和 U 富集系数的计算公式为 $X_{\text{EF}} = (X/\text{Al})_{\text{样品}} / (X/\text{Al})_{\text{平均页岩}}$ 。研究区样品的 U_{EF}、Mo_{EF} 数据大部分小于 1, 最高值一般不大于 3, 在协变模式图中都没有落入缺氧和硫化区域, 反映了氧化的水体条件(图 5b)。因此, 根据多种元素比值和判别方式综合分析, 认为准东北缘在巴山组沉积时期处于氧化环境。

3.3 古盐度

Li、Ni、Ga、Sr 等元素的含量对沉积水体的盐度具有明显的控制作用, 因此沉积岩中这几种元素常被用来判别古沉积环境的水体盐度^[21]。通常情况下, 在海相(盐水)沉积环境中, Li 含量大于 150×10^{-6} , Ni 含量大于 40×10^{-6} , Ga 含量小于 8×10^{-6} , Sr 含量介于 $(800 \sim 1\ 000) \times 10^{-6}$; 而在陆相(淡水)沉积环境中, Li 含量小于 90×10^{-6} , Ni 含量介于 $(20 \sim 25) \times 10^{-6}$, Ga 含量大于 17×10^{-6} , Sr 含量介于 $(100 \sim 500) \times 10^{-6}$ ^[15]。实验结果表明, 研究区巴山组泥岩样品中的 Li 含量除一个样品达到 215×10^{-6} 外, 其余样品均介于 $(12 \sim 65) \times 10^{-6}$, Ni 含量除在个别样品中大于 40×10^{-6} 外, 大部分样品中介于 $(5 \sim 34) \times 10^{-6}$, Ga 含量介于 $(13 \sim 38) \times 10^{-6}$, Sr 含量介于 $(56 \sim 407) \times 10^{-6}$ 。准东北地区在石炭纪以发育火山岩和碎屑岩沉积为主, 不发育碳酸盐岩, 对水体中 Sr 等元素的原始含量没有影响, 因此

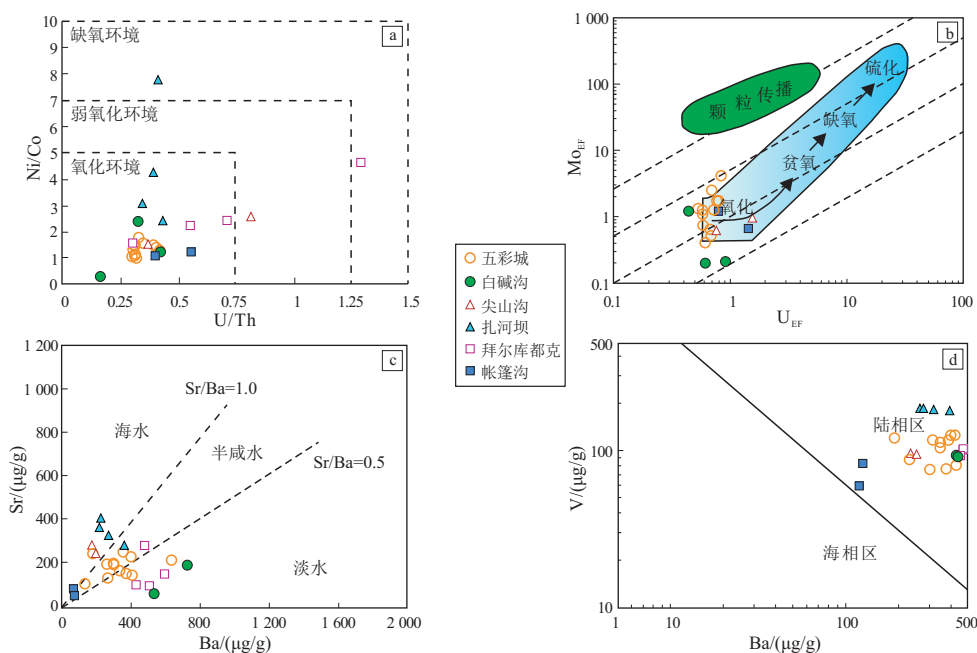


图 5 准噶尔盆地东北缘上石炭统巴山组泥岩 Ni/Co-U/Th (a)^[27]、 U_{EF} - Mo_{EF} (b)^[28]、Sr-Ba (c)^[29]、V-Ba (d)^[30] 判别
Fig.5 Discriminant diagrams for Ni/Co-U/Th (a), U_{EF} - Mo_{EF} (b), Sr-Ba (c), and V-Ba (d) for mudstones
of Upper Carboniferous Batamayineshan Formation in northeastern Junggar Basin

这些微量元素特征均显示巴山组沉积期处于半咸水—淡水环境(图 3)。

另一方面, Sr 和 Ba 的化学性质相似, 其富集程度也受水体盐度的控制, 在咸水环境下, Ba 往往会率先析出, 而 Sr 的溶解度整体高于 Ba, 只有当水体到达一定咸度后才会被析出, 因此, Sr/Ba 常被用来作为判断沉积环境中水体古盐度的重要指标, Sr/Ba > 1.0 指示咸水沉积环境; 当 Sr/Ba 值介于 0.5~1.0 时为半咸水沉积; Sr/Ba < 0.5 则代表了淡水沉积环境^[27]。研究区巴山组除个别泥岩样品的 Sr/Ba 值大于 1, 其余大部分样品 Sr/Ba 值介于 0.12~0.80, 属于半咸水—淡水环境。同时, Sr-Ba、V-Ba 图解也可以指示沉积时的水体盐度和来源, Sr-Ba 图解显示研究区巴山组的大部分泥岩样品均落入半咸水—淡水范围内(图 5c), V-Ba 图解显示巴山组所有泥岩样品均落入陆相区(图 5d)。综上所述, 准噶尔东北缘巴山组沉积期应属于陆相半咸水—淡水环境。

3.4 沉积速率

稀土元素的分异程度是判断沉积速率快慢的重要参数^[32], 黏土矿物等是稀土元素吸附的主要载体。当沉积速率慢时, 在水中停留时间较长导致 REE 分异强, 当沉积速率快时, 在水中停留时间较短导致 REE 分异弱。LREE/HREE 和 $(La/Yb)_N$ 是反映轻重稀土元素分异的重要指标。本次研究只对扎河坝和拜尔库都克地区巴山组泥

岩样品做了稀土元素分析, 结果显示这两个地区的 LREE/HREE 值介于 5.67~7.67, 平均值为 6.63, $(La/Yb)_N$ 介于 5.18~7.77, 平均值为 6.60, 轻—重稀土分异程度中等, 表明巴山组泥岩的沉积速率相对稳定(图 3)。此外, 可根据沉积岩中 Co 和 La 含量对具体的沉积速率值进行估算^[32], 公式如下:

$$V_s = V_0 \times N_{Co} / (S_{Co} - t \times T_{Co}) \quad (1)$$

$$t = S_{La} / N_{La} \quad (2)$$

式中: V_0 为正常水体的沉积速率, 一般为 150~300 m/Ma, 前述成果认为研究区巴山组沉积速率中等, 因此本次计算 V_0 取 200 m/Ma; N_{Co} 为正常水体 Co 的丰度, 为 20×10^{-6} ; S_{Co} 为样品中 Co 的丰度, 平均为 11.185×10^{-6} ; T_{Co} 为沉积岩中 Co 的平均丰度, 为 4.68×10^{-6} ; S_{La} 为样品中 La 的丰度, 平均为 35.6×10^{-6} ; N_{La} 为沉积岩中 La 的平均丰度, 为 38.99×10^{-6} 。计算得到样品的平均沉积速率 V_s 为 578.7 m/Ma; t 为 S_{La} / N_{La} 比值。

3.5 古水深

元素 Zr 化学性质稳定, 一般以锆石等重矿物的形式存在, 在较浅的水体中容易直接沉积; 元素 Rb 化学性质活泼, 易迁移, 在黏土矿物中较常见, 并在较深的水体中更易直接沉积, 因此判断古水深一般使用 Rb/Zr 比值作为参数^[20]。Rb/Zr 比值的升高也与水体环境的深度呈明显的正相关, 与水动

力强度呈负相关。研究区巴山组泥岩样品 Rb/Zr 比值分布于 0.05~0.47 之间,均值为 0.23,反映较浅的水体沉积环境。在沉积速率估算的基础上,根据公式 $h = 3.05 \times 10^5 / V_s^{1.5}$ [33], 计算得到研究区巴山组泥岩沉积时期的平均古水深 (h) 为 21.9 m。

4 构造背景及物源分析

通常情况下,相对稳定的微量元素 (La、Sc、Cr、Th、Zr、Co) 能够较准确地识别沉积物的原始物源区特征,并且微量元素含量与构造背景之间的对应关系也可为进一步判断沉积环境提供地质约束。在沉积岩微量元素三端元判别图解投图中 (图 6), 研究区巴山组泥岩样品均落入大陆岛弧环境。而前人对乌伦古坳陷、扎河坝、白碱沟以及塔克尔巴斯他鸟等地的火山岩微量元素及 Sr-Nd 同位素进行了系统的研究, Sr-Nd 同位素显示,其岩浆来源于亏损地幔,而微量元素特征也具有亏损的特征,但亏损程度要低于岛弧源区,不如板内环境的源区富集,属于后碰撞环境 [9, 34-35]。一般来说,岩浆的地壳混染、分离结晶以及继承前次俯冲所保留下的

特征都能使得出露岩石具有岛弧特征,再结合沉积岩较浅的古水深环境,认为研究区巴山组的构造环境可能为后碰撞伸展。

物源区母岩类型可根据判别函数 (F_1 和 F_2) 及相关图解确定,其中函数 F_1 和 F_2 计算公式如下:

$$F_1 = 30.638TiO_2/Al_2O_3 - 12.541Fe_2O_3/Al_2O_3 + 7.329MgO/Al_2O_3 + 12.031Na_2O/Al_2O_3 + 35.402K_2O/Al_2O_3 - 6.382 \quad (3)$$

$$F_2 = 36.500TiO_2/Al_2O_3 - 10.879Fe_2O_3/Al_2O_3 + 30.875MgO/Al_2O_3 - 5.404Na_2O/Al_2O_3 + 11.112K_2O/Al_2O_3 - 3.89 \quad (4)$$

根据以上计算公式,计算出 F_1 和 F_2 的值, F_1 - F_2 图解 [31] 揭示研究区泥岩主要来自成熟大陆石英质物源区 (图 7a)。同时根据扎河坝和拜尔库都克泥岩稀土元素与微量元素比值 Co/Th-La/Sc, 在 Y 轴上,其落在长英质火山岩与安山岩之间,在 X 轴上,其落在花岗岩与长英质火山岩之间,且处于花岗岩的沉积改造加强方向 (图 7b),说明泥岩组分中含有长英质。综上所述,本次研究的

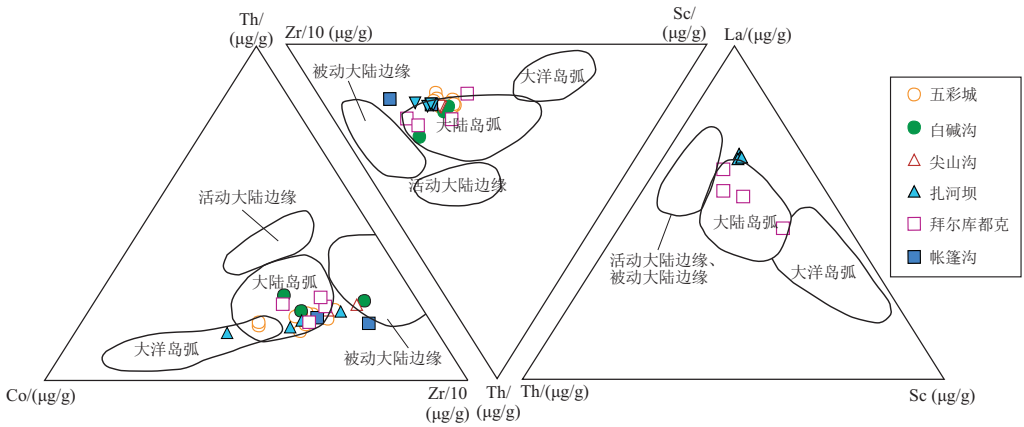


图 6 准噶尔盆地东北缘上石炭统巴山组泥岩沉积构造环境判别 [36]

Fig.6 Discriminant diagrams for tectonic settings of mudstones of Upper Carboniferous Batamayineshan Formation in northeastern Junggar Basin

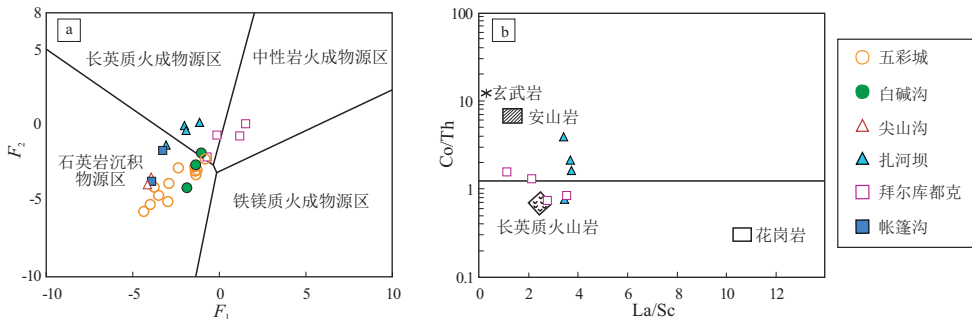


图 7 准噶尔盆地东北缘上石炭统巴山组泥岩沉积物源区判别

a 图 F_1 - F_2 图解据参考文献 [30] 修改, b 图 La/Sc-Co/Th 图解据参考文献 [37] 修改。

Fig.7 Discriminant diagrams for provenance of mudstones of Upper Carboniferous Batamayineshan Formation in northeastern Junggar Basin

巴山组泥岩样品的母岩类型主要为沉积岩和长英质火山岩,形成于后碰撞构造背景,由挤压环境转变为伸展环境,地壳减薄,亏损的软流圈地幔上涌,后经过岩石圈地幔,可能受到混染作用或卡拉麦里洋壳俯冲时所带的流体或熔体的改造,使得其具有岛弧特征。与此同时发生大规模的断裂活动,喷出大量火山岩,而后火山作用减弱,在火山间隙发育低洼地带形成湖盆,形成沉积物的可容空间。

5 烃源岩地球化学特征

石炭纪期间受卡拉麦里碰撞造山和后碰撞演化的影响,准东北缘构造运动强烈,发育多条NW—SE走向的断裂,并导致多期火山喷发,形成多个凸起和凹陷相间排列的构造格局,控制晚石炭世三角洲—湖泊—沼泽相沉积,在凹陷或火山岩之间的低洼地带发育巴山组泥岩沉积^[9,11]。此外,巴山组沉积时期虽然水体深度较浅,且处于氧化环境,但是温暖湿润的古气候条件有利于植物的大规模繁殖,且沉积速率稳定,为有机质碎屑的稳定堆积和输入提供了有利条件,促进了有机质的富集。根据本次野外获得的烃源岩样品测试分析,结合盆地内相关研究成果综合分析,巴山组 TOC 含量为 0.56%~8.92%,平均为 2.08%;氯仿沥青“A”含量为 0.001 5%~0.057 7%,平均为 0.013 5%;生烃潜力(S_1+S_2)为 0.05~2.01 mg/g,平均值为 0.34 mg/g。综上认为巴山组烃源岩有机质丰度中等,具有一定的生烃潜力。有机显微组分结果表明,镜质组占主要组分,平均含量为 90.36%,惰质组平均含量为 15%,其余组分基本为 0。计算得出干酪根类型指数(TI)基本小于 0,指示应主要为 III 型干酪根,少量 II₂或 II₁型,以高等植物来源为主,陆相来源输入明显增多,反映了古气候条件和陆内构造背景的控制。同时,有机质的热演化程度对于油气资源评价至关重要,研究区巴山组烃源岩实测 R_o 介于 0.67%~2.78%,平均值为 1.63%;样品 T_{max} 分布于 436~566 °C,平均值为 506 °C,处于成熟—高成熟演化阶段,说明产气潜力较好。

6 结论

对准噶尔盆地东北缘野外露头区的上石炭统巴山组烃源岩样品中的主微量元素和稀土元素进行了分析研究,得出了以下结论:

(1) 化学蚀变指数(CIA)、化学风化指数(CIW)、斜长石蚀变指数(PIA)、 SiO_2/Al_2O_3 值、微量元素 Sr/Cu 值和 A-CN-K 图解中均显示巴山组沉

积期为温暖湿润的古气候环境,母岩经历了中等程度的化学风化作用。

(2) U/Th、Ni/Co、Cu/Zn 等微量元素比值以及 Ni/Co-U/Th 图解、 $U_{EF}-Mo_{EF}$ 协变模式图均显示研究区巴山组沉积时期以氧化环境为主;同时,根据 Li、Ni、Ga、Al、Sr/Ba 比值、Sr-Ba 和 V-Ba 图解显示其为半咸水—淡水环境。通过 Rb/Zr 比值、Co 元素计算出古水深,发现巴山组沉积时期水体相对较浅,且沉积速率相对稳定。

(3) 通过主微量元素的 F_1-F_2 函数图解结合微量元素 Th-Sc-Zr/10、Th-Co-Zr/10、La-Th-Sc 和 Co/Th-La/S 图解以及区域地质演化特征,揭示研究区巴山组母岩类型主要为沉积岩和长英质火山岩,物源可能主要是来自于卡拉麦里岛弧酸性火成岩区的风化产物。

(4) 研究区巴山组烃源岩有机质类型基本以 III 型干酪根为主,少量 II₂或 II₁型,以高等植物来源为主;有机质丰度中等,TOC 含量平均为 2.08%,具有一定的生烃潜力。同时,较高的 R_o 和 T_{max} 值显示研究区烃源岩处于成熟—高成熟演化阶段,具有较好的生气潜力。

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

该科研工作主要由蔡倩茹主持;实验测试由王金铎、张关龙、宋智华、熊峥嵘、倪胜利完成;手稿由蔡倩茹、王金铎、张关龙、王圣柱起草和修订。所有作者均已阅读论文的最后版本并同意提交。

The study was mainly organized by CAI Qianru. The experimental operation was completed by WANG Jinduo, ZHANG Guanlong, SONG Zhihua, XIONG Zhengrong and NI Shengli. The manuscript was drafted and revised by CAI Qianru, WANG Jinduo, ZHANG Guanlong and WANG Shengzhu. All the authors have read the last version of paper and consented for submission.

参考文献:

- [1] 唐勇,宋永,何文军,等.准噶尔叠合盆地复式油气成藏规律[J].石油与天然气地质,2022,43(1):132-148.
TANG Yong, SONG Yong, HE Wenjun, et al. Characteristics of composite hydrocarbon accumulation in a superimposed basin, Junggar Basin[J]. Oil & Gas Geology, 2022, 43(1): 132-148.
- [2] 王越,熊伟,于洪州,等.准噶尔盆地东部芦草沟组层序地层格架与沉积充填模式[J].油气地质与采收率,2022,29(4):12-24.
WANG Yue, XIONG Wei, YU Hongzhou, et al. Sequence stratigraphic framework and sedimentary filling model of Lucaogou Formation in eastern Junggar Basin[J]. Petroleum Geology and Recovery Efficiency, 2022, 29(4): 12-24.
- [3] 罗亮,胡晨林,唐雅妮,等.准噶尔盆地东北部北三台凸起烧房

- 沟组沉积模式及其对储层发育的控制作用[J].特种油气藏,2023,30(3):9-18.
- LUO Liang, HU Chenlin, TANG Ya'ni, et al. Sedimentary pattern of the Shaofanggou Formation in the north Santai high area of the eastern Junggar Basin and its control on reservoir development[J]. Special Oil & Gas Reservoirs, 2023, 30(3): 9-18.
- [4] 唐勇, 雷德文, 曹剑, 等. 准噶尔盆地二叠系全油气系统与源内天然气勘探新领域[J]. 新疆石油地质, 2022, 43(6): 654-662.
- TANG Yong, LEI Dewen, CAO Jian, et al. Total petroleum system and inner-source natural gas exploration in Permian strata of Junggar basin[J]. Xinjiang Petroleum Geology, 2022, 43(6): 654-662.
- [5] 赵永强, 宋振响, 王斌, 等. 准噶尔盆地油气资源潜力与中国石化常规—非常规油气一体化勘探策略[J]. 石油实验地质, 2023, 45(5): 872-881.
- ZHAO Yongqiang, SONG Zhenxiang, WANG Bin, et al. Resource potential in Junggar Basin and SINOPEC's integrated exploration strategy for conventional and unconventional petroleum[J]. Petroleum Geology & Experiment, 2023, 45(5): 872-881.
- [6] 张关龙, 王继远, 王斌, 等. 准噶尔盆地腹部深层—超深层碎屑岩储层发育特征与孔隙演化定量表征[J]. 石油实验地质, 2023, 45(4): 620-631.
- ZHANG Guanlong, WANG Jiyuan, WANG Bin, et al. Development characteristics and quantitative characterization of pore evolution of deep and ultra-deep clastic reservoirs in the hinterland of the Junggar Basin[J]. Petroleum Geology & Experiment, 2023, 45(4): 620-631.
- [7] 王圣柱, 王千军, 张关龙, 等. 准噶尔盆地石炭系烃源岩发育模式及地球化学特征[J]. 油气地质与采收率, 2020, 27(4): 13-25.
- WANG Shengzhu, WANG Qianjun, ZHANG Guanlong, et al. Development mode and geochemical characteristics of Carboniferous source rocks in Junggar Basin[J]. Petroleum Geology and Recovery Efficiency, 2020, 27(4): 13-25.
- [8] 周雨双, 贾存善, 张奎华, 等. 应用 TSM 盆地模拟技术恢复准噶尔盆地东北缘石炭系烃源岩热演化史[J]. 石油实验地质, 2021, 43(2): 297-306.
- ZHOU Yushuang, JIA Cunshan, ZHANG Kuihua, et al. Thermal evolution history reconstruction of Carboniferous source rocks on the northeastern margin of Junggar Basin using TSM basin simulation technology[J]. Petroleum Geology & Experiment, 2021, 43(2): 297-306.
- [9] 葛海龙. 准东乌伦古地区宝塔玛依内山组火山岩构造背景与烃源岩发育模式[D]. 长春: 吉林大学, 2020: 1-72.
- GE Hailong. Volcanic rocks tectonic setting and source rock development model in Batamayineshan Formation, Wulungun area, eastern Junggar Basin[D]. Changchun: Jilin University, 2020: 1-72.
- [10] 熊峥嵘, 曲彦胜, 朱凤云, 等. 准噶尔盆地北缘石炭系烃源岩元素特征及其环境意义[J]. 科学技术与工程, 2016, 16(15): 164-168.
- XIONG Zhengrong, QU Yansheng, ZHU Fengyun, et al. Trace element characteristic and environment meaning of hydrocarbon source rocks in the northern margin of Junggar Basin[J]. Science Technology and Engineering, 2016, 16(15): 164-168.
- [11] 刘晓康, 边伟华, 孙相灿, 等. 火山活动影响的局限水体生烃潜力分析: 以准噶尔盆地东部石炭系宝塔玛依内山组为例[J]. 世界地质, 2018, 37(2): 518-526.
- LIU Xiaokang, BIAN Weihua, SUN Xiangcan, et al. Hydrocarbon generating potential in restricted waters influenced by volcanic activities: a case study of Carboniferous Batamayineishan Formation in eastern Junggar Basin[J]. Global Geology, 2018, 37(2): 518-526.
- [12] LI Di, HE Dengfa, SANTOSH M, et al. Petrogenesis of Late Paleozoic volcanics from the Zhaheba Depression, East Junggar: insights into collisional event in an accretionary orogen of central Asia[J]. Lithos, 2014, 184-187: 167-193.
- [13] HE Dengfa, LI Di, FAN Chun, et al. Geochronology, geochemistry and tectonostratigraphy of Carboniferous strata of the deepest well Moshen-1 in the Junggar Basin, northwest China: insights into the continental growth of central Asia[J]. Gondwana Research, 2013, 24(2): 560-577.
- [14] 张治波, 朱志军, 王文锋, 等. 滇西兰坪盆地中—新生代蒸发岩元素地球化学特征及其形成环境[J]. 吉林大学学报(地球科学版), 2019, 49(2): 356-379.
- ZHANG Zhibo, ZHU Zhijun, WANG Wenfeng, et al. Geochemical characteristics and formation environment of Mesozoic and Cenozoic evaporative rocks in Lanping Basin, western Yunnan[J]. Journal of Jilin University (Earth Science Edition), 2019, 49(2): 356-379.
- [15] 田景春, 张翔. 沉积地球化学[M]. 北京: 地质出版社, 2016.
- TIAN Jingchun, ZHANG Xiang. Sedimentary geochemistry[M]. Beijing: Geological Publishing House, 2016.
- [16] 白建科, 陈隽璐, 唐卓, 等. 新疆准噶尔古生代洋盆闭合时限: 来自卡拉麦里地区石炭纪碎屑锆石 U-Pb 年代学的约束[J]. 地质通报, 2018, 37(1): 26-38.
- BAI Jianke, CHEN Junlu, TANG Zhuo, et al. The closure time of Junggar Paleozoic oceanic basin: evidence from Carboniferous detrital zircon U-Pb geochronology in Kalamaili area[J]. Geological Bulletin of China, 2018, 37(1): 26-38.
- [17] 李海, 李永军, 徐学义, 等. 东准噶尔卡拉麦里地区碱性玄武岩年代学、地球化学特征及其构造意义[J]. 地质学报, 2021, 95(11): 3282-3300.
- LI Hai, LI Yongjun, XU Xueyi, et al. Petrogenesis and tectonic implications of alkali basalts in Kalamaili area, east Junggar, Xinjiang (NW China): constraints from petrology, geochronology and geochemistry[J]. Acta Geologica Sinica, 2021, 95(11): 3282-3300.
- [18] 徐小涛, 邵龙义. 利用泥质岩化学蚀变指数分析物源区风化程度时的限制因素[J]. 古地理学报, 2018, 20(3): 515-522.
- XU Xiaotao, SHAO Longyi. Limiting factors in utilization of chemical indicator of alteration of mudstones to quantify the degree of weathering in provenance[J]. Journal of Palaeogeography, 2018, 20(3): 515-522.
- [19] BAI Yueyue, LIU Zhaojun, SUN Pingchang, et al. Rare earth and major element geochemistry of Eocene fine-grained sediments in oil shale- and coal-bearing layers of the Meihe Basin, Northeast China[J]. Journal of Asian Earth Sciences, 2015, 97: 89-101.
- [20] 陈平, 林卫兵, 龚大建, 等. 贵州岑巩区块下寒武统变马冲组

- 黑色页岩沉积地球化学特征及其沉积环境意义[J].地质科学,2020,55(4):1025-1043.
- CHEN Ping, LIN Weibing, GONG Dajian, et al. Sedimentary geochemical characteristics and its sedimentary environment significance of the black shale of the Lower Cambrian Bianmachong Formation in the Cen'gong block, Guizhou Province[J]. Chinese Journal of Geology, 2020, 55(4): 1025-1043.
- [21] 王峰, 刘玄春, 邓秀芹, 等. 鄂尔多斯盆地纸坊组微量元素地球化学特征及沉积环境指示意义[J]. 沉积学报, 2017, 35(6): 1265-1273.
- WANG Feng, LIU Xuanchun, DENG Xiuqin, et al. Geochemical characteristics and environmental implications of trace elements of Zhifang Formation in Ordos Basin[J]. Acta Sedimentologica Sinica, 2017, 35(6): 1265-1273.
- [22] 李双应, 杨栋栋, 王松, 等. 南天山中段上石炭统碎屑岩岩石学、地球化学、重矿物和锆石年代学特征及其对物源区、构造演化的约束[J]. 地质学报, 2014, 88(2): 167-184.
- LI Shuangying, YANG Dongdong, WANG Song, et al. Characteristics of petrology, geochemistry, heavy minerals and isotope chronology of Upper Carboniferous detrital rocks in the middle segment of south Tianshan and constraints to the provenance and tectonic evolution[J]. Acta Geologica Sinica, 2014, 88(2): 167-184.
- [23] 吴育平, 刘成林, 龚宏伟, 等. 湘西下寒武统牛蹄塘组地球化学特征及其对沉积—构造环境的响应[J]. 地质与勘探, 2021, 57(5): 1065-1076.
- WU Yuping, LIU Chenglin, GONG Hongwei, et al. Geochemical characteristics and sedimentary tectonic setting of the Lower Cambrian Niutitang Formation in western Hunan Province[J]. Geology and Exploration, 2021, 57(5): 1065-1076.
- [24] XU Guangping, HANNAH J L, BINGEN B, et al. Digestion methods for trace element measurements in shales: paleoredox proxies examined[J]. Chemical Geology, 2012, 324-325: 132-147.
- [25] TRIBOVILLARD N, ALGEO T J, LYONS T, et al. Trace metals as paleoredox and paleoproductivity proxies: an update[J]. Chemical Geology, 2006, 232(1/2): 12-32.
- [26] 李青, 陈建洲, 王国仓, 等. 青藏高原北部东昆仑地区三叠系元素地球化学组成对古环境的指示意义[J]. 天然气地球科学, 2021, 32(11): 1714-1723.
- LI Qing, CHEN Jianzhou, WANG Guocang, et al. The element compositions of the Triassic shales into the east Kunlun area (northern Tibetan Plateau) and their paleoenvironmental implications[J]. Natural Gas Geoscience, 2021, 32(11): 1714-1723.
- [27] SCHEFFLER K, BUEHMANN D, SCHWARK L. Analysis of Late Palaeozoic glacial to postglacial sedimentary successions in South Africa by geochemical proxies—Response to climate evolution and sedimentary environment[J]. Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology, 2006, 240(1/2): 184-203.
- [28] 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.
- [29] MACKENZIE A S, PATIENCE R L, MAXWELL J R, et al. Molecular parameters of maturation in the Toarcian shales, Paris Basin, France—I. Changes in the configurations of acyclic isoprenoid alkanes, steranes and triterpanes[J]. Geochimica et Cosmochimica Acta, 1980, 44(11): 1709-1721.
- [30] ROSER B P, KORSCH R J. Provenance signatures of sandstone-mudstone suites determined using discriminant function analysis of major-element data[J]. Chemical Geology, 1988, 67(1/2): 119-139.
- [31] 贾永斌, 于文修, 温汉捷, 等. 滇中盆地南缘富锂黏土岩地球化学特征及沉积环境初探[J]. 沉积学报, 2023, 41(1): 170-182.
- JIA Yongbin, YU Wenxiu, WEN Hanjie. Geochemical characteristics and sedimentary environment of Li-rich clay rocks at the southern margin of the central Yunnan Basin[J]. Acta Sedimentologica Sinica, 2023, 41(1): 170-182.
- [32] 曾秋楠, 张交东, 于炳松, 等. 太康隆起上古生界稀土元素地球化学特征及其地质意义[J]. 海洋地质与第四纪地质, 2020, 40(3): 132-143.
- ZENG Qiunan, ZHANG Jiaodong, YU Bingsong, et al. Geochemical characteristics of Upper Paleozoic mudstone in southern North China Basin and their geological significances[J]. Marine Geology Quaternary Geology, 2020, 40(3): 132-143.
- [33] 吴智平, 周瑶琪. 一种计算沉积速率的新方法: 宇宙尘埃特征元素法[J]. 沉积学报, 2000, 18(3): 395-399.
- WU Zhiping, ZHOU Yaoqi. Using the characteristic elements from meteoritic dust in strata to calculate sedimentation rate[J]. Acta Sedimentologica Sinica, 2000, 18(3): 395-399.
- [34] ZHANG Bowen, CHEN Chuan, GONG Xiaoping, et al. The Kamusite A₂-type granites in the Karamaili tectonic belt, Xinjiang (NW China): tracing staged postcollisional delamination in the eastern Junggar[J]. Geological Magazine, 2021, 158(4): 723-748.
- [35] LI Di, HE Dengfa, SANTOSH M, et al. Tectonic framework of the northern Junggar Basin part I: the eastern Luliang Uplift and its link with the East Junggar terrane[J]. Gondwana Research, 2015, 27(3): 1089-1109.
- [36] HORTON B K, YIN An, SPURLIN M S, et al. Paleocene-Eocene syncontractional sedimentation in narrow, lacustrine-dominated basins of east-central Tibet[J]. GSA Bulletin, 2002, 114(7): 771-786.
- [37] LYONS T W, WERNE J P, HOLLANDER D J, et al. Contrasting sulfur geochemistry and Fe/Al and Mo/Al ratios across the last oxic-to-anoxic transition in the Cariaco Basin, Venezuela[J]. Chemical Geology, 2003, 195(1/4): 131-157.