

康滇古陆两侧五峰组—龙马溪组沉积演化差异

张茜^{1,2}, 张海全^{1,2}, 王剑³, 门玉澎^{1,2}, 余谦^{1,2}, 周业鑫^{1,2}, 曹峻锋^{1,2}, 赵安坤^{1,2}

1.中国地质调查局成都地质调查中心(西南地质科技创新中心), 成都 610218

2.自然资源部沉积盆地与油气资源重点实验室, 成都 610218

3.西南石油大学地球科学与技术学院, 成都 610500

摘要 【目的】深入研究康滇古陆东西两侧五峰组—龙马溪组黑色泥岩沉积环境及沉积构造演化差异, 支撑区域页岩气勘探开发及相关研究。【方法】通过全面的地质调查及系统矿物岩石学及地球化学分析, 综合对比研究了古陆东侧昭通地区及西侧盐源盆地五峰组—龙马溪组黑色泥岩沉积的物源属性、古海洋环境及古气候特征。【结果】东侧陆源碎屑指示参数 Al_2O_3 、 TiO_2 、Sc、Zr 等元素均较西侧富集, 而 Mo_{EF} 、 U_{EF} 及 V/Cr 、 U/Th 等水体氧化还原性指标参数均较西侧低。两侧沉积环境差异明显, 东侧属于局限海陆棚沉积, 富有机质页岩以硅质钙质岩系为主, 而西侧属于开阔海陆棚, 富有机质页岩为硅质岩系。东侧离物源更近, 源岩以长英质火成岩为主, 化学风化作用更强, 气候也更温暖, 沉积水体较浅, 以弱氧化—贫氧环境为主。西侧水体较深, 以缺氧还原环境为主, 构造运动较强, 背景更复杂, 有活动大陆边缘及岛弧环境属性, 这可能与西侧洋壳与扬子陆壳的碰撞相关。【结论】富有机质页岩的形成是不同的沉积构造演化模式下多因素共同作用的结果。相比而言, 古陆西侧富有机质页岩的形成主要受控于还原性水体有利的保存条件, 而东侧则主要受控于弱氧化环境下生物繁盛造成的极高古生产力。

关键词 康滇古陆; 五峰组—龙马溪组; 地球化学; 沉积环境; 构造背景

第一作者简介 张茜, 女, 1983 年出生, 博士研究生, 高级工程师, 沉积学储层矿物岩石学、油气地质学, E-mail: 76517507@qq.com

通信作者 张海全, 男, 硕士研究生, 高级工程师, 油气地质学, E-mail: zhq433@126.com

中图分类号 文献标志码 A

0 引言

奥陶系—志留系的五峰组—龙马溪组是我国南方海相页岩气勘探的优选层位, 其烃源岩分布几乎遍及扬子区, 且四川盆地已经取得该层位的页岩气突破, 多口井获得工业气流^[1-3]。为了进一步扩大页岩气勘探开发, 四川盆地周缘的构造复杂区已成为目前工作的重点^[4-5]。

前期勘探发现, 位于康滇古陆两侧的川西南构造复杂区页岩气地质条件较好, 广泛分布五峰组—龙马溪组黑色有机质泥岩, 西侧的盐源盆地已获得较好的油气显示, 东侧的昭通地区已获得页岩气突破^[6-7], 证实研究区虽然构造复杂, 但仍具备较大的页岩气勘探潜力。但是受控于构造改造强、研究程度低等因素制约, 一些关键的基础地质问题仍未解决。所以本

论文选取康滇古陆东西两侧的五峰组—龙马溪组地层为研究对象,通过全面的地质调查及系统的岩石矿物学及地球化学分析,对比研究古陆两侧的沉积环境差异,建立其沉积构造演化模式。以期为盆地周缘构造复杂区的油气资源评价提供有价值的参考和指导。

1 地质背景

研究区大地构造位置隶属于中上扬子克拉通西缘,康滇古陆两侧,属滇中推覆冲断带及滇东北冲断带上,行政区划包括四川省凉山州和云南省昭通市地区^[4,7]。研究区在新元古代以来的构造演化过程发育有多条规模宏大,现今仍然强烈活动的重要断裂带,多条断裂纵横切割,形成断块构造区^[7]。康滇古陆属扬子地台西南缘二级构造单元,是显生宙以来长期出露的地区,也是研究区最重要的物源提供区^[8]。中奥陶世以后,由于地幔物质上涌,康滇地块构造隆升成穹,一直持续到二叠纪^[8-9]。因此,在五峰组—龙马溪组沉积期,康滇古陆呈持续抬升扩大趋势,整体受热水沉积影响较大。

古陆东侧昭通地区地层出露完整,奥陶系上统五峰组和观音桥段普遍发育。五峰组—龙马溪期,水体自康滇古陆和黔中隆起往北东方向加深,总体属于局限海陆棚相沉积环境^[10](图1)。五峰组厚度较小,一般介于5~30 m,龙马溪组厚度较大,可达几百米,富有质页岩厚度巨大,最具代表性的XD2井富有机质页岩(总有机碳TOC>1%)厚度大于100 m。古陆西侧盐源盆地属扬子地台西缘沉积区,西邻广海,东侧因金河—箐河断裂逆冲推覆陆棚相直接与康滇隆起接触而缺失浅水的边缘相沉积,沉积相与古陆展布并不配套,推测地层曾发生旋转或抬升剥蚀(图1)。向西至深海盆地在陆棚区受沉积基底的不均一沉降作用,存在多个水下隆起区,总体属于开阔海陆棚相沉积环境^[6]。龙马溪组岩性以高硅质泥岩而明显区别于古陆东侧的高钙质泥岩,且厚度明显较东侧薄,总厚不超100 m,富有机质页岩厚度小于60 m。缺失五峰组沉积,龙马溪组底部与中奥陶宝塔组灰岩呈平行不整合接触(DCZ剖面宝塔组顶部可见紫红色瘤状灰岩,CYD2井宝塔组顶部见溶蚀角砾岩,SH剖面可见风化壳存在)(图2a)。两侧均发育笔石(图2b),黄铁矿呈带状、脉状及点状分布于岩石中(图2c)。

为对比研究古陆两侧五峰组—龙马溪组黑色泥岩的沉积环境与构造背景,除详细的野外地质调查外,还选择深水陆棚相富有机质页岩较发育的盐源盆地BZT剖面及昭通地区XD2井进行了系统的地球化学测试。其中BZT剖面龙马溪组总厚约90 m左右,与下伏宝塔组灰岩及上覆稗子灰质白云岩均为平行不整合接触,黑色泥岩段主要发育在剖面中下段,厚约60 m,上段岩性为浅灰色粉砂质泥岩、灰质泥岩,生烃潜力较差。XD2井五峰组—龙马溪

组总厚超 300 m，与下伏宝塔组灰岩及上覆石牛栏组灰岩均为整合接触。黑色泥岩段主要集中在五峰组及龙马溪组下段 160 m 处，中上段岩性主要为浅灰色钙质粉砂质泥岩、泥质粉砂岩，为浅水相快速沉积产物，生烃潜力较差，未采样。本次共采集 BZT 剖面 66 件泥岩，泥灰岩样品及 XD2 井五峰组及龙马溪组下段 44 件钙质泥岩样品做了 TOC 及 X 衍射矿物成分检测，BZT 剖面 25 件黑色泥岩样品及 XD2 井 26 件黑色泥岩样品做了元素测定，采样位置及 TOC 和矿物成分含量见图 3。

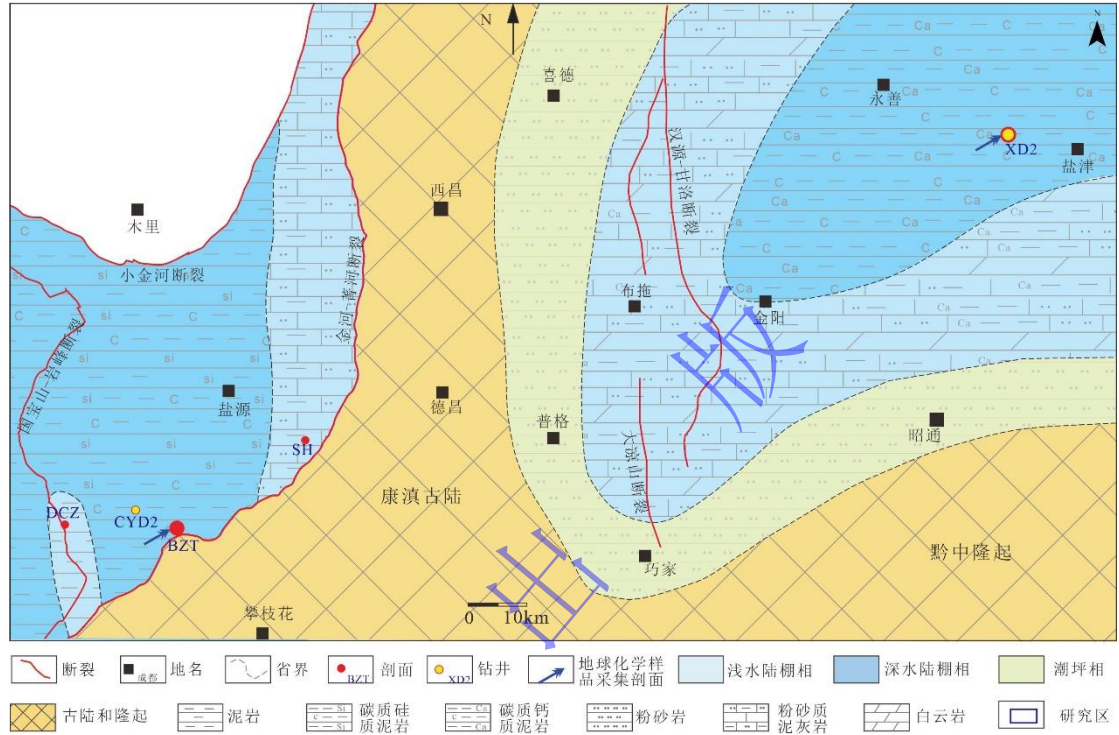


图 1 研究区位置与沉积相图

Fig.1 Study area location and sedimentary facies map

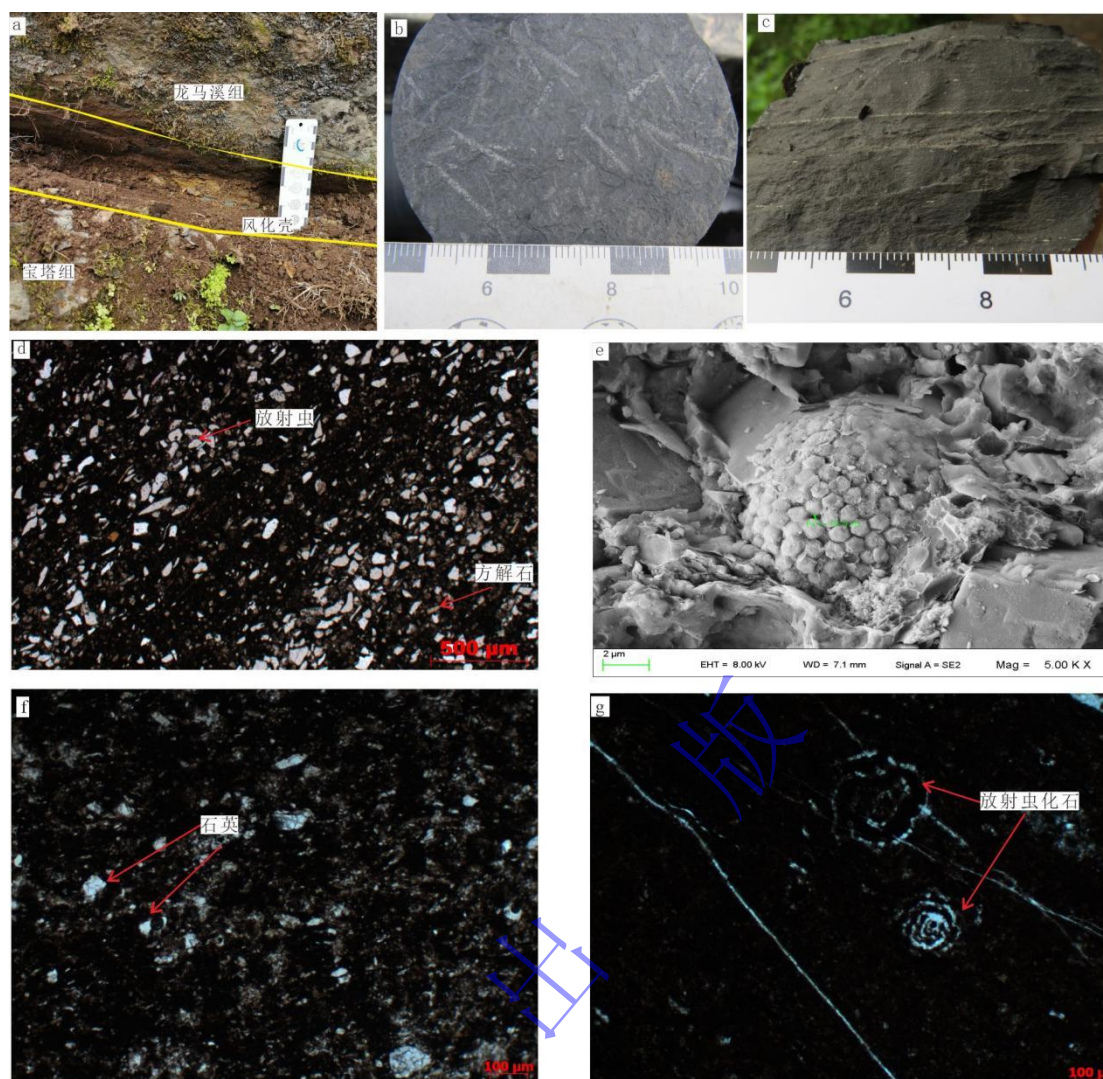


图2 古陆两侧龙马溪组岩石矿物学特征

(a) 古陆西侧 SH 剖面龙马溪组与宝塔组接触面风化壳特征；(b) 古陆东侧 XD2 井笔石特征；(c) 古陆西侧 BZT 剖面薄层状黄铁矿顺层展布；(d) 古陆东侧 XD2 井龙马溪组放射虫，薄片特征；(e) 古陆东侧 XD2 井草莓状黄铁矿，扫描电镜特征；(f) 古陆西侧 BZT 剖面龙马溪组矿物特征，薄片特征；(g) 古陆西侧 BZT 剖面放射虫，薄片特征

Fig.2 Petromineralogical characteristics of the Longmaxi Formation on both sides of the ancient land.

(a) weathering crust between the Longmaxi and Baota formations in SH outcrop on the west side of the ancient land; (b) graptolite of Well XD2 on the east side of the ancient land; (c) thin-bedded pyrite distribution in BZT outcrop on the west side of the ancient land; (d) radiolarian of the Longmaxi Formation XD2, east side of the ancient land, thin section characteristics; (e) pyrite framboids in well XD2 on the eastern side of the ancient land, scanning electron microscope characteristics; (f) minerals characteristic of BZT outcrop on the west side of the ancient land, thin section characteristics; (g) radiolaria in BZT outcrop from the west side of the old land, thin section characteristics

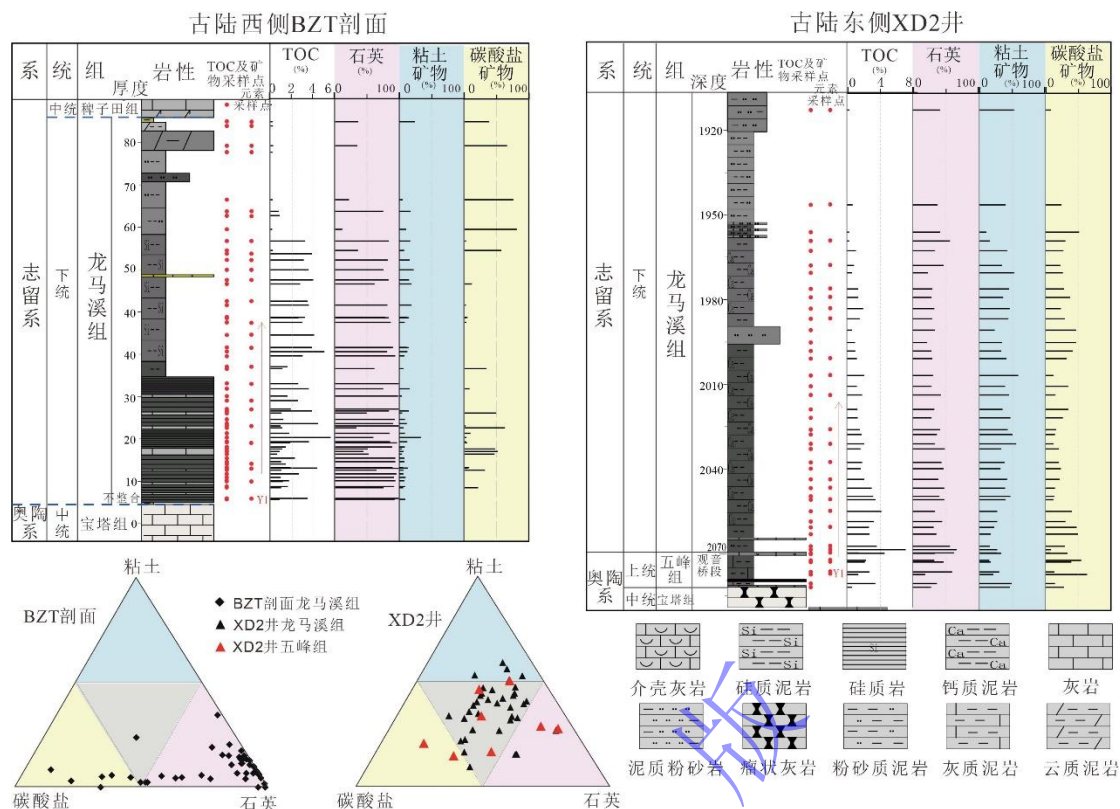


图3 古陆两侧采样位置及矿物成分特征

Fig.3 Sampling locations and mineral composition characteristics on both sides of the ancient land

2 样品测试及结果

2.1 样品采集及实验测试方法

在无污染条件下，选择新鲜样品磨碎至粒径小于 0.2 mm，采用非散射红外线检测法用于 TOC 测定。将新鲜样品磨制到 200 目，用于主微量元素及全岩矿物成分 X 衍射分析。TOC 测定引用 GB/T19145—2003《沉积岩中总有机碳的测定》，使用德国耶拿 multiN/C3100 总碳分析仪进行检测，误差小于 1%。主量元素分析采用荷兰帕纳科 Axios mAx PW4400/40 X 射线荧光光谱仪进行检测，相对标准偏差小于 1%。微量元素采用电感耦合等离子体质谱仪（ICP-MS）分析，仪器型号为 X-seriesII 美国 ThermoFisher，相对标准偏差小于 5%。全岩矿物成分 X 衍射测试使用 ZJ207 Bruker D8 advance 型 X 射线衍射仪，测定标准遵循 SY/T5163—2010。部分测定流程参考文献[11]。

2.2 矿物成分特征

古陆两侧 TOC 及矿物成分含量如图 3 所示，东侧 XD2 井 TOC 含量介于 0.16%~7.0%，平均值为 1.86%，其中富有机质页岩段（TOC>1%）主要在五峰组及龙马溪组下段钙质泥岩段，总厚约 160 m，上部粉砂质泥岩段 TOC 含量降低，小于 1.0%。薄片鉴定结果显示，五

峰组及龙马溪组下段泥岩主要是由泥质、碎屑组分和碳酸盐矿物组成,碎屑颗粒主要是石英,少量长石,呈棱角状零散分布在泥质中。碳酸盐矿物主要是方解石及少量白云石,呈半自形—自形粒状。部分有机质,主要呈黑色团块状混在泥质中。少量黄铁矿,呈黑色粒状零散分布在泥质中,部分聚集在局部呈团块状(图 2d)。全岩 X 衍射分析结果显示,矿物成分主要以石英、碳酸盐矿物和黏土矿物为主(图 3)。石英含量介于 17%~65%,平均值为 37%;碳酸盐矿物含量介于 6%~62%,平均值为 27%,多呈泥晶团块状,部分是以脉体形式分布在岩石中;部分白云石(2%~10%),呈粒状零散分布在泥晶方解石及泥质组分之中。黏土含量较高,介于 9%~58%,平均值为 35%,混在碳酸盐矿物之间。部分有机质(约 4%),见少量细小的云母片。黄铁矿广泛发育,平均含量为 2%,脉状、粒状分布,龙马溪组底部样品镜下可见放射虫及草莓状黄铁矿(图 2e)。

西侧 BZT 剖面龙马溪组黑色泥岩 TOC 介于 0.06%~5.63%,平均值为 2.02%,其中中下段硅质岩及硅质泥岩段为富有机质页岩段,厚度约为 50 m(图 3),上部泥灰岩段、粉砂岩段 TOC 含量降低,小于 0.5%。薄片结果显示,龙马溪组泥岩主要是由碎屑组分、泥质和碳酸盐矿物组成,石英含量较高,呈粒状不均匀分布,见大量硅质放射虫化石(图 2f, g),生物成因硅大量发育^[5],其余硅质呈显微晶—隐晶质硅质不均匀分布,部分呈球粒状或残余生屑状不均匀分布。泥质主要包括黏土矿物和长英质细碎屑,不均匀分布。炭质呈炭屑状或浸染状,无固定形态。全岩 X 衍射分析结果中,石英含量较高,特别是在龙马溪组中下段,石英含量大多高于 80%,少数样品达 100%。黏土含量较低,介于 2%~22.7%,平均值为 9.6%;碳酸盐矿物在泥岩中含量低,主要在灰岩透镜体,灰岩夹层及上半段的泥灰岩中发育,平均值为 32%。黄铁矿广泛发育,平均含量为 2.9%。笔石发育,镜下可见草莓状黄铁矿。

在矿物成分三角图(图 3)中,东侧 XD2 井五峰组与龙马溪组样品类似,样品点主要投入混合岩相区,西侧 BZT 剖面龙马溪组岩性主要为硅质岩相。古陆西侧黏土矿物及碳酸盐矿物含量明显低于东侧,但石英+长石含量明显高于东侧。两侧富有机质页岩岩性差异较大,指示其沉积环境明显不同。

2.3 主微量元素特征

主量元素成分见表 1,相对于大陆上地壳(UCC)^[12],古陆西侧 BZT 剖面 SiO₂、MnO 含量较富集,说明受上升洋流及热液沉积影响较大^[13-14]。而古陆东侧 XD₂ 井则 CaO、MgO 明显富集,其他元素均较亏损。微量及稀土元素含量见表 2,相对于后太古宙澳大利亚页岩(PAAS)^[12]古陆两侧 Mo、U 较为富集,同时古陆东侧 Sc、Zr、Th 等亲石元素及稀土元素总量(Σ REE)明显较西侧富集,说明古陆东侧离物源更近^[15-16]。

表 1 古陆两侧主量元素含量 (%) 及相关参数

Table 1 Major element content (%) and related parameters on both sides of the ancient land

	TOC	SiO ₂	Al ₂ O ₃	TFe ₂ O ₃	MgO	CaO	Na ₂ O	K ₂ O	MnO	TiO ₂	P ₂ O ₅	烧失量	CIA
B(25)	0.13~4.07	34.09~95.37	1.14~18.37	0.40~4.57	0.12~10.49	0.088~18.42	0.073~0.77	0.32~6.04	0.003~0.72	0.054~0.83	0.028~0.13	1.70~28.02	50.07~70.09
B _{平均}	2.13	78.61	5.40	1.60	1.30	2.71	0.34	1.86	0.11	0.28	0.06	7.14	63.97
X(26)	0.17~7	29.54~67.07	4.12~17.39	1.51~5.48	0.97~7.21	2.77~22.06	0.04~1.43	1.15~4.60	0.018~0.40	0.20~0.72	0.051~1.10	5.60~30.28	46.63~76.18
X _{平均}	2.09	50.88	10.98	3.75	3.24	8.78	0.63	3.08	0.067	0.51	0.14	14.88	67.78
UCC		65.89	15.17	4.49	2.2	4.19	3.89	3.39	0.07	0.5	0.2		
B/UCC		1.19	0.36	0.36	0.59	0.65	0.09	0.55	1.57	0.55	0.32		
X/UCC		0.77	0.72	0.84	1.47	2.10	0.16	0.91	0.96	1.02	0.70		

注：B (25) 为 BZT 剖面 25 件样品编号最小值~最大值；X (26) 为 XD2 井 26 件样品编号最小值~最大值；UCC 值引自文献[12]。CIA 为化学风化指数。

表 2 古陆两侧微量元素 (10⁻⁶) 及相关参数Table 2 Trace elements (10⁻⁶) and related parameters on both sides of the ancient land

	Sc	V	Cr	Co	Ni	Mo	Th	U	Mo _{EF}	U _{EF}	La	Yb	ΣREE	Mo/TOC	V/Cr	Ni/Co	U/Th
B(25)	1.0~16.8	18.4~667	10.8~95.6	0.4~16.4	9.7~134	0.3~34.9	0.9~19.2	1.3~12.3	0.45~264.82	0.69~26.58	2.7~51.7	0.4~3.1	15.9~216.7	2.2~20.1	1.1~19.9	2.0~40.1	0.10~5.37
B _{平均}	4.4	232.1	34.8	4.2	30.5	16.7	5.9	4.4	101.63	8.91	18.5	1.3	81.4	8.5	7.7	11.7	1.59
X(26)	2.91~17.10	6.85~458.84	21.22~162.59	3.31~18.22	34.42~152.34	0.33~95.71	3.60~21.49	1.25~39.45	0.33~241.18	1.03~32.07	15.73~51.93	1.12~3.01	73.46~229.59	1.7~29.80	0.32~4.94	2.83~18.10	0.16~5.04
X _{平均}	10.27	132.89	93.47	11.71	69.77	15.53	14.77	8.25	35.92	5.66	38.21	1.97	171.6	7.02	1.52	6.93	0.83
PAAS	16	150	110	10	55	1	14.6	3.1									
B/PAAS	0.28	1.55	0.32	0.42	0.55	16.70	0.40	1.42									
X/PAAS	0.64	0.89	0.85	1.17	1.27	15.53	1.01	2.66									

注：B (25) 为 BZT 剖面 25 件样品编号最小值~最大值；X (26) 为 XD2 井 26 件样品编号最小值~最大值；PAAS 值引自文献[12]。EF 为元素富集系数，公式为 EF 元素 = (元素/Al)_{样品} / (元素/Al)_{PAAS}。ΣREE 为稀土总量 = La + Ce + Pr + Nd + Sm + Eu + Gd + Tb + Dy + Ho + Er + Tm + Yb + Lu。

通常用富集系数 EF 来表示微量元素在沉积水体中的富集程度^[17]。公式如下：

$$EF_{\text{元素}} = (\text{元素}/\text{Al})_{\text{样品}} / (\text{元素}/\text{Al})_{\text{PAAS}} \quad (1)$$

式中：元素和 Al 代表了样品中某一元素和 Al 的含量。样品用 PAAS（后太古宙澳大利亚页岩）进行标准化^[18]。如果 $X_{EF} > 1$ 则表示该元素相对于平均海相页岩富集， $X_{EF} > 3$ 明显富集， $X_{EF} > 10$ 则属中—强烈富集，反之， $X_{EF} < 1$ 指示相对亏损^[19-20]。

如表 1 所示，古陆西侧 BZT 剖面 Mo 和 U 富集程度较高， Mo_{EF} 平均值为 101.6，属极强烈富集， U_{EF} 平均值为 8.9，属明显富集，且 Mo_{EF}/U_{EF} 平均值为 11.41，明显大于正常海水值（7.9）^[12]。XD2 井 Mo_{EF} 平均值为 30.45，属强烈富集， U_{EF} 平均值为 4.92，属弱明显富集，且 Mo_{EF}/U_{EF} 平均值为 4.76，小于正常海水值（7.9）。通常较高的 Mo 富集，说明沉积水体较深，且还原硫化^[17]，由此可以看出，在龙马溪沉积期古陆西侧 BZT 剖面沉积水体较深，硫化程度及还原性均较古陆东侧大。

3 讨论

3.1 源岩属性及沉积构造背景

沉积碎屑岩样品的地球化学特征能有效反映物源区特征及沉积构造背景的相关信息^[15,21]。一般 Al_2O_3 和 TiO_2 主要陆源物质输入相关，很少受成岩作用和后期地质作用的影响，含量相对稳定，因此，一般 Al_2O_3 与 TiO_2 的正相关与 SiO_2/Al_2O_3 与 Al_2O_3 的负相关指示在沉积过程中有较高比例的陆源物质持续输入^[22]。如图 4 所示，古陆西侧 BZT 剖面龙马溪组与古陆东侧 XD2 井五峰组及龙马溪组均呈现这一特征，说明研究区五峰组—龙马溪沉积期均有较高比例的陆源物质持续输入。此外，XD2 井中 Al_2O_3 与 TiO_2 含量明显高于 BZT 剖面，XD2 井 Al_2O_3 平均为 10.98%， TiO_2 平均为 0.51，BZT 剖面 Al_2O_3 平均为 5.40%， TiO_2 平均为 0.28%，说明 XD2 井受陆源碎屑影响较大，离物源较近。

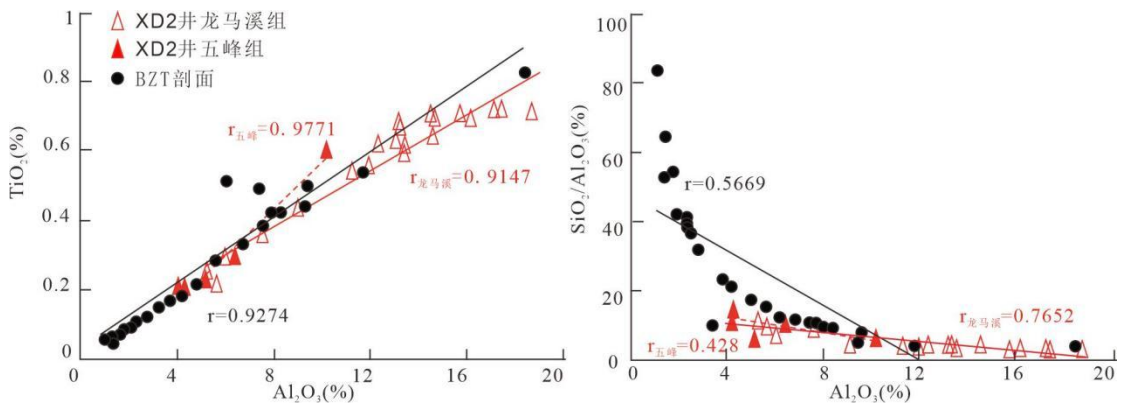


图 4 陆源物质输入线性图

Fig.4 Linear diagram of terrigenous material input

一些非迁移性微量元素，如 Zr、Hf、Th、Sc、Y、REE 等在沉积盆地演化过程中含量变化很小^[16]，能很好地保留成岩物质来源的相关信息，可作为物源属性及源区构造背景判别的理想对象^[15,23]。在物源属性判别图解 $\Sigma\text{REE-La/Yb}$ 中^[16]（图 5a），BZT 剖面样品点大多落在了沉积岩—钙质泥岩区与花岗岩区，少部分落在沉积岩—钙质泥岩、花岗岩及玄武岩重叠区域，而 XD2 井五峰组样品点大多落入沉积岩区，龙马溪组样品点则大多落在花岗岩与沉积岩交汇区域；在 La/Sc-Co/Th 图解^[24]（图 5b）中，BZT 剖面样品主要分布于长英质火成岩区及靠近花岗岩区，部分有向长英质—中基性岩混合物源区偏移的趋势。而 XD2 井五峰组和龙马溪组样品呈现相同趋势，大多落在长英质火成岩及花岗岩之间。由此可以看出，古陆西侧物源较为复杂，以酸性长英质火成岩为主，并有少量中基性岩的混入。而古陆东侧物源较为单一，主要为长英质火成岩。

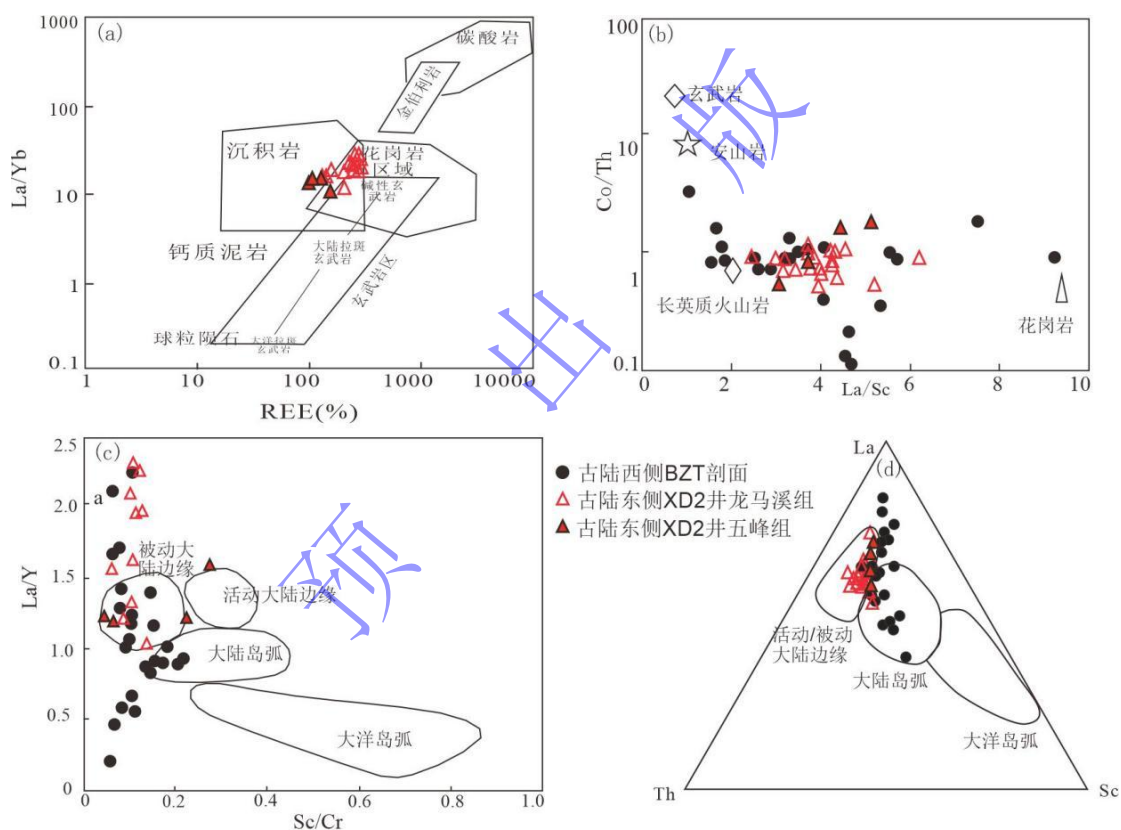


图 5 (a, b) 物源属性判别图解；(c, d) 为构造背景判别图解

底图 (a, d) 据文献^[16]，(b) 据文献^[24]，(c) 据文献^[25]

Fig.5 Provenance attribute (a, b) and sedimentary tectonic background (c, d) discriminant map

base map modified from (a, d) ^[16], (b) ^[24], (c) ^[25]

在构造背景判别图解 Sc/Cr-La/Y 中^[15,25]（图 5c），BZT 剖面样品投点虽较为分散，但多数落入被动大陆边缘及大陆岛弧及其附近区域。在 La-Th-Sc ^[16]（图 5d）也呈现出相同趋势，所有样品点分散落入活动大陆边缘、被动大陆边缘及大陆岛弧区域。而 XD2 井五峰组及龙马溪组样品点较为集中，主要落入被动大陆边缘区。

综上,对比古陆东侧,西侧源岩成分及构造背景均较为复杂,有活动大陆边缘及岛弧环境属性,这可能与西侧洋壳与扬子陆壳的碰撞相关,也可能与大洋岛弧提供物源相关。而古陆东侧的昭通地区在盆地内部,属于前陆盆地克拉通内部,构造相对稳定,为被动大陆边缘环境。

3.2 盆地属性及水体氧化还原性研究

沉积水体的氧化还原性是指水体溶氧量特征及其相关变化引起的各种岩石、生物和地球化学等特征的综合,通常缺氧还原的水体环境更有利于有机质的保存而与烃源岩形成密切相关^[1,26]。研究表明,氧化还原敏感性元素如 V、Cr、Th、Co、Ni、Mo、U 及稳定而又灵敏的稀土元素(REE)已被广泛应用于水体氧化还原性的研究中^[27]。然而这些元素的变化受控于复杂的地质化学过程,在使用时应多种指标的综合考量才能得到较为准确的规律。

大量研究证实,中上扬子地区五峰组—龙马溪组富含有机质页岩沉积于贫氧缺氧环境^[27-28]。综合各种参数,本次研究优选采用 V/Cr、U/Th、Ni/Co 这三种相对较稳定且准确的比值参数来对比古陆两侧环境的变化^[29]。如图 6 所示,两侧 V/Cr、U/Th、Ni/Co 均呈现相似趋势, XD2 井五峰组上部及龙马溪组底部水体呈现厌氧环境,往上水体呈氧化环境;而西侧 BZT 剖面龙马溪组整体处于厌氧—贫氧环境,晚期氧化性增强。XD2 井在龙马溪组沉积期水体呈贫氧—弱氧化环境,但依然形成富含有机质页岩,推测此时有机质富集以高古生产力或其他为主控因素而非保存条件。而古陆西侧富含有机质页岩的形成,则以缺氧环境有利于有机质的保存为主控因素。

在沉积盆地重建时,U、Mo 因其独特的地球化学特征及其相关参数 Mo/TOC 和 U-Mo 协变图被广泛应用于盆地属性及局限性的研究^[19,28]。U 和 Mo 性质相近,在缺氧还原性水体易在沉积物中富集,但是,U 的沉积明显早于 Mo 沉积^[18],U 在较浅水体及弱还原环境下就开始沉积^[30-31],而 Mo 则需要更深的水体及强还原性,或 H₂S 的存在才开始沉积^[18,32]。在与上升洋流有关的沉积盆地,金属元素在缺氧—硫化水体中的富集往往得益于颗粒传输机制(particulate shuttle)的增强^[28-29,33]。在硫化沉积盆地且发生颗粒传输时,沉积物 Mo 浓度通常远高于未发生颗粒传输区域。而在非硫化但是缺氧还原的沉积盆地,U 的浓度往往大于 Mo,且没有颗粒传输^[28]。在 U-Mo 协变模式图中(图 7a),古陆西侧 BZT 剖面样品点大多落入颗粒传输区,且与弱滞留环境的 Cariaco 盆地相近,表明西侧龙马溪沉积期受上升洋流影响较大,沉积水体弱局限且硫化还原。这与盐源盆地沉积相吻合,BZT 剖面区为一沉降中心(图 1),水体相对较深,推测为一构造形成的深水洼地。古陆东侧 XD₂ 井大部分点样品点投入弱氧化盆地区,Mo_{EF} 大于 U_{EF},大多数的 Mo_{EF}/U_{EF} 值点在 1×SW 至 3×SW 区,在

缺氧静水环境下， Mo_{EF}/U_{EF} 更靠近 $3 \times SW$ 线，但仍在此区域，并没有随着 U、Mo 的富集出现明显富集或降低。这种 U-Mo 协变模式可解释为：在非滞留海盆中，Mo 的浓度较高，Mo/U 会持续增高。而在强滞留海盆中，Mo 易络合转入沉积物后使 Mo/U 降低；古陆东侧的昭通地区是个半滞留海盆，Mo 在海水中的浓度较低，这就使得 Mo/U 不会像开放海盆那样持续增高，而且弱连通的海盆又可以使得海水得到一定的 Mo、U 补给，不会像强滞留海盆那样使 Mo/U 值降低^[34-35]。Algeo^[18]也指出这种 U-Mo 协变模式在半滞留沉积盆地中比较常见。此外，XD2 井龙马溪组 Mo-U 呈现明显的正相关，也说明其水体硫化性较弱^[18]，五峰组则正相关较弱，说明其硫化程度较龙马溪组强^[18]（图 7b）。

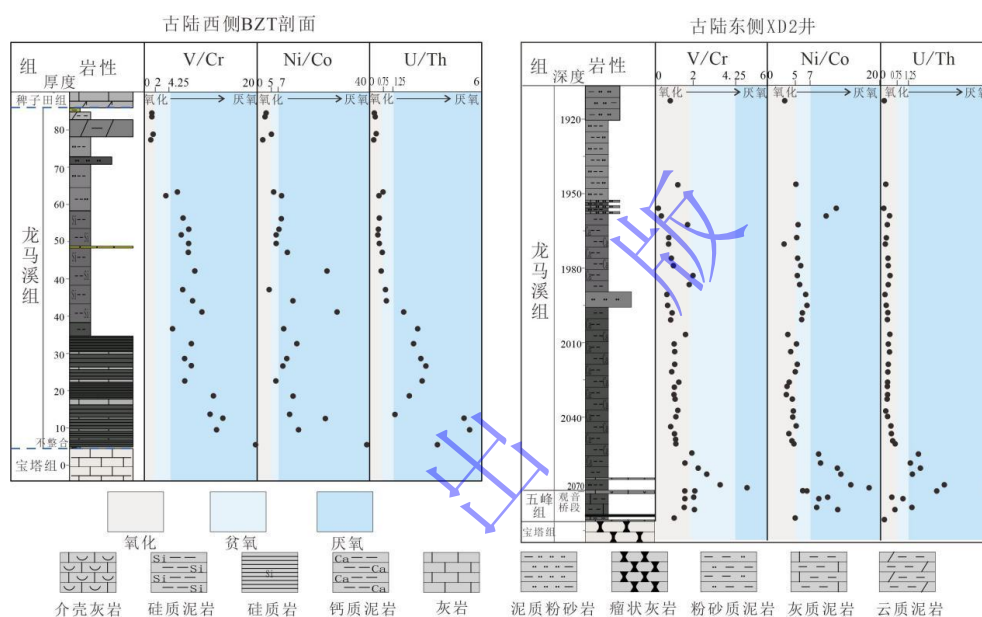


图 6 古陆两侧水体氧化还原性对比图

Fig.6 Comparison of oxidation-reduction properties on both sides of the ancient land

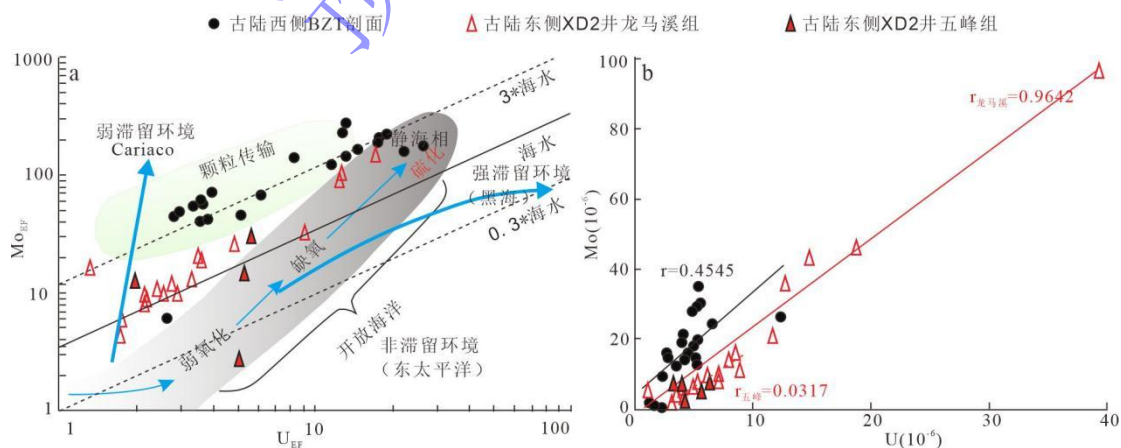


图 7 古陆两侧 Mo-U 协变图 (a)^[18]，Mo-U 线性图 (b)

Fig.7 Mo-U covariant diagram on both sides of the ancient land (a)^[18] and Mo-U linear diagram (b)

研究表明，强滞留局限性的黑海，Mo/TOC 值较低为 4.5，而在半局限性的挪威 Framvaren 峡湾，Mo/TOC 值增大至 9，而在局限性较弱的委内瑞拉中北部 Cariaco 盆地，

Mo/TOC 值为 25；而开放性水体的加拿大 Saanich 海湾，Mo/TOC 为 45^[29,34]。值得注意的是，Mo/TOC 这一参数仅在非氧化性水体下适用^[29]。本次研究中 BZT 剖面龙马溪组下段 Mo/TOC 值介于 10~15，与半局限性较强的 Framvaren 海峡湾相近，中段 Mo/TOC 为 5 左右，局限性增强，上部值为 20 左右，局限性较弱，为相对开放环境（图 8）。而东侧 XD2 井的龙马溪组下半段 Mo/TOC 值介于 10~15，为半局限性盆地，而五峰组与龙马溪组不同，Mo/TOC 值小于 5，为强局限盆地。五峰组沉积期受到冰期事件影响，全球海平面下降，再加上构造隆升挤压，水体被隆起分割，形成强滞留环境。而龙马溪早期，大规模海进，海水漫过障壁，使得海盆与大洋的连通性加强，成为半滞留海盆。而到中晚期，相对海平面下降，与大洋连通性更好，水体呈氧化状态。

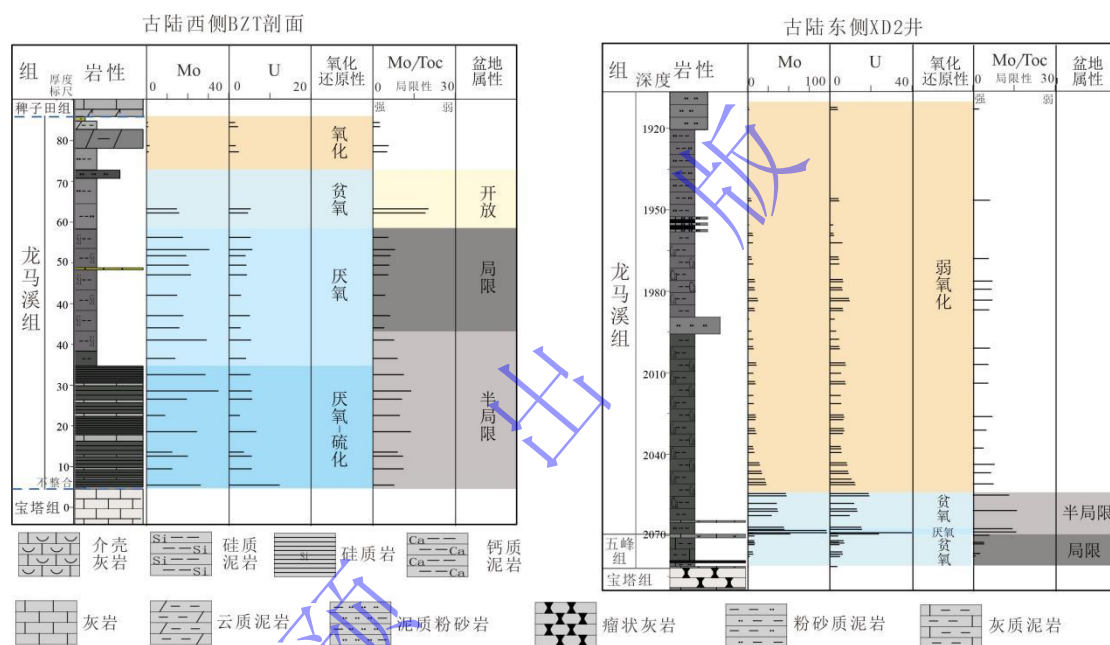


图 8 古陆两侧盆地属性对比图

Fig.8 Comparison of basin attributes on both sides of the ancient land

3.3 风化条件及古气候

化学蚀变指数 (CIA)^[35]是用来判别物源区化学风化作用及气候特征的有效指标，公式为： $CIA=100 \times [Al_2O_3 / (Al_2O_3 + CaO^* + Na_2O + K_2O)]$ 。其中，各氧化物值均为摩尔质量，CaO*只代表在硅酸盐中的氧化钙含量，因此需要校正排除化学沉积的 CaO，校正方法参考文献[36]。同时，交代作用会使岩石中的 Ca²⁺、Na⁺、K⁺等不稳定离子流失或增加，而影响 CIA 的准确度，通常用 Al₂O₃- (CaO*+Na₂O)-K₂O (A-CN-K) 图解来排除交代作用的影响^[37-38]。理想条件下，如果没有受到交代作用，那么风化作用线将平行于 A-CN 或者 A-K 的方向^[26,37]。BZT 剖面及 XD2 井样品点在 A-CN-K 图中均沿 A-CN 方向分布，实际风化线与自然风化线基本平行（图 9a），说明样品在沉积期后交代作用微弱，CIA 值可用于判定化学风化作用。

通常，寒冷、干燥环境下的初级风化作用 CIA 值介于 50~65，温暖、湿润环境下的中等风化作用 CIA 值介于 65~85，炎热、潮湿环境下的强烈风化作用 CIA 值介于 85~100^[38]。BZT 剖面 CIA 值介于 50.07~70.09，平均值为 63.97，说明龙马溪组沉积期整体受化学风化程度较低，反映气候可能较为寒冷、干燥（表 1、图 9b）。XD2 井 CIA 值介于 46.63~76.18，平均值为 66.33，说明龙马溪组沉积期整体受中度化学风化作用，反映气候为温暖、湿润的环境。晚奥陶期短暂的冰期寒冷气候向早志留期温暖气候的转化在古陆东侧已渐显端倪，相较于古陆东侧，古陆西侧受广海影响，气候仍较为干冷。较低的 CIA 值表明古陆西侧在龙马溪期构造活动性较强，风化作用以物理风化作用为主，化学风化作用较弱，而古陆东侧化学风化作用较西侧强。同时，在 A-CN-K 图上，两侧样品点的分布均较为分散（图 9b），说明物源在沉积过程中处于不稳定的气候和构造条件^[6,37]。同时，化学风化趋势线均落在花岗岩与长英质火成岩之间，显示物源主要为长英质火成岩与花岗岩，这与前面得到的结论一致。

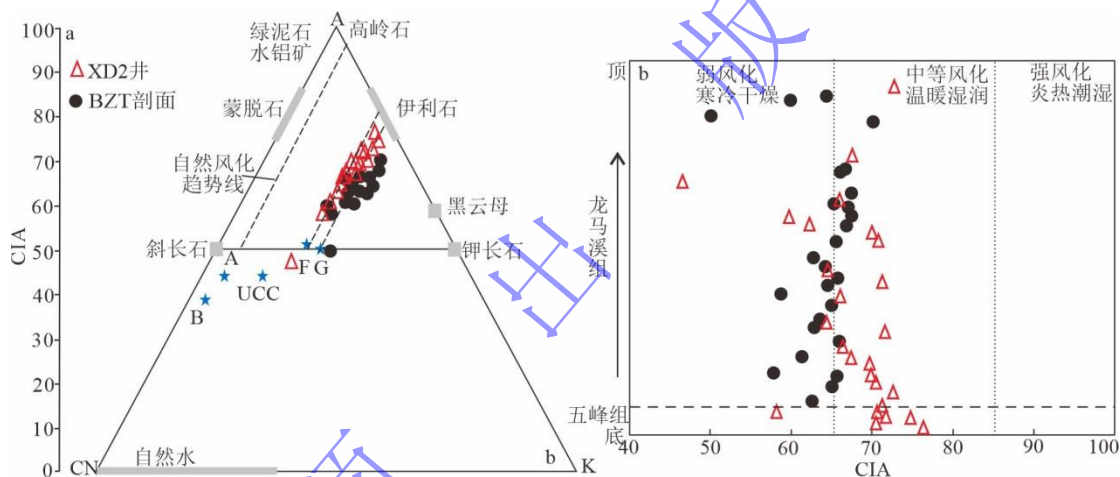


图9 古陆两侧 A-CN-K 图解(a)^[35], CIA 图解 (b)^[37]

A. 安山岩; B. 玄武岩; F. 长英质火成岩; G. 花岗岩; UCC. 上地壳岩石

Fig.9 A-CN-K diagrams on both sides of the ancient land (a)^[35] and CIA diagrams (b)^[37]

A. andesite; B. basalt; F. felsic igneous rock; G. granite; UCC. upper crust rocks

3.4 古陆两侧沉积构造演化模式

晚奥陶世一早志留世之交，受冈瓦纳大陆冰川事件波及全球，中上扬子地区存在短暂的赫南特冰期^[39-41]，气温骤降，生物大量灭绝，沉积了观音桥段介壳灰岩^[27,40-41]，古陆东侧昭通地区有该沉积响应，而古陆西侧盐源盆地则受构造隆升或碰撞影响，中奥陶宝塔组晚期就已抬升成陆缺失五峰组沉积。继而早志留世，四川盆地内气候回暖，冰雪消融，海平面上涨，使得底层水体滞留还原沉积了深水陆棚相龙马溪组富有机质页岩^[42]。而古陆西侧却依然继承了奥陶纪晚期全球寒冷干旱的古气候，气候回暖较慢，受区域构造挤压抬升沉降及上升洋流的影响，沉积了龙马溪组高硅质富有机质页岩^[6]。两侧沉积构造演化模式如下（图 10）。

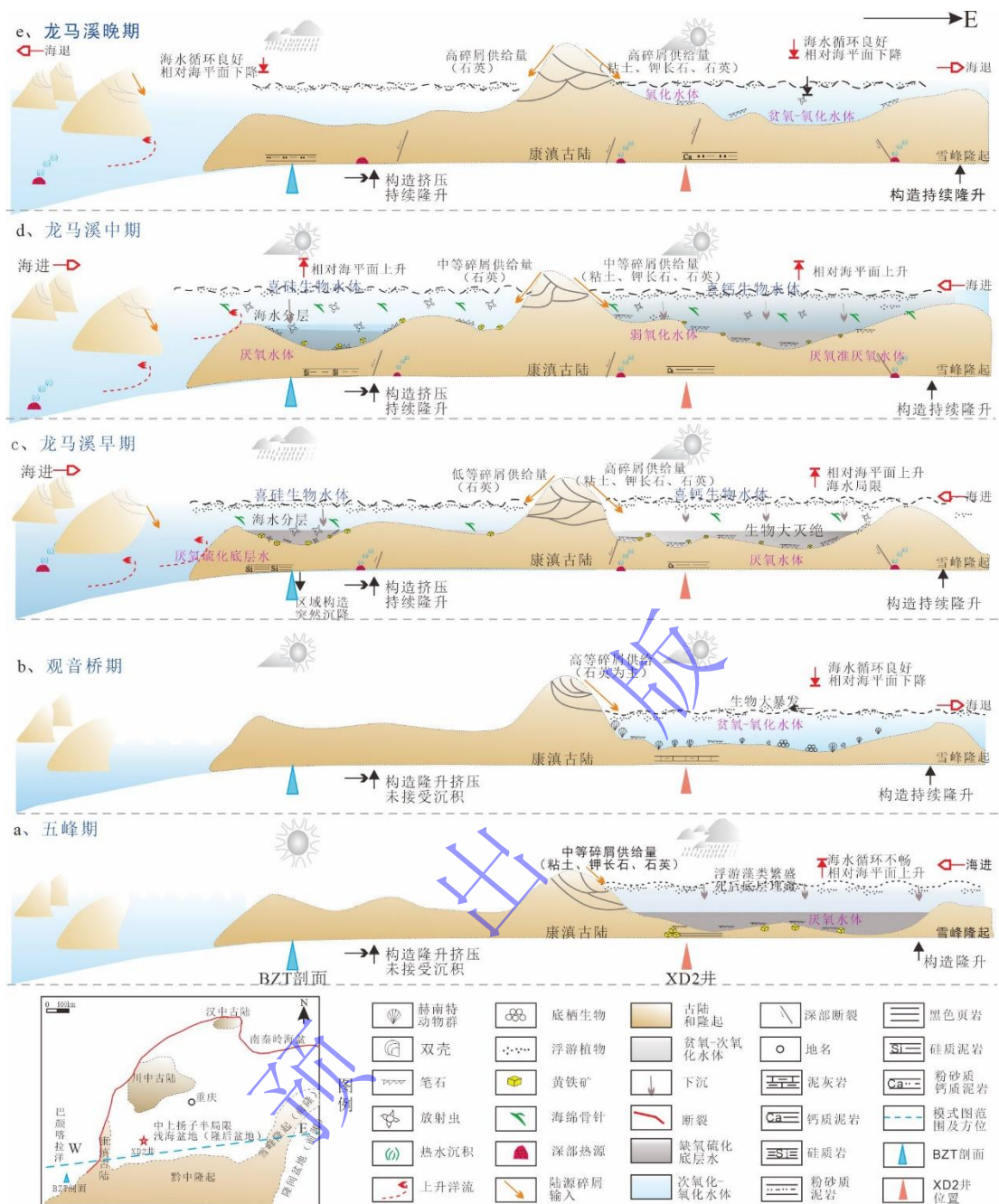


图 10 古陆两侧沉积演化模式图

Fig.10 Models of sedimentary evolution on both sides of the ancient land

晚奥陶五峰期：该期构造活动加剧，使得东侧昭通地区围陷于持续扩大的康滇古陆、川中隆起及黔中隆起之间成为强滞留的、半局限浅海沉积环境。而古陆西侧则抬升成陆，未见沉积。强烈的构造活动带来大量的陆源碎屑物质注入古陆东侧海盆，为海盆提供了大量营养物质，初级古生产力旺盛。同时厌氧水体利于有机质的保存，TOC 较高。

五峰期观音桥段：受全球冰期事件影响，古陆东侧昭通地区相对海平面下降，重新形成循环通畅的浅水碳酸盐岩沉积环境。冰期特征生物赫南特贝及其他种类底栖生物大量繁盛。

由于气候急剧变冷，及海体营养盐缺少而导致浮游生物相对较少，初级古生产力较低，表现出较低的 TOC 值。而古陆西侧仍为隆起区，没有沉积。

龙马溪早期：冰期结束，气候回暖，发生大规模海侵，古陆东侧围陷作用仍在持续，水体加深分层，形成厌氧—硫化的底层海水环境，底栖生物由于不能适应硫化环境和气候的突变而发生大面积灭绝，还原性海水环境有利于有机质的保存。加之可海底热液带来大量的营养物质，藻类繁盛，造成龙马溪初期海洋初级高古生产力，因此 TOC 呈现峰值。而古陆西侧则由于强烈的构造运动，造成区域构造突然沉降，形成厌氧—硫化的深水环境，加之广海频繁的上升洋流作用，火山沉积及热水沉积的影响，形成黑色硅质页岩沉积。喜硅生物（如放射虫、海绵古针等）大量繁殖，产生较高的初级古生产力。由于生物复苏过程较为缓慢，且龙马溪组初期水体较深底层水体硫化不适宜生物生存，所以龙马溪早期初级古生产力相对较低，而龙马溪中期生产力更高。

龙马溪中期：为古生产力旺盛期。随着古陆的进一步扩大，东侧昭通地区形成贫氧—氧化环境，陆源碎屑的输入提供了浮游生物所需的大量营养物质，导致海洋初级生产力更高，虽然贫氧—弱氧化的水体环境并不有利于有机质保存，但是有利于喜钙生物水体的大量繁殖，造成极高古生产力而形成富有机质页岩；古陆西侧的盐源盆地构造快速抬升挤压，造成区域持续的水体加深及生产力的提高，使得 TOC 值较高。

龙马溪组晚期：古陆东侧构造相对稳定，由于退海水体缓慢变浅，陆源碎屑持续增多稀释有机质，呈现较低的 TOC 值。而古陆西侧构造快速隆升，由于海退水体变浅，形成开放盆地环境，贫氧厌氧的环境遭破坏，浮游生物的减少，初级古生产力降低，陆源碎屑大量涌入使得 TOC 值较低。

4 结论

(1) 古陆两侧均发育富有机质黑色泥岩，但沉积环境明显不同。东侧昭通地区属于局限海陆棚相沉积环境，富有机质泥页岩主要以硅质钙质岩系为主。西侧盐源盆地属于开阔海陆棚相沉积环境，富有机质页岩主要为硅质岩系。

(2) 西侧盐源盆地中奥陶宝塔组晚期构造抬升成陆，未见五峰组沉积，两侧在龙马溪期均有较高比例的陆源物质持续输入，而东侧 XD2 井则离物源更近，且源岩成分较为单一，以长英质火成岩为主。西侧物源则较为复杂，主要以长英质物源及花岗岩为主，并有少量中基性岩的混入。反映古陆西侧构造背景更复杂，有活动大陆边缘及岛弧环境属性，这可能与西侧洋壳与扬子陆壳的碰撞相关。而古陆东侧属前陆盆地克拉通内部，构造相对稳定，为被

动大陆边缘环境。

(3) 古陆西侧龙马溪组沉积期整体受化学风化程度较低,反映气候可能较为寒冷、干燥。而东侧则受中度化学风化作用,气候为温暖、湿润的环境。整体而言,古陆东侧化学风化作用强于古陆西侧,气候也较西侧温暖。

(4) 古陆西侧 BZT 剖面沉积期构造运动更为剧烈,龙马溪期经历快速隆升和沉降,沉积水体更深,为还原—硫化性水体,同时受更多上升洋流及热水沉积的影响,喜硅水体生物大量发育,富有机质页岩的形成得益于良好的保存环境。而古陆东侧 XD2 井区域构造相对平稳,以总体抬升为主,沉积水体较浅,以贫氧—弱氧化环境为主,喜钙水体生物大量发育,富有机质页岩的形成则得益于温暖气候下生物的繁盛,带来较高的古生产力。

致谢 感谢审稿专家和编辑部老师提出的宝贵意见

参考文献 (References)

- [1] Guo X S, Hu D G, Shu Z G, et al. Exploration, development, and construction in the Fuling national shale gas demonstration area in Chongqing: Progress and prospects[J]. *Natural Gas Industry B*, 2023, 10(1): 62-72.
- [2] Zou C N, Zhao Q, Wang H Y, et al. Principal characteristics of marine shale gas, and the theory and technology of its exploration and development in China[J]. *Natural Gas Industry B*, 2023, 10(1): 1-13.
- [3] Zhang J C, Li Z, Wang D S, et al. Shale gas accumulation patterns in China[J]. *Natural Gas Industry B*, 2023, 10(1): 14-31.
- [4] 程锦翔, 邓敏, 王正和, 等. 康滇古陆西侧早志留世古海洋氧化—还原环境及优质烃源岩发育模式: 以盐源地区CYD2井为例[J]. *地质通报*, 2022, 41(10): 1813-1828. [Cheng Jinxiang, Deng Min, Wang Zhenghe, et al. Paleo-marine redox conditions and development model of high-quality source rocks of the Early Silurian on the West side of Kangdian Oldland: A case study of CYD2 well in Yanyuan area[J]. *Geological Bulletin of China*, 2022, 41(10): 1813-1828.]
- [5] 张茜, 王剑, 余谦, 等. 康滇古陆西侧龙马溪组黑色页岩地球化学特征及其地质意义[J]. *沉积与特提斯地质*, 2017, 37(1): 97-107. [Zhang Qian, Wang Jian, Yu Qian, et al. Black shales from the Longmaxi Formation in western Xikang-Yunnan ancient land: Geochemistry and geological implications[J]. *Sedimentary Geology and Tethyan Geology*, 2017, 37(1): 97-107.]
- [6] Zhang Q, Zhang B, Yu Q, et al. Study on the provenance and tectonic setting of mudstone in the Lower Silurian Longmaxi Formation of the Yanyuan Basin on the western margin of the Yangtze platform[J]. *Minerals*, 2023, 13(2): 194.
- [7] 王正和, 邓敏, 程锦翔, 等. 康滇古陆西侧断裂及岩浆活动对油气保存条件的影响: 以盐源盆地为例[J]. *地球科学*, 2018, 43(10): 3616-3624. [Wang Zhenghe, Deng Min, Cheng Jinxiang, et al. Influence of fault and Magmatism on oil and gas preservation condition, to the West of Kangdian ancient continent: Taking Yanyuan Basin as an example[J]. *Earth Science*, 2018, 43(10): 3616-3624.]
- [8] 刘家铎, 张成江, 刘显凡, 等. 扬子地台西南缘成矿规律及找矿方向[M]. 北京: 地质出版社, 2004. [Liu Jiaduo, Zhang Chengjiang, Liu Xianfan, et al. Mineralization regulation and exploration evaluation in Southwest Margin of Yangtze platform[M]. Beijing: Geology Press, 2004.]
- [9] 肖荣吾. 康滇大陆古裂谷带特征及其演化[J]. *云南地质*, 1988, 7(3): 229-235, 237-244. [Xiao Rongwu. The character and evolution of continental paleorift zone in Xikang-Yunnan (Kang-Dian)[J]. *Yunnan Geology*, 1988, 7(3): 229-235, 237-244.]
- [10] 张廷山, 陈雷, 梁兴, 等. 昭通国家级页岩气示范区五峰组—龙马溪组页岩气富集地质主控因素[J]. *天然气工业*, 2023, 43(4): 93-102. [Zhang Tingshan, Chen Lei, Liang Xing, et al. Geological control factors of shale gas enrichment in the Wufeng-Longmaxi Formation of the Zhaotong national shale gas demonstration area[J]. *Natural Gas Industry*, 2023, 43(4): 93-102.]
- [11] 徐进力, 邢夏, 唐瑞玲, 等. 动能歧视模式ICP-MS测定地球化学样品中14种痕量元素[J]. *岩矿测试*, 2019, 38(4): 394-402.

- [Xu Jinli, Xing Xia, Tang Ruiling, et al. Determination of 14 Trace elements in geochemical samples by ICP-MS using kinetic energy discrimination mode[J]. *Rock and Mineral Analysis*, 2019, 38(4): 394-402.]
- [12] Taylor S R, McLennan S M. The continental crust: Its composition and evolution: An examination of the geochemical record preserved in sedimentary rocks[M]. Oxford: Blackwell Scientific Publications, 1985.
- [13] Sugitani K, Yamashita F, Nagaoka T, et al. Geochemistry and sedimentary petrology of Archean clastic sedimentary rocks at Mt. Goldsworthy, Pilbara Craton, western Australia: Evidence for the early evolution of continental crust and hydrothermal alteration[J]. *Precambrian Research*, 2006, 147(1/2): 124-147.
- [14] Adachi M, Yamamoto K, Sugisaki R. Hydrothermal chert and associated siliceous rocks from the northern Pacific their geological significance as indication of ocean ridge activity[J]. *Sedimentary Geology*, 1986, 47(1/2): 125-148.
- [15] 刘彬, 王学求. 长江中下游地区早古生代沉积岩地球化学特征及其构造背景与物源分析[J]. *大地构造与成矿学*, 2018, 42(1): 163-176. [Liu Bin, Wang Xueqiu. Geochemistry of early Paleozoic sedimentary rocks in the Middle-Lower reaches of the Yangtze River and its constraints on tectonic setting and provenance[J]. *Geotectonica et Metallogenia*, 2018, 42(1): 163-176.]
- [16] 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.
- [17] Tribouillard 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.
- [18] Algeo T J, Tribouillard N. Environmental analysis of paleoceanographic systems based on molybdenum-uranium covariation[J]. *Chemical Geology*, 2009, 268(3/4): 211-225.
- [19] Algeo T J, Lyons T W. Mo-total organic carbon covariation in modern anoxic marine environments: Implications for analysis of paleoredox and paleohydrographic conditions[J]. *Paleoceanography and Paleoclimatology*, 2006, 21(1): PA1016.
- [20] 汤冬杰, 史晓颖, 赵相宽, 等. Mo-U共变作为古沉积环境氧化还原条件分析的重要指标: 进展、问题与展望[J]. *现代地质*, 2015, 29(1): 1-13. [Tang Dongjie, Shi Xiaoying, Zhao Xiangkuan, et al. Mo-U covariation as an important proxy for sedimentary environment redox conditions-progress: Problems and prospects[J]. *Geoscience*, 2015, 29(1): 1-13.]
- [21] 张建军, 牟传龙, 周恳恳, 等. 滇西户撒盆地芒棒组砂岩地球化学特征及物源区和构造背景分析[J]. *地质学报*, 2017, 91(5): 1083-1096. [Zhang Jianjun, Mou Chuanlong, Zhou Kenken, et al. Geochemical characteristic of sandstones from the Mangbang Formation in the Husa Basin, western Yunnan, and its constraints on provenances and tectonic setting[J]. *Acta Geologica Sinica*, 2017, 91(5): 1083-1096.]
- [22] Verma S P, Armstrong-Altrin J S. Geochemical discrimination of siliciclastic sediments from active and passive margin settings[J]. *Sedimentary Geology*, 2016, 332: 1-12.
- [23] Verma S P, Rivera-Gómez M A, Díaz-González L, et al. Multidimensional classification of magma types for altered igneous rocks and application to their tectonomagmatic discrimination and igneous provenance of siliciclastic sediments[J]. *Lithos*, 2017, 278-281: 321-330.
- [24] Condie K C. Chemical composition and evolution of the Upper continental crust: Contrasting results from surface samples and shales[J]. *Chemical Geology*, 1993, 104(1/2/3/4): 1-37.
- [25] Roser B P, Korsch R J. Determination of tectonic setting of sandstone-mudstone suites using SiO₂ content and K₂O/Na₂O ratio[J]. *The Journal of Geology*, 1986, 94(5): 635-650.
- [26] Moradi A V, Sarı A, Akkaya P. Geochemistry of the Miocene oil shale (Hançili Formation) in the Çankırı-Çorum Basin, Central Turkey: Implications for Paleoclimate conditions, source-area weathering, provenance and tectonic setting[J]. *Sedimentary Geology*, 2016, 341: 289-303.
- [27] Chen C, Mu C L, Zhou K K, et al. The geochemical characteristics and factors controlling the organic matter accumulation of the Late Ordovician-Early Silurian black shale in the Upper Yangtze Basin, South China[J]. *Marine and Petroleum Geology*, 2016, 76: 159-175.
- [28] Li Y F, Zhang T W, Ellis G S, et al. Depositional environment and organic matter accumulation of Upper Ordovician-Lower Silurian marine shale in the Upper Yangtze Platform, South China[J]. *Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology*, 2017,

- 466: 252-264.
- [29] Yan D, Wang H, Fu Q L, et al. Geochemical characteristics in the Longmaxi Formation (Early Silurian) of South China: Implications for organic matter accumulation[J]. *Marine and Petroleum Geology*, 2015, 65: 290-301.
- [30] 周炼, 周红兵, 李莱, 等. 扬子克拉通古大陆边缘Mo同位素特征及对有机埋藏量的指示意义[J]. *地球科学: 中国地质大学学报*, 2007, 32(6): 759-766. [Zhou Lian, Zhou Hongbing, Li Mo, et al. Molybdenum isotope signatures from Yangtze Craton continental margin and its indication to organic burial rate[J]. *Earth Science: Journal of China University of Geosciences*, 2007, 32(6): 759-766.]
- [31] Zhou L, Algeo T J, Shen J, et al. Changes in marine productivity and redox conditions during the Late Ordovician Hirnantian glaciation[J]. *Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology*, 2015, 420: 223-234.
- [32] Helz G R, Miller C V, Charnock J M, et al. Mechanism of molybdenum removal from the sea and its concentration in black shales: EXAFS evidence[J]. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 1996, 60(19): 3631-3642.
- [33] Zhao J H, Jin Z J, Jin Z K, et al. Applying sedimentary geochemical proxies for paleoenvironment interpretation of organic-rich shale deposition in the Sichuan Basin, China[J]. *International Journal of Coal Geology*, 2016, 163: 52-71.
- [34] Tribouillard 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.
- [35] Nesbitt H W, Young G M. Early Proterozoic climates and plate motions inferred from major element chemistry of lutites[J]. *Nature*, 1982, 299(5885): 715-717.
- [36] Cox R, Lowe D R, Cullers R L. The influence of sediment recycling and basement composition on evolution of mudrock chemistry in the southwestern United States[J]. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 1995, 59(14): 2919-2940.
- [37] Fedo C M, Nesbitt H W, Young G M. Unraveling the effects of potassium metasomatism in sedimentary rocks and paleosols, with implications for paleoweathering conditions and provenance[J]. *Geology*, 1995, 23(10): 921-924.
- [38] Sensarma S, Rajamani V, Tripathi J K. Petrography and geochemical characteristics of the sediments of the small River Hemavati, southern India: Implications for provenance and weathering processes[J]. *Sedimentary Geology*, 2008, 205(3/4): 111-125.
- [39] Zhang Y N, Wang Z W, Yang X, et al. Petrological and Ni-Mo isotopic evidence for the genesis of the Ni- and Mo-sulfide extremely enriched early Cambrian black shale from Southwest China[J]. *Chemical Geology*, 2022, 598: 120812.
- [40] 陈旭, 樊隽轩, 王文卉, 等. 黔渝地区志留系龙马溪组黑色笔石页岩的阶段渐进展布模式[J]. *中国科学(D辑): 地球科学*, 2017, 47(6): 720-732. [Chen Xu, Fan Junxuan, Wang Wenhui, et al. Stage-progressive distribution pattern of the Lungmachi black graptolitic shales from Guizhou to Chongqing, Central China[J]. *Science China (Seri. D): Earth Sciences*, 2017, 47(6): 720-732.]
- [41] 陈旭, 戎嘉余, 樊隽轩, 等. 奥陶-志留系界线地层生物带的全球对比[J]. *古生物学报*, 2000, 39(1): 100-114. [Chen Xu, Rong Jiayu, Fan Junxuan, et al. A global correlation of biozones across the Ordovician-Silurian boundary[J]. *Acta Palaeontologica Sinica*, 2000, 39(1): 100-114.]
- [42] Liang X, Shan C, Wang W X, et al. Exploration and development in the Zhaotong national shale gas demonstration area: Progress and prospects[J]. *Natural Gas Industry B*, 2023, 10(1): 44-61.

Sedimentary Evolution Difference in the Black Mudstone of Wufeng Formation-Longmaxi Formation on both Sides of Kangdian Ancient Land

ZHANG Qian^{1,2}, ZHANG HaiQuan^{1,2}, WANG Jian³, MEN YuPeng^{1,2}, YU Qian^{1,2}, ZHOU YeXin^{1,2}, CAO JunFeng^{1,2}, ZHAO AnKun^{1,2}

1. Chengdu Center, China Geological Survey(Geosciences Innovation Center of Southwest China), Chengdu 610218, China

2. Key Laboratory of Sedimentary Basin and Oil & Gas Resources, Ministry of Land and Resources, Chengdu 610218, China

3. School of Geoscience and Technology, Southwest Petroleum University, Chengdu 610500, China

Abstract: **[Objective]** This study examined the difference of sedimentary environment and tectonic evolution of the Wufeng Formation-Longmaxi Formation on the east and west sides of the Kangdian ancient land to support regional shale gas exploration and development and related research. **[Methods]** Based on a comprehensive geological survey and systematic mineralogical, petrological, and geochemical analysis, the provenance, paleoredox environment, and paleoclimate characteristics of black mudstone in the Wufeng Formation-Longmaxi Formation in the Zhaotong area on the east side of the ancient land and Yanyuan Basin on the west side were studied. **[Results]** The results show that the indicator parameters of terrigenous detrital such as Al_2O_3 , TiO_2 , Sc, and Zr on the east side are more enriched than those on the west side, whereas the redox index parameters of Mo_{EF} , U_{EF} , V/Cr, and U/Th are lower than those on the west side. There are clear differences in the sedimentary environment between the two sides. The eastern side is confined to marine shelf deposits, and the organic-rich shale is dominated by siliceous calcareous rocks. The west side is an open marine shelf, and the organic-rich shale is a siliceous rock series. Well XD2 on the east side is closer to the ancient land, the parent rock is mainly felsic igneous rock, the chemical weathering is stronger, the climate is warmer, and the sedimentary water is shallow and dominated by weak oxidation environment. The western side of the water body is relatively deep and dominated by anoxic reduction, with strong tectonic movement and more complex tectonic background, as well as active continental margin and island arc environmental properties, which may be related to the collision between the western ocean crust and Yangtze continental crust. **[Conclusion]** The formation of organic rich shale is the result of multiple factors together under different sedimentary evolution patterns. In comparison, the formation of organic rich shale on the western side of the ancient land is controlled by favorable preservation conditions of reducing water bodies, whereas the eastern side is controlled by extremely high paleoproductivity caused by the flourish of organisms in weakly oxidizing environments. Different sedimentary evolution patterns have created significant differences in the main controlling factors and distribution characteristics of organic rich shale formation on both sides of ancient land, which is of great significance for guiding regional shale gas exploration and development.

Key words: Kangdian ancient land; Wufeng Formation-Longmaxi Formation; geochemistry; sedimentary environment; tectonic setting