



滇黔北昭通地区晚奥陶世—早志留世黑色页岩地球化学特征及其地质意义

李娟, 陈雷, 胡月, 计玉冰, 卢畅, 董建华, 谭秀成, 杨莉, 杨琳, 陈鑫

引用本文:

李娟, 陈雷, 胡月, 计玉冰, 卢畅, 董建华, 谭秀成, 杨莉, 杨琳, 陈鑫. 滇黔北昭通地区晚奥陶世—早志留世黑色页岩地球化学特征及其地质意义[J]. 沉积学报, 2024, 42(3): 738–756.

LI Juan, CHEN Lei, HU Yue, et al. Element Geochemical Characteristics and Their Geological Significance of Late Ordovician-Early Silurian Black Shale in Zhaotong Area of Northern Yunnan and Guizhou[J]. *Acta Sedimentologica Sinica*, 2024, 42(3): 738–756.

相似文章推荐（请使用火狐或IE浏览器查看文章）

Similar articles recommended (Please use Firefox or IE to view the article)

滇黔北坳陷五峰组—龙马溪组下段页岩岩相与沉积环境

Analysis of Shale Lithofacies and Sedimentary Environment on Wufeng Formation–Lower Longmaxi Formation in Dianqianbei Depression

沉积学报. 2018, 36(4): 743–755 <https://doi.org/10.14027/j.issn.1000-0550.2018.066>

川东南地区龙马溪组底部海相页岩高GR峰沉积成因探讨

Study on the Sedimentogenesis of the High GR Peak Strata at the Bottom of the Longmaxi Formation in Southeast Sichuan Basin

沉积学报. 2018, 36(6): 1243–1255 <https://doi.org/10.14027/j.issn.1000-0550.2018.163>

渝东北奥陶—志留纪之交沉积地球化学及其环境演化——以城口地区燕麦剖面—龙马溪组为例

Sedimentation and Geochemistry of Upper Ordovician–Lower Silurian from Northern Chongqing, and Its Environmental Evolution: A Study of Linx–iang Formation to Longmaxi Formation of Yanmai Profile from Chengkou Region

沉积学报. 2018, 36(2): 257–266 <https://doi.org/10.14027/j.issn.1000-0550.2018.024>

渝东北田坝地区五峰—龙马溪组页岩矿物学特征及其油气地质意义

Mineralogical Characteristics and Petroleum Geological Significance of Wufeng–Longmaxi Formation Shale in the Tianba Area, Northeast of Chongqing

沉积学报. 2017, 35(4): 772–780 <https://doi.org/10.14027/j.cnki.cjxb.2017.04.011>

扬子陆块下古生界页岩发育特征与沉积模式

Characteristics and Depositional Model of the Lower Paleozoic Organic Rich Shale in the Yangtze Continental Block

沉积学报. 2015, 33(1): 21–35 <https://doi.org/10.14027/j.cnki.cjxb.2015.01.003>

文章编号:1000-0550(2024)03-0738-19

DOI: 10.14027/j.issn.1000-0550.2024.038

滇黔北昭通地区晚奥陶世—早志留世黑色页岩地球化学特征及其地质意义

李娟^{1,2,3},陈雷^{1,2,3},胡月⁴,计玉冰⁵,卢畅⁶,董建华^{1,2,3},谭秀成^{1,2,3},杨莉⁷,杨琳⁸,
陈鑫⁹

1.西南石油大学地球科学与技术学院,成都 610500

2.天然气地质四川省重点实验室,成都 610500

3.中国石油天然气集团有限公司碳酸盐岩储层重点实验室西南石油大学研究分室,成都 610500

4.甘肃省地质矿产勘查开发局第三地质矿产勘查院,兰州 730000

5.中国石油浙江油田公司,杭州 310023

6.中海石油(中国)有限公司深圳分公司,广东深圳 518000

7.四川页岩气勘探开发有限责任公司,成都 610051

8.中国石油川庆钻探工程公司钻采工程技术研究院,四川广汉 618300

9.中国石油西南油气田分公司页岩气研究院,成都 610500

摘要【目的】滇黔北昭通示范区地处四川盆地边缘,在晚奥陶世—早志留世时期,相较于盆内的长宁—威远地区,其沉积水体相对更浅、更靠近物源区,该地区五峰组—龙马溪组页岩的沉积可能与盆内存在差异。因此,厘清滇黔北昭通示范区晚奥陶世—早志留世黑色页岩的硅质成因、物质来源以及源区背景,具有重要意义。【方法】以昭通示范区太阳区块为研究区,利用区内四口井样品的主量元素、微量元素和稀土元素测试数据,探讨研究区五峰组—龙马溪组页岩的源区背景、源岩属性及硅质来源。【结果】研究区五峰组—龙马溪组黑色页岩中的硅质主要来自硅质生物和陆源碎屑物质,生物成因硅自下而上先增加后减小,表现出与陆源成因硅相反的变化规律;晚奥陶世存在短暂的冰期,直到早志留世冰川发生融化,海侵事件发生,随后海平面逐渐下降,水体不断变浅,陆源输入总体表现为先减小再增加的特征,沉积速率也呈现相同的规律。部分样品稀土元素球粒陨石标准化配分模式曲线小幅度波动,反映研究区五峰组—龙马溪组页岩沉积可能存在混合物源。【结论】研究区五峰组—龙马溪组页岩原始物质可能主要来自康滇古陆和黔中隆起的花岗岩和沉积岩,沉积时受一定海底热液的影响,但原始热液组分极少;相关指标综合反映五峰组—龙马溪组页岩物源区的构造背景主要为被动大陆边缘。

关键词 黑色页岩;地球化学;物源分析;构造背景;滇黔北

第一作者简介 李娟,女,1999年出生,硕士研究生,非常规油气地质,E-mail: 3406916041@qq.com

通信作者 陈雷,男,教授,E-mail: cl211@126.com

中图分类号 P618.13 文献标志码 A

0 引言

暗色富有机质页岩是目前油气勘探开发领域中的研究热点^[1-3]。自2009年以来,我国先后在四川盆地及其周缘多个区块实现页岩气勘探重大突破,并建立了长宁—威远、涪陵和昭通国家级页岩气示范区^[4-6]。富有机质页岩的沉积受古气候、古海洋等

多种地质要素影响^[7]。五峰组—龙马溪组沉积时期,上扬子地块构造运动、火山活动以及冰川作用频发,区域上控制页岩沉积,不同区域页岩中的矿物结构、有机质含量等受原岩性质、风化剥蚀作用以及后期成岩作用的多重影响而有所不同^[7],间接影响页岩的含气量。因此,阐明富有机质页岩的原岩性质、构造背景等,是研究其富集机理及工业效

收稿日期:2023-07-28;修回日期:2024-03-05;录用日期:2024-04-03;网络出版日期:2024-04-03

基金项目:国家自然科学基金项目(41602147);中国石油—西南石油大学创新联合体科技合作项目(2020CX020000)[Foundation: National Natural Science Foundation of China, No. 41602147; China University of Petroleum-Southwest Petroleum University Innovation Consortium Science and Technology Cooperation Project, No. 2020CX020000]

益的关键一步^[2]。

昭通国家级页岩气示范区是我国目前重点开发的区块之一,位于四川盆地南缘及滇黔北坳陷的交界地带,具有构造活跃、改造作用强、地形复杂的特点,勘探开发难度较大^[8-9]。前人重点对该地区五峰组—龙马溪组页岩气的富集机理及有机质富集机制进行了研究^[8-11]。如梁兴等^[9]、杜建平等^[10]对昭通太阳背斜区块整体的沉积环境、保存条件、储层特征及甜点展布进行研究,提出“三元控藏”规律;张廷山等^[11]提出了“水下地貌是基础、有机质保存是关键、优势岩相控储控气、纳米孔隙系统发育、顶底板封盖”是昭通示范区内五峰组—龙马溪组页岩气富集关键要素;李琪琪等^[11]采用地球化学手段对黔中隆起北缘的沉积环境及物源区构造背景进行研究,认为该区五峰组—龙马溪组页岩沉积环境主要为贫氧—厌氧环境,源岩总体以花岗岩为主,源区构造背景主要为主动大陆边缘;王鹏万等^[12-13]、王跃等^[14]对昭通示范区页岩的沉积环境及有机质富集机制进行了研究。总体而言,学者们对于昭通示范区富有机质页岩的有机质富集机制和页岩气富集机理已经取得了一系列认识,但对其源区属性及背景等方面的研究尚少。基于此,以昭通示范区太阳区块为研究区,利用区内四口井的分析测试数据探讨研究区五峰组—龙马溪组页岩的源区背景、源岩属性及硅质来源,为后续页岩气勘探开发研究奠定一定的基础。

1 地质背景

昭通页岩气示范区位于四川盆地南缘台坳与滇东—黔中隆起的交界带,地势整体呈北低南高的特征^[15-16]。示范区北部处于川南低陡褶皱带之内,由川南低陡褶皱带—滇黔北坳陷—黔中隆起构造形变由弱到强^[16],地形较为复杂,示范区内由西向东多个南北—东北走向的复背斜和向斜带相间发育,形成典型的隔槽式褶皱^[17]。研究区位于昭通页岩气示范区东北部,受燕山期、喜山期等多期构造活动影响,形成叙永向斜、太阳背斜等多个褶皱,走向大致呈东西向,并且断层发育,多为逆断层,构造复杂(图1)^[10,15-17]。

晚奥陶世—早志留世时期,由于区域构造活动、古气候条件变化,发生海侵事件,海平面快速上升,昭通示范区受到北部川中古隆起以及南部黔中隆起的阻隔,水体变深,整体处于深水陆棚环境,由于黔中隆起的不断抬升,海平面不断下降,沉积环境逐渐转变为半深水—浅水陆棚环境^[18-19],整体沉积一套暗色富有机质页岩。研究区五峰组—龙马溪组的上覆地层因多期构造活动抬升遭受剥蚀而不断减薄^[20],页岩气埋深整体较浅,主要为一套黑色页岩沉积,厚度为50~200 m,并见有斑脱岩夹层。龙马溪组依据岩性、颜色等可划分为两段,龙一段又划分为两个亚段,其中底部的龙一₁亚段依据古生物等特征划分为4个小层(图1),本文研究主要层段为五峰组—龙一₁亚段^[17-18,21]。

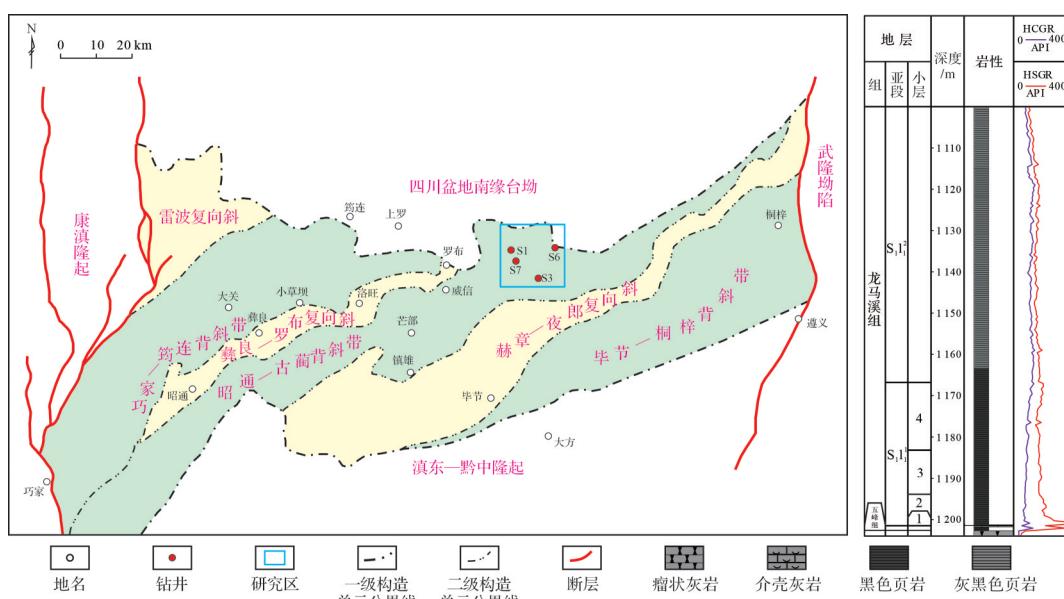


图1 昭通太阳区块构造背景图与岩性柱状图(据文献[18]修改)

Fig.1 Structural background map and lithologic histogram in Taiyang block of Zhaotong (modified from reference [18])

2 样品特征与测试

2.1 样品特征

以昭通太阳区块五峰组—龙马溪组海相页岩为主要对象,岩性主要为灰黑色—黑色页岩,偶见粉砂质页岩。五峰组顶部可见赫南特贝发育(图2a),龙马溪组黑色页岩偶见钙质夹层(图2b),构造裂缝发育,富含笔石化石(图2c),矿物组分主要包括石英、长石、碳酸盐矿物以及黏土矿物,黏土矿物以绿泥石、伊利石为主。微观视角下大量水平层理发育,暗色黏土纹层与浅色石英纹层或碳酸盐纹层呈互层状发育(图2d),碎屑矿物多呈次棱角状—棱角状,较多微裂缝顺层发育,部分被方解石充填(图2e,f),片状伊利石充填于微晶石英聚集体之间(图2g),大量草莓状黄铁矿发育,晶间多被有机质充填,并发育大量有机质孔(图2h)。此次分析测试的样品来自滇黔北昭通太阳区块S1、S3、S6、S7四口井五峰组—龙马溪组岩心(图1),共采集85块岩心样品进行地球化学测试分析,采样间隔为1~2 m。其中,五峰组样品12块,龙马溪组样品73块。

2.2 测试方法

根据国标GB/T19145—2003《沉积岩中总有机碳的测定》,利用LECO CS-230碳硫分析仪对样品进行

总有机碳(Total Organic Carbon, TOC)含量测试,分析精度优于2%。根据国标GB/T 21114—2019《耐火材料X射线荧光光谱化学分析熔铸玻璃片法》,采用熔铸玻璃片方法制样,X射线荧光光谱(X-Ray Fluorescence Spectrometry, XRF)对研究区样品进行主量元素测定,分析误差小于5%。根据国标GB/T 14506.30—2010《硅酸盐岩石化学分析方法第30部分:44个元素量测定》,采用高温高压消解法测定样品微量元素及稀土元素含量,首先将0.5 g左右的样品粉末置于坩埚中,放入高温炉中煅烧去除有机质后再称取约0.5 mg烧失后的样品放入溶样瓶中,记录每个样品的称量结果后,滴入7.5 mL比例为2:2:1的HNO₃、HF和HClO₄溶解样品,混合均匀后放置于100 °C电热板上蒸干,后加入1:1纯化的HNO₃和HF,放入高压釜中190 °C保温48 h。冷却后再放置于140 °C电热板上将溶液蒸至湿盐状,然后缓慢加入4 mL的HNO₃,再次放入高压釜中170 °C恒温4 h。冷却后,用2%的HNO₃将溶解样稀释2 000倍。溶解稀释后的样品在安捷伦电感耦合等离子体质谱仪(Agilent 7800)上进行测试分析,微量元素及稀土元素含量分析误差小于5%。以上测试均在北京通标标准技术服务有限公司的矿产实验室完成。

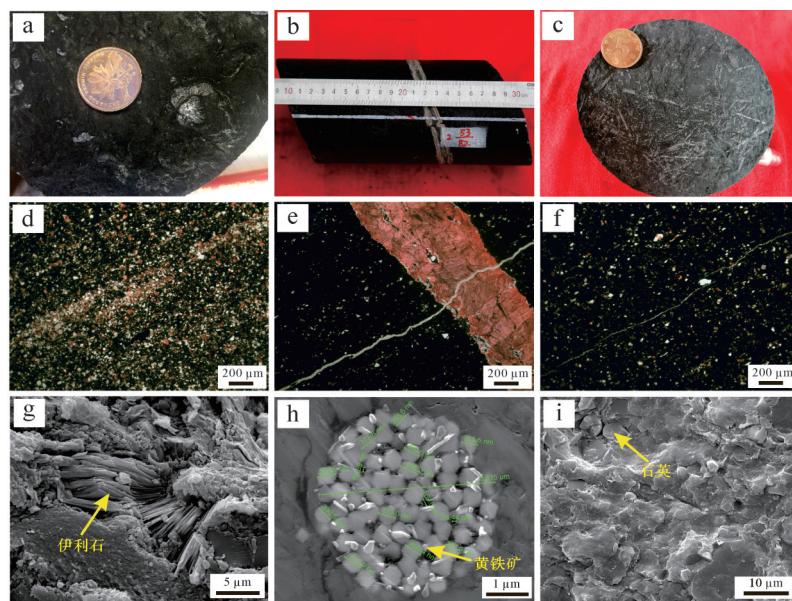


图2 昭通太阳区块五峰组—龙马溪组页岩宏观及微观特征

(a)赫南特贝,S5井,1 690.32 m,五峰组;(b)黑色页岩,Y18井,1 661.85 m,龙马溪组;(c)大量笔石,S23井,1 623.04 m,龙马溪组;(d)暗色黏土纹层与浅色石英纹层互层,S7井,1 249.65 m,龙马溪组,正交光;(e)构造缝被方解石充填,S38井,1 983.12 m,龙马溪组,正交光;(f)微裂缝,S7井,1 218.95 m,龙马溪组,正交光;(g)片状绿泥石,S18井,2 244.19 m,龙马溪组,SEM;(h)草莓状黄铁矿,S6井,2 009.10 m,龙马溪组,SEM;(i)碎屑石英,S16井,1 397.91 m,龙马溪组,SEM

Fig.2 Macroscopic and microscopic characteristics of the Wufeng Formation-Longmaxi Formation shale in Taiyang block of Zhaotong

3 元素地球化学特征

3.1 主量元素特征

昭通太阳区块五峰组页岩TOC含量介于4.2%~6.8%,平均值为5.5%(表1、图3),整体含量较高。龙马溪组TOC含量介于0.1%~8.1%,平均值为14.9%,TOC值在龙一₁小层达最大值,自下而上逐渐减小。五峰组—龙马溪组页岩主要包括SiO₂、Al₂O₃、CaO、K₂O等主量元素,其中龙马溪组页岩SiO₂含量介于34.50%~61.40%、平均值为53.61%,五峰组页岩SiO₂含量较龙马溪组稍低。龙马溪组页岩Al₂O₃含量介于9.90%~26.26%,平均值为14.56%,较五峰组Al₂O₃含量稍低,自下而上Al₂O₃含量整体呈增大的趋势,说明陆源输入逐渐增加^[22-23]。五峰组、龙马溪组页岩CaO含量平均值分别为6.80%、6.30%,而MgO含量平均值为3.59%、2.74%,普遍低于CaO含量,表明页岩中

方解石含量大于白云石含量。相比于大陆上地壳(Upper Continental Crust, UCC)的元素丰度^[24],五峰组—龙马溪组页岩的SiO₂、Al₂O₃、Na₂O、TiO₂、P₂O₅表现为弱亏损的特征,CaO、MgO明显富集。

3.2 微量元素特征

研究区五峰组—龙马溪组页岩样品微量元素分析结果见表2。研究区五峰组页岩较UCC元素丰度Mo、U表现出强烈富集的特征^[24],富集系数分别达71.58、17.22,Be、V、Ni、Cu、Zn、Cs、Pb表现为中等富集,Li、Sc、Ga、Rb、Zr、Nb、Ba、Th、Cr表现为弱富集特征,而Co、Sr、Hf表现弱亏损的特征(表2);龙马溪组页岩Mo元素与五峰组特征相似,富集系数达48.22,V、Ni、Cu、Zn、Cs、Th、U中等富集,Li、Be、Sc、Co、Ga、Ba、Rb、Zr、Nb、Pb、Cr弱富集或不富集,而Sr、Hf呈现亏损的特征(图4)。

表1 昭通太阳区块五峰组—龙马溪组主量元素含量(%)统计表

Table 1 Principal element content (%) in the Wufeng Formation-Longmaxi Formation, Taiyang block of Zhaotong

层位	样号	SiO ₂	Al ₂ O ₃	T(Fe ₂ O ₃)	CaO	MgO	K ₂ O	Na ₂ O	TiO ₂	P ₂ O ₅	MnO	TOC/%
	Y12	53.27	15.47	8.71	4.27	2.80	3.93	1.05	0.68	0.11	0.04	0.8
	Y13	49.39	26.26	5.74	0.81	3.07	6.48	0.78	0.53	0.07	0.01	0.3
	Y14	48.51	13.45	6.63	8.58	4.17	3.39	0.82	0.63	0.11	0.09	1.0
	Y15	48.28	23.44	5.64	2.90	3.18	5.99	0.84	0.37	0.09	0.03	1.0
	Y16	48.32	16.28	5.26	8.54	2.98	4.35	0.63	0.70	0.09	0.05	1.7
	Y17	54.04	14.88	4.77	6.75	2.73	4.16	0.66	0.62	0.11	0.04	1.9
	Y18	50.59	15.92	5.26	7.10	2.82	4.39	0.69	0.62	0.11	0.04	2.1
	Y19	51.75	12.77	4.80	8.76	3.02	3.51	0.63	0.60	0.11	0.05	2.4
	Y20	53.68	16.38	4.21	5.77	2.72	4.46	0.73	0.55	0.09	0.03	2.5
龙马溪组	Y21	54.58	12.35	4.81	7.90	2.27	3.34	0.69	0.58	0.14	0.03	2.6
	Y22	55.65	12.09	4.37	8.08	2.32	3.25	0.65	0.58	0.14	0.03	2.7
	Y23	55.24	14.49	4.46	6.34	2.43	3.84	0.88	0.57	0.14	0.03	2.3
	Y24	57.09	11.54	4.14	7.46	2.43	3.12	0.65	0.55	0.14	0.04	2.7
	Y25	56.89	10.92	4.40	7.95	2.20	2.95	0.69	0.52	0.14	0.04	3.3
	Y26	55.26	9.90	7.41	7.34	2.00	2.74	0.63	0.47	0.11	0.04	2.9
	Y27	56.38	9.99	3.66	8.99	2.63	2.70	0.61	0.47	0.11	0.05	3.2
	Y28	53.06	11.14	4.46	7.13	3.48	3.02	0.81	0.55	0.14	0.06	5.4
	Y29	58.86	10.12	4.51	6.83	2.25	2.69	0.66	0.47	0.11	0.03	3.6
	Y30	51.09	12.11	4.01	6.89	2.58	3.16	1.04	0.62	0.14	0.04	8.1
五峰组	Y31	47.72	12.37	3.46	8.82	3.85	3.48	0.69	0.55	0.14	0.05	6.8
	Y32	46.24	19.70	4.73	4.79	3.33	5.59	0.62	0.77	0.11	0.04	4.2
上地壳丰度		66.00	15.20	—	4.20	2.20	3.40	3.90	0.65	0.15	0.08	—

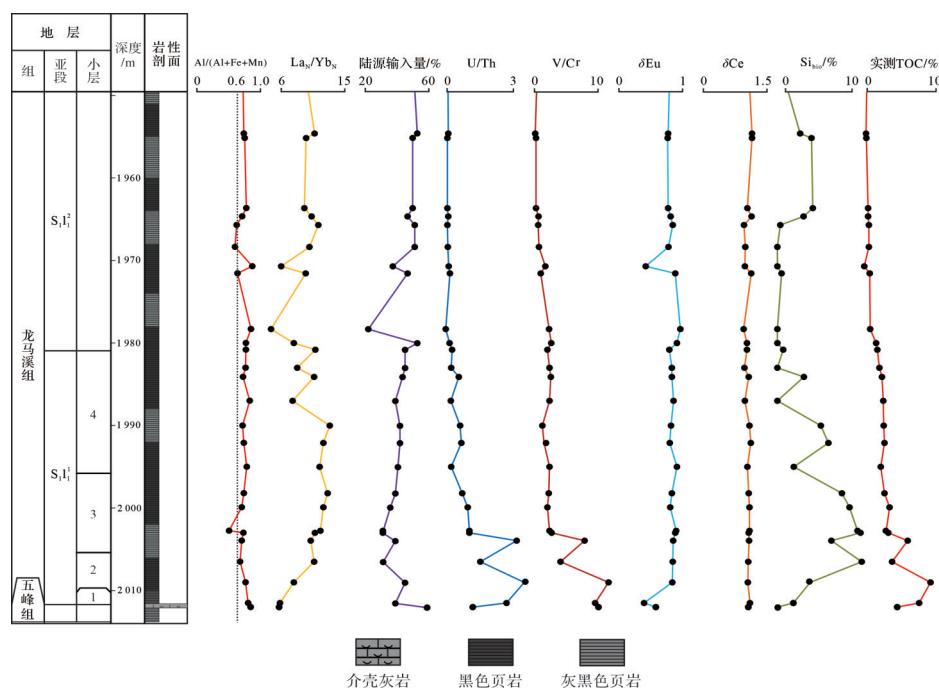


图3 昭通太阳区块S6井五峰组—龙马溪组页岩地化参数垂向变化序列图

Fig.3 Sequence diagram depicting the vertical variation of geochemical parameters from the Wufeng Formation-Longmaxi Formation shale, well S6, Taiyang block of Zhaotong

3.3 稀土元素特征

研究区五峰组—龙马溪组黑色页岩稀土元素(Rare Earth Element, REE)在不同层段呈不同规律(表3)。五峰组—龙马溪组页岩ΣREE介于113.36~512.37 μg/g,平均值为224.28 μg/g,相较于大陆上地壳稀土元素(Rare Earth Element, REE)总量表现为明显富集的特征,其中五峰组ΣREE较龙马溪组更高(表3)。研究区页岩LREE/HREE值介于6.02~10.48,平均值为9.14,反映研究区更富集轻稀土元素,且LREE/HREE值普遍小于大陆上地壳值,其中五峰组页岩的LREE/HREE平均值为7.37,龙马溪组页岩的平均值为9.25,二者稀土元素分异程度较为相近,表明研究区五峰组与龙马溪组页岩的物源大致相同^[2]。通常La_N/Yb_N(N表示球粒陨石标准化)值会受陆源碎屑输入的影响,随着陆源输入增多La_N/Yb_N值不断增大^[25-28]。研究区五峰组—龙马溪组页岩La_N/Yb_N值介于4.75~12.26,平均为9.44,反映其受物源影响较大^[22]。δEu值介于0.42~0.85,平均为0.71,表现为负异常特征,其中五峰组δEu平均为0.49,较龙马溪组亏损严重。δCe值介于0.90~1.05,平均为0.97,以弱负异常为主。据稀土元素球粒陨石标准化配分模式图来看,五峰组与龙马溪组均呈较为平缓的右倾特征,与大陆上地壳相似(图5)。

4 讨论

4.1 硅质成因

硅质页岩中SiO₂的成因主要包括陆源、生物、热液三种^[29]。根据前人研究,陆源输入通常与Al元素的含量相关,而热液的参与则影响Fe、Mn元素的富集^[30-31],因此常用Al-Fe-Mn三角图和Al/(Al+Fe+Mn)比值来判断硅质页岩的成因。Al/(Al+Fe+Mn)比值通常反映热液对沉积物的贡献量,热液物质的贡献量越多,Fe、Mn元素越富集,比值就越小。通常纯热液沉积物的Al/(Al+Fe+Mn)比值近似0.01,受热液影响的沉积物Al/(Al+Fe+Mn)比值通常小于0.35,当比值大于0.4时,表明主要受陆源输入的影响,而纯生物作用形成的硅质岩该比值接近0.6^[32-33]。例如东太平洋洋中脊纯热液沉积物的Al/(Al+Fe+Mn)比值低至0.01,半远洋环境下纯生物成因的Kamiaso硅质岩的比值为0.60^[32]。研究区五峰组—龙马溪组Al/(Al+Fe+Mn)比值介于0.42~0.78,表明该套页岩硅质成分受热液影响较小,生物成因和陆源输入可能是该套页岩SiO₂形成的主要因素。据样品测试点在Al-Fe-Mn三角图上的投点显示,研究区样品主要落在生物成因区内,仅有一个样品点落在生物成因区外,靠近热液成因区,进一步表明研究区五峰组—龙马溪组

表2 昭通太阳区块五峰组—龙马溪组页岩微量元素含量(μg/g)统计表

Table 2 Trace element content (μg/g) in the Wufeng Formation–Longmaxi Formation, Taiyang block of Zhaotong

层位	样号	Sc	V	Co	Ni	Cu	Zn	Ga	Rb	Sr	Y	Zr	Nb	Mo	Cs	Ba	Hf	Ta	Tl	Pb	Th	U	Cd	Cr	Sn
	Y12	13.70	116	26.40	75.1	49.3	146.0	23.0	131.0	128.0	29.9	192.0	16.0	66.7	12.40	97.4	6.10	1.75	2.06	51.6	20.1	5.78	0.68	67.2	4.09
	Y13	7.52	58.4	7.08	24.3	23.4	80.4	22.0	112.0	70.8	27.2	173.0	11.2	6.02	13.30	77.5	7.60	3.15	2.11	12.5	22.0	6.92	0.35	23.4	12.2
	Y14	16.50	125	21.50	52.7	44.8	79.4	20.4	174.0	227.0	35.3	206.0	16.2	17.6	12.80	124.9	6.27	1.77	1.89	36.9	19.1	6.99	0.24	64.5	3.81
	Y15	9.04	71.8	7.59	26.1	29.6	56.9	23.5	126.0	111.0	23.9	151.0	10.3	8.18	17.30	1069	7.07	3.03	2.79	25.2	42.3	8.97	0.28	24.2	7.63
	Y16	14.40	194	15.50	60.7	47.8	166.0	22.4	119.0	238.0	31.5	144.0	15.6	17.6	15.00	964	5.38	1.96	2.48	23.2	23.1	8.13	0.57	60.9	4.07
	Y17	15.40	187	17.50	71.4	48.6	132.0	22.2	142.0	154.0	28.5	148.0	16.3	15.0	15.70	99	4.01	1.72	2.68	28.4	20.7	9.04	0.80	68.4	4.20
	Y18	15.10	191	15.10	67.0	43.9	120.0	22.2	141.0	161.0	30.0	152.0	14.5	18.9	15.10	1069	5.53	1.79	2.77	33.9	24.0	9.63	0.74	63.9	4.88
	Y19	14.90	222	17.00	75.9	47.1	158.0	20.1	188.0	208.0	33.2	117.0	14.8	22.6	13.40	1059	3.45	1.44	2.31	22.8	16.6	11.20	1.08	70.0	3.48
	Y20	13.90	170	11.80	51.5	39.6	68.5	22.9	143.0	143.0	28.6	138.0	15.1	17.2	14.10	1009	4.79	1.82	2.61	22.3	23.6	9.11	0.32	56.3	4.72
龙马溪组	Y21	14.30	139	22.00	62.2	52.3	192.0	20.1	188.0	216.0	29.7	118.0	15.2	25.8	13.50	1109	3.13	1.30	2.4	35.3	15.7	11.20	0.65	64.3	3.22
	Y22	14.50	160	19.70	71.8	50.3	208.0	19.2	177.0	220.0	30.6	118.0	14.9	26.5	12.80	1079	3.17	1.36	2.43	29.6	15.9	12.20	0.98	68.4	3.18
	Y23	14.20	182	16.10	60.0	47.4	67.1	21.1	174.0	191.0	25.7	105.0	14.1	21.8	13.60	1049	3.26	1.74	2.35	28.9	24.1	9.79	0.46	60.2	3.56
	Y24	13.60	189	18.70	70.5	53.9	104.0	19.1	166.0	210.0	29.5	112.0	13.8	24.9	11.50	99	3.05	1.27	2.25	26.1	15.3	12.10	0.94	64.9	3.16
	Y25	12.60	162	18.90	79.9	57.9	98.5	17.4	161.0	218.0	30.0	95.7	12.8	47.6	10.90	967	2.73	1.16	2.35	29.6	14.4	14.20	1.03	59.0	2.80
	Y26	11.10	153	16.90	88.0	59.7	61.1	16.3	144.0	239.0	28.9	98.8	14.9	40.8	9.18	999	2.45	1.07	2.38	38.7	13.1	13.70	0.46	51.2	2.58
	Y27	11.70	183	14.40	80.5	47.4	128.0	16.8	142.0	300.0	30.4	119.0	19.3	39.2	8.76	1159	2.91	1.22	2.04	18.7	12.7	13.30	0.95	56.0	2.65
	Y28	13.20	491	17.50	147.0	71.9	492.0	19.3	158.0	197.0	34.9	136.0	16.8	88.0	9.78	1089	3.52	1.27	3.08	25.2	14.7	40.20	6.19	68.7	3.01
	Y29	12.00	257	15.00	122.0	61.0	154.0	16.8	147.0	208.0	32.2	101.0	12.5	63.6	9.90	1019	2.69	1.15	2.85	26.6	13.6	19.60	0.97	59.7	2.80
	Y30	13.50	869	17.90	246.0	120.0	490.0	20.9	165.0	330.0	39.3	197.0	15.4	171.0	10.70	1049	4.96	1.31	5.03	29.3	16.0	68.30	7.41	86.2	2.94
五峰组	Y31	17.30	864	8.59	138.0	154.0	330.0	22.1	190.0	234.0	81.2	323.0	17.1	53.2	10.60	1119	7.02	1.32	1.91	51.5	15.4	36.40	2.24	103.0	3.99
	Y32	18.90	609	12.40	110.0	116.0	292.0	26.3	161.0	137.0	44.6	283.0	23.1	32.7	11.50	1599	8.17	2.07	2.65	134.0	21.9	25.60	2.11	69.3	6.06
	上地壳丰度	10.00	70	12.0	21.0	17.0	63.0	18.0	95.0	300.0	—	170.0	13.0	0.6	3.30	640	11.60	0.90	—	18.0	9.5	1.80	—	44.0	—

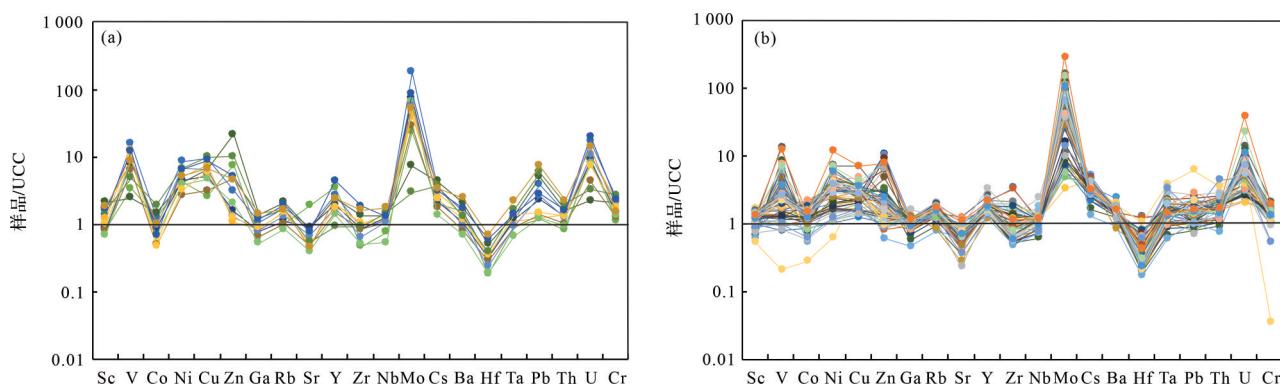


图4 昭通太阳区块五峰组—龙马溪组页岩微量元素UCC标准化蛛网图

(a)五峰组;(b)龙马溪组

Fig.4 Trace element UCC (Upper Continental Crust) standardized spider web diagram of the Wufeng Formation-Longmaxi Formation shale, Taiyang block of Zhaotong

表3 昭通太阳区块五峰组—龙马溪组页岩稀土元素含量(μg/g)统计表

Table 3 Rare earth element content (μg/g) in the Wufeng Formation-Longmaxi Formation, Taiyang block of Zhaotong

层位	样号	La	Ce	Pr	Nd	Sm	Eu	Gd	Tb	Dy	Ho	Er	Tm	Yb	Lu
	Y12	51.3	99.0	11.30	43.2	5.76	1.35	5.83	1.02	5.56	1.16	3.41	0.52	3.35	0.63
	Y13	38.8	79.2	9.94	38.0	5.90	0.82	5.36	0.93	5.26	1.17	3.47	0.55	3.62	4.00
	Y14	49.7	108.0	11.30	43.2	6.02	1.62	6.61	1.13	6.13	1.24	3.59	0.54	3.38	0.54
	Y15	23.2	44.1	5.33	20.4	3.25	0.93	3.47	0.69	3.98	0.91	2.82	0.48	3.22	0.58
	Y16	39.3	78.5	8.60	32.3	5.12	1.38	5.31	0.90	5.22	1.09	3.19	0.47	3.07	0.50
	Y17	46.0	90.5	9.66	35.1	5.48	1.29	5.49	0.88	4.86	1.01	2.96	0.45	2.82	0.49
	Y18	42.4	80.2	9.17	33.9	5.06	1.25	5.13	0.89	4.99	1.09	3.20	0.49	3.17	0.65
	Y19	47.4	97.0	10.30	38.4	5.60	1.41	5.94	0.95	5.40	1.14	3.25	0.48	2.95	0.50
	Y20	40.5	78.0	8.90	32.9	4.93	1.25	5.01	0.84	4.82	1.07	3.18	0.50	3.22	0.53
龙马溪组	Y21	45.8	95.5	10.00	37.5	5.65	1.37	5.69	0.89	4.90	1.00	2.77	0.40	2.46	0.57
	Y22	44.6	95.2	9.85	37.3	6.23	1.44	5.84	0.94	5.00	1.01	2.84	0.42	2.54	0.40
	Y23	40.3	79.6	8.38	30.9	4.39	1.22	4.86	0.76	4.29	0.89	2.58	0.38	2.38	0.36
	Y24	46.1	92.9	9.65	36.2	5.44	1.35	5.56	0.88	4.76	0.97	2.81	0.41	2.52	0.38
	Y25	43.5	90.9	9.56	36.0	6.13	1.43	5.81	0.91	4.90	0.98	2.79	0.40	2.47	0.38
	Y26	43.7	90.1	9.30	35.4	4.80	1.30	5.17	0.88	4.76	0.98	2.79	0.40	2.56	0.43
	Y27	40.8	82.2	8.46	31.6	5.26	1.36	5.23	0.87	4.85	1.00	2.77	0.40	2.52	0.36
	Y28	45.8	93.8	9.73	37.0	5.60	1.45	6.05	1.01	5.57	1.14	3.29	0.47	2.95	0.46
	Y29	41.8	84.2	8.87	33.3	5.10	1.29	5.31	0.91	4.86	1.02	2.95	0.42	2.60	0.41
	Y30	43.4	87.5	9.32	35.5	5.94	1.47	5.98	1.06	6.18	1.28	3.71	0.55	3.40	0.54
五峰组	Y31	72.7	149.0	14.90	52.8	9.23	1.32	10.20	1.99	12.10	2.59	7.51	1.13	6.91	1.04
	Y32	53.9	111.0	12.20	43.8	6.38	1.21	6.85	1.26	7.59	1.68	4.99	0.77	5.18	0.86
上地壳丰度		33.0	64.0	7.30	28.0	5.00	1.12	4.40	0.67	4.00	0.80	2.30	0.34	3.24	0.33

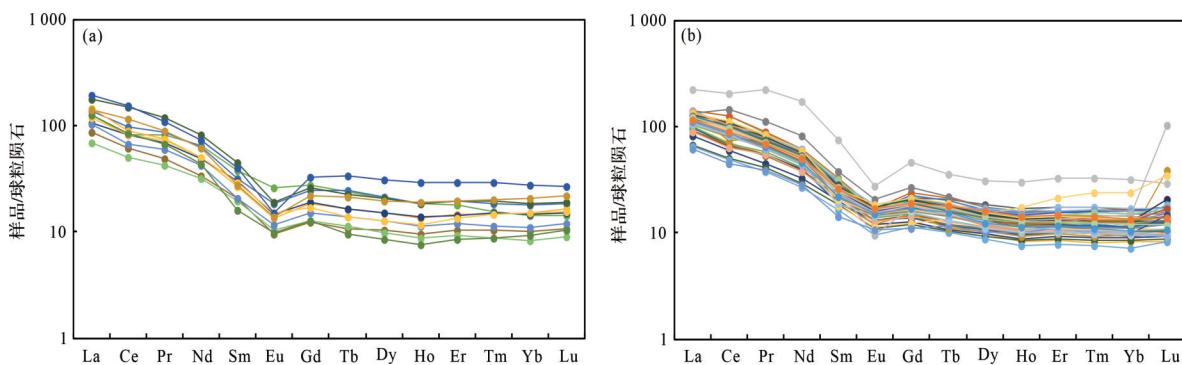


图5 昭通太阳区块五峰组—龙马溪组页岩稀土元素球粒陨石标准化配分模式图

(a)五峰组;(b)龙马溪组

Fig.5 Standardized distribution pattern diagram depicting chondrites of rare earth elements from the Wufeng Formation-Longmaxi Formation shale, Taiyang block of Zhaotong

页岩硅质成因以生物和陆源输入为主(图6),但也不能排除热液的影响;另外研究区五峰组—龙马溪组页岩镜下可见海绵骨针、腕足类化石以及放射虫等硅质生物化石(图7)。

Si/Al 比值也可用来判断硅质成因。研究区五峰组—龙马溪组页岩 Si/Al 比值较高, Holdaway *et al.*^[34]提出过量硅是指高于正常碎屑沉积环境下的 SiO_2 含量,通常反映生物成因部分的硅质,其计算公式为: $\text{Si}_{\text{过量}} = \text{Si}_{\text{样品}} - [(\text{Si}/\text{Al})_{\text{背景}} \times \text{Al}_{\text{样品}}]$, $(\text{Si}/\text{Al})_{\text{背景}}$ 采用平均页岩比值3.11。研究区五峰组—龙马溪组页岩 $\text{Si}_{\text{过量}}$ 介于0.29%~23.73%,平均值为8.52%。 $\text{Si}-\text{Al}$ 相关图显

示,五峰组—龙马溪组页岩与Barnett页岩类似,在伊利石 Si/Al 线上为过量硅部分,反映硅质的生物成因部分^[29,35];而部分样品点落入伊利石 Si/Al 线下区域(图8),反映五峰组—龙马溪组页岩硅质的陆源碎屑来源。通过硅质总量减去硅得到陆源硅的含量,五峰组—龙马溪组页岩陆源硅含量介于6.94%~43.23%,平均值为20.11%,自下而上陆源硅含量逐渐增多,生物硅含量逐渐减少(图3),表明在五峰组—龙马溪组沉积时期陆源输入不断增多。焦石坝地区五峰组—龙马溪组下段页岩样品过量硅含量介于19.79%~55.31%,平均值为33.4%^[30-31],川南长宁地区五峰组—龙马溪组页岩的生物硅含量多介于0.24%~61.23%,五峰组—龙马溪组底部平均值可达47.52%^[36-37]。而研究区陆源硅总体偏低,推测原因为昭通示范区靠近黔中古陆、康滇古陆,导致陆源硅输入较多,生物硅相对较少。

4.2 陆源输入

陆源碎屑物质的输入对有机质的富集起到关键性作用^[38]。通常陆源碎屑的输入会带来丰富的营养物质,使得水体中的藻类大量繁殖,由此促进有机质的富集;当陆源碎屑输入过多时,会对有机质产生稀释作用,从而抑制有机质的富集^[38-39]。 Al, Ti 等元素在沉积过程中不易受风化作用和成岩作用的影响,常被用来指示陆源物质输入^[39]。Murry *et al.*^[40]提出利用公式:陆源物质质量分数(%) = $\omega(\text{Ti}_{\text{样品}})/\omega(\text{Ti}_{\text{PAAS}}) \times 100$ 来计算陆源输入量。经计算,研究区五峰组—龙马溪组页岩陆源输入量介于10.47%~53.49%,平均值为35.0%,自下而上表现为先减小再增加的特征(图9)。陆源输入的变化与沉积时的古环境密切相

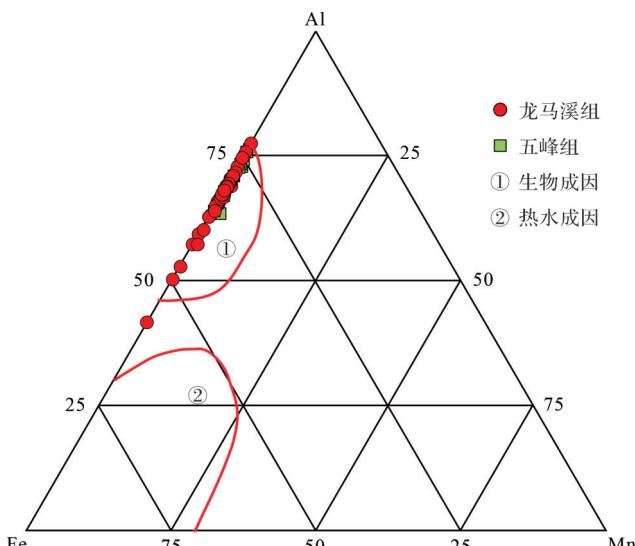


图6 昭通太阳区块五峰组—龙马溪组页岩Al-Fe-Mn三角图解(底图据文献[32])

Fig.6 Al-Fe-Mn ternary diagram of the Wufeng Formation-Longmaxi Formation shale, Taiyang block of Zhaotong
(base map is from reference [32])

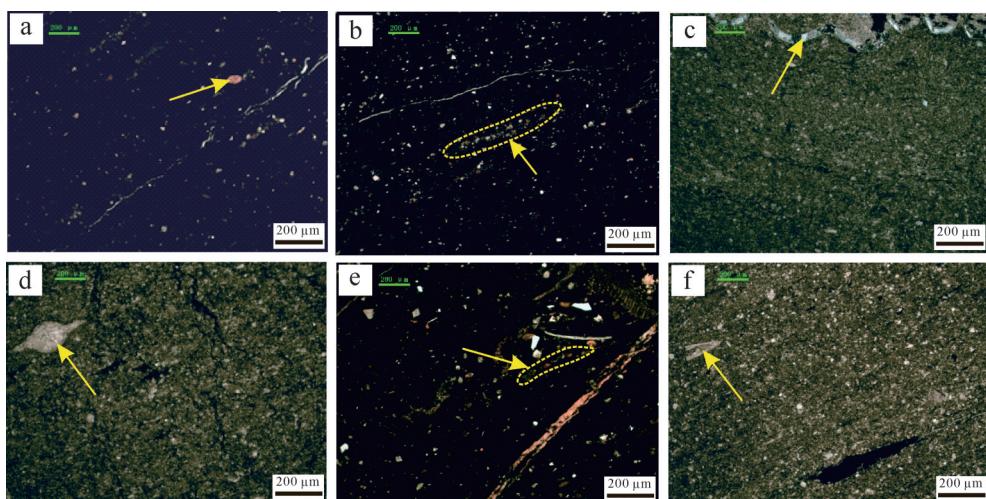


图7 昭通太阳区块五峰组—龙马溪组页岩典型硅质生物照片

(a) 海绵骨针, S2井, 1 239.99 m, 龙马溪组, 正交光; (b) 硅质生物碎屑, S4井, 1 194.27 m, 龙马溪组, 正交光; (c) 硅质生物碎屑, S4井, 1 162.03 m, 龙马溪组, 正交光; (d) 放射虫, S4井, 1 035.56 m, 龙马溪组, 单偏光; (e) 硅质生物碎屑, S5井, 1 254.34 m, 龙马溪组, 正交光; (f) 硅质组成的腕足类化石, S7井, 1 032.50 m, 龙马溪组, 单偏光

Fig.7 Typical siliceous biological photographs of the Wufeng Formation-Longmaxi Formation shale, Taiyang block of Zhaotong

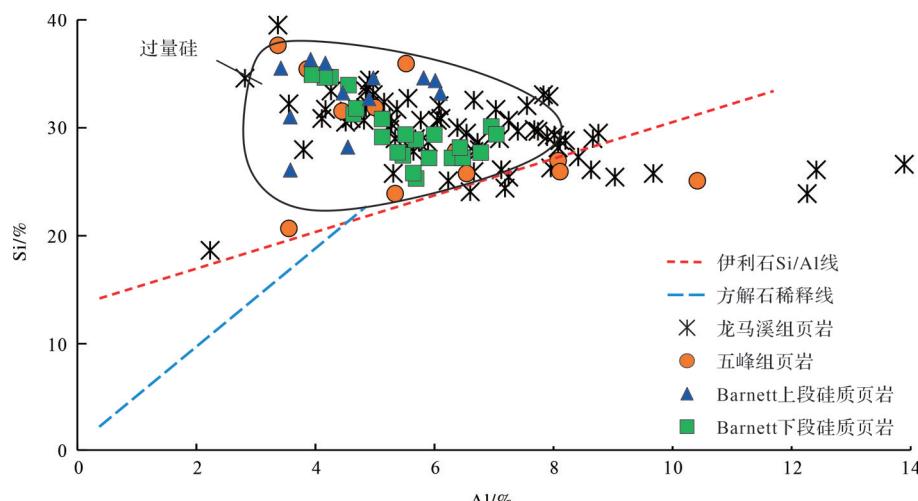


图8 昭通太阳区块五峰组—龙马溪组页岩及 Barnett 页岩 Si-Al 相关图(底图据文献[35])

Fig.8 Correlation diagram of the Wufeng Formation-Longmaxi Formation shale and Barnett shale Si-Al, Taiyang block of Zhaotong (base map is from reference [35])

关^[1-2]。在晚奥陶世末期存在短暂的冰期,导致全球海平面下降,陆源输入增多;早志留世早期冰川发生大规模融化,海平面快速上升,发生海侵,陆源输入迅速减少,随着早志留世中后期海退的发生,水体逐渐变浅,陆源碎屑输入逐渐增多^[37-39],这与U/Th、V/Cr所指示的沉积环境变化(由缺氧环境转变为富氧环境)相符(图3),随着陆源碎屑物质不断沉积,海水中的沉积物趋于稳定^[41]。

研究区五峰组—龙马溪组页岩TOC含量在龙

一₁亚段底部1、2小层达最大,向上逐渐减小。据陆源输入与TOC交会图显示,龙一₁亚段底部1、2小层的TOC与陆源输入呈较好的正相关关系, R^2 分别为0.40、0.57(图10),表明在1、2小层沉积时期陆源碎屑的输入带来了丰富的营养物质,有利于生物繁盛,进而促进有机质的富集,在五峰组、龙一₁亚段3、4小层及龙一₂亚段陆源碎屑的输入较多,对有机质产生一定的稀释作用,因此在一定程度上抑制了有机质的富集。

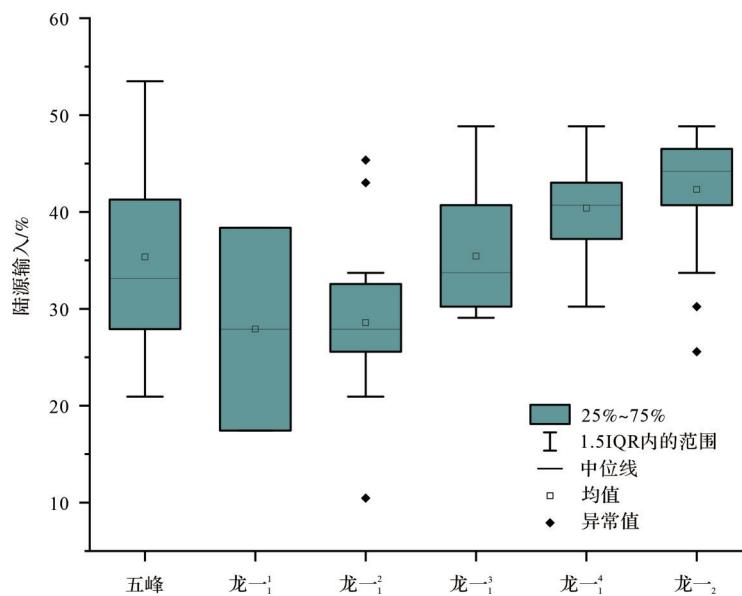


图9 昭通太阳区块五峰组—龙马溪组页岩陆源输入箱型图

Fig.9 Histogram of terrestrial source input of the Wufeng Formation-Longmaxi Formation shale, Taiyang block of Zhaotong

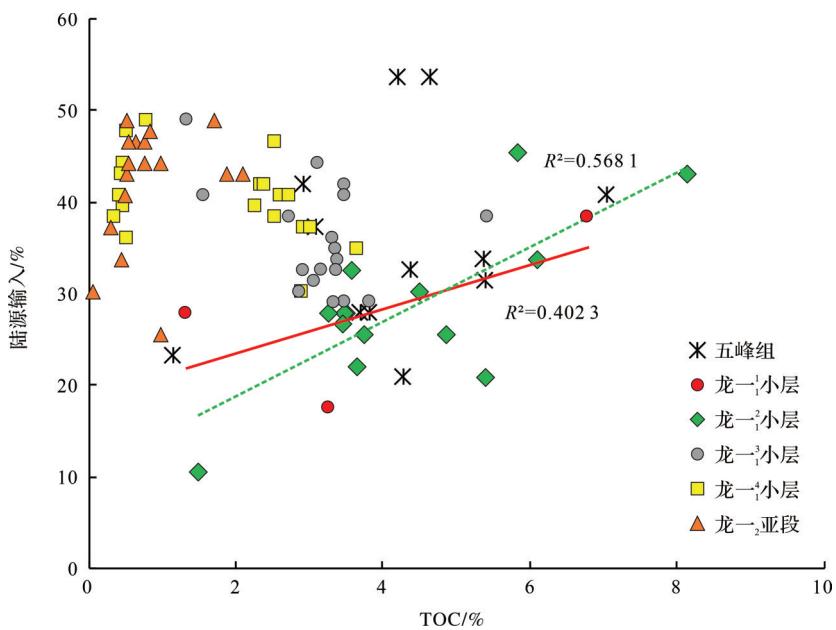


图10 昭通太阳区块五峰组—龙马溪组页岩TOC、陆源输入相关关系图

Fig.10 Correlation diagram of total organic carbon (TOC) and terrestrial source input of the Wufeng Formation-Longmaxi Formation shale, Taiyang block of Zhaotong

4.3 沉积速率

稀土元素在水体中主要赋存在细粒碎屑物质或悬浮物中,这些载体在水体中停留时间的长短决定了REE的分异程度,因此REE分异程度是研究沉积速率的重要手段之一。在沉积过程中轻稀土元素通常会被吸附在黏土矿物或者有机质中优先沉积,而重稀土元素常常在水体中形成稳定络合物,进而导

致轻重稀土元素强烈分异^[42]。La和Yb分别指示轻稀土元素和重稀土元素。因此,可以利用 La_N/Yb_N 值和稀土元素标准化配分模式曲线的斜率来体现沉积速率相对大小^[42-43]。当沉积物在水体中的停留时间越长,沉积速率越慢时,稀土元素的分解程度越彻底,有机质等物质发生反应的程度越高,REE分异程度越强,稀土元素配分模式曲线斜率越大, La_N/Yb_N 值明

显大于1或小于1,即偏离1的程度越大;反之,沉积物与水体中的物质交换少,REE分异程度弱,曲线越平缓,分异程度越小, $\text{La}_{\text{N}}/\text{Yb}_{\text{N}}$ 值越接近1^[43]。研究区五峰组—龙马溪组 $\text{La}_{\text{N}}/\text{Yb}_{\text{N}}$ 值介于3.72~14.42,平均为9.19,自下而上 $\text{La}_{\text{N}}/\text{Yb}_{\text{N}}$ 值呈由低—高—低—高的变化趋势,反映五峰组—龙马溪组页岩的沉积速率降低—增加—降低的变化过程,与陆源输入呈大致相同的变化趋势(图3)。沉积速率的变化与前文所述的沉积环境变化相符合。五峰组沉积时期陆源输入较多,沉积速率较快;龙马溪组沉积早期陆源输入减少,沉积物在水体中长时间滞留,沉积速率减慢,早志留世中后期陆源碎屑输入不断增多,沉积速率增大,随着沉积物稳定沉降^[38-39],陆源输入减小,沉积速率也再次减小。研究区五峰组—龙马溪组稀土元素标准化配分模式曲线较为平缓(图5),整体沉积速率较快,表明其沉积时期距离物源区较近。

4.4 物源分析

由于各元素稳定性的差异,部分稳定性较强微量及稀土元素能够较好地保留源区的地球化学信息,因此常被用来表征物源类型^[1,44]。通常物质来源稳定的沉积物稀土元素配分模式较为相似^[45-46]。例如何佳伟等^[2]研究发现盐津牛寨剖面龙马溪组各页岩样品之间的配分模式差异不大,配分模式曲线间近于平行,源岩主要为沉积岩及花岗岩,来源基本一致。对研究区五峰组—龙马溪组页岩样品进行球粒陨石标准化^[47],据稀土元素配分模式图显示,五峰组和龙马溪组的稀土元素配分模式基本一致,呈较为平缓的右倾特征,五峰组的配分模式曲线整体波动幅度较小,龙马溪组大多数样品配分模式曲线基本平行,个别样品出现异常,稀土元素含量整体偏高(图5),说明可能存在混合物源;此外,配分模式图中还显示研究区五峰组—龙马溪组页岩存在Eu负异常和Ce弱负异常,与上地壳的稀土元素配分模式一致,反映研究区五峰组—龙马溪组的源岩来自上地壳^[1,44,46]。

通常情况下花岗岩的 δEu 值多小于0.90,玄武

岩、中性斜长石等 δEu 值大于0.90^[48-49]。研究区五峰组—龙马溪组 δEu 介于0.42~0.85,均小于0.9,指示其源岩主要为花岗岩。Roser *et al.*^[50]最早提出了依据主量元素含量计算的砂、泥岩物源区判别函数(表4),判别函数图(F1-F2)显示,研究区五峰组—龙马溪组页岩样品主要落在石英质沉积岩源区、酸性火山岩源区,少部分样品落在中性火山岩源区(图11a)。微量元素Hf-La/Th图解中^[51],样品点主要落在长英质物源以及与基性岩混合物源区域,部分样品落在被动大陆边缘附近(图11b)。随着岩浆不断演化,La、Th等元素不断富集,Sc、Co等元素逐渐亏损,因此酸性火成岩通常显示有更高的La/Sc值和更低的Co/Th值^[49,52-53]。研究区样品La/Sc比值介于2.57~9.74,Co/Th值介于0.10~1.93,在La/Sc-Co/Th图解中主要分布在长英质火成岩附近^[53],少数样品点散落在长英质火成岩和花岗岩中间区域(图11c),判断其原始物质可能来自长英质火成岩和花岗岩。 $\Sigma\text{REE-La/Yb}$ 图解常能够有效判别源岩属性^[46,54],该图解显示研究区五峰组—龙马溪组样品主要落在沉积岩和花岗岩交汇区域,少数落在碱性玄武岩、花岗岩交汇区(图11d),反映五峰组—龙马溪组页岩的源岩主要为沉积岩类和花岗岩类。综合上述判断研究区五峰组—龙马溪组可能存在混合物源,其源岩主要来自花岗岩和沉积岩。

海底热液对黑色页岩沉积具有重要影响^[48,55]。前人常用Ba/Sr、Co/Zn值来识别海底热液活动。通常正常海相沉积物的Ba/Sr值小于1,受海底热液影响的沉积物Ba/Sr值大于1^[56]。研究区五峰组—龙马溪组页岩的Ba/Sr值介于1.16~17.50,普遍大于1,表明其沉积时受到海底热液影响。热液成因的沉积物中Co/Zn值约为0.15,铁锰结核等正常沉积形成的岩石中Co/Zn值一般在2.5左右^[27]。研究区五峰组—龙马溪组页岩的Co/Zn值介于0.01~0.40,平均为0.12,接近0.15,同样反映存在热液活动。Zn-Ni-Co三角图也是判断热液影响的方法之一^[57-58],该图解显示样品主要落在受热液影响的沉积区及其附近,进一步反映热液活动的存在(图12a)。通常可以利用 $\Sigma\text{REE/Fe}$

表4 砂、泥岩物源区主量元素判别函数的变量及其系数^[50]

Table 4 Variables and their coefficients of discriminant function for provenance of sandstone and mudstone^[50]

变量	TiO_2	Al_2O_3	$\text{T}(\text{Fe}_2\text{O}_3)$	MgO	CaO	Na_2O	K_2O	常数
F1系数	-1.773	0.607	0.76	-1.500	0.616	0.509	-1.224	-9.090
F2系数	0.445	0.070	-0.25	-1.142	0.438	1.475	1.426	-6.816

注:判别公式 $F=a_1x_1+a_2x_2+\dots+a_nx_n+C$, 其中 $x_1 \sim x_n$ 为 n 个判别变量, $a_1 \sim a_n$ 为其相应系数, C 为常数。

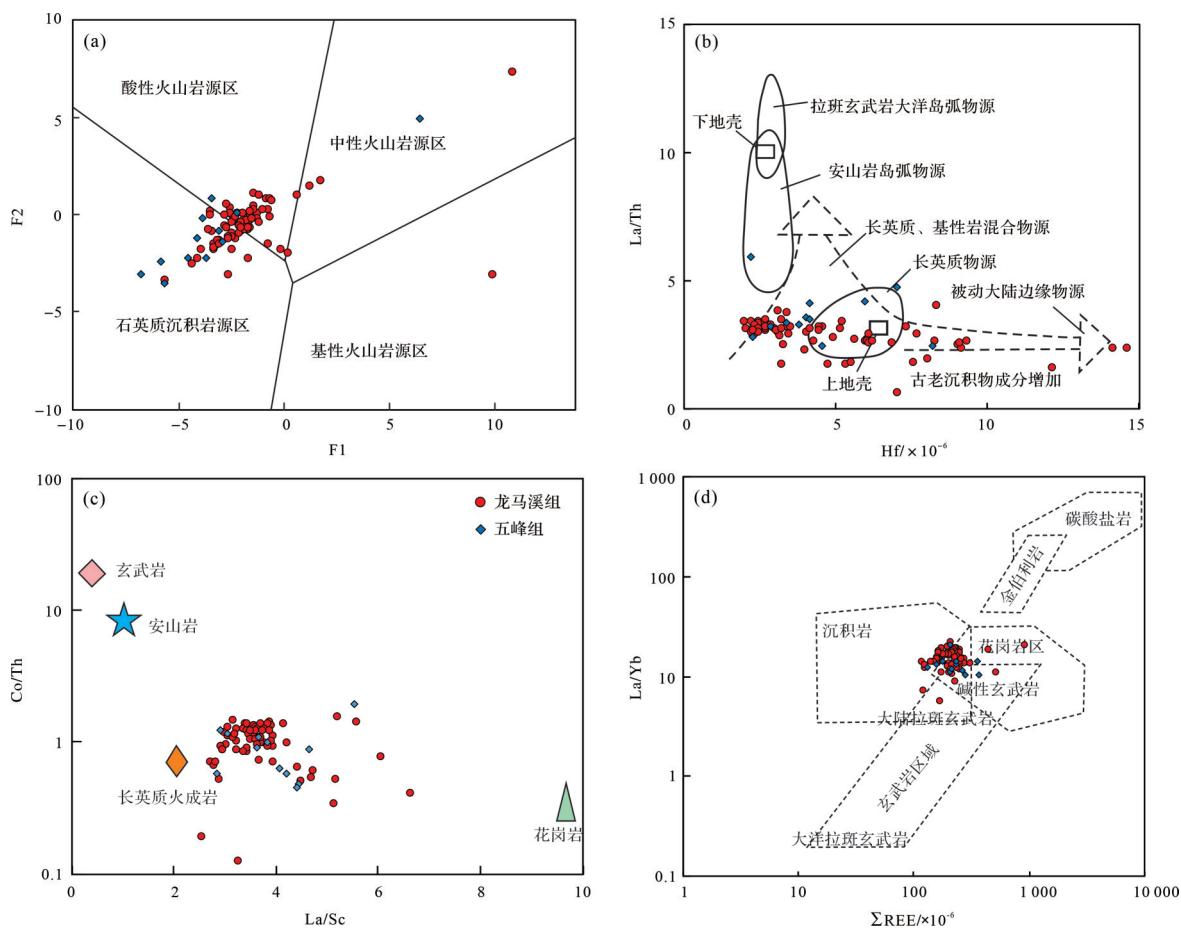


图 11 昭通太阳区块五峰组—龙马溪组页岩的物源区岩石属性判别交会图

(a) F1-F2 判别系数图解,底图据文献[50];(b) Hf-La/Th 图解,底图据文献[51];(c) Co/Th-La/Sc 图解,底图据文献[53];(d) La/Yb- Σ REE 图解,底图据文献[54]

Fig.11 Discrimination diagram of the Wufeng Formation-Longmaxi Formation shale, Taiyong block of Zhaotong

值来反映受热液影响的沉积物距离热液活动中心的远近,该比值越小,距离热液活动中心就越近,反之则越远^[59-60]。如东太平洋洋隆附近沉积物的 Σ REE/Fe 值为 6.2×10^{-4} ,而距离洋隆 802 km 之外的沉积区该比值约为 28.8×10^{-4} ^[59]。研究区五峰组页岩的 Σ REE/Fe 值介于 $57.32 \times 10^{-4} \sim 141.91 \times 10^{-4}$,平均为 96.77×10^{-4} ,龙马溪组页岩的 Σ REE/Fe 值介于 $14.90 \times 10^{-4} \sim 563.30 \times 10^{-4}$,平均为 73.85×10^{-4} ,说明研究区五峰组—龙马溪组页岩沉积时离热液活动中心较远。Alexander *et al.*^[61]提出 Eu/Sm-Sm/Yb 二元图解用于判断海水与海底热液的贡献量。研究区五峰组—龙马溪组页岩接近于水成铁锰质地壳与海水(图 12b),表明在原始溶液中海底热液的占比尚不足 0.1%。此外海底热液常表现出强烈的 Eu 正异常,学者们利用 Eu 正异常程度判别高温热液的贡献量^[62],当样品的 δ Eu 值大于 1,并且数值越大,说明样品正异常程度越高,高温热液的贡献量也就越大。研究区样品均表现为 Eu 负异常,

进一步说明原始溶液中海底热液组分较少,对页岩沉积影响极小,推测其为远离热液活动中心的远端沉积^[27]。前文的 Al-Fe-Mn 三角图解(图 6)主要是针对硅质成因进行判别,该图解没有样品点落入热水成因区中,并不表示无热液影响。通过以上研究证实研究区五峰组—龙马溪组页岩的硅质来源受到了热液的影响。但由于热液组分含量极低,从而对于 Fe、Mn 元素的响应不大,导致无样品点落入热水成因区,热液对于硅质成分的贡献极小,因此这与上文黑色页岩受热液影响的结论并不相悖^[29]。

4.5 构造背景判别

伴随着沉积作用及构造活动的发生,不同地质背景下的陆源碎屑岩中地球化学特征会存在差异,部分微量元素和稀土元素在沉积过程中比较稳定,其元素特征和比值范围能够较好地保留物源区的相关信息,常被用来研究物源区母岩属性及构造背景^[46,48-49,63]。Bhatia *et al.*^[63]研究发现不同构造背景下的

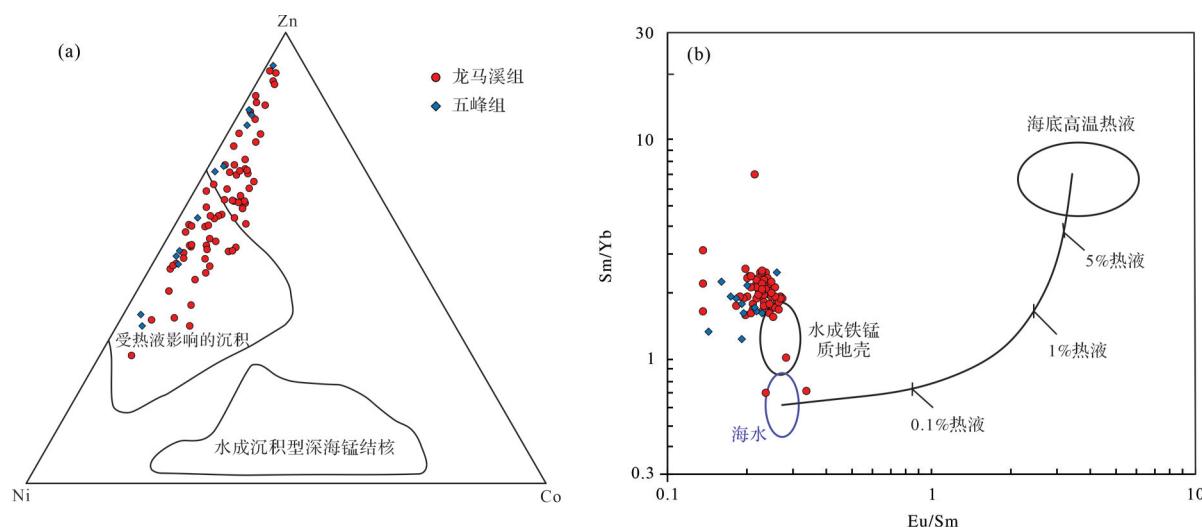


图 12 昭通太阳区块五峰组—龙马溪组页岩物源判别图解

(a) Zn-Ni-Co 物源判别图解, 底图据文献[58]; (b) Eu/Sm-Sm/Yb 图解, 底图据文献[61]

Fig.12 Provenance discrimination diagram of the Wufeng Formation-Longmaxi Formation shale, Taiyang block of Zhaotong

杂砂岩的REE分布存在一定差异，并总结出规律作为不同构造背景的识别依据（表5），通过对研究区La、Ce、 Σ REE及La/Yb平均值等数值进行计算，再与前人研究总结出的各背景下的范围值进行比较，依据对比结果综合判断出最为接近的构造背景。此外利用主量元素判别不同构造背景已得到广泛应用，常用的主量元素指标有SiO₂、K₂O、Na₂O和Al₂O₃等^[24,63]。

利用Sc/Cr-La/Y图解对研究区五峰组—龙马溪组样品数据进行投点，结果显示研究区样品投点较为集中，大部分样品落在被动大陆边缘内，少数样品落在活动大陆边缘和大陆岛弧内及其附近（图13a）。利用前人建立的SiO₂/Al₂O₃-K₂O/Na₂O双变量判别图版进行投点^[63]，所有样品集中落在被动大陆边缘范围内（图13b），说明研究区构造背景为被动大陆边缘。通常处于被动大陆边缘的沉积物稀土元素具有轻稀土富集，Eu负异常的特征，而活动大陆边缘的沉积物多以重稀土元素富集、无Eu亏损为特征，且多为分异程度较低的火成岩^[43,48,64]。研究区样品的LREE/HREE平均值为9.11，δEu平均值为0.69，指示构造背景为被动大陆边缘。将研究区样品稀土元素含量与各背景的范围值对比^[63]，结果表明研究区La、Ce、 Σ REE及La/Yb平均值分别为44.79 μg/g、90.68 μg/g、225.98 μg/g、14.73（表5），均与被动大陆边缘接近。综合以上研究结果，判断研究区五峰组—龙马溪组页岩构造背景主要为被动大陆边缘。

研究区主要位于上扬子地块东南部，而扬子地块是前寒武纪华南板块的重要组成部分，在早古生代与华北板块、塔里木板块发生分离^[22,29]。寒武纪末期，华夏板块与扬子地块受广西造山运动的影响开始发生汇聚，扬子板块东南部不断抬升，扬子地区进入被动大陆边缘演化阶段。扬子地区奥陶世先以碳酸盐台地沉积为主，自晚奥陶世起，以碳酸盐岩—碎屑岩混合沉积为主。在奥陶纪—志留纪之交发生匀运动，华南板块向北持续俯冲，与华北板块、滇缅板块等发生碰撞，使得扬子板块内部发生挤压变形，川中隆起、黔中—滇东隆起、雪峰隆起等开始形成，由此控制了晚古生代的构造演化，扬子西缘整体仍在持续抬升，因此仍处于被动大陆边缘环境，与上述研究结论一致^[22,64]。奥陶纪末期冈瓦纳大陆南极冰盖开始扩张，扬子地台发生海退，早志留世早期，随着华夏板块的不断扩张以及华南板块大部分地区的持续隆升，康滇古陆、黔中隆起以及雪峰隆起等古陆及水下高地开始形成，并且该时期伴随着冰川的大规模融化，由于各个古隆起的阻隔，上扬子地区处于半封闭的沉积环境，广泛沉积一套黑色页岩，即龙马溪组页岩^[3,8,22]。

研究区西侧的康滇古陆位于扬子地台西南缘。康滇古陆自显生宙以来长期暴露地表^[65]，前寒武纪以前，康滇古陆逐渐开始形成岛弧褶皱带，晋宁运动导致岛弧褶皱发生转变，转变成早震旦世的安第斯型山弧，并与扬子大陆统一^[66-67]。晚震旦世康滇构造带基

表5 昭通太阳区块五峰组—龙马溪组页岩样品与不同构造背景沉积盆地杂砂岩的REE特征对比^[63]Table 5 Comparison of rare earth element characteristics of mixed sandstones from the Wufeng Formation-Longmaxi Formation shale samples from Taiyang block of Zhaotong with heterogeneous sandstones in sedimentary basins with different tectonic backgrounds^[63]

构造背景	La/(μg/g)	Ce/(μg/g)	ΣREE/(μg/g)	LREE/HREE	La/Yb	Sc/Cr
大洋岛弧	8.7±2.5	19±3.7	58±10	3.8±0.9	4.2±1.3	0.57±0.16
大陆岛弧	24.4±2.3	59±8.2	146±20	7.7±1.7	11.0±3.6	0.32±0.06
活动大陆边缘	33.0±4.5	78	186	9.1	12.5	0.30±0.02
被动大陆边缘	33.5±5.8	85	210	8.5	15.9	0.16±0.02
研究区平均值	44.79	90.68	225.98	9.11	14.73	0.24

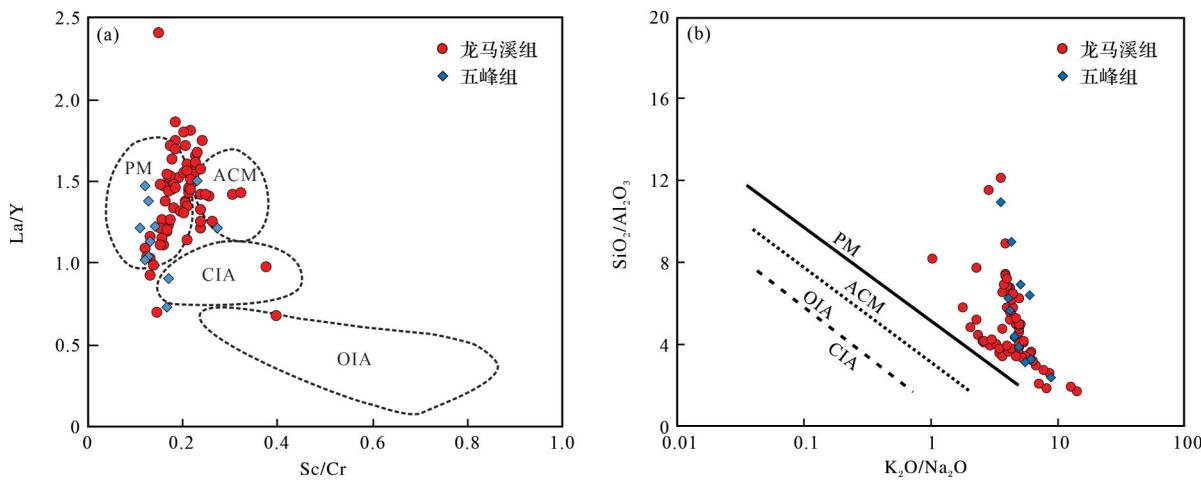


图13 昭通太阳区块五峰组—龙马溪组构造背景判别图解

(a) Sc/Cr-La/Y图解,底图据文献[50];(b)K₂O/Na₂O-SiO₂/Al₂O₃图解,底图据文献[63];ACM.活动大陆边缘;PM.被动大陆边缘;CIA.大陆岛弧;OIA.大洋岛弧
Fig.13 Tectonic setting discrimination diagrams of the Wufeng Formation-Longmaxi Formation, Taiyang block of Zhaotong

本处于稳定状态,中奥陶世—二叠纪,地幔物质上涌,上地壳发生上隆,康滇古陆区域也大面积隆升。据前人研究发现,康滇古陆部分区域(如泸定—石棉一线)主要出露新元古代地台盖层,岩性主要为一套中—酸性火成岩—火山碎屑岩,在其内部发现有大量同源花岗岩侵入体^[2,29,67],与前文研究得出的花岗岩源岩属性结论一致。结合五峰组—龙马溪组页岩沉积时构造背景,在晚奥陶世—早志留世黔中隆起紧邻研究区开始发育,与龙马溪组开始沉积时间基本同步^[2,68],据此综合推断研究区五峰组—龙马溪组页岩的源岩可能来自康滇古陆新元古地台盖层和黔中隆起。

5 结论

(1) 研究区五峰组—龙马溪组页岩硅质主要来源于硅质生物和陆源输入,受热液影响较小;在晚奥陶世—早志留世时期研究区构造活跃,且靠近黔中古陆、康滇古陆,因此研究区页岩生物成因硅相较于焦石坝等地区整体偏低,陆源硅相对偏高,自下而上

生物成因硅先增加后减小,陆源硅呈相反趋势。

(2) 研究区五峰组—龙马溪组页岩沉积时期陆源输入具有明显的变化,其对TOC的富集具有双重作用。龙一₁亚段1、2小层时期,陆源输入带来的营养物质促进了TOC的富集,而五峰组、龙一₁亚段3、4小层时期则由于陆源输入的大量增加,反而起到了稀释作用,不利于TOC的富集。La_N/Yb_N值反映五峰组—龙马溪组页岩的沉积速率降低—增加的变化过程,整体与陆源输入变化趋势相同。

(3) 物源分析表明五峰组—龙马溪组页岩可能存在混合物源,源岩可能来自康滇古陆和黔中隆起,沉积时受海底热液影响较小,构造背景主要为被动大陆边缘。

致谢 在研究和撰写过程中,同门廖舒悦、熊敏、任官宝、刘棠煊、秦何星、吴帅才在进行岩心观察采样及样品处理工作上给予了诸多帮助。此外,审稿专家和编辑老师对本文提出了许多宝贵的建设性意见,在此一并感谢。

参考文献(References)

- [1] 李琪琪,蓝宝锋,李刚权,等. 黔中隆起北缘五峰—龙马溪组页岩元素地球化学特征及其地质意义[J]. 地球科学,2021,46(9): 3172-3188. [Li Qiqi, Lan Baofeng, Li Gangquan, et al. Element geochemical characteristics and their geological significance of Wufeng-Longmaxi Formation shales in north margin of the central Guizhou uplift[J]. Earth Science, 2021, 46(9): 3172-3188.]
- [2] 何佳伟,谢渊,侯明才,等. 川西南盐津地区志留系龙马溪组页岩地球化学特征及地质意义[J]. 古地理学报,2021,23(6): 1174-1191. [He Jiawei, Xie Yuan, Hou Mingcai, et al. Geochemical characteristics and geological significance of the Silurian Longmaxi Formation shale in Yanjin area, southwestern Sichuan Basin[J]. Journal of Palaeogeography, 2021, 23(6): 1174-1191.]
- [3] 王鹏万,张磊,李昌,等. 黑色页岩氧化还原条件与有机质富集机制;以昭通页岩气示范区A井五峰组—龙马溪组下段为例[J]. 石油与天然气地质,2017,38(5):933-943. [Wang Pengwan, Zhang Lei, Li Chang, et al. Redox conditions and organic enrichment mechanisms of black shale: A case from the Wufeng-lower Longmaxi Formations in well A in Zhaotong Shale Gas Demonstration Area[J]. Oil & Gas Geology, 2017, 38(5): 933-943.]
- [4] 杨跃明,陈玉龙,刘燊阳,等. 四川盆地及其周缘页岩气勘探开发现状、潜力与展望[J]. 天然气工业,2021,41(1): 42-58. [Yang Yueming, Chen Yulong, Liu Shenyang, et al. Status, potential and prospect of shale gas exploration and development in the Sichuan Basin and its periphery[J]. Natural Gas Industry, 2021, 41(1): 42-58.]
- [5] 胡明毅,邱小松,胡忠贵,等. 页岩气储层研究现状及存在问题探讨[J]. 特种油气藏,2015,22(2):1-7. [Hu Mingyi, Qiu Xiaosong, Hu Zhonggui, et al. Current researches on shale gas reservoirs and existing problems[J]. Special Oil & Gas Reservoirs, 2015, 22(2): 1-7.]
- [6] 张金川,陶佳,李振,等. 中国深层页岩气资源前景和勘探潜力[J]. 天然气工业,2021,41(1):15-28. [Zhang Jinchuan, Tao Jia, Li Zhen, et al. Prospect of deep shale gas resources in China[J]. Natural Gas Industry, 2021, 41(1): 15-28.]
- [7] 操应长,徐琦松,王健. 沉积盆地“源—汇”系统研究进展[J]. 地学前缘,2018, 25 (4) : 116-131. [Cao Yingchang, Xu Qisong, Wang Jian. Progress in “source-to-sink” system research[J]. Earth Science Frontiers, 2018, 25(4): 116-131.]
- [8] 梁兴,张朝,单长安,等. 山地浅层页岩气勘探挑战、对策与前景:以昭通国家级页岩气示范区为例[J]. 天然气工业,2021,41(2): 27-36. [Liang Xing, Zhang Zhao, Shan Chang'an, et al. Exploration challenges, countermeasures and prospect of mountain shallow shale gas: A cased study on the Zhaotong National Shale Gas Demonstration Area[J]. Natural Gas Industry, 2021, 41(2): 27-36.]
- [9] 梁兴,徐政语,张朝,等. 昭通太阳背斜区浅层页岩气勘探突破及其资源开发意义[J]. 石油勘探与开发,2020,47(1):11-28. [Liang Xing, Xu Zhengyu, Zhang Zhao, et al. Breakthrough of shallow shale gas exploration in Taiyang anticline area and its significance for resource development in Zhaotong, Yunnan province, China[J]. Petroleum Exploration and Development, 2020, 47(1): 11-28.]
- [10] 杜建平,叶熙,史树有,等. 复杂山地页岩气勘探开发技术创新与成效:以昭通国家级页岩气示范区为例[J]. 天然气工业,2021, 41 (4) : 41-50. [Du Jianping, Ye Xi, Shi Shuyou, et al. Technological innovation and achievements in the exploration and development of shale gas in complex mountainous areas: A case study of the Zhaotong National Shale Gas Demonstration Area[J]. Natural Gas Industry, 2021, 41(4): 41-50.]
- [11] 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.]
- [12] 王鹏万,焦鹏飞,贺训云,等. 昭通示范区太阳—海坝浅层页岩气富集模式[J]. 中国石油大学学报(自然科学版),2023,47(3) : 45-54. [Wang Pengwan, Jiao Pengfei, He Xunyun, et al. Shallow shale gas enrichment model of Taiyang-Haiba in Zhaotong Demonstration Area[J]. Journal of China University of Petroleum (Edition of Natural Science), 2023, 47(3): 45-54.]
- [13] 王鹏万,邹辰,李娴静,等. 昭通示范区页岩气富集高产的地质主控因素[J]. 石油学报,2018,39(7):744-753. [Wang Pengwan, Zou Chen, Li Xianjing, et al. Main geological controlling factors of shale gas enrichment and high yield in Zhaotong Demonstration Area[J]. Acta Petrolei Sinica, 2018, 39(7): 744-753.]
- [14] 王跃,桂和荣,苏尚国,等. 滇黔北五峰组—龙马溪组页岩沉积环境和古气候地球化学特征[J]. 沉积学报,2022,40(3): 653-666. [Wang Yue, Gui Herong, Su Shangguo, et al. Sedimentary environment and paleoclimate geochemical characteristics of shale in the Wufeng and Longmaxi Formations, northern Yunnan-Guizhou area[J]. Acta Sedimentologica Sinica, 2022, 40 (3): 653-666.]
- [15] 梁兴,张廷山,舒红林,等. 滇黔北昭通示范区龙马溪组页岩气资源潜力评价[J]. 中国地质,2020,47(1): 72-87. [Liang Xing, Zhang Tingshan, Shu Honglin, et al. Evaluation of shale gas resource potential of Longmaxi Formation in Zhaotong National Shale Gas Demonstration Area in the northern Yunnan-Guizhou[J]. Geology in China, 2020, 47(1): 72-87.]
- [16] 何勇,李林,刘成,等. 盆外山地浅层页岩气经济有效开发对策探索[J]. 天然气工业,2021,41(4):82-90. [He Yong, Li Lin, Liu Cheng, et al. Economic and effective development of shale gas in mountainous areas outside the Sichuan Basin[J]. Natural Gas Industry, 2021, 41(4): 82-90.]
- [17] 李娟,陈雷,计玉冰,等. 浅层海相页岩含气性特征及其主控因素;以昭通太阳区块下志留统龙马溪组为例[J]. 石油实验地

- 质, 2023, 45(2): 296-306. [Li Juan, Chen Lei, Ji Yubing, et al. Gas-bearing characteristics and major controlling factors of shallow marine shale: A case study of the Lower Silurian Longmaxi Formation in Taiyang block of Zhaotong area[J]. Petroleum Geology and Experiment, 2023, 45(2): 296-306.]
- [18] 任官宝, 陈雷, 计玉冰, 等. 昭通东北地区五峰组—龙马溪组龙一₁亚段页岩岩相类型及其储层特征[J]. 石油实验地质, 2023, 45(3): 443-454. [Ren Guanbao, Chen Lei, Ji Yubing, et al. Shale lithofacies types and reservoir characteristics from Ordovician Wufeng Formation to the First sub-member of the First member of Silurian Longmaxi Formation, northeast Zhaotong area[J]. Petroleum Geology & Experiment, 2023, 45(3): 443-454.]
- [19] 何卫红, 汪啸风, 卜建军. 晚奥陶世五峰期扬子海盆海平面变化旋回与古水体深度[J]. 沉积学报, 2002, 20(3): 367-375. [He Weihong, Wang Xiaofeng, Bu Jianjun. The eustatic cycles and the depth of water mass of the latest Ordovician Wufengian in the Yangtze Basin[J]. Acta Sedimentologica Sinica, 2002, 20(3): 367-375.]
- [20] 梁兴, 徐政语, 张介辉, 等. 浅层页岩气高效勘探开发关键技术:以昭通国家级页岩气示范区太阳背斜区为例[J]. 石油学报, 2020, 41(9): 1033-1048. [Liang Xing, Xu Zhengyu, Zhang Jiehui, et al. Key efficient exploration and development technologies of shallow shale gas: A case study of Taiyang anticline area of Zhaotong National Shale Gas Demonstration Zone[J]. Acta Petrolei Sinica, 2020, 41(9): 1033-1048.]
- [21] Curtis J B. Fractured shale-gas systems[J]. AAPG Bulletin, 2002, 86(11): 1921-1938.
- [22] 张茜, 肖渊甫, 王晓飞, 等. 四川盆地西南缘龙马溪组泥岩地球化学特征及物源区和构造背景分析[J]. 地质论评, 2020, 66(5): 1393-1411. [Zhang Qian, Xiao Yuanfu, Wang Xiaofei, et al. Geochemistry of the Longmaxi Formation mudstones of the southwest Sichuan Basin: Implications for provenance and source weathering[J]. Geological Review, 2020, 66(5): 1393-1411.]
- [23] 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.
- [24] Gromet L P, Haskin L A, Korotev R L, et al. The "North American shale composite": Its compilation, major and trace element characteristics[J]. Geochimica et Cosmochimica Acta, 1984, 48(12): 2469-2482.
- [25] 杜远生, 朱杰, 顾松竹, 等. 北祁连造山带寒武系—奥陶系硅质岩沉积地球化学特征及其对多岛洋的启示[J]. 中国科学(D辑): 地球科学, 2007, 37(10): 1314-1329. [Du Yuansheng, Zhu Jie, Gu Songzhu, et al. Sedimentary geochemistry of the Cambrian-Ordovician cherts: Implication on archipelagic ocean of North Qilian orogenic belt[J]. Science China (Series D): Earth Sciences, 2007, 37(10): 1314-1329.]
- [26] 李友川, 李宏义, 兰蕾. 北部湾盆地流二段油页岩地球化学特征及成因[J]. 沉积学报, 2022, 40(3): 616-625. [Li Youchuan, Li Hongyi, Lan Lei. Geochemical characteristics and genesis of oil shale in Beibuwan Basin[J]. Acta Sedimentologica Sinica, 2022, 40(3): 616-625.]
- [27] 张茜, 余谦, 王剑, 等. 应用ICP-MS研究川西南龙马溪组泥页岩稀土元素特征及沉积环境[J]. 岩矿测试, 2018, 37(2): 217-224. [Zhang Qian, Yu Qian, Wang Jian, et al. Application of ICP-MS to study the rare earth element characteristics and sedimentary environment of black shale in the Longmaxi Formation in the southwestern Sichuan Basin[J]. Rock and Mineral Analysis, 2018, 37(2): 217-224.]
- [28] Bai Y Y, Liu Z J, Sun P C, 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.
- [29] 邱振, 谈昕, 卢斌, 等. 四川盆地巫溪地区五峰组—龙马溪组硅质岩地球化学特征[J]. 矿物岩石地球化学通报, 2018, 37(5): 880-887. [Qiu Zhen, Tan Xin, Lu Bin, et al. Geochemical characteristics of cherts from the Wufeng and Longmaxi Formations in the Wuxi area, Sichuan Basin[J]. Bulletin of Mineralogy, Petrology and Geochemistry, 2018, 37(5): 880-887.]
- [30] 姚红生, 何希鹏, 汪凯明. 下扬子皖南地区下寒武统荷塘组页岩地球化学特征及地质意义[J]. 海洋地质前沿, 2022, 38(4): 32-41. [Yao Hongsheng, He Xipeng, Wang Kaiming. Geochemical characteristics and significance of the shale of Lower Cambrian Hetang Formation in the southern Anhui province of Lower Yangtze area[J]. Marine Geology Frontiers, 2022, 38(4): 32-41.]
- [31] 刘江涛, 李永杰, 张元春, 等. 焦石坝五峰组—龙马溪组页岩硅质生物成因的证据及其地质意义[J]. 中国石油大学学报(自然科学版), 2017, 41(1): 34-41. [Liu Jiangtao, Li Yongjie, Zhang Yuanchun, et al. Evidences of biogenic silica of Wufeng-Longmaxi Formation shale in Jiaoshiba area and its geological significance[J]. Journal of China University of Petroleum (Edition of Natural Science), 2017, 41(1): 34-41.]
- [32] 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.
- [33] Yamamoto K. Geochemical characteristics and depositional environments of cherts and associated rocks in the Franciscan and Shimanto Terranes[J]. Sedimentary Geology, 1987, 52(1/2): 65-108.
- [34] Holdaway H K, Clayton C J. Preservation of shell microstructure in silicified brachiopods from the Upper Cretaceous Wilmington Sands of Devon[J]. Geological Magazine, 1982, 119(4): 371-382.
- [35] 王淑芳, 邹才能, 董大忠, 等. 四川盆地富有机质页岩硅质生物成因及对页岩气开发的意义[J]. 北京大学学报(自然科学)

- 版), 2014, 50(3): 476-486. [Wang Shufang, Zou Caineng, Dong Dazhong, et al. Biogenic silica of organic-rich shale in Sichuan Basin and its significance for shale gas[J]. *Acta Scientiarum Naturalium Universitatis Pekinensis*, 2014, 50(3): 476-486.]
- [36] 易婷. 川南五峰组—龙马溪组富有机质页岩硅质特征与储层之间的关系[D]. 成都:成都理工大学, 2020. [Yi Ting. Relationship between silica's characteristics and reservoirs of the organic-rich shale in Wufeng Formation-Longmaxi Formation in southern Sichuan Basin[D]. Chengdu: Chengdu University of Technology, 2020.]
- [37] 王拔秀, 张鹏辉, 梁杰, 等. 生物成因微晶石英特征及其对海相页岩储层孔隙发育的影响[J/OL]. 沉积学报, doi: 10.14027/j.issn.1000-0550.2022.143. [Wang Baxiu, Zhang Penghui, Liang Jie, et al. Biogenic microcrystalline quartz and its influence on pore development in marine shale reservoirs[J/OL]. *Acta Sedimentologica Sinica*, doi: 10.14027/j.issn.1000-0550.2022.143.]
- [38] 张茜. 康滇古陆西侧龙马溪组黑色页岩地球化学特征及沉积环境研究[D]. 成都:成都理工大学, 2017. [Zhang Qian. Black shale from the Longmaxi Formation in the western Xikang-Yunnan ancient land: Geochemistry and sedimentary environment[D]. Chengdu: Chengdu University of Technology, 2017.]
- [39] 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 Zisan, Wang Xingzhi, Yang Xian, 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.]
- [40] Murray R W, Leinen M, Isern A R. Biogenic flux of Al to sediment in the central equatorial Pacific Ocean: Evidence for increased productivity during glacial periods[J]. *Paleoceanography*, 1993, 8(5): 651-670.
- [41] 薛路, 陈建文, 吴飘, 等. 下扬子巢湖地区鼓地1井五峰组—高家边组下段页岩地球化学特征及其地质意义[J]. 海洋地质前沿, 2022, 38(5): 12-22. [Xue Lu, Chen Jianwen, Wu Piao, et al. Geochemical characteristics and geological significance of shale in the Lower member of Wufeng-Gaojiaobian Formation of well Gudi 1 in Chaohu area, Lower Yangtze region[J]. *Marine Geology Frontiers*, 2022, 38(5): 12-22.]
- [42] 陈会军, 刘招君, 柳蓉, 等. 银额盆地下白垩统巴音戈壁组油页岩特征及古环境[J]. 吉林大学学报(地球科学版), 2009, 39(4): 669-675. [Chen Huijun, Liu Zhaojun, Liu Rong, et al. Characteristic of oil shale and paleoenvironment of the Bayingebei Formation in the Lower Cretaceous in Yin'e Basin[J]. *Journal of Jilin University (Earth Science Edition)*, 2009, 39(4): 669-675.]
- [43] 王中刚, 于学元, 赵振华. 稀土元素地球化学[M]. 北京:科学出版社, 1989. [Wang Zhonggang, Yu Xueyuan, Zhao Zhenhua. *Geochemistry of rare earth elements*[M]. Beijing: Science Press, 1989.]
- [44] 郭望, 张卫刚, 李玉宏, 等. 柴北缘大煤沟组七段页岩地球化学特征:对中侏罗世晚期物源及风化作用的指示及意义[J]. 沉积学报, 2020, 38(3): 676-686. [Guo Wang, Zhang Weigang, Li Yuhong, et al. Geochemistry of 7 member shale of the Dameigou Formation in the northern Qaidam Basin, China: Significance and implication for provenance and source weathering in the late Middle Jurassic[J]. *Acta Sedimentologica Sinica*, 2020, 38(3): 676-686.]
- [45] Bhatia M R, Taylor S R. Trace-element geochemistry and sedimentary provinces: A study from the Tasman Geosyncline, Australia[J]. *Chemical Geology*, 1981, 33(1/2/3/4): 115-125.
- [46] Bhatia M R. Rare earth element geochemistry of Australian Paleozoic graywackes and mudrocks: Provenance and tectonic control[J]. *Sedimentary Geology*, 1985, 45(1/2): 97-113.
- [47] Taylor S R, McClenann S M. The continental crust: Its composition and evolution[M]. Oxford: Blackwell Scientific, 1985.
- [48] 刘英俊, 曹励明, 李兆麟, 等. 元素地球化学[M]. 北京:科学出版社, 1984. [Liu Yingjun, Cao Liming, Li Zhaolin, et al. *Elemental geochemistry*[M]. Beijing: Science Press, 1984.]
- [49] 刘春来, 熊国庆, 董国明, 等. 扬子北缘奥陶纪—志留纪之交泥岩地球化学特征及其源区、构造背景[J]. 地质论评, 2021, 67(5): 1263-1279. [Liu Chunlai, Xiong Guoqing, Dong Guoming, et al. Geochemical characteristics of mudstones and its provenance and tectonic setting during the Ordovician-Silurian period in northern margin of Yangtze Block[J]. *Geological Review*, 2021, 67(5): 1263-1279.]
- [50] 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.
- [51] Floyd P A, Leveridge B E. Tectonic environment of the Devonian Gramscatho Basin, south Cornwall: Framework mode and geochemical evidence from turbiditic sandstones[J]. *Journal of the Geological Society*, 1987, 144(4): 531-542.
- [52] 周传芳, 杨华本, 蔡艳龙, 等. 漠河盆地西缘漠河组形成时代及物源区构造环境判别[J]. 中国地质, 2021, 48(3): 832-853. [Zhou Chuanfang, Yang Huaben, Cai Yanlong, et al. Stratigraphic age of the Mohe Formation in the western margin of Mohe Basin and tectonic environment discrimination of provenance[J]. *Geology in China*, 2021, 48(3): 832-853.]
- [53] Gu X X, Liu J M, Zheng M H, et al. Provenance and tectonic setting of the Proterozoic turbidites in Hunan, South China: Geochemical evidence[J]. *Journal of Sedimentary Research*, 2002, 72(3): 393-407.
- [54] Allègre C J, Minster J F. Quantitative models of trace element behavior in magmatic processes[J]. *Earth and Planetary Science Letters*, 1978, 38(1): 1-25.
- [55] Yu B S, Dong H L, Widom E, et al. Geochemistry of basal Cam-

- brian black shales and cherts from the northern Tarim Basin, northwest China: Implications for depositional setting and tectonic history[J]. *Journal of Asian Earth Sciences*, 2009, 34(3): 418-436.
- [56] Peter J M. Mineralogy, composition, and fluid-inclusion microthermometry of seafloor hydrothermal deposits in the southern trough of Guaymas Basin, gulf of California[J]. *The Canadian Mineralogist*, 1988, 26(3): 567-587.
- [57] 侯东壮, 吴湘滨, 邓鑫楠. 贵州铜仁地区九门冲组黑色页岩地球化学特征及成岩环境研究[J]. 地质与勘探, 2019, 55(3): 779-788. [Hou Dongzhuang, Wu Xiangbin, Deng Xinnan. Geochemical characteristics and diagenetic setting of the Jiumentchong Formation black shale in the Tongren area of Guizhou province[J]. *Geology and Exploration*, 2019, 55(3): 779-788.]
- [58] Cronan D S. Underwater minerals[M]. London: Academic Press, 1980.
- [59] Olivarez A M, Owen R M. REE/Fe variations in hydrothermal sediments: Implications for the REE content of seawater[J]. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 1989, 53(3): 757-762.
- [60] Chen D Z, Qing H R, Yan X, et al. Hydrothermal venting and basin evolution (Devonian, South China): Constraints from rare earth element geochemistry of chert[J]. *Sedimentary Geology*, 2006, 183(3/4): 203-216.
- [61] Alexander B W, Bau M, Andersson P, et al. Continentally-derived solutes in shallow Archean seawater: Rare earth element and Nd isotope evidence in iron formation from the 2.9 Ga Pongola Supergroup, South Africa[J]. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 2008, 72(2): 378-394.
- [62] Bau M, Dulski P. Comparing yttrium and rare earths in hydrothermal fluids from the Mid-Atlantic Ridge: Implications for Y and REE behaviour during near-vent mixing and for the Y/Ho ratio of Proterozoic seawater[J]. *Chemical Geology*, 1999, 155(1/2): 77-90.
- [63] 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.
- [64] 张治波, 徐颖, 苗艳菊, 等. 昌都盆地古近系贡觉组物源及其沉积环境[J]. 沉积学报, 2022, 40(6): 1561-1581. [Zhang Zhibo, Xu Ying, Miao Yanju, et al. Provenance and sedimentary environment of Paleogene Gongjue Formation in Qamdo Basin [J]. *Acta Sedimentologica Sinica*, 2022, 40(6): 1561-1581.]
- [65] 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: Geological Publishing House, 2004.]
- [66] 孙玮, 刘树根, 韩克猷, 等. 四川盆地燕山期古构造发展及对油气的影响[J]. 成都理工大学学报(自然科学版), 2012, 39(1): 70-75. [Sun Wei, Liu Shugen, Han Keyou, et al. Effect of the evolution of palaeotectonics on the petroleum genesis in Yan-shan period, Sichuan Basin, China[J]. *Journal of Chengdu University of Technology (Science & Technology Edition)*, 2012, 39(1): 70-75.]
- [67] 骆耀南. 康滇构造带的古板块历史演化[J]. 地球科学, 1983(3): 93-102. [Luo Yaonan. The evolution of paleoplates in the Kang-Dian tectonic zone [J]. *Earth Science*, 1983(3): 93-102.]
- [68] 陈旭, 戎嘉余, 周志毅, 等. 上扬子区奥陶—志留纪之交的黔中隆起和宜昌上升[J]. 科学通报, 2001, 46(12): 1052-1056. [Chen Xu, Rong Jiayu, Zhou Zhiyi, et al. The central Guizhou and Yi-Chang uplifts, Upper Yangtze region, between Ordovician and Silurian[J]. *Chinese Science Bulletin*, 2001, 46(12): 1052-1056.]

Element Geochemical Characteristics and Their Geological Significance of Late Ordovician-Early Silurian Black Shale in Zhaotong Area of Northern Yunnan and Guizhou

LI Juan^{1,2,3}, CHEN Lei^{1,2,3}, HU Yue⁴, JI YuBing⁵, LU Chang⁶, DONG JianHua^{1,2,3}, TAN XiuCheng^{1,2,3}, YANG Li⁷, YANG Lin⁸, CHEN Xin⁹

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

2. Natural Gas Geology Key Laboratory of Sichuan Province, Chengdu 610500, China

3. Southwest Petroleum University, Branch of Key Laboratory of Carbonate Reservoirs, CNPC, Chengdu 610500, China

4. The Third Geological and Mineral Exploration Institute of Gansu Bureau of Geology and Mineral Resources, Lanzhou 730000, China

5. PetroChina Zhejiang Oilfield Company, Hangzhou 310023, China

6. CNOOC (China) Shenzhen Branch, Shenzhen, Guangdong 518000, China

7. Sichuan Shale Gas Exploration and Development Co., Ltd, Chengdu 610051, China

8. Drilling & Production Engineering Technology Research Institute, CNPC Chuanqing Drilling Engineering Co., Ltd, Guanghan, Sichuan 618300, China

9. Shale Gas Research Institute, PetroChina Southwest Oil & Gasfield Company, Chengdu 6100500, China

Abstract: [Objective] Located at the southern margin of the Sichuan Basin, the Zhaotong Demonstration Area of northern Yunnan and Guizhou was relatively shallower and closer to the source area than the Changning-Weiyuan area in the basin during the Late Ordovician-Early Silurian period. Therefore, the deposition of the Wufeng Formation-Longmaxi Formation shale in this area may be different from that in the basin, it is of great significance to clarify the siliceous genesis, provenance, and tectonic setting of the Late Ordovician-Early Silurian black shale in the Zhaotong area of northern Yunnan and Guizhou. [Methods] Using the Taiyang Block in the Zhaotong area as the research region, this study explores the source area background, source rock properties, and siliceous sources of the shale in the Wufeng Formation-Longmaxi Formation in the region by utilizing the testing data of major elements, trace elements, and rare earth elements from four wells within the area. [Results] The results show that the silica of the black shale mainly came from siliceous organisms and terrestrial clastic materials, and the biogenic silicon first increases and then decreases from bottom to top, showing a trend opposite that of terrestrial source silicon. There was a brief glacial period in the Late Ordovician, until the melting of the Early Silurian glaciers, the occurrence of marine intrusions, and then the gradual falling of sea level, leading to the continuous shallow water bodies. The overall manifestation of terrestrial input is characterized by first decreasing and then increasing, and the sedimentation rate also shows the same trend. The standardized distribution mode curve of chondrite meteorites of rare earth elements in certain samples fluctuated slightly, indicating that there may be a mixture source during the deposition of shale in the Wufeng Formation-Longmaxi Formation in the study area. [Conclusions] Therefore, the parent materials of the Wufeng Formation-Longmaxi Formation shale in the study area may come from granite and sedimentary rocks of the Kangdian paleocontinent and the central Guizhou uplift, which is affected by certain seafloor hydrothermal fluids during sedimentation, but the original hydrothermal components are extremely small. The relevant indicators comprehensively reflect that the tectonic background of the shale source area of the Wufeng Formation-Longmaxi Formation is a passive continental margin.

Key words: black shale; geochemistry; provenance analysis; tectonic background; northern Yunnan and Guizhou