

康滇古陆西侧志留系龙马溪组红—黑转换特征 ——以宁蒗大槽子剖面为例

王正和, 张海全, 程锦翔, 邓敏

中国地质调查局成都地质调查中心

摘要 中上扬子区康滇古陆以东的志留系龙马溪组无“红层”发育,但在康滇古陆西侧的盐源—丽江地区,龙马溪组底部却发育有“红层”(为厚约2m的紫红色硅质泥页岩)。为了明确该套“红层”的成因及地质意义,以盐源—丽江地区的宁蒗大槽子剖面为例,从岩性、岩相及岩石地球化学等方面,对龙马溪组下部“红层”到上部“黑层”的红—黑转换特征进行了研究。结果表明:①龙马溪组下部“红层”中含 Fe^{3+} ,且无有机碳存在,推测这是“红层”致红的原因;②“红层”与“黑层”中稀土元素特征相似,但微量元素特征差异较大,尤其是“红层”中Co的含量均值高出“黑层”9倍以上,而“黑层”中Mo的含量均值高出“红层”9倍以上;③龙马溪组下部“红层”至上部“黑层”,整体上是相对富氧的氧化沉积环境转变为相对缺氧的还原沉积环境,也是沉积水体逐渐由浅变深的过程,这是红—黑转换的主控因素;④龙马溪组从下部“红层”转换至上部“黑层”,其间构造背景均为活动大陆边缘环境,不同于康滇古陆以东的稳定大陆边缘背景。

关键词 红层; 沉积转换; 龙马溪组; 志留纪; 康滇古陆西侧

中图分类号: TE121.3 **文献标识码**: A

0 前言

在晚奥陶世—志留纪早期全球性海泛的背景下^[1-5],扬子地台上奥陶统五峰组—志留系龙马溪组普遍发育了稳定的暗色泥页岩沉积,形成了一套优质的烃源岩^[6-11],并成为目前国内页岩气勘探开发取得重大突破的重要层位。前人通过对扬子地台五峰组及龙马溪组的大量研究,认为上扬子区康滇古陆东侧五峰组与龙马溪组为贫氧—缺氧还原环境下的深水—较深水沉积^[12-20]。其中,龙马溪组下部岩性主要为灰黑色碳质硅质泥页岩,且区域上分布十分稳定,向上过渡为以碳质含量逐渐降低的灰色泥页岩为主,局部地区则向上过渡到以砂岩为主;五峰组岩性主要为灰黑色硅质岩及碳质硅质页岩。总体上,在康滇古陆东侧的扬子区,迄今尚未发现五峰组—龙马溪组中有“红层”发育。

然而,在康滇古陆西侧邻近盐源—丽江地区的大槽子、民胜、泸沽湖等剖面中^[21],发现龙马溪组下部普遍发育厚约2m的“红层”,其岩性主要为硅质泥页岩,“红层”之上则转换为“黑层”,其岩性主要为灰色—灰

黑色碳质泥页岩夹灰黑色硅质岩。前人将该套“红层”归于龙马溪组^[22-23],然而,结合区域构造、沉积演化及地层特征的横向对比,笔者认为龙马溪组底部这套“红层”可能归属于上奥陶统五峰组,但鉴于目前尚无充分的证据,因此笔者暂时仍然沿用前人将其归于龙马溪组的划分方案。

在奥陶纪晚期至志留纪早期,扬子区康滇古陆东侧除了局部地区发育以龟裂纹灰岩构成的“红宝塔”(五峰组与临湘组之下)以外,并无其他岩性构成的“红层”发育。如此看来,与康滇古陆东侧扬子区五峰组—龙马溪组均为“黑层”相比,康滇古陆西侧盐源—丽江地区龙马溪组底部发育的这套“红层”就显得十分独特。对该套“红层”进行研究,将有助于理解其成因,及其与古地理、古环境、古气候之间的响应关系,也有助于理解与探讨奥陶纪—志留纪康滇古陆东、西两侧的沉积演化差异。因此,笔者仅尝试从岩性、岩相及岩石地球化学等方面对研究区龙马溪组自下而上的“红层”至“黑层”的转换(简称红—黑转换)特征进行研究,以期对该套“红层”地质意义的全面研究提供部分参考。

收稿日期: 2018-06-05; 改回日期: 2019-09-06; 网络出版日期: 2020-01-17

本文受中国地质调查局地质调查项目“四川盆地古生界页岩气基础地质调查”(编号:DD20160176)资助

第一作者: 王正和, 博士, 高级工程师, 主要从事沉积层序及油气地质勘探工作。通信地址: 610083 四川省成都市金牛区一环路北三段2号; E-mail: 3121927631@qq.com

1 地质概况

本文研究区为邻近康滇古陆西侧的盐源—丽江地区(图1),其横跨四川省西南及云南省西北,主要位于锦屏山前陆逆冲推覆带上,总体为一推覆体,夹于青藏特提斯构造域与扬子大陆板块构造域之间^[24],为扬子准地台西缘与松潘—甘孜印支褶皱系的衔接部位^[25],属于盐源—丽江台缘拗陷(印支—燕山期)^[26]。

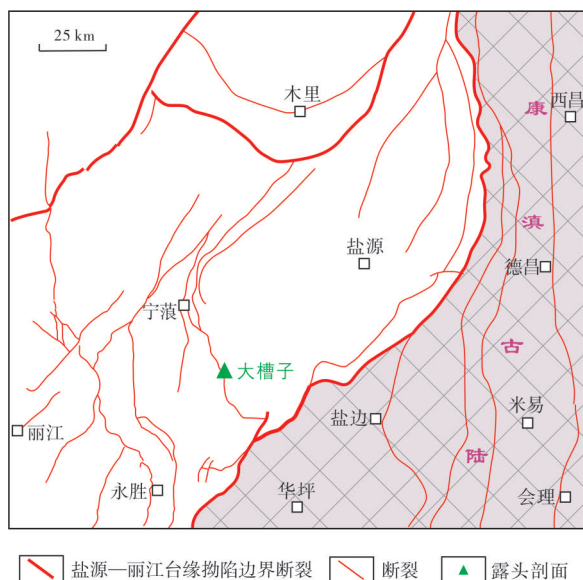


图1 研究区及露头剖面位置图

Fig. 1 The location of the study area and outcrop section

研究区沉积地层具有扬子区盐源—丽江分区的发育特征^[27]。区内出露的地层从老到新为震旦系至第四系,缺失侏罗系与白垩系。在三叠系以下地层中,除上二叠统为玄武岩以外,其余均属海相沉积。研究区下古生界的特征为:震旦系仅出露上震旦统,零星分布于盐源东南边缘,岩性为白云岩,下部夹砂岩、页岩、泥灰岩等;寒武系假整合于震旦系之上,缺失下寒武统上部至上寒武统,残留的下寒武统中、下部主要为碎屑岩;奥陶系假整合于寒武系之上,下奥陶统以紫红色至灰色碎屑岩为主,中奥陶统为石灰岩或白云岩,缺失上奥陶统;志留系假整合于奥陶系之上,下志留统龙马溪组为滨岸—陆棚相沉积,以深灰色—灰黑色含笔石硅质泥页岩为主,夹硅质岩、石灰岩及砂岩,局部底部发育厚约2m的紫红色硅质泥页岩,中、上志留统主要为碳酸盐台地相沉积,以泥质网纹状石灰岩或白云岩为主。

2 红—黑转换特征

2.1 岩性、岩相转换特征

康滇古陆西侧宁蒗县大槽子剖面龙马溪组下伏中奥陶统巧家组灰色网纹状泥质灰岩,上覆中志留统石门坎组灰白色微—粉晶白云岩(图2)。龙马溪组下部C1—C3层为“红层”,以紫红色硅质泥页岩为主(图3a—3c),除发育有水平层理外,不见其他沉积构造,总厚2.27m。龙马溪组上部C4—C14层为“黑层”,其中C4层、C6层分别为厚0.54m、0.50m的灰白色细—中粒长石石英杂砂岩(图3d, 3e),略显平行层理;粒度为0.1~0.5mm,偶见大于2mm的砾石,呈次棱角状,分选中等,矿物成分主要为石英,少量为长石、岩屑和白云母,偶见电气石;填隙物主要为黏土矿物,基底式胶结,颗粒支撑。C14层因风化强烈,无法取得新鲜基岩样品,无法判断出其原岩,故下文论述龙马溪组“黑层”特征时,均不包含C14层。“黑层”中其余岩性主要为灰黑色薄层状硅质岩、灰黑色碳质硅质泥页岩及灰黑色碳质粉砂质页岩,硅质泥页岩与粉砂质泥页岩中水平层理较发育,且多含有笔石化石(图3f—3h)。

总体上,盐源—丽江地区龙马溪组从下部“红层”转换至上部“黑层”,岩性主要存在着2个方面的显著转换:一是岩石颜色存在明显的由红至黑的转换,二是碳质含量存在着由低向高的转换。

2.2 地球化学转换特征

2.2.1 样品描述和分析方法

(1) 样品描述

本次研究的样品均采自宁蒗县大槽子剖面(采样位置见图2),其中采集龙马溪组样品21件(样品号为S3—S23),采集中奥陶统样品2件(样品号为S1—S2),采集中志留统样品2件(样品号为S24—S25),总计25件样品。在野外剖面测量时,对每层至少采集了1件样品,同时对每类岩石至少采集了1件样品。其中,S1—S2为中奥陶统泥质灰岩样品,S3—S6为龙马溪组下部“红层”样品,S7—S23为龙马溪组上部“黑层”样品,S24—S25为中志留统白云岩样品。龙马溪组样品(S3—S23)中:S3—S5为紫红色硅质泥页岩;S6、S8、S9、S11、S12均为很纯的灰黑色硅质岩(S6样品虽然为灰黑色,但它

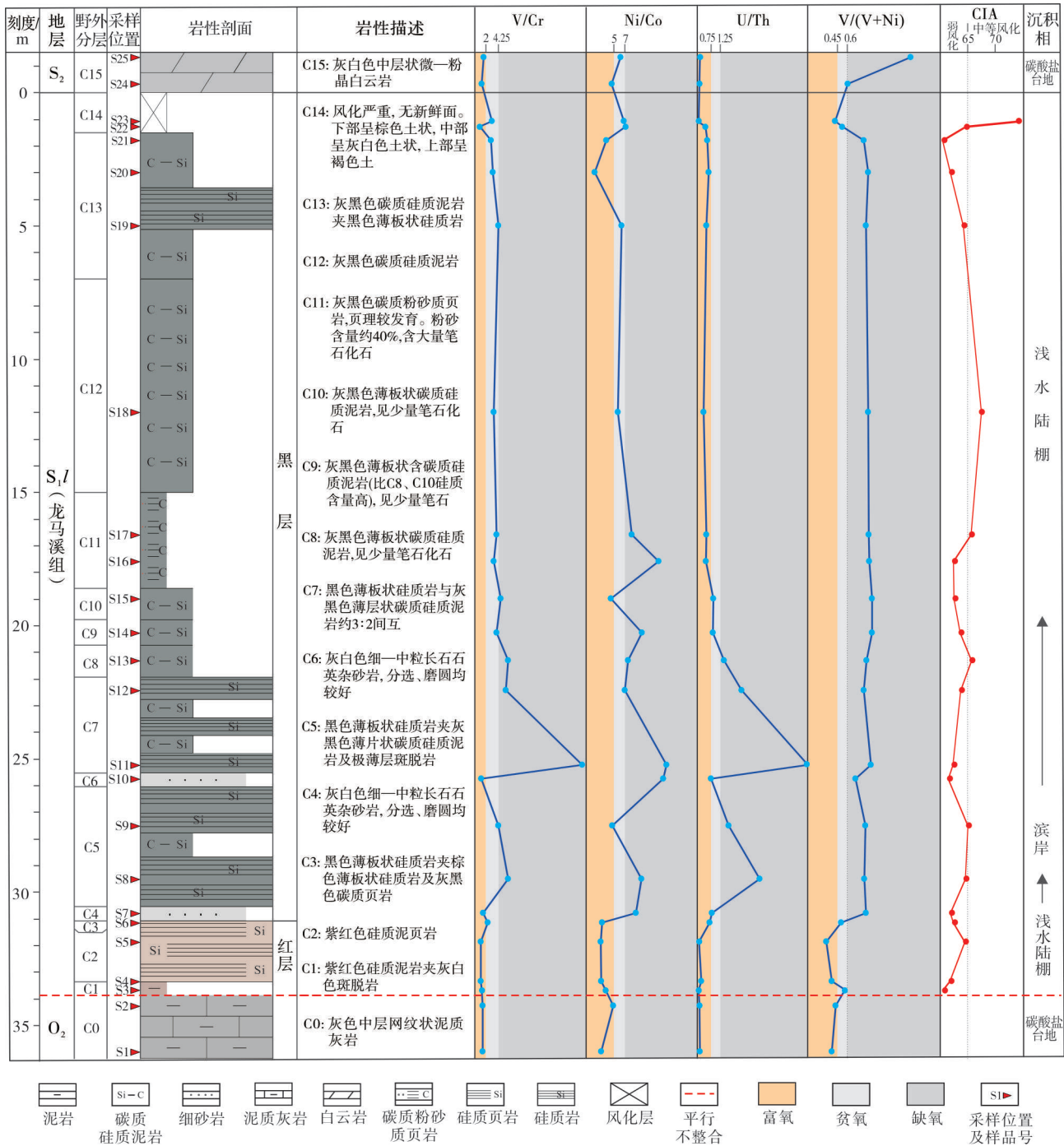


图2 康滇古陆西侧宁蒗大槽子剖面龙马溪组综合柱状图

Fig. 2 The comprehensive column of Longmaxi Formation in Dacaozi outcrop of Ninglang, west of the Kangdian Ancient Land

所对应的是红层中很薄的夹层,所以文中将其归为红层),故这几个样品的分析测试数据没有用于下文关于源岩风化程度的讨论;S7、S10为灰白色细—中粒长石石英杂砂岩;S13—S21为灰黑色碳质硅质或粉砂质泥页岩;S22和S23为遭受严重风化的不新鲜样品,且难以推断其源岩岩性,故不用

于下文所有的分析讨论。

(2)分析方法

样品加工及分析测试均在核工业北京地质研究院分析测试研究中心完成,所用实验仪器为X-射线荧光光谱仪及X系列电感耦合等离子体质谱仪。主量元素(表1)分析由飞利浦PW2404-X射线荧光

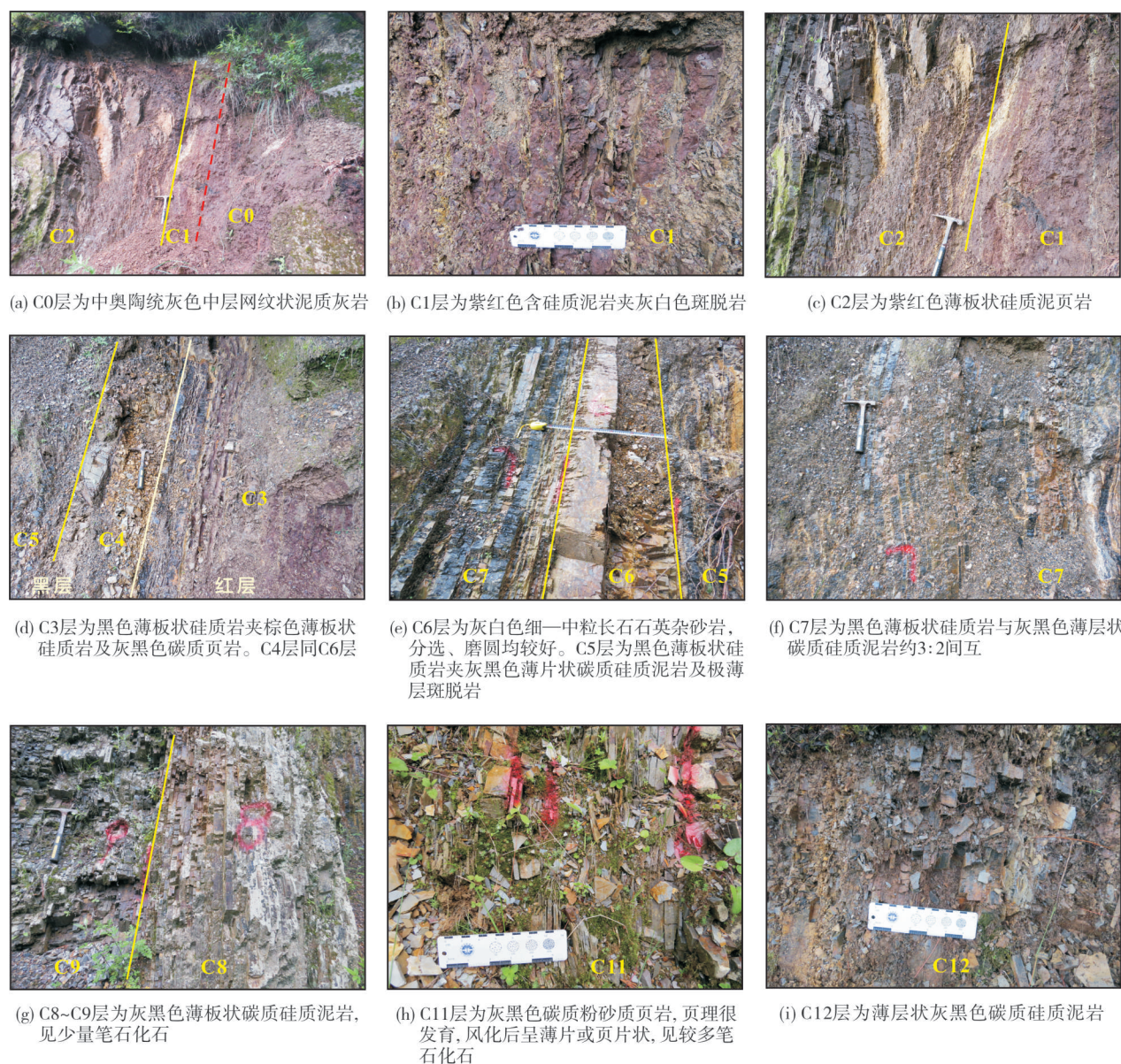


图3 康滇古陆西侧宁蒗大槽子剖面龙马溪组“红层”(a—c)与“黑层”(d—i)露头照片

Fig. 3 The outcrop photos of the “red bed” and the “black bed” of Longmaxi Formation in Dacaozi outcrop of Ninglang, west of the Kangdian Ancient Land

光谱仪完成,相对偏差 $<5\%$,实验方法和流程依据《硅酸盐岩石化学分析方法 第28部分:16个主成分量测定》(GB/T 14506.28—2010)^[28]。微量元素(表2)和稀土元素(表1)分析由 Finnigan MAT 的 HR-ICP-MS(Element I)完成,分析误差 $\leq 3\%$,实验方法和流程依据《硅酸盐岩石化学分析方法 第30部分:44个元素量测定》(GB/T 14506.30—2010)^[29]。

2.2.2 岩石地球化学转换特征

(1) 主量元素转换特征

主量元素含量差异最明显的是:龙马溪组下部

“红层”(C1—C3层)MnO含量远高于上部“黑层”(C4—C14层),且基本高出达2个数量级(表1)。

“红层”中除很纯的硅质岩样品S6外,其余样品 Fe_2O_3 含量为 $0.92\% \sim 3.69\%$,均值为 2.62% ,FeO含量为 $0.05\% \sim 0.42\%$,均值为 0.17% ;“黑层”中 Fe_2O_3 含量为 $0.01\% \sim 4.12\%$,均值为 1.28% ,FeO含量为 $0.18\% \sim 0.48\%$,均值为 0.36% 。三价铁离子的存在通常是岩石致红的关键因素。“红层”比“黑层”中 Fe_2O_3 含量高,且“红层”基本不含有机质,“黑层”中有机质含量高。所以,“红层”可能是 Fe^{3+} 含量相对较高且无有机碳掩盖所致。

表 1 康滇古陆西侧宁蒗大槽子剖面龙马溪组岩石地球化学测试数据

Table 1 Test data of major and rare earth elements of Longmaxi Formation in Dacaozi outcrop of Ninglang, west of the Kangdian Ancient Land

层号	样品	岩性	主量元素化合物含量/% ①										轻稀土元素含量/(μg·g ⁻¹)										重稀土元素含量/(μg·g ⁻¹)									
			SiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	FeO	CaO	MgO	K ₂ O	Na ₂ O	TiO ₂	MnO	P ₂ O ₅	La	Ce	Pr	Nd	Sm	Eu	Gd	Tb	Dy	Ho	Er	Tm	Yb	Lu					
C0	S1	灰色泥质灰岩	71.49	11.50	3.24	0.05	0.33	1.11	5.64	0.38	0.56	0.973	0.068	22.90	49.70	5.25	21.20	3.98	0.833	3.71	0.629	3.41	0.639	1.780	0.277	1.670	0.245					
	S2	灰色泥质灰岩												21.90	41.20	4.74	19.70	3.75	0.780	3.48	0.624	3.37	0.648	1.720	0.274	1.640	0.235					
C1	S3	褐红色黏土	71.49	11.50	3.24	0.05	0.33	1.11	5.64	0.38	0.56	0.973	0.068	61.50	137.00	13.90	56.10	10.80	2.380	10.20	1.870	10.50	2.100	5.550	0.954	5.750	0.829					
C2	S4	褐红色硅质页岩	90.54	3.50	0.92	0.42	0.12	0.32	1.69	0.09	0.15	0.202	0.027	16.90	48.60	3.82	14.90	2.76	0.609	2.58	0.441	2.21	0.454	1.160	0.187	1.230	0.186					
	S5	褐红色硅质页岩	72.60	11.58	3.69	0.05	0.15	1.18	5.42	0.13	0.56	0.452	0.063	57.00	97.40	12.40	47.10	7.59	1.550	6.38	1.070	5.50	1.120	3.220	0.534	3.400	0.507					
C3	S6	黑色硅质岩	96.81	0.86	0.03	0.53	0.18	0.10	0.22	0.08	0.03	0.141	0.034	7.02	13.70	1.53	6.63	1.34	0.349	1.36	0.268	1.48	0.264	0.733	0.124	0.763	0.107					
C4	S7	灰白色砂岩	80.60	9.03	1.64	0.43	0.10	0.45	4.43	0.21	0.56	0.009	0.113	32.70	47.90	6.21	22.90	3.76	0.850	3.27	0.503	2.74	0.559	1.690	0.299	2.020	0.321					
C5	S8	黑色硅质岩	96.21	1.19	0.01	0.28	0.23	0.15	0.32	0.09	0.05	0.013	0.021	7.69	11.60	2.21	9.76	2.26	0.604	2.24	0.419	2.37	0.441	1.210	0.180	1.060	0.151					
	S9	黑色硅质岩	92.98	2.76	0.70	0.37	0.11	0.30	1.03	0.11	0.12	0.004	0.039	9.11	24.50	2.29	9.17	2.05	0.515	1.92	0.388	2.31	0.499	1.370	0.238	1.430	0.197					
C6	S10	灰白色砂岩	76.56	9.60	3.47	0.33	0.13	0.54	4.93	0.18	0.62	0.007	0.115	34.90	64.70	8.06	31.50	5.66	1.310	5.15	0.929	5.21	1.060	3.010	0.511	3.100	0.463					
C7	S11	黑色硅质岩	96.67	1.04	0.03	0.22	0.15	0.14	0.31	0.09	0.05	0.001	0.022	6.83	8.29	1.54	6.50	1.25	0.355	1.23	0.212	1.16	0.252	0.664	0.113	0.649	0.102					
	S12	黑色硅质岩	96.12	1.27	0.01	0.38	0.16	0.17	0.36	0.10	0.05	0.004	0.017	8.44	11.00	2.03	8.78	1.83	0.456	1.63	0.278	1.44	0.280	0.771	0.125	0.785	0.110					
C8	S13	灰黑色硅质碳质泥岩	86.42	5.03	2.53	0.46	0.10	0.44	2.13	0.09	0.23	0.004	0.089	24.20	38.20	6.00	24.90	5.31	1.080	4.86	0.887	4.79	0.955	2.550	0.412	2.570	0.389					
C9	S14	灰黑色硅质碳质泥岩	85.36	7.54	0.01	0.18	0.10	0.51	3.60	0.11	0.40	0.001	0.021	34.80	55.10	7.16	25.30	4.33	0.759	3.57	0.584	3.03	0.589	1.660	0.277	1.660	0.246					
C10	S15	灰黑色硅质碳质泥岩	87.65	6.14	0.05	0.27	0.09	0.40	3.03	0.11	0.33	0.001	0.028	31.70	49.50	6.67	26.00	4.57	0.946	3.73	0.623	3.11	0.640	1.910	0.323	2.180	0.337					
C11	S16	灰黑色碳质粉砂质页岩	77.05	11.13	1.24	0.33	0.09	0.68	5.65	0.14	0.65	0.004	0.05	45.20	76.00	9.56	35.80	6.53	1.190	5.53	0.942	4.78	0.937	2.560	0.427	2.650	0.394					
	S17	灰黑色碳质粉砂质页岩	81.40	8.92	1.11	0.38	0.12	0.81	3.90	0.12	0.49	0.005	0.056	35.40	66.30	7.75	29.60	5.43	0.940	4.11	0.685	3.25	0.578	1.630	0.268	1.760	0.261					
C12	S18	灰黑色硅质碳质泥岩	88.55	5.34	0.42	0.48	0.07	0.47	2.07	0.10	0.28	0.004	0.034	24.20	44.50	5.08	18.50	3.23	0.603	2.44	0.358	1.69	0.306	0.910	0.164	1.050	0.154					
C13	S19	黑色硅质岩	87.44	5.59	0.95	0.44	0.11	0.36	2.52	0.11	0.28	0.004	0.044	21.60	36.40	4.41	15.90	2.75	0.707	2.40	0.484	2.47	0.492	1.370	0.233	1.440	0.193					
C14	S20	灰黑色硅质碳质泥岩	82.40	6.06	4.12	0.44	0.09	0.37	3.12	0.09	0.31	0.015	0.107	20.00	35.90	4.05	14.60	2.67	0.564	2.16	0.362	1.89	0.354	0.942	0.150	1.040	0.146					
	S21	灰黑色硅质碳质泥岩	75.31	10.64	2.91	0.45	0.12	0.74	5.89	0.14	0.51	0.005	0.068	35.90	67.30	7.47	27.60	4.78	0.877	3.98	0.696	3.70	0.705	2.110	0.359	2.340	0.359					
C15	S22	褐色黏土	72.54	10.38	4.15	0.05	0.20	1.02	4.66	0.17	0.51	1.770	0.136	71.70	163.00	14.00	51.60	9.45	1.530	8.06	1.440	8.21	1.710	5.180	0.914	5.890	0.880					
	S23	灰白色黏土	54.83	21.90	2.03	0.43	0.45	3.45	6.65	0.12	0.76	0.010	0.101	296.00	542.00	61.70	225.00	40.60	5.140	35.00	6.440	33.50	6.120	16.000	2.530	14.700	2.010					
C15	S24	灰白色白云岩												15.50	31.40	3.15	12.40	2.38	0.467	2.11	0.380	1.98	0.363	1.050	0.168	1.020	0.147					
	S25	灰白色白云岩												9.92	20.10	2.16	8.41	1.65	0.371	1.63	0.278	1.39	0.290	0.730	0.124	0.729	0.102					

① 主量元素化合物含量为质量百分比。

表2 康滇古陆西侧宁蒗大槽子剖面龙马溪组岩石微量元素含量测试数据

Table 2 Trace element test data of Longmaxi Formation in Dacaozi outcrop of Ninglang, west of the Kangdian Ancient Land

层号	样品	岩性	单位: μg/g																						
			Cu	Pb	Zn	Cr	Ni	Co	Li	Rb	Cs	W	Mo	Bi	Sr	Ba	V	Sc	Ta	Zr	Hf	Be	Ga	U	Th
C0	S1	灰色泥质灰岩	12.80	3.72	17.2	17.40	42.20	15.000	15.40	27.30	1.070	1.190	0.207	0.496	154.00	681	25.3	6.13	0.371	18.5	0.538	0.684	4.42	0.763	4.89
	S2	灰色泥质灰岩	6.76	3.04	13.8	15.90	30.80	6.190	15.50	25.10	1.130	0.862	0.284	0.266	143.00	498	23.1	5.39	0.268	14.9	0.470	0.497	3.51	0.512	3.71
C1	S3	褐红色黏土	22.60	10.40	131.0	58.70	63.30	17.500	57.10	139.00	8.060	4.170	1.250	0.871	24.90	2375	82.8	17.20	1.080	65.0	2.010	2.230	16.30	1.110	16.80
C2	S4	褐红色硅质页岩	26.20	80.60	56.8	18.60	36.20	12.800	24.50	40.70	2.200	0.737	0.907	0.164	10.30	787	21.5	4.94	0.378	30.2	0.886	0.717	5.48	1.030	4.54
	S5	褐红色硅质页岩	74.40	153.00	129.0	61.20	170.00	63.200	59.20	146.00	7.970	2.780	2.690	0.566	19.40	1934	70.4	15.50	1.150	78.7	2.430	2.760	16.80	1.670	16.30
C3	S6	黑色硅质岩	7.10	50.70	86.2	5.97	13.60	4.560	7.20	7.12	0.973	0.120	1.010	0.044	6.85	542	14.4	1.22	0.063	8.0	0.214	0.457	1.92	0.787	1.16
C4	S7	灰白色砂岩	16.00	96.70	71.0	64.90	12.50	1.380	21.10	93.20	3.860	1.340	4.780	0.115	51.70	1358	97.5	8.80	0.766	98.2	2.950	1.560	12.80	8.550	10.40
C5	S8	黑色硅质岩	21.90	5.56	21.9	9.16	9.11	0.904	10.10	9.75	1.000	0.128	4.970	0.023	13.60	807	55.1	1.05	0.096	11.3	0.321	0.439	1.95	4.370	1.29
	S9	黑色硅质岩	36.10	8.55	46.7	22.90	13.10	2.740	11.80	27.30	1.760	0.330	8.660	0.066	11.10	541	98.6	2.59	0.206	19.1	0.554	0.890	4.24	5.460	3.22
C6	S10	灰白色砂岩	53.60	148.00	356.0	85.40	37.70	2.700	27.60	88.80	3.930	1.300	12.500	0.186	25.90	2097	104.0	11.00	1.170	95.8	2.810	1.930	12.80	8.830	11.80
C7	S11	黑色硅质岩	25.20	8.31	23.7	14.30	12.30	0.845	6.39	9.67	0.746	0.112	8.130	0.031	11.00	686	277.0	1.04	0.087	9.0	0.234	0.552	1.54	7.350	1.23
	S12	黑色硅质岩	23.80	5.63	19.6	10.30	10.20	1.450	8.38	11.40	0.878	0.138	6.470	0.031	13.00	699	58.2	1.20	0.111	9.8	0.240	0.545	2.18	3.200	1.32
C8	S13	灰黑色硅质碳质泥岩	86.10	15.70	94.6	50.00	34.60	4.540	17.20	51.90	3.220	0.624	23.100	0.158	12.00	735	302.0	5.23	0.430	43.9	1.250	1.650	8.15	8.700	6.02
C9	S14	灰黑色硅质碳质泥岩	12.00	22.60	14.9	64.40	6.19	0.612	17.90	79.70	4.020	0.985	10.400	0.290	17.00	841	254.0	5.34	0.726	69.5	1.950	1.780	12.20	8.030	9.48
C10	S15	灰黑色硅质碳质泥岩	13.60	21.40	11.7	55.80	5.11	1.130	15.90	68.10	3.440	0.769	22.700	0.264	19.90	1199	261.0	5.49	0.696	61.6	1.730	1.660	10.50	7.470	8.45
C11	S16	灰黑色碳质粉砂质页岩	18.80	31.00	58.5	93.20	22.10	1.680	24.40	127.00	6.560	1.400	34.500	0.378	27.20	1198	323.0	11.20	1.170	114.0	3.170	2.540	18.30	7.960	16.10
	S17	灰黑色碳质粉砂质页岩	16.70	27.90	70.3	72.40	20.10	2.420	24.50	106.00	6.410	1.070	19.700	0.274	27.40	896	286.0	8.58	0.894	81.7	2.460	2.340	14.70	6.270	12.10
C12	S18	灰黑色硅质碳质泥岩	12.20	23.90	42.8	48.70	14.50	2.500	20.70	58.30	2.980	0.794	11.900	0.363	15.70	710	169.0	4.26	0.538	40.3	1.250	1.600	9.24	2.720	7.44
C13	S19	黑色硅质岩	28.80	13.40	57.3	52.80	27.20	4.190	15.60	53.60	2.360	0.700	12.300	0.267	14.70	1626	228.0	5.99	0.532	40.0	1.240	1.420	8.28	3.610	7.18
	S20	灰黑色硅质碳质泥岩	79.60	34.20	22.8	54.60	14.90	9.260	11.10	55.30	2.770	0.663	31.200	0.308	15.60	1038	178.0	9.59	0.546	41.5	1.220	1.450	9.57	5.250	8.39
C14	S21	灰黑色硅质碳质泥岩	50.10	24.60	90.6	84.30	45.20	12.200	23.20	103.00	5.550	1.100	26.700	0.404	21.70	1272	251.0	8.93	0.871	75.5	2.030	2.250	14.00	6.660	12.20
	S22	褐色黏土	22.10	28.80	140.0	69.30	60.50	8.360	30.30	123.00	9.580	1.030	5.110	0.402	47.10	1574	68.9	9.16	1.130	336.0	5.950	2.580	22.20	8.000	17.40
C15	S23	灰白色黏土	13.50	14.60	107.0	4.75	20.80	3.040	37.70	187.00	33.400	0.391	5.780	0.573	17.80	1583	14.8	9.55	21.400	2457.0	56.200	2.670	57.40	2.900	40.00
	S24	灰白色白云岩	5.85	6.39	11.8	19.40	16.40	3.470	8.75	32.90	2.360	0.593	0.499	0.100	67.60	425	25.7	3.76	0.335	25.2	0.739	0.751	4.58	0.521	4.03
	S25	灰白色白云岩	3.43	5.31	8.2	15.50	15.50	2.530	3.84	17.30	0.914	0.314	0.293	0.039	72.00	302	24.2	2.30	0.143	13.9	0.437	0.438	2.47	0.448	2.22

“黑层”样品 S8—S9 和 S11—S12 为很纯的、具有一定光泽的灰黑色硅质岩, Fe_2O_3 含量为 0.01% ~ 0.70%, 均值为 0.19%; 样品 S7、S10 为细—中粒长石石英杂砂岩, Fe_2O_3 含量为 1.64% ~ 3.47%, 均值为 2.56%, 其 Fe_2O_3 含量虽与“红层”相当, 但为基底式胶结, 颗粒支撑, 颗粒主要为石英(含量 59%)、长石(含量 3%)、岩屑(含量 1% ~ 2%), 所以 Fe_2O_3 含量对其颜色的影响很弱, 断面主要呈灰白色; “黑层”中其他样品(不包含样品 S22—S23) Fe_2O_3 含量为 0.01% ~ 4.12%, 均值为 1.28%, 虽然最大值超过“红

层”中的 Fe_2O_3 含量最大值, 但因为大量有机碳的存在导致断面颜色呈黑色—灰黑色。

(2) 微量元素转换特征

龙马溪组上部“黑层”中 V、U 含量的均值高出下部“红层”中相应元素平均含量的 3 倍以上, “黑层”中 Mo 含量的均值高出“红层”中的 9 倍以上; 下部“红层”中 Pb、Li、Sc、W 及 Bi 含量的均值高出上部“黑层”中相应元素的 2 倍以上, “红层”中 Ni 含量的均值要高出“黑层”中的将近 5 倍, Co 含量的均值更是高出“黑层”中的 9 倍以上(图 4a)。

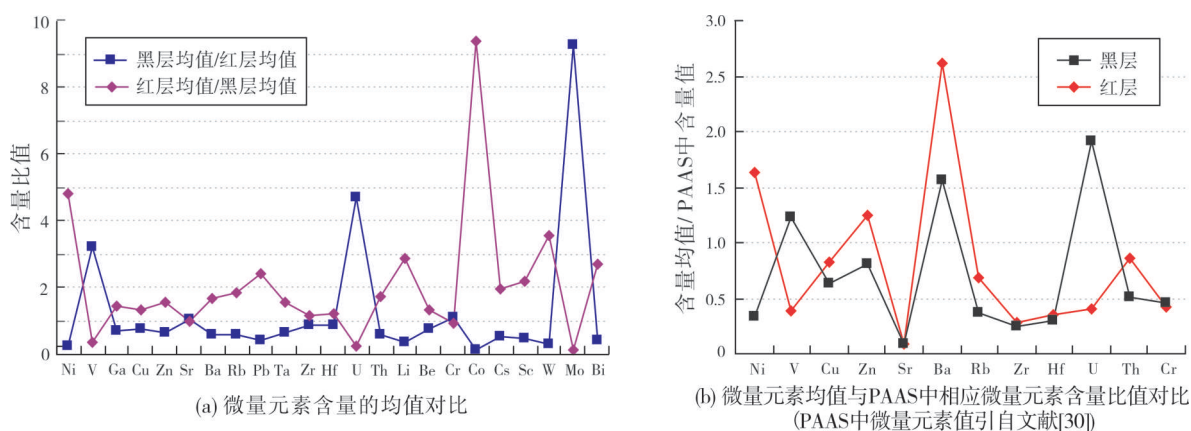


图4 康滇古陆西侧宁蒗大槽子剖面龙马溪组“红层”与“黑层”中微量元素特征对比

Fig. 4 The content comparison of trace elements between the “red bed” and the “black bed” of Longmaxi Formation in Dacaozi outcrop of Ninglang, west of the Kangdian Ancient Land

与澳大利亚后太古宙页岩(PAAS)中的微量元素含量^[30]相比, 龙马溪组下部“红层”中的 Ni、Zn、Ba 平均含量明显高于 PAAS 中的 Ni、Zn、Ba 含量, 上部“黑层”中的 V、Ba、U 含量则明显高于 PAAS 中的 V、Ba、U 含量(图 4b)。

过渡族元素 Ni、Cr、Co 常富集于基性和超基性岩中, 不相容元素 La、Th 常富集于中酸性岩中^[31-32]。从龙马溪组微量元素特征来看, “红层”中 Ni、Co 含量均较高, 这或许表明“红层”物源中混有基性或超基性岩。

(3) 稀土元素转换特征

龙马溪组上部“黑层”稀土元素总量(ΣREE)总体上偏低, 均值为 122.05 $\mu\text{g/g}$, 下部“红层”稀土元素总量总体上高于上部“黑层”, 均值为 256.01 $\mu\text{g/g}$ 。“红层”与“黑层”轻、重稀土元素分异均较明显, 且分异程度相当(表 3)。经 PAAS^[30]标准化后, “红层”与“黑层”中的 $(\text{La}/\text{Yb})_{\text{NPAAS}}$ 均值都略大于 1, 其中“红层”中 $(\text{La}/\text{Yb})_{\text{NPAAS}}$ 均值为 1.01, “黑层”中 $(\text{La}/\text{Yb})_{\text{NPAAS}}$ 均值为 1.04。这表明“红层”与“黑层”中轻、重稀土元素分馏程度与 PAAS 相当(表 3)。

表3 康滇古陆西侧宁蒗大槽子剖面龙马溪组稀土元素分析

Table 3 The rare earth elements analysis of Longmaxi Formation in Dacaozi section of Ninglang, west of the Kangdian Ancient Land

	$\Sigma\text{REE}/(\mu\text{g}\cdot\text{g}^{-1})$		$\Sigma\text{LREE}/\Sigma\text{HREE}$		$(\text{La}/\text{Yb})_{\text{NPAAS}}$	
	范围	均值	范围	均值	范围	均值
“黑层”	39.05~220.50	122.05	1.50~6.02	3.27	0.47~1.70	1.04
“红层”	108.64~382.13	256.01	2.80~4.16	3.69	0.79~1.24	1.01

将龙马溪组下部“红层”与上部“黑层”样品的稀土元素各自均值化,并以PAAS进行标准化,结果表现为龙马溪组下部“红层”与上部“黑层”轻、重稀土元素的配分曲线大致平行,且均比较平直(图5a),表明“红层”与“黑层”物源具有较高的相似性,也表明“红层”与“黑层”中的轻、重稀土元素与PAAS中的轻、重稀土元素配分形式具有较好的相

似性。“红层”的配分曲线纵坐标稍高于1.0,表明“红层”中的稀土元素配分形式与PAAS较为接近,而“黑层”配分曲线纵坐标明显高于1.0,表明“黑层”中稀土元素含量与PAAS中的稀土元素含量差异更大。以球粒陨石中的稀土元素含量^[32]标准化以后,表现为“红层”与“黑层”中的轻、重稀土元素均较富集,但轻、重稀土元素分异度更为明显(图5b)。

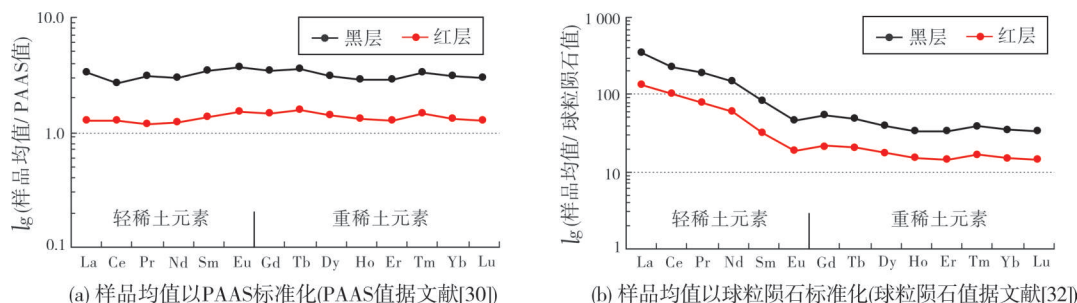


图5 康滇古陆西侧宁蒗大槽子剖面龙马溪组稀土元素含量均值标准化后的模式图

Fig. 5 Normalized REE patterns of Longmaxi Formation in Dacaozi outcrop of Ninglang, west of the Kangdian Ancient Land

2.2.3 讨论

(1) 源岩风化程度转换特征

化学蚀变指数(CIA)可用于表征和反映源岩的化学风化程度^[33]:

$$CIA = 100 \times \{w(Al_2O_3) / [w(Al_2O_3) + w(CaO^*) + w(Na_2O) + w(K_2O)]\} \quad (1)$$

式中:CaO*指存在于硅酸盐矿物中的CaO^[34-35],并以Bock等人的方法确定^[35]。龙马溪组下部“红层”CIA值为61~65,均值为63;上部“黑层”除很纯的硅质岩以外,CIA值为61~68,均值为64。因此,下部“红层”与上部“黑层”源岩风化程度相当,且根据风化程度的划分标准^[36],基本上处于弱风化至中等风化过渡带(图6)。整体上看,龙马溪组下部“红层”与上部“黑层”源岩可能都来自于钾长石含量偏高的酸性物源,且经历了弱至中等风化。

(2) 氧化-还原环境转换特征

一般认为,V/(V+Ni)值 ≥ 0.46 指示缺氧环境^[37]。龙马溪组下部“红层”V/(V+Ni)值为0.29~0.57(均值为0.41),上部“黑层”V/(V+Ni)值为0.51~0.98(均值为0.87),表明下部“红层”沉积环境相对不缺氧,而上部“黑层”则转换为明显缺氧环境及水体呈现分层^[38]。

V/Cr、Ni/Co、U/Th等微量元素指标广泛用于古

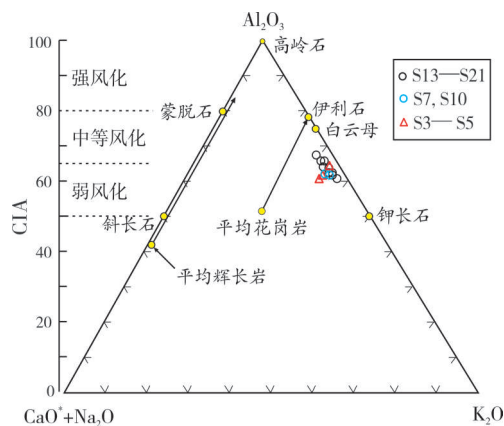


图6 康滇古陆西侧宁蒗大槽子剖面龙马溪组A-CN-K图(底图据文献[33])

Fig. 6 The A-CN-K diagram of Longmaxi Formation in Dacaozi outcrop of Ninglang, west of the Kangdian Ancient Land (base map is cited from literature [33])

氧化-还原条件判别^[39-43]。以V/Cr来看,龙马溪组下部“红层”为富氧沉积环境,上部“黑层”中除了有2层长石石英杂砂岩(C4层,对应的样品号为S7; C6层,对应的样品号为S10)为富氧沉积环境以外,其余则为贫氧至厌氧沉积环境。以Ni/Co来看,龙马溪组下部“红层”为富氧沉积环境,上部“黑层”则既有富氧沉积环境,也有贫氧至厌氧沉积环境,以后一种环境为主。以U/Th来看,龙马溪组下部“红层”为富氧沉积环境,上部“黑层”则以贫氧至厌氧沉积环境为主。

氧化还原敏感性元素V、U、Mo对沉积环境的富氧、缺氧反应较为灵敏。当沉积环境为缺氧的还原环境时,上述元素皆易沉淀下来。Mo元素在还原条件下,特别是在有 H_2S 存在的条件下,会以硫化物的形式迅速沉淀^[42]。因此,Mo元素能够很灵敏地反映海洋的氧化还原状态^[43]。在龙马溪组中,上部“黑层”V、U、Mo含量均明显高于下部“红层”,尤其是Mo含量显著高于“红层”(图4a),这应当是由“红层”的贫有机质氧化环境转变为“黑层”富有机质还原环境所致。

因此,综合各微量元素参数来看,龙马溪组从“红层”转换至“黑层”,整体上是相对富氧的氧化环境转变为相对缺氧的还原环境,但“黑层”中的2层(C4层和C6层)灰白色细—中粒长石石英杂砂岩仍然为相对富氧的沉积环境(图2)。上述结论意味着下部“红层”沉积水体相对较浅,上部“黑层”沉积水

体相对较深,但从剖面的纵向演化与横向对比来看,“黑层”中所夹砂岩仍然属于浅水沉积。结合“黑层”中所夹砂岩的颗粒分选、磨圆及粒度,认为这2层灰白色细—中粒长石石英杂砂岩为滨岸带沉积产物。

(3) 构造环境转换特征

主量元素和微量元素的地球化学特征是判断构造环境的有效方法之一。龙马溪组主量元素及微量元素投点表明:从其下部“红层”到上部“黑层”,构造环境没有转换,均处于活动大陆边缘(图7)。因此,活动大陆边缘代表了龙马溪组“红层”与“黑层”沉积时期的构造背景。然而,康滇古陆东侧的中、上扬子区龙马溪组沉积构造背景为稳定大陆边缘^[44],属于稳定的板块内陆棚沉积^[16]。因此,康滇古陆东、西两侧龙马溪组沉积时期的构造背景截然不同,这也表明了康滇古陆是龙马溪期一个重要的控制了构造格局的古地理单元。

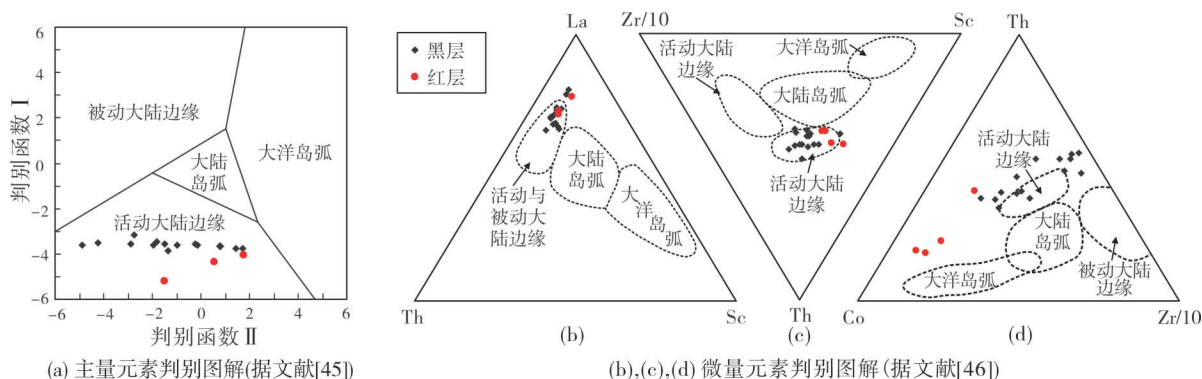


图7 康滇古陆西侧宁蒗大槽子剖面龙马溪组源岩构造背景判别图

Fig. 7 The tectonic background discrimination of original rock of Longmaxi Formation in Dacaozi outcrop of Ninglang, west of the Kangdian Ancient Land

3 结论

康滇古陆西侧盐源—丽江地区龙马溪组从下部“红层”转换为上部“黑层”,具有以下转换特征:

(1) 龙马溪组从下部“红层”转换至上部“黑层”,岩性存在着2个方面的显著转换:一是岩石颜色存在明显的由红至黑的转换,二是碳质含量由低到高。龙马溪组下部“红层”含 Fe^{3+} ,且无有机碳掩盖,这种叠加效应可能是其致红的主要原因。

(2) 龙马溪组从下部“红层”转换至上部“黑层”,整体上是相对富氧的氧化沉积环境转变为相对缺氧的还原沉积环境,这应当是上部“黑层”中V、U、Mo含量显著高于下部“红层”的原因。这也表明,研究区在奥陶纪与志留纪沉积期间受都匀运动

影响,大槽子一带的奥陶系被部分剥蚀形成不整合,之后相对海平面逐渐上升,导致志留系龙马溪组自下而上是一个沉积水体由浅变深的转换过程,这可能是“红—黑”转换的主要控制因素。

(3) 龙马溪组从下部“红层”转换至上部“黑层”,沉积构造背景没有变化,均处于活动大陆边缘环境,迥然不同于康滇古陆东侧的稳定大陆边缘背景。

致谢:感谢成都地调中心熊小辉博士为本文提出的宝贵建议,也感谢审稿专家及编辑对本文的细心审阅并提出宝贵意见!

参考文献

- [1] LOYDELL D K. Early Silurian sea-level changes[J]. Geological magazine, 1998, 135(4): 447-471.

- [2] CHEN Xu, RONG Jiayu, LI Yue, et al. Facies patterns and geography of the Yangtze region, South China, through the Ordovician and Silurian transition [J]. *Palaeogeography, palaeoclimatology, palaeoecology*, 2004, 204(3/4): 353–372.
- [3] JOHNSON M E. Relationship of Silurian sea-level fluctuations to oceanic episodes and events [J]. *GFF*, 2006, 128(2): 115–121.
- [4] MUNNECKE A, CALNER M, HARPER D A T, et al. Ordovician and Silurian sea–water chemistry, sea level, and climate: a synopsis [J]. *Palaeogeography, palaeoclimatology, palaeoecology*, 2010, 296(3/4): 389–413.
- [5] ARTYUSHKOV E V, TESAKOV Y I, CHEKHOVICH P A. Ordovician sea–level change and rapid change in crustal subsidence rates in East Siberia and Baltoscandia [J]. *Russian geology and geophysics*, 2008, 49(9): 633–647.
- [6] 田景春, 陈洪德, 张翔, 等. 凝缩段特征及其与烃源岩的关系: 以中国南方海相震旦系—中三叠统为例 [J]. *石油与天然气地质*, 2006, 27(3): 378–383.
- [7] 李双建, 肖开华, 沃玉进, 等. 南方海相上奥陶统—下志留统优质烃源岩发育的控制因素 [J]. *沉积学报*, 2008, 26(5): 872–880.
- [8] 梁狄刚, 郭彤楼, 陈建平, 等. 中国南方海相生烃成藏研究的若干新进展(一): 南方四套区域性海相烃源岩的分布 [J]. *海相油气地质*, 2008, 13(2): 1–16.
- [9] 徐胜林, 陈洪德, 陈安清, 等. 四川盆地海相地层烃源岩特征 [J]. *吉林大学学报(地球科学版)*, 2011, 41(2): 343–350, 358.
- [10] 陈建平, 梁狄刚, 张水昌, 等. 泥岩/页岩: 中国元古宙—古生代海相沉积盆地主要烃源岩 [J]. *地质学报*, 2013, 87(7): 905–921.
- [11] 聂海宽, 金之钧, 边瑞康, 等. 四川盆地及其周缘上奥陶统五峰组—下志留统龙马溪组页岩气“源—盖控藏”富集 [J]. *石油学报*, 2016, 37(5): 557–571.
- [12] 苏文博, 李志明, FRANK R E, 等. 华南五峰组—龙马溪组黑色岩系时空展布的主控因素及其启示 [J]. *地球科学(中国地质大学学报)*, 2007, 32(6): 819–827.
- [13] 蔡俊, 何幼斌, 张来, 等. 中上扬子地区五峰组沉积环境分析 [J]. *海洋地质动态*, 2010, 26(6): 24–30.
- [14] 梁超, 姜在兴, 杨德婷, 等. 四川盆地五峰组—龙马溪组页岩岩相及储集空间特征 [J]. *石油勘探与开发*, 2012, 39(6): 691–698.
- [15] 张春明, 张维生, 郭英海. 川东南—黔北地区龙马溪组沉积环境及对烃源岩的影响 [J]. *地学前缘*, 2012, 19(1): 136–145.
- [16] 张春明, 姜在兴, 郭英海, 等. 川东南—黔北地区龙马溪组地球化学特征与古环境恢复 [J]. *地质科技情报*, 2013, 32(2): 124–130.
- [17] 刘树根, 王世玉, 孙玮, 等. 四川盆地及其周缘五峰组—龙马溪组黑色页岩特征 [J]. *成都理工大学学报(自然科学版)*, 2013, 40(6): 621–639.
- [18] 王淑芳, 董大忠, 王玉满, 等. 四川盆地南部志留系龙马溪组富有机质页岩沉积环境的元素地球化学判别指标 [J]. *海相油气地质*, 2014, 19(3): 27–34.
- [19] 王玉满, 董大忠, 李新景, 等. 四川盆地及其周缘下志留统龙马溪组层序与沉积特征 [J]. *天然气工业*, 2015, 35(3): 12–21.
- [20] 赵建华, 金之钧, 金振奎, 等. 四川盆地五峰组—龙马溪组页岩岩相类型与沉积环境 [J]. *石油学报*, 2016, 37(5): 572–586.
- [21] 薛代福, 冷崇林, 沙绍礼, 等. 中华人民共和国区域地质调查报告: 1:20万永宁幅(地质部分) [R]. 昆明: 云南省地质局, 1980.
- [22] 范承钧, 段彦学, 吕顺泰, 等. 中华人民共和国区域地质调查报告: 1:20万丽江幅(地质部分) [R]. 昆明: 云南省地质局, 1977.
- [23] 四川省地质局第一区域地质测量大队. 中华人民共和国区域地质调查报告: 1:20万盐边幅(地质部分) [R]. 四川省地质局, 1972.
- [24] 钟康惠, 刘肇昌, 施央申, 等. 盐源—丽江构造带是新生代陆内造山带 [J]. *地质学报*, 2004, 78(1): 36–43.
- [25] 胡受权, 郭文平. 云南宁蒗地区菱形构造格局及其联合构造型式 [J]. *矿物岩石*, 1995(4): 93–99.
- [26] 唐若龙. 木里—盐源推覆构造特征与金铜、铅锌的成矿关系 [J]. *四川地质学报*, 1987(2): 5–11.
- [27] 金淳泰. 西南地区地层总结: 志留系 [R]. 成都: 地质部成都地质矿产研究所, 1982.
- [28] 国家地质实验测试中心. 硅酸盐岩石化学分析方法 第28部分: 16个主次成分量测定 (GB/T 14506.28—2010) [S]. 北京: 中国标准出版社, 2010.
- [29] 国家地质实验测试中心. 硅酸盐岩石化学分析方法 第30部分: 44个元素量测定 (GB/T 14506.30—2010) [S]. 北京: 中国标准出版社, 2010.
- [30] MCLENNAN S M. Rare earth elements in sedimentary rocks: influence of provenance and sedimentary processes [J]. *Reviews in mineralogy and geochemistry*, 1989, 21(1): 169–200.
- [31] 蔡观强, 郭峰, 刘显太, 等. 沾化凹陷新近系沉积岩地球化学特征及其物源指示意义 [J]. *地质科技情报*, 2007, 26(6): 17–24.
- [32] MCLENNAN S M, TAYLOR S R. Geochemical standards for sedimentary rocks: trace–element data for U.S.G.S. standards SCo–1, MAG–1 and SGR–1 [J]. *Chemical geology*, 1980, 29(1): 333–343.
- [33] NESBITT H W, YOUNG G M. Prediction of some weathering trends of plutonic and volcanic rocks based on thermodynamic and kinetic considerations [J]. *Geochimica et cosmochimica acta*, 1984, 48(7): 1523–1534.
- [34] NESBITT H W, YOUNG G M. Early proterozoic climates and plate motions inferred from major element chemistry of lutites [J]. *Nature*, 1982, 299: 715–717.
- [35] BOCK B, MCLENNAN S M, HANSON G N. Geochemistry and provenance of the Middle Ordovician Austin Glen Member (Normanskill Formation) and the Taconian Orogeny in New England [J]. *Sedimentology*, 1998, 45(4): 635–655.
- [36] 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.
- [37] RIMMER S M. Geochemical paleoredox indicators in Devonian—Mississippian black shales, Central Appalachian Basin (USA)[J]. *Chemical geology*, 2004, 206(3/4): 373–391.
- [38] HATCH J R, LEVENTHAL J S. Relationship between inferred redox potential of the depositional environment and geochemistry of the Upper Pennsylvanian (Missourian) Stark Shale Member of the Dennis Limestone, Wabaunsee County, Kansas, U. S. A.[J]. *Chemical geology*, 1992, 99(1/3): 65–82.
- [39] JONES B, MANNING D A C. Comparison of geochemical indices used for the interpretation of palaeoredox conditions in ancient mudstones[J]. *Chemical geology*, 1994, 111(1/4): 111–129.
- [40] 李艳芳, 邵德勇, 吕海刚, 等. 四川盆地五峰组—龙马溪组海相页岩元素地球化学特征与有机质富集的关系[J]. *石油学报*, 2015, 36(12): 1470–1483.
- [41] 腾格尔, 刘文汇, 徐永昌, 等. 缺氧环境及地球化学判别标志的探讨:以鄂尔多斯盆地为例[J]. *沉积学报*, 2004, 22(2): 365–372.
- [42] 高剑峰, 凌洪飞, 赵葵东. Mo 含量和 Mo 同位素对古海洋氧化还原环境演化的指示作用[J]. *地球学报*, 2005, 26(增刊 1): 203–204.
- [43] MORFORD J L, EMERSON S R. The geochemistry of redox sensitive trace metals in sediments[J]. *Geochimica et cosmochimica acta*, 1999, 63(11/12): 1735–1750.
- [44] 熊小辉, 王剑, 余谦, 等. 富有机质黑色页岩形成环境及背景的元素地球化学反演:以渝东北地区田坝剖面五峰组—龙马溪组页岩为例[J]. *天然气工业*, 2015, 35(4): 25–32.
- [45] BHATIA M R. Plate tectonics and geochemical composition of sandstones [J]. *The journal of geology*, 1983, 91(6): 611–627.
- [46] 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.

编辑:黄革萍

Red–black transitional characteristics of the Silurian Longmaxi Formation in the west of the Kangdian Ancient Land: taking Dacaozi outcrop of Ninglang as an example

WANG Zhenghe, ZHANG Haiquan, CHENG Jinxiang, DENG Min

Abstract: The Silurian Longmaxi Formation to the east of the Kangdian Ancient Land in the Middle and Upper Yangtze Region has no red beds, but in the Yanyuan–Lijiang area to the west of the Kangdian Ancient Land, there are red beds (about 2 m thick purple red siliceous shale) at the bottom of the Longmaxi Formation. In order to make clear the genesis and geological significance of the red beds, this paper studies the red–black transitional characteristics from the red beds in the bottom of Longmaxi Formation to the black beds in the upper part of Longmaxi Formation, from the aspects of lithology, lithofacies and petrochemistry, taking the Dacaozi outcrop of Ninglang in Yanyuan–Lijiang area as an example. The results show that: (1) the “red bed” contains Fe^{3+} and there is no organic carbon in it, which may be the primary reason for its red color; (2) the characteristics of rare earth elements in “red layer” and “black layer” are similar, but the characteristics of trace elements are quite different, especially the mean value of Co content in “red layer” is more than 9 times higher than that in “black layer”, and the mean value of Mo in the “black bed” is more than 9 times higher than that of the “red bed”; (3) from the “red layer” in the bottom of Longmaxi Formation to the “black layer” in the upper part of Longmaxi Formation, it is a process from relatively oxygen rich sedimentary environment to relatively anoxic sedimentary environment, and it is also a process that the sedimentary water gradually changes from shallow to deep, which is the main controlling factor of the red–black transition; (4) the tectonic setting from the lower “red bed” to the upper “black bed” is always in the active continental margin, which is different from the stable continental margin to the east of Kangdian Ancient Land.

Key words: red bed; sedimentary transition; Longmaxi Formation; Silurian; west side of Kangdian Ancient Land

WANG Zhenghe, First author: PhD, Senior Engineer, engaged in sedimentary sequence and petroleum geology. Add: Chengdu Center of China Geological Survey, No. 2 North 3rd section, Yihuan Road, Jinniu District, Chengdu, Sichuan 610083, China