

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



Pre-pub. on line: www.
geojournals.cn/georev

刘春来¹⁾, 熊国庆^{2,3)}, 董国明¹⁾, 崔伟¹⁾

1) 河北省地质矿产勘查开发局第二地质大队, 河北唐山, 063004;

2) 中国地质调查局成都地质调查中心, 成都, 610081;

3) 自然资源部沉积盆地与油气资源重点实验室, 成都, 610081

内容提要:近年来,扬子地块北缘奥陶纪—志留纪之交沉积构造背景一直存在不同认识。本文对渝东北城口厚坪五峰组—龙马溪组砂、泥岩进行系统采样和主、微量元素测试分析,从地球化学特征角度,来探讨该时期砂、泥岩物源区及其构造环境。地球化学特征显示,五峰组—龙马溪组砂、泥岩主量元素 SiO_2 含量为 39.57%~87.16%,多数高于北美页岩, Al_2O_3 含量为 3.41%~14.98%,均低于北美页岩, MgO 、 CaO 、 MnO_2 和 P_2O_5 含量明显低于北美页岩,相比于四川盆地川南长宁—双河五峰组—龙马溪组泥岩,渝东北城口具有高 SiO_2 和低 MgO 、 CaO 的特点,表明城口五峰组—龙马溪组泥岩碎屑组分主要以粉砂质和硅质等陆缘碎屑为主;微量元素 Sc 、 Sr 、 Co 、 Zr 、 Hf 较北美页岩相对亏损, V 、 U 、 Sb 、 Ba 相对富集, Cr 、 Ni 、 Nb 、 Ta 含量相近。稀土元素北美页岩标准化均表现为略微向右倾斜的配分模式,多数具有 δCe 负异常,观音桥段和龙马溪组 δEu 正异常指示了该时期存在海底热液活动。砂、泥岩主、微量元素的物源和构造背景图解表明沉积物源区源岩具有多样的物质组分,以长英质岩为主,同时混入了花岗质和安山质岩石组分;源岩形成时的构造背景主要为被动陆缘环境,少数为活动陆缘和大陆岛弧环境,这一结果与扬子地块北缘新元古代—早古生代处于被动大陆边缘的区域地质背景一致。

关键词: 扬子地块北缘;奥陶纪—志留纪之交;物源区;构造环境

碎屑岩是由母岩风化产物或火山碎屑经搬运、沉积、压实和胶结而形成的岩石,一般认为这些碎屑岩组分主要受物源区母岩性质和构造背景影响 (McLennan et al., 1993; Fralick and Kronberg, 1997)。因此,碎屑组分常作为一种恢复沉积盆地的物源和构造背景的传统方法 (Dickinson, 1983; Morton, 1991)。研究表明,在风化、搬运和成岩过程中,碎屑岩中一些相对不易迁移的地球化学组分(如稀土元素(REE)和 Zr 、 Th 、 Sc 、 Y 等一些微量元素),不仅能提供了物源区成分的信息 (Taylor and McLennan, 1985; Girty et al., 1993), Bhatia (1983) 和 Roser 等 (1986) 还据此提出了不同构造背景下砂、泥岩的地球化学判别方法,随后被广泛用于碎屑岩的物源及其沉积构造背景分析 (Bhatia and Crook, 1986; McLennan et al., 1993)。

渝东北地区位于扬子陆块北缘,奥陶纪—志留纪之交,沉积了一套深水陆棚相五峰组—龙马溪组黑色页岩。这一时期,扬子陆块北缘究竟是处于秦岭洋南侧的扬子被动大陆边缘 (吉让寿等, 1990; 张国伟等, 1988, 1995, 1996, 2001), 还是南秦岭沟—弧—盆体系的活动大陆边缘 (王宗起等, 2009), 或是克拉通盆地南侧的扬子陆缘 (姜涌泉, 1998), 仍存有争议。前人通过常量元素的地球化学方法对渝东北地区五峰组—龙马溪组泥岩所形成的构造环境进行了初步讨论 (熊小辉等, 2015; 刘田等, 2019), 但缺乏微量元素,尤其是不活泼的元素的深入系统分析,其结论有待进一步验证。本文从渝东北城口厚坪五峰组—龙马溪组泥岩的地球化学特征入手,详细探讨扬子陆块北缘奥陶纪—志留纪之交沉积物的物源及其沉积构造背景,对该地区这一时期

注:本文为四川盆地龙马溪组页岩气战略选区调查项目(编号:DD20160193)、贵州凯里—都匀地区页岩气地质调查项目(编号:DD20190722)和重庆市页岩气勘探有利区带优选及资源量评价研究(渝东北地区)地方财政项目的成果。

收稿日期:2020-12-01;改回日期:2021-04-23;网络首发:2021-05-20;责任编辑:刘志强。Doi: 10.16509/j.georeview.2021.04.231

作者简介:刘春来,男,1978年生,工程硕士,高级工程师,地质学、地质工程专业,现从事矿产地质勘查及矿床学等方面研究;Email: liuchunlai990@163.com。通讯作者:熊国庆,男,1975年生,博士,高级工程师,矿物学、岩石学、矿床学专业,现从事岩相古地理、沉积地质、页岩气地质等方面研究;Email: hsiungq@163.com。

沉积盆地所处的大地构造背景及其沉积古地理源区分析具有重要的地质意义。

1 区域地质背景

大巴山地区处于盆山过渡带,北与东秦岭造山带、南与四川盆地相接,东西夹持于武当山隆起、神农架隆起和米仓山隆起之间,呈向南凸出的弧形构造带,城巴断裂将其分为南、北大巴山两个沉积—构造单元(图 1a,李智武等,2006)。研究区位于大巴山西段的川渝陕交界,区内自下而上发育震旦系、寒武系、奥陶系、志留系、二叠系及三叠系,缺失泥盆系和石炭系,北大巴山早古生代地层中辉绿岩脉顺层发育(图 1b),时代上为奥陶纪—志留纪(向忠金等,2016)。

晚元古代的晋宁运动,华北陆块与扬子陆块逐渐拼合对接,最终导致南秦岭在内各个块体形成统一的克拉通褶皱基底(罗志立,1998)。随着全球 Rodinia 超大陆解体,华北陆块和扬子陆块发生裂解,逐渐演化形成“秦岭洋”。有观点认为,秦岭洋发生在商南—丹凤一线,也称“商丹洋”,两侧为被动大陆边缘,奥陶—志留纪开始,扬子陆块向华北陆块之下的北向俯冲,南秦岭南缘此时发生局部拉伸,基性岩浆活动就位(胡健民等,2002),洋盆于泥盆—石炭纪消亡,与此同时,沿勉县—略阳一带打开一个新的勉略洋盆,最终形成了秦岭造山带“三块夹两缝”的构造格局(张国伟等,1995a, b, 1996, 2001, 2003, 2004);也有观点认为,扬子陆块和华北陆块之间的秦岭造山带只存在一个统一的原始大洋盆地——“秦岭洋”,时间为新元古—早中生代(约 840~220 Ma)(闫全人等,2007, 2009, 2014),晚古生代秦岭洋向南俯冲增生,南秦岭南缘构成了安康弧、北大巴山弧后混杂岩和寒武纪—志留纪弧后盆地构造体系,南大巴山为弧后盆地陆缘,属于扬子台地稳定沉积(王宗起等,2009;王刚等,2014)。随着早中生代洋盆消亡,印支—燕山期,秦岭开始转入陆内碰撞造山阶段,喜马拉雅期定型,最终形成了现今的大巴山弧形构造带。

2 样品采集及测试

2.1 样品采集

本文研究的样品采自南大巴山西段渝东北城口县厚坪(HP)剖面 and 蒙蒙溪剖面(MM),两者处于同一向斜的南北两翼,直线距离约 10 km(图 1c)。厚坪剖面位于城溪路 S301 省道至厚坪的 X026 县道

边(图 1b),晚奥陶世临湘组—早志留世龙马溪组地层连续。临湘组与下伏宝塔组灰色中层状龟裂纹灰岩整合接触,主体上为一套浅水陆棚黄绿色泥岩夹灰色泥灰岩,顶部为灰色薄层状泥质白云岩、泥质砂岩,表现为向上变浅的沉积层序,顶界面土黄色泥质风化壳表明曾短暂暴露(熊国庆等,2019),其上五峰组深水陆棚黑色中层状硅质页岩、硅质碳质泥岩,为一套快速海侵沉积,上覆观音桥段时代上与全球赫兰特冰期相当,底部以黑色薄板状泥质粉砂岩,向上变为灰黑色中层状细砂岩、中—粗砂岩及灰色厚层状含砂砾白云岩,与五峰组碳质泥岩渐变过渡,反映了一次逐渐海退的沉积序列(熊国庆等,2019);随着赫兰特冰川消融,全球海平面迅速上升,龙马溪组一套深水陆棚黑色薄层状粉砂质碳质泥岩快速沉积于白云岩之上(图 1c),未见顶。蒙蒙溪剖面位于明中乡至彭家湾的乡道边,交通方便(图 1b),露头出露较为完整,晚奥陶世临湘组—早志留世龙马溪组地层连续。临湘组浅黄绿色泥岩与五峰组黑色硅质碳质泥岩直接接触,表现为一次快速海侵过程,随后发育的观音桥段白云岩呈透镜状,区域上可对比,为一套赫兰特冰期沉积,其上龙马溪组黑色粉砂质碳质泥岩为一套冰期后全球海平面再次快速上升形成的深水陆棚相沉积(图 1c)。

2.2 样品处理及测试

采样时已尽量剥除风化表面,保证样品新鲜和足量。全岩样品首先粉碎至 200 目以下,常量、微量和稀土元素测试分析在核工业北京地质研究院分析测试研究中心完成,测试时,室内温度 20℃,相对湿度 30%。常量元素分析仪器为 AB-104L, PW2404 X 射线荧光光谱仪,测试方法和依据为 GB/T 14506. 14-2010《硅酸盐岩石化学分析方法 第 14 部分:氧化亚铁量测定》,GB/T 14506. 28-2010《硅酸盐岩石化学分析方法 第 28 部分:16 个主次成分量测定》,相对误差为 $\pm 1\% \sim \pm 4\%$ 。微量、稀土元素测试采用 ELEMENT XR 等离子质谱分析仪,测试方法和依据为 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》,相对误差为 $\pm 3\% \sim \pm 12\%$ 。常量元素及微量、稀土元素测试分析结果分别列入表 1、表 2、表 3 和表 4 中。

3 结果

3.1 主量元素

厚坪五峰组—龙马溪组砂、泥岩 SiO_2 含量为 53.4%~79.43%,平均 72.98%(表 1),高于北美页



Fig. 1 The location of Dabashan region and the sketch geological map of study area (Fig. 1a modified from Li Zhiwu et al., 2006&)

岩 64.8%,也高于同一盆地内川南长宁—双河五峰组—龙马溪组 SiO₂ 含量 55.67%的平均值。五峰组顶部 2 件泥岩 SiO₂ 含量为 53.4%和 56.21%,较其他样品明显偏低,这与样品的高烧失量有关;观音桥段 2 件砂、泥岩 SiO₂ 含量为 69.03%和 69.71%,龙马溪组 1 件样品 70.91%,低于其他样品,高于北美页岩;其余 10 件样品 SiO₂ 含量平均 77.54%,五峰组与龙马溪组基本相同,远高于北美页岩(表 1)。蒙蒙溪五峰组—龙马溪组泥岩 SiO₂ 含量为 39.57%~87.16%,平均 73.31%(表 2),均高于北美页岩和

川南长宁—双河。龙马溪组一个异常低的 SiO₂ 值与其高铁含量和高烧失量有关,其余绝大多数均大于 70%(表 2)。厚坪五峰组—龙马溪组砂、泥岩 Al₂O₃ 含量为 3.41%~11.47%,平均 7.73%,均低于北美页岩 16.9%,也低于川南长宁—双河五峰组—龙马溪组 Al₂O₃ 含量 10.13%的平均值。五峰组顶部 2 件泥岩 Al₂O₃ 含量为 11.09%和 11.49%,明显高于其他样品,与川南长宁—双河接近,观音桥段 2 件样品 Al₂O₃ 含量最低,仅为 3.41%~5.62%,其余 11 件样品 Al₂O₃ 含量平均 7.67%,五峰组与龙马溪

表 1 扬子地块北缘城口厚坪剖面五峰组—龙马溪组砂、泥岩主量元素分析结果(%)

Table 1 Analysical results of major elements of Wufeng Formation and Longmaxi Formation sandstones and mudstones from Houping profile in Chengkou County, northern margin of Yangtz Block(%)

样品	地层及岩性	位置(m)	SiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	MgO	CaO	Na ₂ O	K ₂ O	MnO	TiO ₂	P ₂ O ₅	FeO	烧失量	总含量
HP1	五峰组 硅质岩	7.05	77.57	8.52	1.18	0.65	0.17	0.44	2.29	0.00	0.41	0.16	0.40	8.22	100.02
HP2		7.25	77.38	7.56	0.95	1.01	0.80	0.41	1.95	0.01	0.43	0.11	0.45	9.03	100.09
HP3		7.35	78.13	7.66	0.75	0.55	0.17	0.66	1.97	0.00	0.36	0.08	0.63	9.20	100.15
HP4		7.45	78.50	6.74	1.07	0.49	0.23	0.57	1.79	<0.004	0.34	0.06	0.46	9.82	100.06
HP5		7.55	76.34	6.36	1.05	0.39	0.06	0.94	1.50	<0.004	0.42	0.04	0.63	12.37	100.10
HP6		7.75	56.21	11.47	3.21	0.92	0.09	1.20	3.10	<0.004	0.66	0.07	0.98	22.59	100.49
HP7		7.95	53.40	11.09	1.34	0.87	0.32	1.14	3.10	<0.004	0.62	0.07	0.65	27.46	100.06
HPG2	观音桥段 砂岩	8.11	69.71	3.41	1.74	4.31	6.99	0.28	0.89	0.14	0.17	0.16	0.67	11.66	100.13
HPG3		8.12	69.03	5.62	1.92	2.31	7.39	0.74	1.83	0.06	0.34	2.93	0.55	7.40	100.12
HP8	龙马溪组 泥岩	8.40	76.63	8.80	1.09	0.60	0.08	0.86	2.48	0.00	0.45	0.07	0.79	8.43	100.28
HP9		8.53	75.99	7.72	1.54	0.58	0.25	0.62	2.25	0.01	0.39	0.05	1.00	10.33	100.71
HP10		8.58	78.16	6.72	1.42	0.47	0.19	0.66	1.95	<0.004	0.34	0.06	0.47	9.65	100.08
HP11		8.66	70.91	9.20	3.45	0.68	0.23	0.64	2.64	<0.004	0.46	0.05	0.82	11.27	100.34
HP12		8.78	77.28	7.85	1.19	0.60	0.29	0.63	2.18	<0.004	0.40	0.04	0.62	9.13	100.19
HP13		9.48	79.43	7.28	0.91	0.54	0.09	0.63	2.02	<0.004	0.38	0.08	0.44	8.28	100.09

表 2 扬子地块北缘城口蒙蒙溪剖面五峰组—龙马溪组泥岩主量元素分析结果(%)

Table 2 Analysical results of major elements of Wufeng Formation and Longmaxi Formation mudstones from Mengmengxi profile in Chengkou County, northern margin of Yangtz block(%)

样品	地层及岩性	深度(m)	SiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	MgO	CaO	Na ₂ O	K ₂ O	MnO ₂	TiO ₂	P ₂ O ₅	FeO	烧失量	总含量
MM1	五峰组 硅质泥岩	0.58	73.86	9.61	4.1	0.853	0.115	0.166	2.97	0.005	0.548	0.127	2.36	7.26	101.97
MM2		1.22	67.57	5.67	8.11	0.416	0.159	0.72	1.42	0.004	0.323	0.038	1.24	15.2	100.87
MM3		2.68	73.08	7.97	1.46	0.55	0.141	0.845	2.24	0.006	0.418	0.041	0.67	12.84	100.26
MM4		3.55	83.36	4.61	1.38	0.319	0.117	0.374	1.27	<0.004	0.243	0.035	0.73	8.07	100.51
MM5		4.02	74.78	9.04	1.38	0.619	0.15	0.791	2.47	<0.004	0.466	0.086	1.14	9.94	100.86
MM6		4.54	87.16	4.26	1.03	0.285	0.145	0.365	1.14	0.004	0.195	0.058	0.9	5.05	100.59
MM7		5.30	68.96	11.48	3.25	0.773	0.221	1.05	2.98	0.004	0.591	0.094	1.85	10.25	101.50
MM8		5.88	72.3	9.07	4.31	0.516	0.146	1.18	2.33	0.004	0.52	0.048	0.78	9.14	100.34
MM9		7.57	78.93	7.04	1.96	0.411	0.125	0.813	1.93	<0.004	0.427	0.052	0.77	7.98	100.44
MM10		7.86	71.13	9.52	5.16	0.584	0.133	1.07	2.59	0.007	0.532	0.061	0.87	8.67	100.33
MM11		8.15	75.63	7.79	3.25	0.473	0.129	0.933	2.17	0.004	0.44	0.065	1.57	8.72	101.17
MM12		8.73	71.63	8.18	3.97	0.496	0.123	0.972	2.24	0.006	0.458	0.065	1.07	11.3	100.51
MM13		9.14	71.61	9.38	3.64	0.567	0.163	1.02	2.61	0.005	0.557	0.05	1.59	9.93	101.12
MM14		9.55	80.21	6.37	2.49	0.472	0.222	0.617	1.72	0.006	0.333	0.066	0.74	7.15	100.40
MM15		9.84	74.44	9.58	2.6	0.639	0.131	0.772	2.73	0.007	0.551	0.054	0.96	8.04	100.50
MM16		10.06	72.15	10.63	2.38	0.737	0.146	0.715	3.05	0.007	0.619	0.057	2.15	9.02	101.66
MM17		10.49	84.36	5.03	1.49	0.569	0.644	0.416	1.4	0.01	0.259	0.093	0.94	5.46	100.67

样品	地层及岩性	深度(m)	SiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	MgO	CaO	Na ₂ O	K ₂ O	MnO ₂	TiO ₂	P ₂ O ₅	FeO	烧失量	总含量
MM18	龙马溪组 泥岩	10.86	79.22	7.17	2.68	0.475	0.158	0.579	2	<0.004	0.38	0.072	0.88	6.86	100.47
MM19		11.15	72.26	9.62	4.43	0.696	0.25	0.764	2.67	0.005	0.529	0.073	0.81	8.28	100.39
MM20		11.44	74.79	9.07	3.23	0.592	0.148	0.715	2.48	<0.004	0.497	0.077	0.98	7.98	100.56
MM21		12.02	71.77	10.38	2.67	0.733	0.136	0.581	2.86	0.009	0.562	0.063	1.05	9.87	100.68
MM22		12.31	70.93	11.73	2.07	0.824	0.213	0.767	3.22	0.004	0.615	0.087	1.82	9.02	101.30
MM23		12.60	74.6	8.17	2.44	0.514	0.269	0.902	2.19	0.004	0.459	0.089	1.01	10.12	100.77
MM24		13.04	70.38	9.63	4.44	0.607	0.161	0.942	2.53	0.007	0.485	0.074	1.04	10.26	100.56
MM25		13.55	72.17	10.04	2.9	0.649	0.193	0.889	2.67	0.008	0.566	0.101	0.99	9.44	100.62
MM26		14.42	72.43	8.03	4.93	0.51	0.128	0.842	2.07	0.007	0.422	0.104	0.96	10.2	100.63
MM27		15.29	39.57	4.82	31.79	0.337	0.123	0.423	1.23	0.005	0.302	0.07	1.27	21.33	101.27
MM28		16.45	75.04	7.27	3.7	0.467	0.16	0.756	1.92	0.008	0.389	0.109	1.08	9.88	100.78
MM29		16.89	76.78	7.56	2.63	0.482	0.131	0.795	2	0.005	0.416	0.111	0.73	8.87	100.51
MM30		17.25	70.16	7.49	7.4	0.485	0.134	0.784	2.03	0.007	0.431	0.117	1.41	10.66	101.11
MM31		19.07	77.29	7.08	2.83	0.457	0.143	0.727	1.85	0.006	0.384	0.102	1.32	8.85	101.04
MM32		20.59	77.81	7.01	2.97	0.437	0.129	0.757	1.83	0.007	0.354	0.091	1.4	8.24	101.04
MM33		22.12	77.77	6.61	2.93	0.402	0.119	0.749	1.7	0.006	0.33	0.082	1.05	8.97	100.72
MM34		22.70	72.96	8.56	3.79	0.504	0.124	1.08	2.11	0.007	0.427	0.088	1.63	10.18	101.46
MM35		23.86	72.35	10.3	1.46	0.694	0.125	1.15	2.82	0.004	0.581	0.05	1.23	10.08	100.84
MM36		25.53	68.32	10.85	4.16	0.661	0.141	1.12	2.6	0.009	0.563	0.108	2.92	10.96	102.41
MM37		26.62	62.52	14.98	3.27	0.997	0.157	1.67	3.8	0.008	0.868	0.094	1.86	11.33	101.55
MM38		29.02	75.03	8.16	2.3	0.517	0.128	0.987	2.15	0.005	0.477	0.039	1.49	9.71	100.99
MM39		30.47	69.39	11.75	2.27	0.782	0.135	0.918	3.12	0.005	0.598	0.085	1.79	10.7	101.54
MM40		30.54	74.53	8.45	2.71	0.513	0.131	1.04	2.3	0.006	0.493	0.039	1.43	9.49	101.13
MM41		31.04	74.14	9.01	3.08	0.566	0.118	1.11	2.33	0.01	0.478	0.043	1.14	8.78	100.81
MM42		31.60	76.96	7.76	2.82	0.456	0.12	1.04	1.99	0.008	0.435	0.04	0.98	8.05	100.66
MM43		32.54	72.15	9.75	3.37	0.623	0.112	1.04	2.53	0.009	0.505	0.046	1.08	9.44	100.66
MM44		32.98	74.92	8.64	2.78	0.576	0.121	0.981	2.29	0.006	0.475	0.047	1.39	8.75	100.98
MM45		33.61	77.27	7.84	2.06	0.48	0.115	1.13	1.94	0.005	0.41	0.046	1.15	8.34	100.79
MM46		34.24	68.75	13.06	3.41	0.794	0.152	1.39	3.24	0.009	0.648	0.086	2.56	8.29	102.39
MM47		34.86	73.92	10.73	2.93	0.669	0.14	1.12	2.76	0.009	0.533	0.056	0.94	6.86	100.67
MM48		35.49	72.5	11.36	3.18	0.764	0.132	1.13	2.94	0.009	0.57	0.06	0.97	7.03	100.65
MM49		36.12	75.23	9.59	3.19	0.602	0.137	1.08	2.49	0.008	0.487	0.075	1.12	6.85	100.86
MM50		37.37	72.41	11.18	3.06	0.683	0.149	1.49	2.78	0.008	0.546	0.069	0.95	7.3	100.63
MM51		38.94	73.11	9.54	4.93	0.639	0.192	0.949	2.54	0.008	0.512	0.071	2.49	7.29	102.27
MM52		40.07	70.61	11.48	4	0.775	0.158	0.993	2.97	0.01	0.582	0.091	0.98	8.03	100.68
MM53		40.50	73.69	10.26	3.32	0.655	0.186	1.04	2.78	0.004	0.552	0.044	2.24	7.12	101.89
MM54		40.63	72.02	11.4	2	0.717	0.136	1.25	2.87	0.006	0.574	0.041	1	8.65	100.66
MM55		41.13	74.68	10.11	2.39	0.66	0.119	0.905	2.72	0.005	0.544	0.045	1.17	7.48	100.83
MM56		42.22	71.52	10.47	3.11	0.698	0.126	1	2.79	0.006	0.586	0.054	1.1	9.29	100.75
MM57		43.75	75.33	9.71	2.52	0.691	0.114	0.696	2.58	0.004	0.52	0.049	1.43	7.31	100.95

表 3 扬子地块北缘城口厚坪剖面五峰组—龙马溪组砂、泥岩微量元素分析及计算结果(×10⁻⁶)

Table 3 Analysical and calculated results of minor elements of Wufeng Formation and Longmaxi Formation sandstones and mudstones from Houping profile in Chengkou County, northern margin of Yangtz block (×10⁻⁶)

样品	HP1	HP2	HP3	HP4	HP5	HP6	HP7	HPG2	HPG3	HP8	HP9	HP10	HP11	HP12	HP13
Sc	10.2	6.59	5.4	5.01	3.75	8.75	12	5.63	4.72	6.5	5.56	5.95	6.57	6.5	4.84
V	1200	921	1253	1129	233	326	295	55.2	50.7	654	1219	902	1079	1100	565
Cr	204	114	116	124	37.6	80	75.3	19.7	25.1	102	75.3	62.8	102	69.6	55.2
Co	1.11	2.5	0.995	0.876	0.826	2.19	2.67	5.88	8.21	1.4	0.867	0.901	1.92	0.743	0.745
Ni	65.7	68	64.7	63.7	22.4	27.6	40.6	59	73.5	85.2	73.2	72	93.5	79.5	63.3
Cu	21.8	37.5	17.9	53.9	27.3	33.3	19.8	15.3	18.7	19.5	15.3	21.4	30.7	30.8	24.7
Zn	25.2	34.6	20.2	17.9	20.9	32.8	27.9	85.8	48.6	49.1	19.5	43.6	21.4	58.1	10.7
Rb	97	81.7	79.4	69.7	60.7	135	135	36.4	55.3	98.3	92.4	80.2	106	95	83
Sr	33.4	44.7	31.6	30.1	27.1	44.1	50.4	312	458	43.5	40.6	39.7	49	51	41

样品	HP1	HP2	HP3	HP4	HP5	HP6	HP7	HPG2	HPG3	HP8	HP9	HP10	HP11	HP12	HP13
Y	31. 1	30. 6	23. 5	20. 4	17. 8	42. 8	42. 8	18. 3	68	10. 3	17. 9	21. 2	35	22. 5	19. 7
Sb	0. 661	1. 41	1. 85	3. 47	5. 8	1. 76	2. 27	6. 34	7. 16	9. 25	6. 54	3. 63	22. 1	7. 54	5. 63
Cs	8. 48	5. 77	5. 69	4. 77	3. 75	10. 7	10. 5	1. 79	1. 89	44	5. 88	4. 93	7. 32	6. 07	5. 25
Ba	2126	3041	1659	1748	1674	2260	2676	3554	3022	2702	2649	2954	3222	3015	3117
La	38. 1	37. 7	31. 4	28. 7	30. 7	57. 4	58. 2	14. 3	45. 3	26	31. 8	28. 4	35. 5	30. 2	26. 5
Ce	67. 5	65. 9	54. 7	46. 8	49. 9	94. 9	101	24	74. 2	41. 4	53. 4	46. 9	61. 5	49. 3	45. 1
Pr	8. 71	8. 76	7. 42	6	5. 61	9. 83	10. 7	3. 14	9. 15	4. 96	6. 71	6. 05	7. 82	5. 9	5. 61
Nd	35. 8	35. 4	28. 6	23	19. 5	37. 8	42. 1	12. 9	39. 8	17	24. 4	22	29. 5	21	21. 2
Sm	6. 63	6. 66	5. 26	3. 71	2. 65	6. 25	7. 14	2. 45	7. 47	2. 25	3. 16	3. 07	3. 71	2. 52	3. 58
Eu	1. 43	1. 33	1. 08	0. 809	0. 651	1. 09	1. 2	0. 862	2. 07	0. 475	0. 716	0. 738	1. 15	0. 633	1. 09
Gd	6. 52	6. 17	5. 07	3. 87	3. 11	6. 83	7. 48	2. 58	7. 62	2. 41	3. 31	3. 32	4. 09	2. 89	3. 32
Tb	1. 06	1. 04	0. 778	0. 619	0. 482	1. 11	1. 2	0. 412	1. 37	0. 349	0. 515	0. 556	0. 691	0. 458	0. 568
Dy	6. 06	5. 63	4. 47	3. 59	2. 77	6. 33	6. 73	2. 17	7. 95	1. 98	2. 93	3. 13	4. 13	2. 92	3. 16
Ho	1. 24	1. 2	0. 852	0. 738	0. 612	1. 46	1. 44	0. 461	1. 92	0. 394	0. 601	0. 693	0. 919	0. 64	0. 656
Er	3. 11	3. 13	2. 36	2. 05	1. 77	3. 92	3. 98	1. 47	4. 91	1. 17	1. 73	1. 98	2. 83	1. 88	1. 97
Tm	0. 578	0. 543	0. 399	0. 354	0. 315	0. 726	0. 705	0. 245	0. 83	0. 216	0. 299	0. 322	0. 486	0. 354	0. 334
Yb	3. 51	3. 4	2. 39	2. 3	2. 05	4. 78	4. 53	1. 62	5. 06	1. 56	1. 95	2. 19	3. 04	2. 21	2. 26
Lu	0. 523	0. 515	0. 36	0. 328	0. 304	0. 716	0. 668	0. 22	0. 724	0. 234	0. 291	0. 328	0. 407	0. 339	0. 314
Pb	16. 5	10. 3	21	35. 9	31. 3	33. 1	50. 7	10. 7	14. 4	22. 7	31. 9	20. 8	49	23. 8	23
Th	9. 45	7. 68	7. 99	8. 07	7. 29	16. 3	13. 7	3. 97	6. 64	10. 8	8. 79	8. 39	7. 48	9. 02	8. 21
U	7. 6	9. 83	10. 9	7. 65	18. 1	22. 3	35. 2	3. 46	5. 38	26. 5	23. 5	23. 9	23. 3	19	13. 4
Nb	14. 6	10. 1	9. 96	9. 81	11. 1	17. 7	18. 7	4. 41	7. 46	9. 47	9	7. 72	11. 3	9. 44	8. 61
Ta	0. 795	0. 777	0. 755	0. 656	0. 809	1. 37	1. 58	0. 312	0. 51	0. 854	0. 718	0. 611	0. 778	0. 681	0. 634
Zr	97. 5	82. 4	70. 5	63. 7	73. 7	126	142	34	86	71. 3	63. 9	59. 3	83. 3	68	59. 3
Hf	2. 22	2. 41	1. 95	1. 75	2. 03	3. 35	3. 6	0. 779	2. 5	2. 19	1. 83	1. 63	1. 74	1. 78	1. 39
ΣREE	180. 77	177. 38	145. 14	122. 87	120. 42	233. 14	247. 07	66. 83	208. 37	100. 40	131. 81	119. 68	155. 77	121. 24	115. 66
$\frac{LREE}{HREE}$	7. 00	7. 20	7. 70	7. 87	9. 55	8. 01	8. 24	6. 28	5. 86	11. 08	10. 34	8. 56	8. 39	9. 37	8. 19
La/Yb	10. 85	11. 09	13. 14	12. 48	14. 98	12. 01	12. 85	8. 83	8. 95	16. 67	16. 31	12. 97	11. 68	13. 67	11. 73
(La/Yb) _N	7. 79	7. 95	9. 42	8. 95	10. 74	8. 61	9. 22	6. 33	6. 42	11. 95	11. 70	9. 30	8. 38	9. 80	8. 41
δEu	0. 66	0. 63	0. 64	0. 65	0. 69	0. 51	0. 50	1. 05	0. 84	0. 62	0. 68	0. 71	0. 90	0. 72	0. 97
δCe	0. 91	0. 89	0. 88	0. 87	0. 93	0. 98	0. 99	0. 88	0. 89	0. 89	0. 90	0. 88	0. 90	0. 91	0. 91

表 4 扬子地块北缘城口蒙蒙溪剖面五峰组—龙马溪组泥岩微量元素分析及计算结果(×10⁻⁶)

Table 4 Analysical and calculated results of minor elements of Wufeng Formation and Longmaxi Formation mudstones from Mengmengxi profile in Chengkou County, northern margin of Yangtz Block (×10⁻⁶)

样品	MM1	MM2	MM3	MM4	MM5	MM6	MM7	MM8	MM9	MM10	MM11	MM12	MM13	MM14
Sc	9. 13	4. 4	6. 76	3. 92	7. 26	3. 06	8. 77	6. 18	8. 38	8. 68	5. 3	7. 88	7. 01	5. 65
V	473	231	714	342	526	195	585	420	221	396	272	343	356	258
Cr	111	39. 8	82. 6	45. 7	73. 2	25. 3	76. 5	64. 9	40. 6	62. 1	42. 8	47. 8	59. 6	40. 9
Co	4. 3	3. 36	2. 02	0. 726	1. 08	1. 63	1. 98	3. 84	0. 993	6. 03	1. 58	4. 91	3. 39	6. 79
Ni	78. 5	26. 8	97. 5	52. 6	66. 8	48. 5	66. 2	75. 4	38. 6	85. 3	44. 7	73. 6	68. 8	86. 2
Cu	36. 2	34. 1	64. 5	18	23. 2	20	29. 7	36. 2	14. 8	74	25	58. 6	40. 5	49. 2
Zn	30. 3	16. 5	26. 6	17. 5	43. 2	27. 9	25. 4	13. 8	19. 3	30	21. 8	30. 9	36. 1	77. 6
Rb	119	59. 4	91. 8	53. 7	103	40. 1	150	95. 8	69. 5	108	76. 4	88. 9	108	72. 2
Sr	54. 8	33. 9	60	48. 4	93. 3	53. 9	129	63. 9	60. 1	69. 6	51. 1	58. 1	74. 5	55. 2
Y	28. 9	17. 9	21. 3	14	21. 6	14. 3	26. 8	17. 4	13. 5	22. 2	15. 8	19. 2	22. 5	22. 4
Sb	2. 76	8. 71	16. 5	5. 51	4. 21	1. 91	11. 7	7. 39	2. 26	6. 44	1. 79	2. 42	3. 37	1. 5
Cs	7. 97	3. 84	53. 6	2. 97	6. 24	2. 18	8. 64	5. 27	3. 88	6. 38	4. 25	4. 91	6. 61	4. 07
Ba	1159	1191	2765	2418	3340	2316	3070	2844	6480	4152	3519	3745	3738	5764
La	49	26. 3	32. 5	20. 7	34. 6	13. 9	45. 5	33. 9	29. 5	38. 7	28. 2	35. 4	42. 2	26. 1
Ce	79. 4	44	60. 5	36. 3	59. 4	25. 6	79. 3	57. 9	48. 8	69. 6	51. 4	62. 6	73. 6	47. 5
Pr	8. 92	5. 04	8. 04	4. 8	7. 43	3. 39	10. 7	7. 25	6. 02	9. 04	6. 41	7. 96	8. 66	6. 09
Nd	30. 9	17. 8	30. 5	18. 4	26. 3	14. 2	39. 9	23. 8	21. 3	34. 1	23. 3	31. 7	31. 8	23. 5

样品	MM1	MM2	MM3	MM4	MM5	MM6	MM7	MM8	MM9	MM10	MM11	MM12	MM13	MM14
Sm	5.04	2.62	4.35	2.74	3.78	2.77	6.3	2.82	2.92	5.01	3.23	5.03	4.14	4.48
Eu	1.03	0.602	1.06	0.789	1.03	0.896	0.958	0.369	0.695	1.21	0.985	1.68	1.21	1.12
Gd	4.71	2.83	4.1	2.57	3.56	2.24	4.75	2.68	2.92	4.77	3.19	4.51	4.06	3.85
Tb	0.688	0.423	0.675	0.374	0.53	0.378	0.774	0.413	0.392	0.701	0.463	0.681	0.588	0.64
Dy	4.02	2.29	3.42	1.94	2.9	1.98	3.65	2.14	2	3.61	2.43	3.49	3.12	3.55
Ho	0.919	0.521	0.645	0.416	0.631	0.422	0.705	0.447	0.399	0.72	0.48	0.664	0.663	0.7
Er	3.14	1.57	2.01	1.29	2.05	1.24	2.08	1.37	1.31	2.26	1.54	1.98	2.21	2.09
Tm	0.616	0.258	0.303	0.219	0.353	0.197	0.365	0.251	0.235	0.347	0.253	0.313	0.381	0.374
Yb	4.18	1.62	1.94	1.42	2.34	1.26	2.6	1.81	1.47	2.23	1.63	2.08	2.47	2.34
Lu	0.687	0.256	0.281	0.227	0.366	0.199	0.386	0.255	0.253	0.344	0.272	0.326	0.411	0.357
Pb	35.1	28.2	21.8	15.7	27.4	8.25	34.8	29	16.6	25.5	18.4	20.8	28.2	15.6
Th	12.4	6.6	9.78	5.3	8.88	4.05	11	8.37	7.62	12.4	8.78	10.6	11.4	8.53
U	4.07	14.2	23.7	10.3	14.3	8.95	16.7	11	8.04	16.3	10.2	13.8	13.3	16.2
Nb	19.9	8.66	10.4	6.36	12.2	4.15	14.6	11.7	8.76	13.1	9.22	11.3	17.3	12.7
Ta	1.02	0.563	0.752	0.45	1	0.31	1.42	0.845	0.603	0.909	0.656	0.707	1.04	0.806
Zr	135	55.9	71.5	39.6	77.1	29.3	104	86.7	59.3	82.7	62.3	78.8	110	82.8
Hf	3.2	1.47	1.85	1.16	2.16	0.896	2.61	1.88	1.74	2.4	1.81	2.08	3.17	2.29
ΣREE	193.25	106.13	150.32	92.19	145.27	68.67	197.97	135.41	118.21	172.64	123.78	158.41	175.51	122.69
LREE														
HREE	9.19	9.87	10.24	9.90	10.41	7.68	11.93	13.46	12.17	10.52	11.07	10.28	11.62	7.83
La/Yb	11.72	16.23	16.75	14.58	14.79	11.03	17.50	18.73	20.07	17.35	17.30	17.02	17.09	11.15
(La/Yb) _N	8.41	11.65	12.02	10.46	10.61	7.91	12.55	13.43	14.39	12.45	12.41	12.21	12.26	8.00
δEu	0.65	0.68	0.77	0.91	0.86	1.10	0.54	0.41	0.73	0.76	0.94	1.08	0.90	0.82
δCe	0.93	0.94	0.92	0.89	0.91	0.91	0.88	0.91	0.90	0.91	0.94	0.91	0.94	0.92

样品	MM15	MM16	MM17	MM18	MM19	MM20	MM21	MM22	MM23	MM24	MM25	MM26	MM27	MM28
Sc	7.02	7.67	4.53	4.83	7.33	6.81	7.34	8.72	5.6	8.4	9.31	6.47	5.2	5.94
V	339	283	163	288	316	320	263	401	260	352	301	272	263	263
Cr	50.9	59	28.4	41.7	51	55.8	48.5	69.1	47.6	55.9	60.4	48.2	38.9	43.6
Co	5.21	5.18	5.48	4.97	7.74	7.26	6.12	1.72	3	8.79	10.4	9.07	8.78	8.36
Ni	80.2	72.4	58.2	73.9	91.7	94.6	63.7	58.6	62.7	105	104	102	98.7	103
Cu	48.7	43.2	30.4	44.8	62.3	53.3	47.4	19.5	26.6	68.8	67.2	55.1	53	50
Zn	30.9	45.3	143	30.2	63.7	66.2	53.4	33.3	47.5	117	139	148	59.5	114
Rb	100	124	57.3	78.2	104	106	111	148	83	110	109	79.1	58.8	71.8
Sr	61.7	94.6	64.5	58.2	56.4	76.5	87.2	123	88	81.3	68.4	59.4	42.6	53.5
Y	19.8	24.4	21.9	22.5	25.2	27.8	29.2	41.4	20.9	28.6	32.9	28.6	18.5	26.1
Sb	6.91	5.94	0.568	4.34	5.2	2.47	2.33	1.76	4	5.36	4.82	3.6	4.11	4.07
Cs	6.06	7.72	2.91	4.04	6.22	6.08	6.79	8.57	4.51	6.57	5.84	4.48	2.71	4.08
Ba	3179	3291	3629	7278	3258	3184	3319	3170	5053	4699	4625	5299	3451	3579
La	40.6	53.7	18.2	19.8	34.9	38	45.1	53	29.6	38.3	37.7	29.1	22.4	26.9
Ce	68.4	96.3	33.5	36.3	59.5	68.9	84.2	97.1	53.2	69.7	68.6	51.5	38	48.3
Pr	8.23	11.3	4.44	4.75	7.04	8.49	9.53	12.8	6.3	8.89	8.47	7.12	4.99	6.31
Nd	29.6	41.5	17.7	19.1	26	32.2	35	45.3	23.5	35.8	32.9	28.5	18.1	23.6
Sm	3.82	5.28	3.62	4.23	4.88	5.61	5.02	6.64	3.83	6.47	6.76	6.24	3.21	4.95
Eu	1.13	1.39	1.42	1	1.52	1.57	1.47	0.999	0.838	1.6	1.56	1.51	0.36	1.52
Gd	3.92	5.29	3.24	3.61	4.35	5.02	4.7	5.52	3.54	5.69	5.56	5.31	2.84	4.23
Tb	0.55	0.703	0.534	0.645	0.7	0.806	0.718	0.919	0.549	0.936	1	0.922	0.508	0.725
Dy	3.14	3.42	1.94	2.9	1.98	3.65	2.14	2	3.61	2.43	3.49	3.12	2.61	3.81
Ho	0.635	0.645	0.416	0.631	0.422	0.705	0.447	0.399	0.72	0.48	0.664	0.663	0.515	0.789
Er	1.98	2.01	1.29	2.05	1.24	2.08	1.37	1.31	2.26	1.54	1.98	2.21	1.45	2.26
Tm	0.356	0.303	0.219	0.353	0.197	0.365	0.251	0.235	0.347	0.253	0.313	0.381	0.251	0.384
Yb	2.24	1.94	1.42	2.34	1.26	2.6	1.81	1.47	2.23	1.63	2.08	2.47	1.69	2.25
Lu	0.362	0.281	0.227	0.366	0.199	0.386	0.255	0.253	0.344	0.272	0.326	0.411	0.246	0.36
Pb	18.9	21.8	15.7	27.4	8.25	34.8	29	16.6	25.5	18.4	20.8	28.2	20.1	16.2
Th	12.2	9.78	5.3	8.88	4.05	11	8.37	7.62	12.4	8.78	10.6	11.4	7.37	8.75
U	10.8	23.7	10.3	14.3	8.95	16.7	11	8.04	16.3	10.2	13.8	13.3	13.1	18.2
Nb	19.7	10.4	6.36	12.2	4.15	14.6	11.7	8.76	13.1	9.22	11.3	17.3	7.68	8.88

样品	MM1	MM2	MM3	MM4	MM5	MM6	MM7	MM8	MM9	MM10	MM11	MM12	MM13	MM14
Ta	1. 67	0. 752	0. 45	1	0. 31	1. 42	0. 845	0. 603	0. 909	0. 656	0. 707	1. 04	0. 589	0. 637
Zr	110	71. 5	39. 6	77. 1	29. 3	104	86. 7	59. 3	82. 7	62. 3	78. 8	110	57	65. 2
Hf	3. 47	1. 85	1. 16	2. 16	0. 896	2. 61	1. 88	1. 74	2. 4	1. 81	2. 08	3. 17	1. 32	1. 88
ΣREE	164. 96	150. 32	92. 19	145. 27	68. 67	197. 97	135. 41	118. 21	172. 64	123. 78	158. 41	175. 51	97. 17	126. 39
LREE														
HREE	11. 51	10. 24	9. 90	10. 41	7. 68	11. 93	13. 46	12. 17	10. 52	11. 07	10. 28	11. 62	8. 61	7. 54
La/Yb	18. 13	16. 75	14. 58	14. 79	11. 03	17. 50	18. 73	20. 07	17. 35	17. 30	17. 02	17. 09	13. 25	11. 96
(La/Yb) _N	13. 00	12. 02	10. 46	10. 61	7. 91	12. 55	13. 43	14. 39	12. 45	12. 41	12. 21	12. 26	9. 51	8. 58
δEu	0. 89	0. 77	0. 91	0. 86	1. 10	0. 54	0. 41	0. 73	0. 76	0. 94	1. 08	0. 90	0. 36	1. 02
δCe	0. 92	0. 92	0. 89	0. 91	0. 91	0. 88	0. 91	0. 90	0. 91	0. 94	0. 91	0. 94	0. 88	0. 91

样品	MM29	MM30	MM31	MM32	MM33	MM34	MM35	MM36	MM37	MM38	MM39	MM40	MM41	MM42
Sc	6. 36	6. 99	6. 08	5. 38	4. 6	6. 44	7. 19	8. 77	9. 5	5. 79	9. 25	5. 99	8. 83	7. 79
V	227	286	220	232	162	199	194	281	240	195	254	179	180	146
Cr	45. 1	49. 9	43. 2	41. 4	31. 5	42. 5	47. 6	61. 1	68. 2	48. 6	67. 9	49. 4	49. 4	40. 8
Co	8. 05	8. 3	8. 38	7. 58	6. 49	10. 6	1. 01	11. 4	5. 03	2. 68	1. 75	5. 3	8. 21	6. 03
Ni	87. 5	92. 7	93	102	73	86	43. 9	116	59	47. 3	50. 2	54. 1	73. 6	54. 3
Cu	43. 5	59. 5	43. 2	41. 7	31. 2	50. 3	21	76. 8	38. 4	32. 4	26. 4	58. 3	85. 7	67. 4
Zn	83. 2	42. 6	117	67. 4	52. 3	101	26	164	47. 7	24. 5	35. 8	29. 1	37. 6	25. 4
Rb	76. 6	85. 9	73. 9	70	54. 9	76. 4	108	107	141	83. 8	130	96	97. 8	78. 5
Sr	55. 9	67. 7	49. 3	44. 7	43. 4	54. 2	81. 3	134	102	122	145	69	71. 4	63. 3
Y	25. 8	24. 4	26. 5	24. 1	17. 5	22	16. 4	23. 1	31. 8	16	25. 2	20. 5	26. 5	19
Sb	0. 686	4. 08	2. 96	2. 81	1. 9	2. 56	3	3. 73	3. 35	0. 308	2. 07	1. 81	0. 979	2. 45
Cs	4. 32	4. 57	4. 07	3. 75	2. 75	4. 17	5. 73	6. 24	8. 49	4. 43	6. 83	5. 76	5. 51	4. 31
Ba	3484	3391	3397	2733	2874	3816	3772	3203	5192	9693	3502	3471	5463	3560
La	28. 7	31	25. 6	22. 9	20. 4	29. 9	48. 7	44. 9	74. 8	33. 3	50. 9	36. 6	38	31. 2
Ce	49. 8	53. 2	47. 6	39. 9	36. 7	52	87. 8	82. 6	133	56	88. 6	66. 1	66. 6	54. 7
Pr	6. 43	7. 24	6. 22	5. 73	5. 04	6. 47	10. 4	10. 7	14. 3	6. 9	11. 2	7. 9	8. 86	6. 74
Nd	24. 5	27. 3	23. 8	22. 2	20. 1	25. 3	37. 3	42. 2	52. 7	24. 2	43. 9	27. 4	29. 7	24
Sm	5. 2	5. 37	4. 96	4. 43	4. 14	5. 03	4. 85	7. 38	8. 06	3. 45	6. 99	3. 66	4. 49	3. 6
Eu	1. 58	1. 63	1. 59	0. 917	0. 754	1. 53	1. 11	1. 55	2. 01	0. 901	1. 8	1. 25	0. 962	1. 38
Gd	4. 36	4. 52	4. 4	4. 04	3. 4	4. 08	4. 42	5. 57	6. 94	3. 37	5. 69	3. 82	4. 26	3. 63
Tb	0. 769	0. 756	0. 777	0. 737	0. 555	0. 695	0. 628	0. 878	1. 11	0. 486	0. 852	0. 594	0. 707	0. 58
Dy	4. 04	3. 9	4. 2	3. 69	2. 92	3. 62	3. 33	4. 38	6. 01	2. 55	4. 54	3. 23	4. 04	3. 12
Ho	0. 839	0. 808	0. 904	0. 738	0. 545	0. 756	0. 609	0. 807	1. 17	0. 517	0. 886	0. 693	0. 849	0. 617
Er	2. 42	2. 35	2. 42	1. 92	1. 4	2. 15	2. 01	2. 64	3. 59	1. 68	2. 87	2. 14	2. 85	1. 91
Tm	0. 405	0. 383	0. 394	0. 314	0. 225	0. 328	0. 343	0. 413	0. 613	0. 282	0. 483	0. 363	0. 471	0. 315
Yb	2. 45	2. 42	2. 38	2. 03	1. 53	2. 13	2. 22	2. 67	3. 82	1. 88	3. 1	2. 23	2. 98	2. 08
Lu	0. 4	0. 386	0. 372	0. 278	0. 21	0. 333	0. 361	0. 424	0. 568	0. 334	0. 474	0. 365	0. 477	0. 319
Pb	14	20. 3	14. 5	13. 7	10. 7	15. 8	19. 9	20. 6	26. 2	14. 8	29. 7	21	21	17. 9
Th	9. 57	10. 5	8. 46	7. 16	6. 6	10. 4	11. 9	12. 9	15. 8	9. 59	14. 9	12. 3	12. 6	11
U	17. 5	16. 6	18. 5	13. 2	11. 2	20	13. 9	125	16. 8	8. 6	18. 4	12. 8	14. 3	12. 1
Nb	9. 13	10. 4	8. 86	7. 72	6. 83	10. 5	13. 3	21. 3	35. 9	11. 8	18	13. 8	13. 3	10. 7
Ta	0. 662	0. 746	0. 613	0. 525	0. 438	0. 68	1. 06	1. 45	3. 69	0. 75	1. 12	0. 881	0. 852	0. 724
Zr	73. 1	74. 8	65. 6	57. 3	48. 8	64. 5	108	119	227	77. 6	121	92. 6	106	73. 1
Hf	2. 02	2. 2	1. 94	1. 31	1. 03	1. 81	3. 22	3. 66	7. 54	2. 21	3. 54	2. 63	2. 76	2. 09
ΣREE	131. 89	141. 26	125. 62	109. 82	97. 92	134. 32	204. 08	207. 11	308. 69	135. 85	222. 29	156. 35	165. 25	134. 19
LREE														
HREE	7. 41	8. 10	6. 93	6. 99	8. 08	8. 53	13. 66	10. 65	11. 96	11. 24	10. 76	10. 64	8. 93	9. 67
La/Yb	11. 71	12. 81	10. 76	11. 28	13. 33	14. 04	21. 94	16. 82	19. 58	17. 71	16. 42	16. 41	12. 75	15. 00
(La/Yb) _N	8. 40	9. 19	7. 72	8. 09	9. 56	10. 07	15. 74	12. 06	14. 05	12. 71	11. 78	11. 77	9. 15	10. 76
δEu	1. 01	1. 01	1. 04	0. 66	0. 61	1. 03	0. 73	0. 74	0. 82	0. 81	0. 87	1. 02	0. 67	1. 17
δCe	0. 90	0. 87	0. 92	0. 85	0. 89	0. 92	0. 96	0. 92	1. 00	0. 91	0. 91	0. 95	0. 89	0. 92

样品	MM43	MM44	MM45	MM46	MM47	MM48	MM49	MM50	MM51	MM52	MM53	MM54	MM55	MM56	MM57
Sc	7. 3	7. 19	6	10. 2	9. 76	10. 6	8. 11	7. 73	7. 78	9. 85	6. 87	7. 25	7. 12	9. 03	8. 46
V	185	180	164	150	98. 2	155	117	120	132	129	116	108	135	148	148

样品	MM43	MM44	MM45	MM46	MM47	MM48	MM49	MM50	MM51	MM52	MM53	MM54	MM55	MM56	MM57
Cr	52.8	53.2	48.5	57.1	54.8	60	47.1	51.3	52.6	58.1	47.2	47.4	51.2	54.5	45.2
Co	10.6	6.42	3.85	6.99	9.36	13.6	8.66	11.1	12.1	15.8	5.91	5.09	5.57	6.63	2.33
Ni	97.8	55.2	42.9	53.6	51.7	68.8	43	38.9	64.5	67.6	23.7	21.5	39.8	46.6	22.8
Cu	89.7	50.5	68	57.4	78	45.5	42.6	42.8	42.2	60.5	43.9	66.6	62.1	66.3	45.3
Zn	16.4	30.5	32.1	40.9	29.7	120	48.4	54.4	112	120	33.6	32.5	37.5	37.8	35.2
Rb	101	98.6	85.3	116	119	129	105	115	110	122	109	117	113	124	117
Sr	67.5	66.3	68.2	119	85.4	80.3	83.1	79.7	98.4	89.7	78.4	74.5	75.3	70.8	93.7
Y	19.1	19.3	18	21.9	20.6	27	20	14.1	19.7	16.4	15.9	19.1	18.7	19.2	22.8
Sb	2.85	2.81	2.73	0.889	1.62	0.64	0.823	1.1	1.31	1.34	0.765	1.3	1.29	1.8	0.644
Cs	4.96	5.44	4.83	6.64	5.75	7.14	5.3	6.18	5.47	7.35	6.38	6.88	6.48	7.19	6.28
Ba	2652	3444	3496	2908	2751	3392	3907	3085	6231	3026	3559	3023	3624	2980	6738
La	32.6	34.4	34	37.8	36.7	39.4	34.1	32.6	33.9	35.2	34	35.8	37.4	36.7	38
Ce	60	61.6	57.4	69.6	71	72.5	62.1	60.2	62	69.5	62.4	70.1	69.2	67	67.9
Pr	7.87	7.62	6.93	8.92	9.43	8.85	7.63	6.73	7.91	7.22	7.29	6.98	8.54	7.04	8.8
Nd	28.3	28	25.7	32.5	34.2	33.8	29.2	23.5	29.4	28.3	27.1	25.9	29	25.5	31.9
Sm	4.42	3.97	3.85	5.7	6.06	6.73	4.87	3.34	5.19	4.7	3.51	4.01	4.4	3.83	5.29
Eu	0.769	1.27	1.09	1.3	0.982	1.64	1.56	0.797	1.22	0.566	1.19	0.593	1.31	0.583	1.07
Gd	3.58	3.74	3.68	4.66	4.76	5.45	4.18	3.02	4.28	3.69	3.31	3.17	3.82	3.26	4.24
Tb	0.586	0.61	0.576	0.765	0.779	0.936	0.69	0.457	0.692	0.564	0.472	0.511	0.583	0.5	0.714
Dy	3.04	3.27	3.04	3.81	4.12	5.01	3.54	2.44	3.56	2.98	2.5	2.7	3.25	2.91	3.95
Ho	0.597	0.668	0.612	0.739	0.782	0.97	0.72	0.438	0.709	0.514	0.484	0.539	0.625	0.548	0.816
Er	1.69	2.04	1.92	2.36	2.17	2.94	2.16	1.52	2.05	1.85	1.68	1.93	2.02	2	2.61
Tm	0.285	0.344	0.337	0.377	0.359	0.473	0.367	0.239	0.351	0.253	0.29	0.286	0.343	0.279	0.456
Yb	1.94	2.26	2.16	2.38	2.4	3.06	2.38	1.48	2.22	1.66	1.84	1.79	2.12	1.76	2.89
Lu	0.272	0.348	0.353	0.377	0.333	0.471	0.4	0.237	0.351	0.257	0.291	0.266	0.34	0.274	0.477
Pb	21.8	22.5	19.9	18	18.2	18.2	17.8	20	23.6	19.3	23.4	15.8	24	20.3	24.6
Th	12.6	10.9	9.59	13.2	12	13.9	11.6	12.4	13.3	12.1	11	12.2	13	10.9	12.3
U	9.65	10.8	8.5	10.7	12.1	12.7	9.6	8.27	20.6	15.7	7.35	12.9	11.6	10.3	11.7
Nb	10.9	12.3	7.83	13.3	12.1	14.1	12.4	14.1	12.7	14.3	13.3	15	16.3	14.9	15.9
Ta	0.865	0.894	0.343	0.94	0.834	0.963	0.863	0.851	0.899	0.851	0.853	1.02	0.944	0.771	0.933
Zr	81.9	81.5	70.7	104	104	104	89.6	105	113	107	96.1	125	113	91.2	121
Hf	1.89	2.4	1.91	2.95	2.59	3.04	2.38	2.85	3.18	2.58	2.77	3.09	2.91	2.01	2.75
ΣREE	145.95	150.14	141.65	171.29	174.08	182.23	153.90	137.00	153.83	157.25	146.36	154.58	162.95	152.18	169.11
LREE	11.17	10.31	10.17	10.07	10.09	8.44	9.66	12.94	9.82	12.36	12.47	12.81	11.44	12.20	9.47
HREE	16.80	15.22	15.74	15.88	15.29	12.88	14.33	22.03	15.27	21.20	18.48	20.00	17.64	20.85	13.15
La/Yb	12.05	10.92	11.29	11.39	10.97	9.24	10.28	15.80	10.95	15.21	13.25	14.35	12.65	14.96	9.43
(La/Yb) _N	0.59	1.01	0.89	0.77	0.56	0.83	1.06	0.77	0.79	0.42	1.07	0.51	0.98	0.50	0.69
δEu	0.92	0.93	0.92	0.93	0.94	0.95	0.94	1.00	0.93	1.07	0.97	1.09	0.95	1.02	0.91
δCe															

组基本接近(表 1)。蒙蒙溪泥岩 Al₂O₃ 含量为 4.26%~14.98%,平均 8.98%,均低于北美页岩 16.9%,也低于川南长宁—双河,但略高于厚坪(表 2)。五峰组 Al₂O₃ 含量为 4.26%~11.48%,平均 7.95%,龙马溪组 Al₂O₃ 含量为 4.82%~14.98%,平均 9.42%,龙马溪组高于五峰组。厚坪五峰组和龙马溪组 MgO 和 CaO 含量分别介于 0.393%~1.01%,平均 0.642%,0.064%~0.803%,平均 0.227%,观音桥段含量远高于五峰组、龙马溪组,分别为 2.31%~4.31%和 6.99%~7.39%;蒙蒙溪两者含量分别为 0.285%~0.997%,平均 0.59%,0.112%~0.644%,平均 0.156%,与厚坪含量相当,

但均远低于川南长宁—双河 MgO 和 CaO 含量 3.0%和 9.51%的平均值(李艳芳等,2015)。川南长宁—双河富有机质层段 SiO₂ 含量高,Al₂O₃ 含量低,贫有机质层段 SiO₂ 含量低,Al₂O₃ 含量高,这种富有机质段高 SiO₂ 含量与生物活动强烈导致的生物硅增加有关,贫有机质段 Al₂O₃ 含量增加与陆源碎屑物质输入有关(李艳芳等,2015)。相比川南长宁—双河,渝东北城口厚坪具有高 SiO₂ 和低 MgO、CaO 的特点,表明城口五峰组—龙马溪组泥岩碎屑组分主要以粉砂质和硅质等陆缘碎屑为主,长宁—双河地区还含有大量的钙质组分。

在主量元素北美页岩标准化图中,厚坪五峰

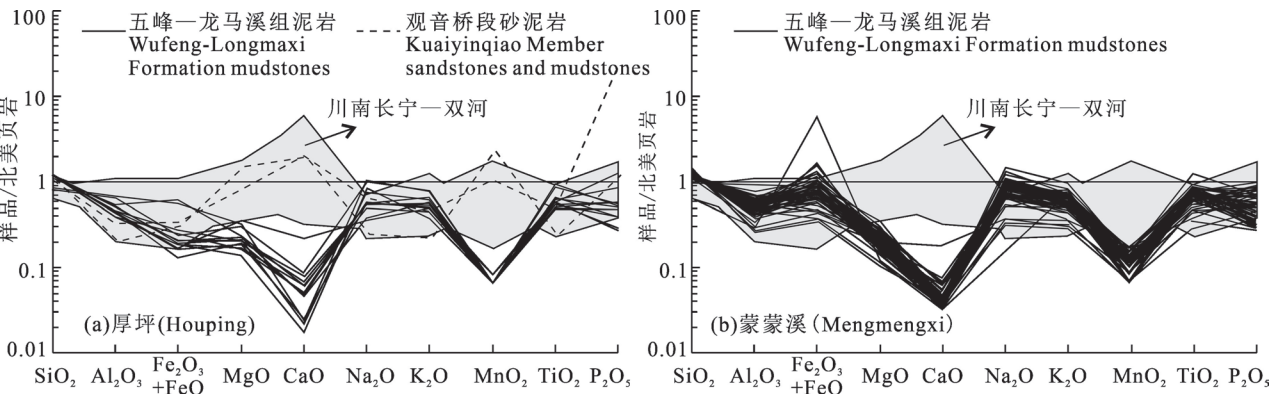


图 2 扬子地块北缘城口五峰组—龙马溪组砂、泥岩主量元素北美页岩标准化图

Fig. 2 NASC-normalized patterns of major elements of the Wufeng Formation and the Longmaxi Formation sandstones and mudstones in Chengkou County, northern margin of Yangtz Block

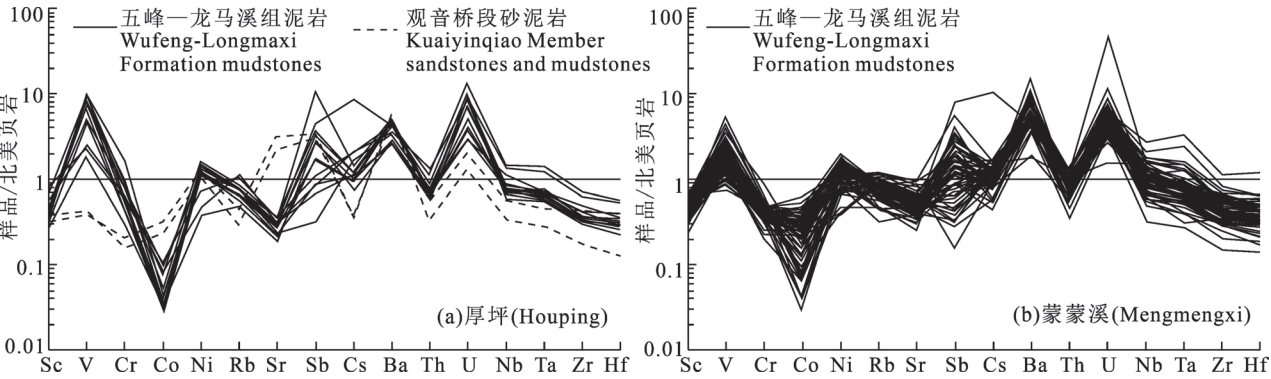


图 3 扬子北缘城口五峰组—龙马溪组砂、泥岩微量元素北美页岩标准化蛛网图

Fig. 3 NASC-normalized spider diagram of trace elements of the Wufeng Formation and the Longmaxi Formation sandstones and mudstones in Chengkou County, northern margin of Yangtz Block

组—龙马溪组泥岩的 $\text{Fe}_2\text{O}_3 + \text{FeO}$ (即全铁 TFeO)、 MgO 、 CaO 、 MnO_2 和 P_2O_5 含量明显低于北美页岩, Na_2O 、 K_2O 和 TiO_2 含量与北美页岩相近, 而观音桥段 2 件砂、泥岩 MgO 、 CaO 、 MnO_2 和 P_2O_5 含量接近或高于北美页岩(图 2), 这与该时期沉积水体变浅和上升洋流的特殊沉积环境有关(熊国庆, 2020); 蒙蒙溪五峰组—龙马溪组泥岩主量元素含量也显示相似的特征(图 2)。主量元素北美页岩标准化图也显示了渝东北城口厚坪和蒙蒙溪比川南长宁—双河 SiO_2 含量更高、 MgO 、 CaO 和 MnO_2 含量更低的特征。蒙蒙溪 $\text{Fe}_2\text{O}_3 + \text{FeO}$ (即全铁 TFeO) 含量相对较高, 尤其是龙马溪组中、下部接近或高于北美页岩, 这一特征也表现在川南长宁—双河龙马溪组中、下部, 表明这一时期可能处于最大海泛面, 盆内沉积水体极度缺氧, 有利于铁富集, 而厚坪未表现出类似的特征, 可能是样品采自龙马溪组底部, 层位较低。

3.2 微量元素

城口和蒙蒙溪五峰组—龙马溪组砂、泥岩微量元素北美页岩标准化蛛网图(图 3)显示, 五峰组—龙马溪组泥岩的微量元素变化趋势基本一致。五峰组—龙马溪组泥岩大离子亲石元素 Sc 、 Sr 较北美页岩相对亏损, 元素 Sb 、 Ba 相对富集, 而观音桥段砂、泥岩 Sc 、 Rb 、 Cs 相对亏损, Sr 、 Sb 、 Ba 元素相对富集。五峰组—龙马溪组泥岩亲铁元素 V 相对北美页岩富集, Co 元素相对亏损, Cr 、 Ni 元素含量接近, 而观音桥段砂、泥岩 V 、 Cr 、 Co 元素相对亏损, 这与五峰组—龙马溪组富有机质泥岩具有较强的吸附能力有关。五峰组—龙马溪组泥岩高场强元素 U 相对北美页岩富集, Zr 、 Hf 元素相对亏损, Nb 、 Ta 元素含量相近, 而厚坪观音桥段砂、泥岩高场强元素也具有相似的变化趋势(图 3)。

3.3 稀土元素

厚坪和蒙蒙溪五峰组—龙马溪组砂、泥岩稀土

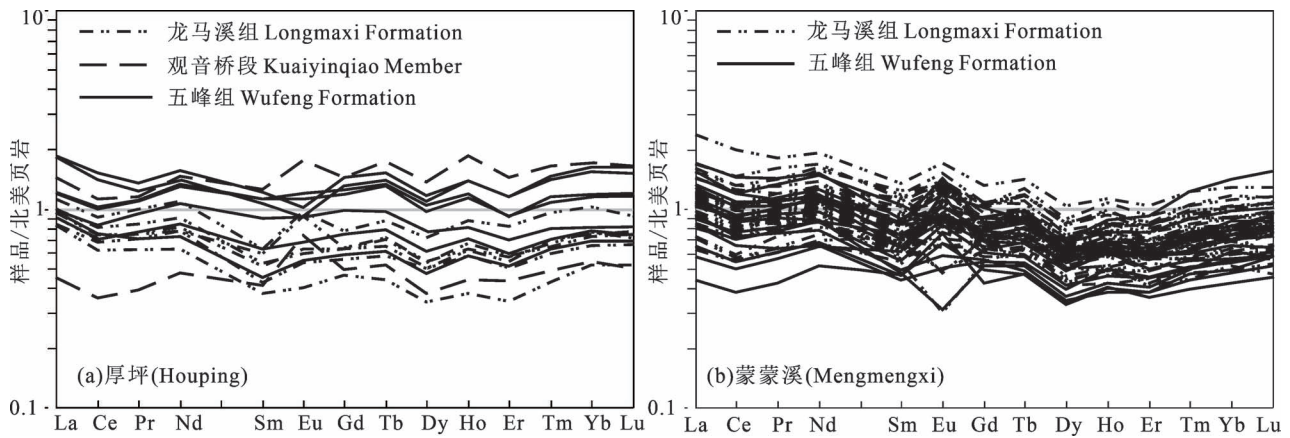


图 4 扬子北缘城口五峰组—龙马溪组砂泥岩稀土元素北美页岩标准化图

Fig. 4 NASC-normalized patterns of major elements of Wufeng Formation and Longmaxi Formation sandstones and mudstones in Chengkou County, northern margin of Yangtze block

元素测试结果见表 3 和表 4, 稀土元素北美页岩标准化图如图 4 所示。文中 δCe 和 δEu 异常分别按 $\delta\text{Ce} = \text{Ce}_\text{N}/(\text{La} \times \text{Pr})_\text{N}^{1/2}$, $\delta\text{Eu} = \text{Eu}_\text{N}/(\text{Sm} \times \text{Gd})_\text{N}^{1/2}$ 公式计算而得 (Taylor and McLennan, 1985)。

厚坪五峰组—龙马溪组砂、泥岩稀土元素含量 ΣREE 为 66.83 ~ 247.07 $\mu\text{g/g}$, 平均 149.77 $\mu\text{g/g}$ (表 3)。其中五峰组上部 ΣREE 为 120.42 ~ 247.07 $\mu\text{g/g}$, 平均 175.26 $\mu\text{g/g}$, 观音桥段 2 件样品 ΣREE 为 66.83 $\mu\text{g/g}$ 和 208.37 $\mu\text{g/g}$ 变化较大, 龙马溪组 ΣREE 为 100.4 ~ 155.77 $\mu\text{g/g}$, 平均为 124.09 $\mu\text{g/g}$, 总体上五峰组 ΣREE 略高于龙马溪组 (表 3); LREE/HREE (5.86 ~ 11.08) 和 $(\text{La}/\text{Yb})_\text{N}$ (6.33 ~ 11.95) 表明轻稀土富集、重稀土亏损 (表 3); 蒙蒙溪五峰组—龙马溪组泥岩稀土元素含量 ΣREE 为 68.67 ~ 308.69 $\mu\text{g/g}$, 平均 151.18 $\mu\text{g/g}$ (表 4)。其中五峰组 ΣREE 为 68.67 ~ 226.69 $\mu\text{g/g}$, 平均 143.65 $\mu\text{g/g}$, 向上略有增加的趋势, 龙马溪组 ΣREE 为 97.17 ~ 308.69 $\mu\text{g/g}$, 平均 158.28 $\mu\text{g/g}$, 具有下高、中低、上高的变化趋势 (表 4); LREE/HREE (6.53 ~ 13.66) 和 $(\text{La}/\text{Yb})_\text{N}$ (4.68 ~ 15.74) 也反映了轻稀土富集、重稀土亏损 (表 4)。

厚坪和蒙蒙溪五峰组—龙马溪组砂、泥岩稀土元素北美页岩标准化均表现为略微向右倾斜的配分模式 (图 4), 多数具有 δCe 负异常, 观音桥段和龙马溪组还显示出 δEu 正异常, 正 Eu 异常通常指示了海底热水活动的存在 (Klinkhammer et al., 1983; 严德天等, 2009), 同期地层中大量的重晶石结核充分说明了这次热液活动的存在 (胥博文等, 2017), 可

表 5 砂、泥岩源区判别函数的变量及其系数 (Roser and Korsch, 1988)

Table 5 Variables and their coefficients of discriminant function for provenance of sandstone and mudstone

变量	TiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	MgO	CaO	Na ₂ O	K ₂ O	常数
F_1^1 系数	-1.773	0.607	0.76	-1.5	0.616	0.509	-1.224	-9.09
F_2^1 系数	0.445	0.07	-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 $x_1 - x_n$ 为 n 个判别变量, $a_1 - a_n$ 为其相应系数, C 为常数。

能与该时期与扬子北缘南秦岭陆缘裂谷发育有关, 裂谷作用过程中地幔柱上涌致使岩浆活动强烈, 不仅碱性玄武岩喷发, 还形成了同期侵入的超基性、基性岩墙 (向忠金等, 2016)。

4 讨论

4.1 物源分析

细粒沉积物中主量元素最能反映沉积物物源区的物质组成特征 (Rollinson, 1993), Roser 和 Korsch (1988) 最早提出了砂、泥岩物源区判别函数 (表 5)。主量元素判别函数图 ($F_1^1 - F_2^1$) 显示 (图 5a), 渝东北城口五峰组—龙马溪组砂、泥岩均落在成熟大陆石英质物源区 (P_4)。

由于稀土元素 REE 及高场强元素 Th、Zr、Hf、Ta、Nb、Sc 和 Co 等不活泼微量元素在沉积和变质作用过程中具有较强的抗迁移性, 被转移到沉积物中仍能反映母岩的地球化学性质, 因此, 这些元素及其比值能很好指示其物源信息 (Taylor and McLennan, 1985; Bhatia and Crook, 1986; Prudencio et al., 1989; Crichton and Condie, 1993), 被广泛应用于沉

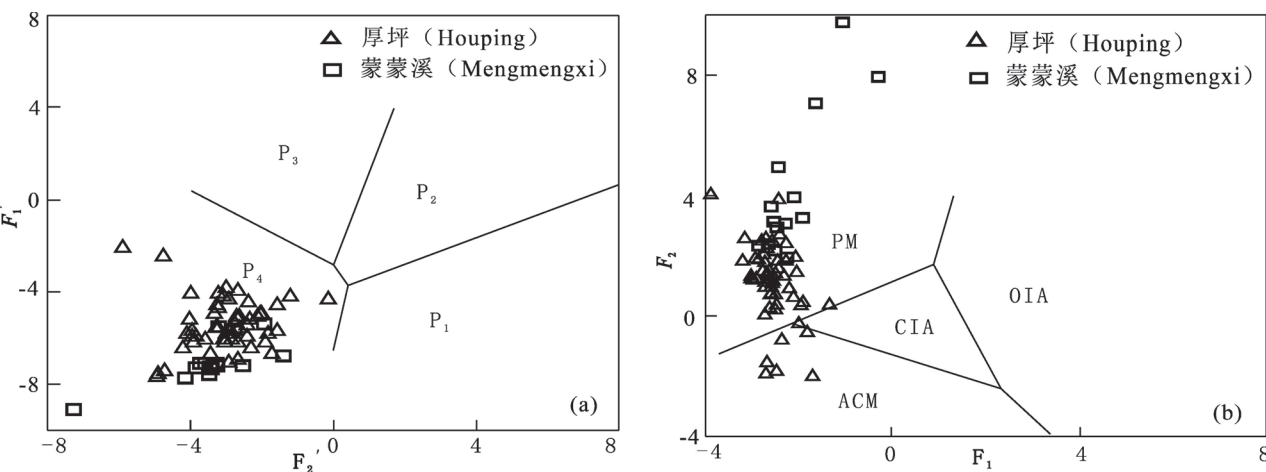


图 5 扬子地块北缘城口五峰组—龙马溪组砂、泥岩物源分析(a)及构造背景判别(b)

Fig. 5 Discrimination diagram of major elements for provenance(a) and tectonic setting(b) of Wufeng Formation and Longmaxi Formation sandstones and mudstones in Chengkou County, northern margin of Yangtze Block

P₁—basic volcanic provenance; P₂—intermediate volcanic provenance; P₃—acid volcanic provenance; P₄—matured - continental quartziferous provenance; PM—passive margin; OIA—oceanic island arc; CIA—continental island arc; ACM—active continental margin; (a) $F_1' - F_2'$ discrimination function (Roser and Korsch, 1988); (b) $F_2 - F_1$ discrimination function (Bhatia, 1983)

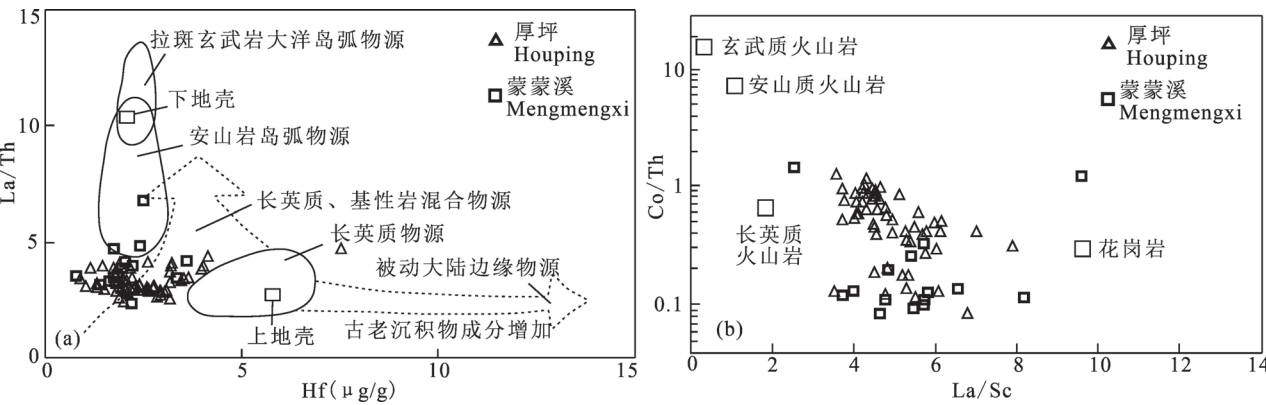


图 6 扬子北缘城口五峰组—龙马溪组砂、泥岩物源分析

Fig. 6 Discrimination diagram of trace elements for provenance of Wufeng Formation and Longmaxi Formation sandstones and mudstones in Chengkou County, northern margin of Yangtze block

(a) La/Th—Hf 图解 (Floyd and Leveridge, 1987); (b) Co/Th—La/Sc 图解 (Gu et al., 2002)

(a) La/Th—Hf diagram (Floyd and Leveridge, 1987); (b) Co/Th—La/Sc diagram (Gu et al., 2002)

表 6 砂岩构造环境判别函数的变量及其系数 (Bhatia, 1983)

Table 6 Variables and their coefficients of discriminant function for tectonic setting of sandstone												
变量	SiO ₂	TiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	FeO	MnO	MgO	CaO	Na ₂ O	K ₂ O	P ₂ O ₅	常数
F ₁ 系数	-0.0447	-0.472	0.008	-0.267	0.208	-3.082	0.14	0.195	0.719	-0.032	7.51	0.303
F ₂ 系数	-0.421	1.966	-0.526	-0.551	-1.61	2.72	0.881	-0.907	-0.177	-1.84	7.224	43.57

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

积源区的分析 (Taylor and McLennan, 1985)。微量元素 La/Th—Hf 图解 (图 6a) 中, 渝东北城口五峰组—龙马溪组大多数砂、泥岩落在长英质岩与基性岩混合源区到安山岩岛弧物源区。在 Co/Th—La/Sc 图解 (图 6b) 上, 大部分泥岩具有低而相对稳定的 Co/Th 值, 介于 0.1~1.0 之间, 而 La/Sc 的值较

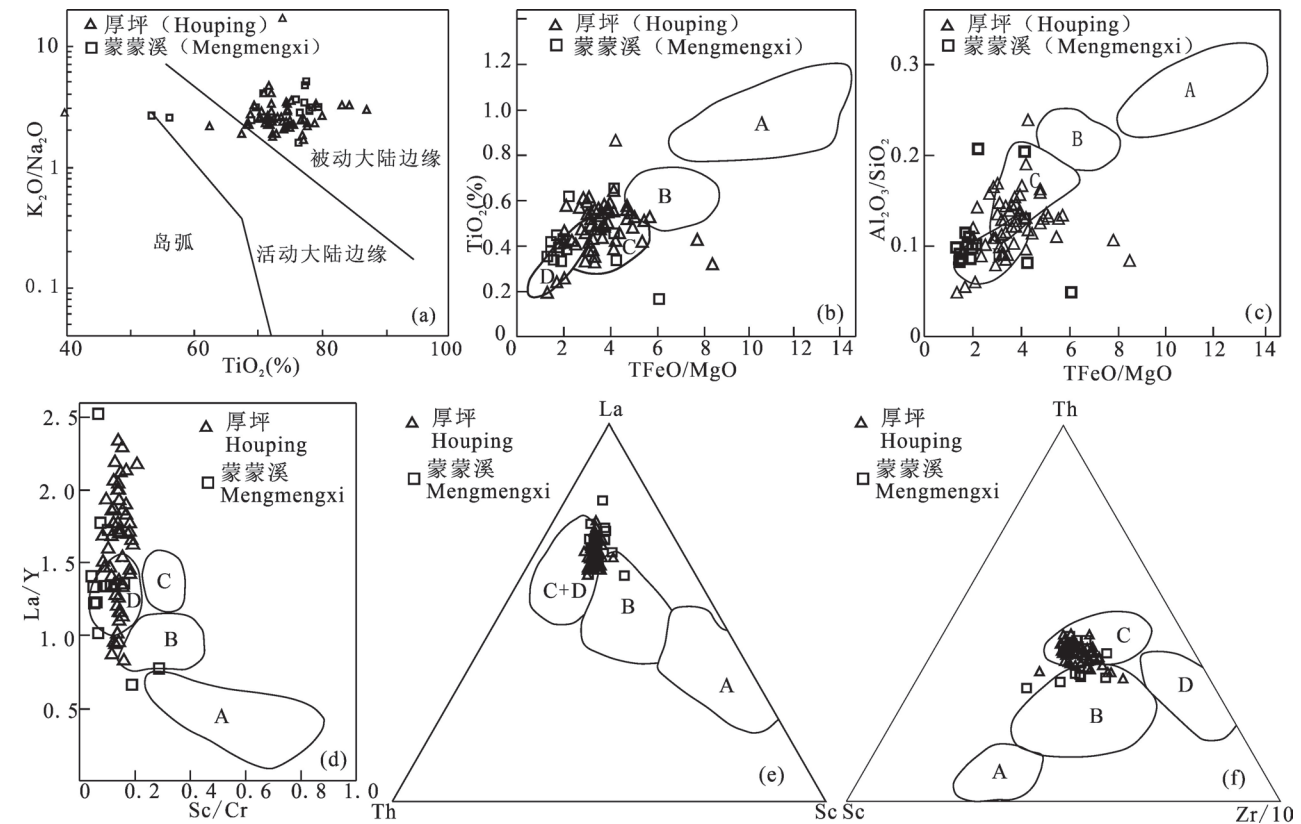


图 7 扬子北缘城口五峰组—龙马溪组砂、泥岩沉积构造背景判别图

Fig. 7 Discrimination diagram of major and trace elements for tectonic setting of Wufeng Formation and Longmaxi Formation sandstones and mudstones in Chengkou County, northern margin of Yangtze block

(a) K_2O/Na_2O-TiO_2 图解 (Roser and Korsch, 1986); (b) TiO_2-TFeO/MgO 图解和 (c) Al_2O_3/SiO_2-Hf 图解 (Bhatia, 1983); (d) $La/Y-Sc/Cr$ 图解; (e) $La-Th-Sc$ 图解和 (f) $Th-Sc-Zr/10$ 图解 (Bhatia, 1983; Bhatia and Crook, 1986); A—大洋岛弧; B—大陆岛弧; C—活动陆缘; D—被动陆缘

(a) K_2O/Na_2O-TiO_2 diagram (Roser and Korsch, 1986); (b) TiO_2-TFeO/MgO diagram; (c) Al_2O_3/SiO_2-Hf diagram (Bhatia, 1983); (d) $La/Y-Sc/Cr$ diagram; (e) $La-Th-Sc$ diagram; (f) $Th-Sc-Zr/10$ diagram (Bhatia, 1983; Bhatia and Crook, 1986); A—oceanic island arc; B—continental island arc; C—active continental margin; D—passive continental margin

高,多数大于 4,样品分布区域在长英质火山岩和花岗岩之间,反映源岩以长英质岩为主,并伴有花岗质和安山质岩石的混入。

4.2 构造背景

Bhatia (1983) 通过砂岩主量元素分析,最早提出了其形成的地构造环境判别函数 (表 5) 及一些碎屑岩的构造环境判别图解, Roser 和 Korsch (1986) 认为与砂岩相伴生的粉砂岩和泥、页岩等细碎屑岩地球化学特征相似,具有相同的物源和沉积构造背景。因此,细粒沉积物中的微量元素和稀土元素也被广泛应用于沉积源区的确定、构造背景及大陆生长的分析 (Bhatia and Taylor, 1981; Taylor and McLennan, 1985; Bhatia, 1985; Bhatia and Crook, 1986)。

在碎屑岩主量元素函数构造环境函数判别图 (F_2-F_1) (图 5b) 中,渝东北城口五峰组—龙马溪组砂、泥岩均落在被动大陆区域内; K_2O/Na_2O-SiO_2 图解上,几乎所有样品都落在被动陆缘区域,极少岛弧和活动陆缘区 (图 7a); 在 TiO_2-TFeO/MgO 和 $Al_2O_3/SiO_2-TFeO/MgO$ 图解 ($TFeO$ 代表全铁含量,即 Fe_2O_3+FeO) (图 7b、7c) 中,渝东北城口五峰组—龙马溪组砂、泥岩绝大多数落在被动陆缘区内,少数在活动陆缘区。微量元素 $La/Y-Sc/Cr$ 构造环境判别图解 (图 7d) 中,渝东北城口五峰组—龙马溪组砂、泥岩大部分落在被动陆缘区内,少数在大陆岛弧区; $La-Th-Sc$ 图解 (图 7e) 中,研究区多数样品落在被动陆缘和活动陆缘区域内,少数在大陆岛弧区,而在 $Th-Sc-Zr/10$ 图解 (图 7f) 上,样品多数落在

活动陆缘区,部分位于大陆岛弧区。上述结果表明,渝东北城口五峰组—龙马溪组砂、泥岩物源区源岩形成时的构造背景主要为被动陆缘环境,少数为活动陆缘和大陆岛弧环境。

研究认为扬子板块北缘在晚元古—早古生代期间是一个被古东秦岭洋(商丹洋)分隔的大西洋型被动大陆边缘(高长林等,1990;吉让寿等,1990),从早奥陶世中期(~470Ma)开始向北单边俯冲,俯冲作用使得华北地块南缘由被动大陆边缘转化为活动大陆边缘,扬子地块北缘被动大陆边缘发生前陆隆起(熊国庆等,2017),该隆起处于城口以北、紫阳芭蕉口以南,东至镇坪一带,被称为巴山隆起或巴山古陆(叶俭等,1992)。随着巴山古陆受构造抬升,致使芭蕉口以南地区坡度变陡,伴随强烈的火山活动,导致浊流发生,为北侧芭蕉口地区的浊流沉积提供了充足的物源(赵健,1987)。米仓山地区汉南古陆周缘地区在早古生代(中寒武世至早奥陶世大巴山西段)发生了南郑上升,导致大巴山西段整体上升成陆并与汉南古陆连成一体,甚至可能与龙门山古陆相连(陈旭等,1990)。因此,奥陶纪—志留纪之交,扬子地块北缘的汉南古陆和巴山隆起为盆内源源不断地提供了物质来源,少量细粒沉积物也可能来自华北南缘的活动陆缘和大陆岛弧物质,此外,南秦岭南缘紫阳—岚皋—竹山一带局部拉伸所产生的火山岩浆活动也为盆内供给了一定的物源。

5 结论

本文通过对扬子地块北缘奥陶纪—志留纪之交砂、泥岩的沉积地球化学特征分析,得出了以下几点结论:

(1)渝东北城口五峰组—龙马溪组砂、泥岩主量元素 Al_2O_3 、 MgO 、 CaO 、 MnO_2 和 P_2O_5 含量明显低于北美页岩, SiO_2 、 Na_2O 、 K_2O 和 TiO_2 含量与北美页岩相近,相比于川南长宁—双河五峰组—龙马溪组泥岩,渝东北城口具有高 SiO_2 、低 MgO 和 CaO 的特点,表明五峰组—龙马溪组泥岩碎屑组分主要以粉砂质和硅质等陆缘碎屑为主。

(2)微量元素 Sc、Sr、Co、Zr、Hf 较北美页岩相对亏损,V、U、Sb、Ba 相对富集,Cr、Ni、Nb、Ta 含量相近。LREE/HREE 和 $(\text{La}/\text{Yb})_N$ 均反映了轻稀土富集、重稀土亏损。

(3)稀土元素北美页岩标准化均表现为略微向右倾斜的配分模式,多数具有 δCe 负异常,观音桥段和龙马溪组显示为 δEu 正异常,指示了该时期存在

海底热液活动。

(4)主、微量元素的物源和构造背景图解表明,沉积物源区源岩具有多样的物质组分,以长英质岩为主,同时混入了花岗质和安山质岩石组分;源岩形成时的构造背景主要为被动陆缘环境,部分为活动陆缘和大陆岛弧环境,这与扬子地块北缘晚元古—早古生代处于被动大陆边缘的区域地质背景一致。

致谢:野外期间得到江新胜研究员和闫剑飞博士的大力支持和帮助,审稿专家对本文提出了诸多有益的建议和意见,使文章增色不少,在此深表谢意。

参考文献 / References

(The literature whose publishing year followed by a “&” is in Chinese with English abstract; The literature whose publishing year followed by a “#” is in Chinese without English abstract)

- 陈旭,徐均涛,成汉钧,汪明洲,陈祥荣,许安东,邓占球,伍鸿基,丘金玉,戎嘉余. 1990. 论汉南古陆及大巴山隆起. 地层学杂志, 14(2): 81~116.
- 高长林,秦德余,吉让寿,殷勇. 1990. 东秦岭俯冲消减古洋壳的地球化学鉴定. 石油实验地质, 12(2): 135~145.
- 胡健民,孟庆任,白武明,赵国春. 2002. 南秦岭构造带中一晚古生代伸展构造作用. 地质通报, 21(8~9): 471~477.
- 吉让寿,秦德余,高长林. 1990. 古东秦岭洋关闭和华北与扬子两地块的拼合. 石油实验地质, 12(4): 353~365.
- 姜涌泉. 1998. 关于秦岭造山带的新认识及有关启示. 海相油气地质, 3(3): 1~5.
- 李艳芳,邵德勇,吕海刚,张瑜,张小龙,张同伟. 2015. 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. 石油学报, 36(12): 1470~1483.
- 李智武,刘树根,罗玉宏,刘顺,徐国强. 2006. 南大巴山前陆冲断带构造样式及变形机制分析. 大地构造与成矿学, 30(3): 294~304.
- 刘田,冯明友,王兴志,陈波,张良华,刘小洪,王珏博. 2019. 渝东北巫溪地区晚奥陶世五峰期元素地球化学特征及其对沉积环境的限制. 天然气地球科学, 30(5): 740~750.
- 罗志立. 1998. 四川盆地基底结构的新认识. 成都理工学院学报, 25(2): 191~200.
- 王刚,王宗起,张英利,王坤明. 2014. 北大巴山弧后混杂岩组成. 中国地球科学联合学术年会. 2236.
- 王宗起,闫全人,闫臻,王涛,姜春发,高联达,李秋根,陈隼璐、张英利,刘平,谢春林,向忠金. 2009. 秦岭造山带主要大地构造单元的新划分. 地质学报, 83(11): 1527~1546.
- 向忠金,闫全人,宋博,王宗起. 2016. 北大巴山超基性、基性岩墙和碱质火山杂岩形成时代的新证据及其地质意义. 地质学报, 90(5): 896~914.
- 熊国庆,王剑,李园园,余谦,门玉澎,周小琳,熊小辉,周业鑫,杨潇. 2017. 大巴山地区早古生代黑色岩系岩相古地理及页岩气地质意义. 古地质量, 19(6): 965~986.
- 熊国庆,王剑,李园园,余谦,门玉澎,周小琳,熊小辉,周业鑫. 2019. 大巴山地区晚奥陶世—早志留世“宜昌上升”的沉积响应. 地质论评, 65(3): 533~550.
- 熊国庆. 2020. 大巴山地区奥陶—志留纪之交构造转换过程的沉积响应研究. 成都理工大学博士学位论文. 148~183.
- 熊小辉,王剑,余谦,杨宇宁,熊国庆,牛丙超,郭秀梅,邓奇.

2015. 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. 天然气工业, 35(4): 25~32.

闫全人, 王宗起, 向忠金, 闫臻, 王涛, 张宏远, 陈隽璐, 覃小锋. 2014. 秦岭洋及其演化过程刍议. 中国地球科学联合学术年会. 2248~2251.

闫全人, 王宗起, 闫臻, 王涛, 张宏远, 向忠金, 姜春发, 高联达. 2009. 从华北陆块南缘大洋扩张到北秦岭造山带板块俯冲的转换时限. 地质学报, 83(11): 1565~1583.

闫全人, 王宗起, 闫臻, 向忠金, 陈隽璐, 王涛. 2007. 秦岭勉略构造混杂带康县—勉县段蛇绿岩块—铁镁质岩块的 SHRIMP 年代及其意义. 地质评论, 53(6): 755~764.

严德天, 陈代钊, 王清晨, 汪建国. 2009. 扬子地区奥陶系—志留系界线附近地球化学研究. 中国科学(D 辑: 地球科学), 39(3): 285~299.

叶俭, 杨友运, 苏春乾, 李钟秀, 刘仿韩. 1992. 大巴山南坡奥陶系的沉积环境分析. 西安地质学院学报, 14(2): 7~16.

笄博文, 刘树根, 冉波, 叶玥豪, 杨迪, 黄瑞, 夏国栋, 焦堃. 2017. 扬子板块北缘下志留统龙马溪组重晶石结核特征及其成因机制分析. 岩石矿物学杂志, 36(2): 213~226.

张国伟, 程顺有, 郭安林, 董云鹏, 赖绍聪, 姚安平. 2004. 秦岭—大别中央造山系南缘勉略古缝合带的再认识—兼论中国大陆主体的拼合. 地质通报, 23(9): 846~853.

张国伟, 董云鹏, 赖绍聪, 郭安林, 孟庆任, 刘少峰, 程顺有, 姚安平, 张宗清, 裴先治, 李三忠. 2003. 秦岭—大别造山带南缘勉略构造带与勉略缝合带. 中国科学(D 辑: 地球科学), 33(12): 1121~1135.

张国伟, 梅志超, 李桃红. 1988. 秦岭造山带的南部古被动大陆边缘. 见: 张国伟等著. 秦岭造山带的形成及其演化. 西安: 西北大学出版社. 86~98.

张国伟, 孟庆任, 于在平, 孙勇, 周鼎武, 郭安林. 1996. 秦岭造山带的造山过程及其动力学特征. 中国科学(D 辑: 地球科学), 26: 193~200.

张国伟, 张本仁, 袁学诚, 肖庆辉. 2001. 秦岭造山带与大陆动力学. 北京: 科学出版社, 1~855.

张国伟, 张宗清, 董云鹏. 1995. 秦岭造山带主要构造岩石地层单元的构造性质及其大地构造意义. 岩石学报, 11(2): 101~114.

赵健. 1987. 陕西芭蕉口志留系浊流沉积的发现及其初步研究. 陕西地质, 5(2): 13~21.

Bhatia M R, Crook K W. 1986. Trace element characteristics of graywackes and tectonic setting discrimination of sedimentary basin. Contributions to Mineralogy and Petrology, 92: 181~193.

Bhatia M R, Taylor S R. 1981. Trace element geochemistry and sedimentary provinces: study from the Tasman geosyncline, Australia. Chemical Geology, 33(1~2): 115~125.

Bhatia M R. 1983. Plate tectonics and geochemical composition of sandstones. Journal of Geology, 91: 611~627.

Bhatia M R. 1985. Rare earth element geochemistry of Australian Paleozoic graywackes and mudstones: Provenance and tectonic control. Sedimentary Geology, 45: 97~113.

Chen Xu, Xu Juntao, Cheng Hanjun, Wang Mingzhou, Chen Xiangrong, Xu Andong, Deng Zhanqiu, Wu Hongji, Qiu Jinyu, Rong Jiayu. 1990&. Discussion on Hannan old land and Dabashan uplift. Journal of Stratigraphy, 14(2): 81~116.

Crichton J G, Condie K C. 1993. Trace Elements as Source Indicators in Cratonic Sediments: A Case of Study from the Early Proterozoic Libby Creek Group, Southwestern Wyoming. The Journal of Geology, 101, 319~332.

Dickinson W R. 1983. Provenance of North American Phanerozoic sandstone in relation to tectonic settings. Bulletin of the Geological Society of America, 94(2): 222~235.

Floyd P A, Leveridge B E. 1987. Tectonic environment of Devonian Gramscatho basin, South Cornwall: Framework mode and geochemical evidence from turbiditic sandstones. Geological Society of London Journal, 144: 531~542.

Fralick P W, Kronberg B I. 1997. Geochemical discrimination of clastic sedimentary rock sources. Sedimentary Geology, 113: 111~24.

Gao Changlin, Qin Deyu, Ji Rangshou, Yin Yong. 1990&. A geochemical determination of the subduction ocean crust in east Qinling mountains. Petroleum Geology and Experiment, 12(2): 135~145.

Girty G H, Hanson A D, Yoshinobu A S. 1993. Provenance of Paleozoic mudstones in a contact metamorphic aureole determined by rare earth element, Th, and Sc analyses, Sierra Nevada, California. Geology, 21: 363~66.

Gu X X, Liu J M, Zheng M H, Tang J X, Qi L. 2002. Provenance and tectonic setting of the Proterozoic turbidites in Hunan, South China: Geochemical evidence. Journal of Sedimentary Research, 72(3): 393~407.

Hu Jianmin, Meng Qingren, Bai Wuming, Zhao Guochun. 2002&. Mid-late Paleozoic extension of the Wudang block in the South Qinling tectonic belt, China. Geological Bulletin of China, 21(8~9): 471~477.

Ji Rangshou, Qin Deyu, Gao Changlin. 1990&. Closing of eastern Qinling palaeocean and collaging between the north China and Yangtze blocks. Petroleum Geology and Experiment, 12(4): 353~365.

Klinkhammer G, Elderfield H, Hudson A. 1983. Rare earth elements in seawater near hydrothermal vents. Nature, 305(5931), 185~188.

Li Yanfang, Shao Deyong, Lü Haigang, Zhang Yu, Zhang Xiaolong, Zhang Tongwei. 2015&. A relationship between elemental geochemical characteristics and organic matter enrichment in marine shale of Wufeng Formation—Longmaxi Formation, Sichuan basin. Acta Petrolei Sinica, 36(12): 1470~1483.

Li Zhiwu, Liu Shugen, Luo Yuhong, Liu Shun, Xu Guoqiang. 2006&. Structural style and deformational mechanism of southern Dabashan foreland fold—thrust belt in central China. Geotectonica et Metallogenia, 30(3): 294~304.

LiuTian, Feng Mingyou, WangXingzhi, Chen Bo, Zhang Lianghua, Liu Xiaohong, Wang Juebo. 2019&. Elemental geochemical characteristics and limit on sedimentary environment in the Late Ordovician Wufengian period in the Wuxi area, NE Chongqing. Natural Gas Geoscience, 30(5): 740~750.

Luo Zhili. 1998&. New recognition of basement in Sichuan Basin. Journal of Chengdu University of Technology, 25(2): 191~200.

McLennan S M, Hemming S R, McDaniel D K, Hanson G N. 1993. Geochemical approaches to sedimentation, provenance, and tectonics. In Johnson M J, Basu A (Eds.). 1993. Processes Controlling the Composition of Clastic Sediments. Geological Society of America, Boulder, CO, 21~40.

Morton A C. 1991. Geochemical studies of detrital heavy minerals and their application to provenance research. In Morton A C, Todd S P, Haughton P D W (Eds.). 1991. Developments in sedimentary provenance studies. Geological Society of London Special Publication, (57): 31~45.

Prudêncio M I, Figueiredo M O, Cabral J M P. 1989. Rare earth distribution and its correlation with clay mineralogy in the clay-sized

- fraction of Cretaceous and Pliocene sediments (central Portugal). *Clay Minerals*, 24: 67~74.
- Rollinson H R. 1993. Using Geochemical Data: Evaluation, Presentation, and Interpretation. Longman Scientific and Technical, Singapore, 352.
- Roser B P, Korsch R J. 1986. Determination of tectonic setting of sandstone-mudstone suites using SiO_2 content and $\text{K}_2\text{O}/\text{Na}_2\text{O}$ ratio. *Journal of Geology*, 94: 635~650.
- Roser B P, Korsch R J. 1988. Provenance signatures of sandstone mudstone suites determined using discriminant function analysis of major element data. *Chemical Geology*, 67: 119~139.
- Taylor S R, McLennan S M. 1985. The Continental Crust: Its Composition and Evolution. Geoscience Texts Blackwell Scientific Publications, 312.
- Wang Zongqi, Yan Quanren, Yan Zhen, Wang Tao, Jiang Chunfa, Gao Lianda, Li Qiugen, Chen Junlu, Zhang Yingli, Liu Ping, Xie Chunlin, Xiang Zhongjin. 2009#. New Division of the Main Tectonic Units of the Qinling Orogenic Belt, Central China. *Acta Geologica Sinica*, 83(11): 1527~1546.
- Xiang Zhongjin, Yan Quanren, Song Bo, Wang Zongqi. 2016#. New evidence for the ages of ultramafic to mafic dikes and alkaline volcanic complexes in the North Daba mountains and its geological implication. *Acta Geologica Sinica*, 90(5): 896~914.
- Xiong Guoqing, Wang Jian, Li Yuanyuan, Yu Qian, Men Yupeng, Zhou Xiaolin, Xiong Xiaohui, Zhou Yexin, Yang Xiao. 2017#. Sedimentary facies and Palaeogeography of early Paleozoic black rock series and its shale-gas geological significance in Dabashan region. *Journal of Palaeogeography*, 19(6): 965~986.
- Xiong Guoqing, Wang Jian, Li Yuanyuan, Yu Qian, Men Yupeng, Zhou Xiaolin, Xiong Xiaohui, Zhou Yexin. 2019#. Sedimentary response to late Ordovician - early Silurian Yichang uplift in Dabashan area. *Geological Review*, 65(3): 533~550.
- Xiong Guoqing. 2020#. The study of sedimentary response to the late Ordovician and early Silurian tectonic transition process in Dabashan area. Doctor Thesis of Chengdu University of Technology, 148~183.
- Xiong Xiaohui, Wang Jian, Yu Qian, Yang Yuning, Xiong Guoqing, Niu Bingchao, Guo Xiumei, Deng Qi. 2015#. Element geochemistry inversion of the environment and background of organic-rich black shale formations: A case study of the Wufeng-Longmaxi black shale in the Tianba section in northeastern Chongqing. *Natural Gas Industry*, 35(4): 25~32.
- Yan Detian, Chen Daizhao, Wang Qingchen, Wang Jianguo. 2009#. Geochemical changes across the Ordovician-Silurian transition on the Yangtze platform, South China. *Science in China (Series D: Earth Sciences)*, 39(3): 285~299.
- Yan Quanren, Wang Zongqi, Yan Zeng, Xiang Zhongjin, Chen Junlu, Wang Tao. 2007#. SHRIMP analyses for ophiolitic-mafic blocks in the Kangxian-Mianxian section of the Mianxian-Lueyang mélange: their geological implications. *Geological Review*, 53(6): 755~764.
- Yan Quanren, Wang Zongqi, Yan Zhen, Wang Tao, Zhang Hongyuan, Xiang Zhongjin, Jiang Chunfa, Gao Lianda. 2009#. Timing of the Transformation from Seafloor Spreading on the South Margin of the North China Block to Subduction within the North Qinling Orogenic Belt. *Acta Geologica Sinica*, 83(11): 1565~1583.
- Ye Jian, Yang Youyun, Su Chunqian, Li Zhongxiu, Liu Fanghan. 1992#. An analysis of Sedimentary environment of the Ordovician system in the southern slope of the Daba mountain. *Journal of Xi'an College of Geology*, 14(2): 7~16.
- Zan Bowen, Liu Shugen, Ran Bo, Ye Yuehao, Yang Di, Huang Rui, Xia Guodong, Jiao Kun. 2017#. An analysis of barite concretions from lower Silurian Longmaxi Formation on the northern margin of the Yangtze block and their genetic mechanism. *Acta Petrologica et Mineralogica*, 36(2): 213~226.
- Zhang Guowei, Cheng Shunyou, Guo Anlin, Dong Yunpeng, Lai Shaocong, Yao Anping. 2004#. Mianlue paleo-suture on the southern margin of the Central Orogenic System in Qinling-Dabie—with a discussion of the assembly of the main part of the continent of China. *Geological Bulletin of China*, 23(9): 846~853.
- Zhang Guowei, Dong Yunpeng, Lai Shaocong, Guo Anlin, Meng Qingren, Liu Shaofeng, Cheng Shunyou, Yao Anping, Zhang Zongqing, Pei Xianzhi, Li Sanzhong. 2004#. Mianlue tectonic zone and Mianlue suture zone on the southern margin of Qinling-Dabie orogenic belt. *Science in China (Series D: Earth Sciences)*, 47(4): 300~315.
- Zhang Guowei, Mei Zhichao, Li Taohong. 1988#. The ancient passive continental margin in south of the Qinling Orogenic Belt. In: Zhang Guowei (Eds.) *Formation and Evolution of the Qinling Orogen*. Xi'an: Northwest University Press: 86~98.
- Zhang Guowei, Meng Qingren, Yu Zaiping, Sun Yong, Zhou Dingwu, Guo Anlin. 1996#. Orogenesis and dynamics of the Qinling orogen. *Science in China (Series D: Earth Sciences)*, 9(3): 225~234.
- Zhang Guowei, Zhang Benren, Yuan Xuecheng, Xiao Qinghui. 2001#. Qinling Orogenic Belt and Geodynamics. Beijing: Science Press: 1~855.
- Zhang Guowei, Zhang Zongqing, Dong Yunpeng. 1995#. Nature of main tectono-lithostratigraphic units of the Qinling orogen: implications for the tectonic evolution. *Acta Petrologica Sinica*, 11(2): 101~114.
- Zhao Jian. 1987. The discovery and preliminary study of the turbidite deposit in the Silurian beds from Bajiaokou, Shaanxi. *Geology of Shaanxi*, 5(2): 13~21.

Geochemical characteristics of mudstones and its provenance and tectonic setting during the Ordovician-Silurian period in northern margin of Yangtze Block

LIU Chunlai¹⁾, XIONG Guoqing^{2,3)}, DONG Guoming¹⁾, CUI Wei¹⁾

1) The 2nd Geological Brigade of Hebei Bureau of Geology and Mineral Resource Exploration, Tangshan, Hebei, 063004;

2) Chengdu Center of Geological Survey, China Geological Survey, Chengdu, 610081;

3) Key Laboratory of Sedimentary Basin & Oil and Gas Resources, Ministry of Natural Resources, Chengdu, 610082

Objective: In recent years, It is all along argued that whatever sedimentary and tectonic setting in northern margin of Yangtze Block is during the Ordovician-Silurian Period.

Method: Systematically sampling sandstones and mudstones of Wufeng Formation and Longmaxi Formation and analyzing their major and minor elements, their provenance and tectonic setting are discussed from the perspective of their geochemical features in this paper.

Conclusions: Major element SiO_2 contents of sandstones and mudstones range from 39.57% to 87.16%, and mostly are higher than North America Average Shale' Content (NASC), while Al_2O_3 contents change from 3.41% to 14.98% and are all lower than those of NASC. NASC normalized major elements spider diagram show that these contents such as MgO , CaO , MnO_2 and P_2O_5 are clearly lower than NASCs'. Compared to major elements of contemporary mudstones from Changning–Shuanghe region located in southern margin of Sichuan basin, these sandstones and mudstones in northern margin of Yangtze block are characterized by higher SiO_2 and lower MgO 、 CaO contents, which indicates that material components of the latter are mainly dominated in terrigenous clast. Relative to minor elements of NASC, some elements such as Sc, Sr, Co, Zr, Hf are relative depleted, some V, U, Sb, Ba are relative enriched, the other Cr、Ni、Nb、Ta have approximate contents. The ratios of LREE/HREE and $(\text{La}/\text{Yb})_N$ show that sandstones and mudstones of Wufeng Formation and Longmaxi Formation might have a feature with LREE depletion and HREE enrichment. NASC-normalized trace element pattern of sandstones and mudstones in this study are entirely featured by slight right-tilted ones with bulk δCe negative abnormalities, δEu positive abnormalities of Kuanyinchiao Member and Longmaxi Formation indicate some hydrothermal activities of oceanic floor during that time. Provenance and tectonic setting diagram of these sandstones and mudstones display their source rock of provenance have multiple kinds of material components, which principally inherited from felsic rocks and mixed with granitic and andesitic rocks. Tectonic setting during source rocks formation is mostly located in passive continental margin and partly in active continental margin and continental island arc, which is coincident with regional geological background of passive continental margin in northern margin of Yangtze block during the late proterozoic-early paleozoic period.

Keywords: Northern margin of Yangtze Block; the Ordovician – Silurian; major and minor elements; provenance; tectonic setting

First author: LIU Chunlai, born in 1978, is a master of engineering of geology and geological engineering, now he is a senior engineer and is mainly engaged in mineral geological exploration and ore deposits; Email: liuchunlai990@163.com

Corresponding author: XIONG Guoqing, born in 1975, Ph. D., now he is a senior engineer and is mainly engaged in sedimentary facies and palaeogeography, sedimentology, and petroleum geology; Email: hsiungq@163.com

Acknowledgements: We appreciated professor Jiang Xinsheng and doctor Yan Jianfei for great supports during field work. The project was jointly funded by geological survey projects from China Geological Survey (Nos. 20160193, 20190722) and Chongqing Local Finance Program

Manuscript received on: 2020-12-01; Accepted on: 2021-04-23; Network published on: 2021-05-20

Doi: 10. 16509/j. georeview. 2021. 04. 231 **Edited by:** LIU Zhiqiang

