

广元恐龙化石埋藏地沙溪庙组地球化学特征 及对物源区和古风化作用的指示

阚泽忠^{1,3} 梁 斌² 王全伟³ 朱 兵³

(1. 成都理工大学, 四川 成都 610059; 2. 西南科技大学环境与资源学院, 四川 绵阳 621000;
3. 四川省地质调查院, 四川 成都 610081)

摘要: 广元恐龙化石埋藏地是四川盆地中侏罗世重要的恐龙化石点, 恐龙化石埋藏于中侏罗统沙溪庙组之中。笔者对该恐龙化石埋藏地沙溪庙组泥质岩的常量元素、微量元素和稀土元素特征进行了研究, 并根据泥质岩的地球化学特征讨论了物源区性质、构造背景以及物源区的风化特征。主量元素和稀土元素表明其物源区以长英质岩石为主, 构造背景为被动大陆边缘; 指示化学风化程度的 CIA 指数及成分成熟度的 ICV 指数, 表明物源区经历了中等的化学风化作用, 反映了中侏罗世恐龙生活在半干旱的古气候环境之中。

关键词: 地球化学; 恐龙; 侏罗系; 四川盆地

中图分类号: P595; P532 **文章标识码:** A **文章编号:** 1000-3657(2006)05-1023-07

碎屑沉积岩记录了源岩的成分特征、物源区古化学风化条件和大地构造背景等方面的信息。对细碎屑沉积物地球化学特征的研究表明, REE 以及某些微量元素能够有效地指示地质作用过程、物源区特征、大地构造背景以及物源区古化学风化特征^[1-5]。由于泥/页岩具有粒度上的均一性、沉积期后的不渗透性和较高的微量元素丰度等优点, 因而其化学成分最适合用来追溯物源区性质和判别其构造背景^[6]。形成于特定构造背景下盆地中的泥/页岩通常反映了源区岩石的成分, 其中的微量元素, 特别是稀土元素(REE)、高场强元素(HFSE)、Cr 和 Co 等, 在沉积水体中的溶解度低, 而且在沉积作用过程中很少分异, 尽管其地球化学成分受母岩、化学风化、搬运和沉积过程的分选以及埋藏后成岩作用等因素的影响, 但这些微量元素的相对稳定性表明它们仍然能够指示物源区性质^[3, 5]。同时, 碎屑沉积岩的某些化学成分也可以反映物源区的古风化特征, 从而为古环境的恢复提供了地球化学方面的途径。

四川盆地中生代陆相红层中蕴含着丰富的恐龙化石, 对已发现的恐龙化石进行了较系统的研究^[7], 虽然对恐龙生活时代的古环境等问题已有涉及, 但多是地层的岩相、沉积

构造以及古生物等方面^[8, 9]。而对于四川盆地侏罗纪地层的地球化学特征及其所反映的物源区性质、古风化作用的研究却十分薄弱。笔者对四川广元河西乡恐龙化石埋藏地中侏罗统沙溪庙组泥质岩的地球化学特征进行了分析, 旨在确定该区沉积岩物源区性质及古风化作用, 进而探讨物源区的古气候条件, 为重建中侏罗世恐龙生活时代的古环境提供地球化学方面的资料。

1 地质特征及样品的采集

恐龙化石埋藏地位于四川盆地北部广元市河西乡, 恐龙动物群产于中侏罗统沙溪庙组上段下部的钙质粉砂质泥岩中。沙溪庙组广泛地分布于四川盆地之中, 为由灰、灰紫色厚层至块状粗、中粒至细粒长石石英砂岩、长石砂岩及紫红色泥质粉砂岩、泥岩组成的数个不等厚韵律层组成, 厚 650~2 500 m。根据该组中部所夹富含叶肢介化石及含植物碎屑、少量植物化石的黑色页岩—“叶肢介页岩”, 可以分为上、下沙溪庙组(沙溪庙组上段、下段)。本次研究中, 笔者仅对包含恐龙化石的沙溪庙组上段进行了剖面测制, 其岩性总体上为一套浅灰、黄灰色厚层至块状中粒至细粒长石石英砂岩—紫

收稿日期: 2005-11-09; 改回日期: 2006-02-15

基金项目: 中国地质调查局地质大调查项目(1212010511602)资助。

作者简介: 阚泽忠, 男, 1963 年生, 教授级高级工程师, 硕士生, 主要从事区域地质和矿产地质研究; E-mail: scddyjcb@vip.sina.com。

红色粉砂岩、粉砂质泥岩、泥岩形成的不等厚韵律互层,以泥质岩为主,厚 483 m。在中下部的泥岩中夹有少量灰色薄-中层状的介壳灰岩,其中产丰富的双壳类化石,属于喜热的 *Cuneopsis-Psilunio-Eolamprotula* 淡水双壳类动物群^[9]。该段泥质岩石中普遍含有成层分布的钙质结核,遗迹化石发育。在砂岩中发育大型板状、槽状交错层理,在粉砂岩及泥岩中发育小型交错层理和水平层理。该剖面的岩相组合、沉积构造及生物标志表明,其沉积环境以河流为主(包括河道和洪泛平原),部分为浅湖环境。据李奎等^[10]的研究,该恐龙动物群是一个以蜥脚类为主,并有虚骨龙、肉食龙、剑龙以及鱼类、龟类、鳄类、蛇颈龙等化石的古脊椎动物群。计有弓鲛(未定种)*Hybodus* sp., 四川角齿鱼 *Ceratodus szechuanensis*, 蛇颈龟(未定种)*Plesiochelys* sp., 鳄目 *Crocodylia*, 中国上龙(未定种)*Sinopliosaurus* sp., 中国虚骨龙(未定种)*Sinocoelurus* sp., 坎氏四川龙 *Szechuanosaurus campi*, 广元嘉陵龙 *Chialingosaurus guangyuanensis* (未刊资料), 广元马门溪龙 *Mamenchisaurus guangyuanensis* (未刊资料)。

2 分析结果

在广元河西乡沙溪庙组上段泥质岩中,共采集泥质岩样品 17 件进行了主量、微量及稀土元素的分析(表 1、表 2、表

3)。澳大利亚后太古代页岩(PAAS)被认为代表了上地壳的平均化学成分^[9],因此可以用它作为一个重要的地球化学标准来分析样品的地球化学特征,为便于比较,将其也列入表中。

泥岩样品中 SiO₂ 与 PAAS 有相同的含量,其他主量元素的平均值与 PAAS 相比,除了 Al₂O₃ (0.85×PAAS)、P₂O₅ (0.85×PAAS)的含量基本相同外,具有富集 CaO(2.13×PAAS),贫 Fe₂O₃(0.79×PAAS)、MgO(0.81×PAAS)、K₂O(0.82×PAAS)、TiO₂(0.8×PAAS)、Na₂O(0.54×PAAS)、MnO(0.63×PAAS)的特征。

泥质岩样品中大离子亲石元素中,除 Sr(0.59×PAAS)的平均含量低于 PAAS 的含量外,其余的 Rb (0.94×PAAS)、Ba (0.99×PAAS)、Th(1.06×PAAS)、U(0.86×PAAS)与 PAAS 的含量基本相同。过渡元素中,Co(1.00×PAAS)、Ni(0.92×PAAS)的平均含量与 PAAS 基本相同,Cr(0.79×PAAS)、V(0.81×PAAS)、Cu(0.62×PAAS)的平均含量低于 PAAS 的含量。高场强元素 Hf 的平均含量 (1.27×PAAS)高于 PAAS 的含量。Condie^[9]指出,与太古代的泥质岩石相比,后太古代泥质岩石中镁铁质元素的含量,特别是 Ni 和 Cr 的含量低,其主要原因是太古代的泥质岩石的物源区存在较多的超镁铁质-镁铁质组分,而后太古代长英质岩石含量增加。在图 1 中,样品几乎都聚集在 PAAS 的附近,表现出了相似的 Ni、Cr 含量,这也表明广

表 1 沙溪庙组泥质岩石主量元素分析(%)及元素比值

Table 1 Major element analysis and element ratios of argillaceous rocks of the Shaximiao Formation

样号	SiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	FeO	MgO	CaO	Na ₂ O	K ₂ O	MnO	TiO ₂	P ₂ O ₅	CO ₂	H ₂ O ⁺	总和	K ₂ O/	Al ₂ O ₃ /	SiO ₂ /	K ₂ O/	ICV	CIA
															Al ₂ O ₃	TiO ₂	Al ₂ O ₃	Na ₂ O		
GH I 2-H1	70.9	13.34	5.43	0.68	1.21	0.49	0.43	2.41	0.06	0.83	0.13	0.06	3.84	99.84	0.18	16	5.32	5.60	0.81	77
GH I 4-H1	71.2	12.98	4.47	0.77	1.13	1.13	0.35	2.37	0.04	0.84	0.1	0.75	3.66	99.83	0.18	15	5.49	6.77	0.79	78
GH I 5-H1	59.6	15.5	5.22	0.82	1.55	4.83	0.53	2.76	0.13	0.77	0.19	3.54	4.32	99.82	0.18	20	3.85	5.21	1.01	77
GH I 6-H1	67.0	14.73	5.09	0.63	1.18	1.88	0.22	2.49	0.05	0.8	0.12	1.4	4.23	99.85	0.17	18	4.55	11.32	0.79	81
GH I 7-H1	59.9	17.18	5.94	1.13	1.94	2.3	0.77	2.77	0.09	0.88	0.11	1.5	5.21	99.79	0.16	20	3.49	3.60	0.85	76
GH I 8-H1	50.4	18.75	5.48	1.1	1.72	6.8	0.29	3.72	0.1	0.69	0.13	5.15	5.35	99.77	0.20	27	2.69	12.83	1.00	79
GH II 8-H1	61.7	15.2	5.76	0.63	1.84	3.37	1.18	2.89	0.07	0.67	0.12	2.47	3.83	99.79	0.19	23	4.06	2.45	1.03	68
GH II 9-H1	65.7	15.78	5.31	1.03	1.23	1.29	0.28	2.82	0.04	0.88	0.08	0.86	4.42	99.8	0.18	18	4.17	10.07	0.75	80
GH II 11-H1	61.0	17.47	7.19	0.38	2.29	1.16	0.95	2.29	0.05	0.83	0.15	0.59	4.87	99.23	0.13	21	3.49	2.41	0.84	76
GH II 14-H1	55.0	19.52	6.22	0.98	1.63	3.42	0.23	4.38	0.06	0.77	0.12	2.58	4.82	99.76	0.22	25	2.82	19.04	0.85	78
GH II 20-H1	74.3	11.2	4.38	0.65	0.95	1.17	0.24	2.23	0.04	0.74	0.06	0.8	3.08	99.84	0.20	15	6.63	9.29	0.87	78
GH II 24-H1	62.0	16.52	6.03	1.48	2.54	1.03	1.34	3.16	0.06	0.87	0.19	0.32	4.21	99.77	0.19	19	3.75	2.36	0.91	68
GH II 26-H1	56.3	16.66	5.92	1.17	2.49	4.52	0.95	3.08	0.1	0.78	0.15	3.11	4.56	99.79	0.18	21	3.38	3.24	1.06	72
GH II 28-H1	60.8	17.42	5.59	1.2	3.12	1.08	1.32	2.88	0.06	0.84	0.19	0.32	4.91	99.76	0.17	21	3.49	2.18	0.85	70
GH II 29-H1	62.1	15.18	5.21	0.8	1.42	3.94	0.36	2.96	0.06	0.78	0.12	2.9	3.87	99.79	0.19	19	4.10	8.22	0.97	78
GH II 31-H1	59.3	15.67	6.08	0.66	2.08	3.87	1.21	3.61	0.1	0.71	0.18	2.47	3.75	99.77	0.23	22	3.79	2.98	1.12	66
GH II 34-H1	52.2	19.62	6.93	0.87	1.89	4.41	0.33	4.32	0.07	0.77	0.18	3.11	5.05	99.77	0.22	25	2.66	13.09	0.95	77
平均值	61.7	16.04	5.66	0.88	1.78	2.75	0.65	3.01	0.07	0.79	0.14	1.88	4.35							
PAAS	62.4	18.88	7.18		2.19	1.29	1.19	3.68	0.11	0.99	0.16									

注:由武汉综合岩矿测试中心分析;CIA=[Al₂O₃/(Al₂O₃+CaO⁺+Na₂O+K₂O)]×100,式中的化学成分的含量均为摩尔数, CaO⁺是指岩石中硅酸盐矿物中所含 CaO 的摩尔数;ICV=(Fe₂O₃+K₂O+Na₂O+CaO+MgO+TiO₂)/Al₂O₃。

表 2 沙溪庙组泥质岩石微量元素化学分析结果 ($\mu\text{g/g}$)

Table 2 Trace element analysis of argillaceous rocks of the Shaximiao Formation

样号	Cr	Rb	Ba	Co	Ni	Sr	V	Cu	U	Th	Hf
GH I 2-H1	75.2	124	411	17.7	38.6	60.6	100	32.8	2.44	15.9	8.3
GH I 4-H1	73.9	123	388	18.6	38	67	97.1	29.8	2.51	15.8	8.4
GH I 5-H1	88.5	146	486	20.5	41.6	111	107	31.4	2.82	15.7	6.4
GH I 6-H1	88.3	138	484	21.1	45.8	83.5	121	43.2	2.79	16.7	8.4
GH I 7-H1	91.6	135	668	22.1	49	97.3	122	43.3	2.42	11.7	6
GH I 8-H1	107	197	636	21.6	48.4	155	143	33.2	3.98	17.8	4.3
GH II 8-H1	77.3	142	681	22.2	50.2	147	105	36.7	2.3	13.7	5
GH II 9-H1	88.7	154	611	20.4	45.9	97.8	139	28.5	3.45	15.7	7.4
GH II 11-H1	93.8	138	623	26.1	57.9	105	117	14	2.82	15.3	5.6
GH II 14-H1	104	225	822	25.3	58.9	130	153	36.9	3.16	18.5	5.4
GH II 20-H1	63.4	120	435	19.8	38.9	60.3	96.9	24.8	2.46	14.4	9
GH II 24-H1	86.6	140	763	26.6	59.2	138	122	12.5	2.76	14.5	5.7
GH II 26-H1	90.3	143	699	21.3	53	114	122	17.3	2.18	16.1	5.3
GH II 28-H1	80.8	132	716	27.6	63.6	233	117	44	2.36	14	5.6
GH II 29-H1	84.7	150	679	23.4	53.2	114	132	28.6	2.53	16.5	7.1
GH II 31-H1	84.2	136	925	26.7	57.6	160	111	32.7	1.81	13	5
GH II 34-H1	102	205	899	28.8	63.4	139	152	37.9	2.57	18.2	4.8
平均值	87.08	149.88	642.71	22.93	50.78	118.38	121.00	31.04	2.67	15.50	6.34
PAAS	110	160	650	23	55	200	150	50	3.1	14.6	5

注:由武汉综合岩矿测试中心采用光度法、原子吸收、原子荧光、发射光谱分析。

表 3 沙溪庙组泥质岩石稀土元素化学分析结果 ($\mu\text{g/g}$)

Table 3 REE analysis of argillaceous rocks of the Shaximiao Formation

样号	La	Ce	Pr	Nd	Sm	Eu	Gd	Tb	Dy	Ho	Er	Tm	Yb	Lu	Σ REE	LREE/HREE	δEu	(La/Yb) _N	(La/Sm) _N	(Gd/Yb) _N
GH I 2-H1	39.95	73.2	9.6	35.31	6.92	1.44	6.1	1.08	6.21	1.23	3.57	0.54	3.33	0.52	189.00	7.4	0.67	7.8	3.3	1.6
GH I 4-H1	39.53	73.15	9.5	34.56	6.95	1.39	6.16	1.07	6.25	1.22	3.5	0.53	3.32	0.53	187.66	7.3	0.64	7.7	3.3	1.6
GH I 5-H1	40.02	77.59	9.6	34.54	6.91	1.41	5.7	0.93	5.34	1.06	3	0.46	2.8	0.45	189.81	8.6	0.67	9.2	3.3	1.7
GH I 6-H1	44.04	78.26	10.17	37.31	7.59	1.52	6.8	1.11	6.56	1.25	3.56	0.56	3.29	0.52	202.54	7.6	0.64	8.7	3.3	1.7
GH I 7-H1	41.83	78.83	9.64	36.94	7.3	1.56	6.33	1.07	6.12	1.19	3.39	0.52	3.14	0.49	198.35	7.9	0.69	8.6	3.3	1.7
GH I 8-H1	52.63	97.95	12.07	44.26	8.52	1.68	6.9	1.05	5.87	1.15	3.2	0.49	2.91	0.46	239.14	9.9	0.66	11.7	3.5	2.0
GH II 8-H1	41.74	77.39	9.7	34.04	6.27	1.27	5.04	0.83	4.5	0.9	2.46	0.38	2.2	0.35	187.07	10.2	0.68	12.3	3.8	1.9
GH II 9-H1	45.29	74.36	9.96	36.51	6.79	1.36	5.78	1.00	6.07	1.23	3.46	0.53	3.19	0.52	196.05	8.0	0.65	9.2	3.8	1.5
GH II 11-H1	42.17	69.17	9.35	34.23	6.13	1.3	5.05	0.83	4.57	0.91	2.58	0.38	2.3	0.38	179.35	9.6	0.70	11.9	3.9	1.9
GH II 14-H1	55.21	101.6	12.48	44.82	8.38	1.6	6.51	1.07	5.81	1.14	3.19	0.47	2.88	0.47	245.63	10.4	0.64	12.4	3.8	1.9
GH II 20-H1	36.72	66.71	8.62	30.67	5.94	1.2	5.38	0.94	5.69	1.13	3.14	0.46	2.58	0.4	169.58	7.6	0.64	9.2	3.5	1.8
GH II 24-H1	43.2	78.38	10.49	38.29	7.5	1.63	6.5	1.03	5.77	1.15	3.15	0.45	2.76	0.45	200.75	8.4	0.70	10.1	3.3	2.0
GH II 26-H1	47.32	84.7	9.96	36.33	6.94	1.47	5.84	0.95	5.32	1.06	3.01	0.46	2.75	0.45	206.56	9.4	0.69	11.1	3.9	1.8
GH II 28-H1	40.09	66.36	8.7	31.23	6	1.27	5.05	0.8	4.65	0.93	2.69	0.41	2.58	0.41	171.17	8.8	0.69	10.1	3.8	1.7
GH II 29-H1	45.95	86.33	10.82	39.25	7.56	1.51	6.53	1.09	6.19	1.2	3.37	0.5	3.15	0.5	213.95	8.5	0.65	9.4	3.5	1.8
GH II 31-H1	38.61	72.46	8.83	33.33	6.44	1.4	5.45	0.83	4.59	0.9	2.45	0.36	2.26	0.37	178.28	10.4	0.71	11.1	3.4	2.0
GH II 34-H1	54.05	103.1	12.67	46.72	8.74	1.75	7.05	1.06	5.96	1.16	3.18	0.48	2.91	0.49	249.32	11.2	0.67	12.0	3.5	2.0
PAAS	38	80	8.33	33.9	5.55	1.08	4.66	0.77	4.68	0.99	2.85	0.4	2.83	0.43	184.47					

注:由武汉综合岩矿测试中心采用 ICP-AES 分析。

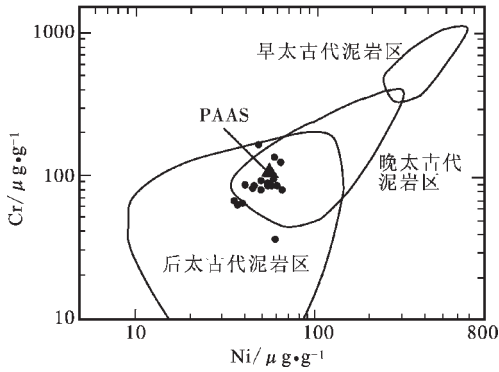


图1 沙溪庙组泥质岩 Ni-Cr 区分图(据参考文献[3])
PAAS—澳大利亚后太古代泥岩
Fig.1 Ni-Cr plot of argillaceous rocks of the Shaximiao Formation (after reference [3])
PAAS—Post-Archean Australian shale

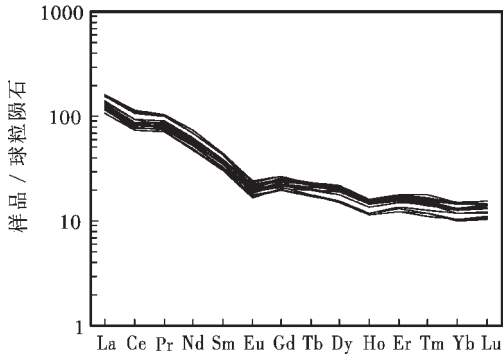


图2 沙溪庙组泥质岩标准化的 REE 配分图
Fig.2 Chondrite-normalized REE patterns of argillaceous rocks of the Shaximiao Formation

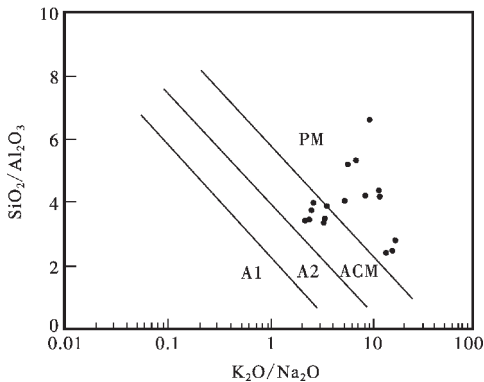


图3 K₂O/Na₂O-SiO₂/Al₂O₃ 构造背景判别图解
(据参考文献[15])

A1—为岛弧构造背景; A2—为演化岛弧背景;
ACM—为活动大陆边缘; PM—为被动大陆边缘

Fig.3 K₂O/Na₂O-SiO₂/Al₂O₃ plot of tectonic setting discrimination.

A1-island arc; A2-evolutionary island arc; ACM-active continental margin; PM-passive continental margin

元河西乡泥质岩石的物源区是以长英质岩石为主的。

泥质岩石样品的稀土总量相对较高, 为 $169.58 \times 10^{-6} \sim 249.32 \times 10^{-6}$, 平均含量为 200.25×10^{-6} 。轻稀土相对于重稀土富集, LREE/HREE 比值为 7.3~11.2, $(La/Yb)_N$ 为 7.7~12.4, 具有中等的负铕异常, δEu 为 0.64~0.71。在稀土配分曲线图上(图 2), 所有样品均具有比较一致的配分模式, 轻、重稀土含量均略高于 PAAS 的轻、重稀土含量。

3 讨论

3.1 物源区性质

REE、Th、Sc 和高场强等元素在水柱中停留时间短, 几乎全部进入了沉积物中, 这些相容和不相容元素的比例能够区分泥岩和砂岩中长英质、铁镁质来源的成分^[9-12]。基性岩 LREE/HREE 比值低, 无 Eu 异常, 而酸性岩通常具有较高的 LREE/HREE 比值和负 Eu 异常, 稀土配分型式可以被用来指示物源区的性质^[9, 13]。

广元河西乡沙溪庙组泥岩样品的 $(La/Yb)_N$ 值的范围为 7.7~12.4, 平均为 10.1, 表明样品轻重稀土的分馏程度较高; 轻稀土的 $(La/Sm)_N$ 为 3.3~3.9, 重稀土的 $(Gd/Yb)_N$ 为 1.5~2.0, 表明轻稀土分馏程度较高, 而重稀土分馏程度低; δEu 为 0.64~0.71, 平均为 0.67(表 3)。稀土元素的这些特征表明物源区的原始物质是长英质的。

K_2O/Al_2O_3 的比值也可以用来确定细碎屑岩源区的成分, 因为粘土矿物和长石的 K_2O/Al_2O_3 值存在明显的差别, 在碱性长石中 K_2O/Al_2O_3 比值为 0.4~1, 在伊利石中约为 0.3, 在其他粘土矿物中则接近于 0^[12]。Cox 等^[12]的研究表明, 当泥质岩中 K_2O/Al_2O_3 值大于 0.5 时, 说明母岩中具有相当数量的碱性长石; K_2O/Al_2O_3 比值小于 0.4 时, 说明母岩中只含有少量的碱性长石。沙溪庙组泥岩中 K_2O/Al_2O_3 比值为 0.13~0.23(表 1), 表明母岩中碱性长石的含量较低。Girty 等^[14]认为, 沉积物中 Al_2O_3/TiO_2 比值小于 14 时, 沉积物物源可能来源于铁镁质岩石; 而 Al_2O_3/TiO_2 比值在 19~28 时, 物源可能来源于安山质和流纹质(或者花岗闪长质和英云闪长质)岩石。沙溪庙组泥质岩石样品的 Al_2O_3/TiO_2 比值为 15~27, 平均值为 20(表 1), 表明其主要来源于长英质岩石, 而非镁铁质岩石。

3.2 构造背景判别

Roser 和 Korsch^[15]对世界不同地区已知构造背景的古代砂岩、泥岩和现代砂、泥质沉积物常量元素的特征进行了研究, 认为常量元素的 K_2O/Na_2O 比值是反映构造环境的最有效的指标, 并总结出了砂岩和泥岩的构造环境的 $K_2O/Na_2O-SiO_2/Al_2O_3$ 判别图(图 3)。在图中大部分泥质岩样品均落在被动大陆边缘区域, 部分样品落入活动大陆边缘。

沉积物中稀土的分布特征受一定构造背景下的源区母岩成分的控制, 是判断物源区大地构造背景的良好指标。Bhatia^[16, 17]研究了东澳大利亚 5 个已知构造环境的古代泥岩

及杂砂岩的稀土元素地球化学后,发现其稀土元素特征、源区类型和构造背景之间存在着相应关系。稀土含量明显地受源区类型的控制,从大洋岛弧→大陆岛弧→活动大陆边缘→被动大陆边缘,随着源区从安山岩→英安岩→花岗岩麻岩→古老沉积岩,其中 ΣREE 、 LREE/HREE 增高, δEu 降低。与澳大利亚已知不同构造背景下的杂砂岩和泥岩的参数相比较^[16,17],广元河西乡中侏罗统沙溪庙组泥岩样品的稀土元素特征与被动大陆边缘的稀土元素特征相似,反映了其物源区的大地构造背景为被动大陆边缘。

3.3 源区的古风化作用及对古气候的指示

细碎屑沉积岩比与其共生的砂岩更能够反映源区风化强度的变化^[9]。Nesbitt 等^[18]提出可以用 CIA 指数(chemical index alteration)来确定物源区的化学风化程度,该指数是目前被广泛地用于确定物源区风化特征的化学指标。CIA 指数的计算公式: $\text{CIA}=[\text{Al}_2\text{O}_3/(\text{Al}_2\text{O}_3+\text{CaO}^*+\text{Na}_2\text{O}+\text{K}_2\text{O})]\times 100$,式中的化学成分的含量均为摩尔数, CaO^* 是指存在于硅酸盐矿物中的 CaO。由于硅酸盐矿物中 CaO 与 Na_2O 通常以 1:1 的比例存在,所以 McLennan^[19]认为当 CaO 的摩尔数大于 Na_2O 时,可认为 $m\text{CaO}^*=m\text{Na}_2\text{O}$;而小于 Na_2O 时则 $m\text{CaO}^*=m\text{CaO}$ 。在广元河西乡恐龙化石埋藏地沙溪庙组地层剖面上,样品的 CIA 指数变化范围为 66~81(表 1),平均为 75,绝大部分在 80 以下。样品的 CIA 指数表明物源区经历了一个中等的化学风化,反映了白云母、伊利石、蒙脱石的成分,更强的风化程度将会在泥岩中富集高岭石、水铝矿等粘土矿物,其 CIA 指数将接近 100^[18]。样品的 CIA 指数揭示物源区可能处于一个半干旱的气候条件。

成分成熟度与沉积物形成的气候背景和构造背景有关,ICV(index chemical variation)指数可以用来确定沉积物的成分成熟度^[20]。成分成熟度低的泥质岩石含有较高比例的非粘土硅酸盐矿物,或者富含蒙脱石、绢云母等粘土矿物,具有高的 ICV 值;相反,含非粘土硅酸盐矿物少或以高岭石矿物占优势的泥质岩,其 ICV 值低。构造活动区泥质岩石的成分成熟度低,而在构造稳定区或者是强烈的化学风化背景下泥质岩的成分成熟度高。研究区泥岩样品的 ICV 指数在 0.75~1.12(表 1),平均值为 0.91,表明了它们的成分成熟度较低,说明其物源区的化学风化作用较弱或处于一个构造较活动的区域。

上述恐龙化石埋藏地泥岩样品的 CIA、ICV 指数,均表明该区沙溪庙组物源区具有相对较弱(或中等)的化学风化程度,揭示了物源区可能是一个半干旱的气候条件或为一个构造相对活动的地区。

四川中生代陆相盆地是一个位于松潘—甘孜造山带边缘的前陆盆地^[20,21],盆地的形成与龙门山的隆起具有密切的联系,其沉积物主要来自于北西部的龙门山构造带^[22]。中侏罗世—晚期在盆地边缘和盆地内部沉积了一套广泛分布的以沙溪庙组为代表的砂、泥质沉积,缺乏砾岩等冲积扇体沉积物,表明这一时期龙门山构造带处于一个构造活动相对稳

定的时期。因此,沙溪庙组地层剖面上 CIA、ICV 指数的变化主要受化学风化作用的影响,它受控于物源区的气候条件,因而反映了中侏罗世物源区是半干旱的气候条件。由于盆地中沉积物主要来自于北西部的龙门山,物源区与沉积区的距离相对较近。考虑到上述两个因素,可以认为物源区与沉积区的气候条件基本相同,都是一个半干旱的气候条件。

中侏罗世四川盆地的古气候特征也可以从沉积物及生物群面貌上得到一定的反映^[8,10]。早侏罗世自流井组以泥页岩、粉砂岩夹介壳灰岩为特征,生物种类繁多,当时湖盆处在一种比较温暖、潮湿的正常湖相环境。中侏罗世中、晚期沉积环境发生明显的变化,盆地由早侏罗世—中侏罗世初期以湖泊环境为主,转变为以河流环境为主,该期沉积环境为河流相与湖泊相交替,生物化石相对稀少。特别是在中侏罗世晚期(沙溪庙组上段),沉积环境主要以河流相为主,并且在洪泛平原上广泛发育以钙质结核为代表的古土壤层,反映了一个与早侏罗世明显不同的半干旱的古气候环境。

4 结论

四川广元河西乡恐龙化石埋藏地中侏罗统沙溪庙组泥质岩的地球化学特征研究表明,它们的物源区以长英质岩石为主,其构造背景为被动大陆边缘。反映化学风化程度的 CIA 指数及成分成熟度的 ICV 指数,表明物源区经历了一个中等的化学风化作用,这反映了中侏罗世恐龙生活在一个半干旱的古气候环境之中,与这一时期四川盆地以河流为主并发育钙质结核的古环境特征是相吻合的。四川盆地中侏罗世是恐龙动物群最为繁盛的时期,岩石地球化学特征所反映的古气候条件为恢复恐龙的古生态提供了新的信息。半干旱的气候条件对恐龙的生存产生了影响,迫使恐龙必须在盆地内进行迁徙,因而恐龙化石点在盆地各处均有发现。

参考文献(References):

- [1] Cullers R L, Basu A, Suttner L. Geochemical signature of provenance in sand-size material in soils and stream sediments near the Tobacco Root batholith, Montana, USA [J]. Chem.Geol. 1988, 70, 335~348.
- [2] Bhatia M R, Crook K A W. Trace element characteristics of greywackes and tectonic setting discrimination of sedimentary basin [J]. Contrib. Mineral. Petrol. 1986, 92: 181~193.
- [3] Taylor S R, McLennan S M. The continental crust: its composition and evolution[M]. Blackwell, Oxford, 1985. 1~312.
- [4] McLennan S M, Hemming S R, McDaniel D K, et al. Geochemical approaches to sedimentation, provenance, and tectonics [A]. In: Johnsson M J, Basu A (eds.). Processes Controlling the Composition of Clastic Sediments[C]. Geol. Soc. Am, Spec. Pap. 1993, 284, 21~40.
- [5] McLennan S M. Rare earth elements in sedimentary rocks: influence of provenance and sedimentary processes[A]. In: Lipin B R, McKay G A (eds.). Geochemistry and Mineralogy of REE[C]. Mineral. Soc.

- Am., Rev. Mineral. 1989, 21, 169~200.
- [6] Condie K C. Chemical composition and evolution of the upper continental crust: contrasting results from surface samples and shales [J]. *Chemical Geology*, 1993, 104:1~37.
- [7] 董枝明, 周世武, 张奕宏. 四川盆地侏罗纪恐龙化石[M]. 北京: 科学出版社, 1983.1~120.
Dong Zhiming, Zhou Shiwu, Zhang Yihong. Dinosaur fossils from early Jurassic in Sichuan basin[M]. Beijing: Science Press, 1983.1~89 (in Chinese with English abstract).
- [8] 四川盆地陆相中生代地层古生物编写组. 四川盆地陆相中生代地层古生物[M]. 成都: 四川人民出版社, 1982.1~215.
Compilation Group of Stratigraphy and Paleontology of Mesozoic Continental Strata in the Sichuan Basin. Strata and Paleontology in Mesozoic of the Continental Strata in Sichuan Basin[M]. Chengdu: Sichuan People's Press, 1982.1~215 (in Chinese with English abstract).
- [9] 夏文杰, 李秀华. 恐龙埋藏环境及岩相古地理特征 [M]. 成都: 四川科学技术出版社, 1988, 29~63.
Xia Wenjie, Li Xiuhua. Burial Environment and Characteristics of Lithofacies and Paleogeography [M]. Chengdu: Sichuan Science and Technology Press, 1988. 29~63 (in Chinese with English abstract).
- [10] 王全伟, 阚泽忠, 朱兵, 等. 四川广元恐龙化石埋藏地上沙溪庙组的双壳动物群[J]. *四川地质学报*, 2005, 25(1): 1~3.
Wang Quanwei, Kan Zehong, Zhu Bing, et al. Bivalve fauna in the middle Jurassic upper Shaximiao Formation as burying place of dinosaur, in Guangyuan, Sichuan[J]. *Acta Geologica Sichuan*, 2005, 25(1): 1~3 (in Chinese with English abstract).
- [11] 李奎, 张玉光, 蔡开基, 等. 四川盆地侏罗纪恐龙骨骼及红层的微量元素组合特征[M]. 北京: 地质出版社, 1999. 1~45.
Li Kui, Zhang Wuguang, Cai Kaiji, et al. The Characteristics of Rare Elements of Dinosaur Skeletons and Red Clastic Rocks in Sichuan basin [M]. Beijing: Geological Publishing House, 1999. 1~45 (in Chinese with English abstract).
- [12] Cox R, Lowe D R, Cullers R L. The influence of sediment recycling and basement composition on evolution of mudrock chemistry in the southwestern United States [J]. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 1995, 59: 2919~2940.
- [13] Wronkiewicz D J, Condie K C. Geochemistry of Archean shales from the Witwatersrand Supergroup, South Africa: source – area weathering and provenance [J]. *Geochim. Cosmochim. Acta*, 1987, 51: 2401~2416.
- [14] Girty G H, Ridge D L, Knaack C, et al. Provenance and depositional setting of Paleozoic chert and argillite, Sierra Nevada, California[J]. *Journal of Sedimentary Research*, 1996, 66(1): 107~118.
- [15] Roser B P, Korsch R J. Plate tectonic setting of sandstone – mudstone suites using SiO₂ content and K₂O/Na₂O ratio[J]. *Journal of Geology*, 1986, 94: 635~650.
- [16] Bhatian M R, Taylor S R. Trace element geochemistry and sedimentary provenance: study from the Tasman geosyncline, Australia[J]. *Chemical Geology*, 1981, 33(1): 115~125.
- [17] Bhatian M R. Rare earth element geochemistry of Australian Palaeozoic greywackes and mudrocks: provenance and tectonic control[J]. *Sedimentary Geology*, 1985, 45: 97~113.
- [18] 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.
- [19] McLennan S M. Weathering and global denudation [J]. *Journal of Geology*, 1993, 101: 295~303.
- [20] 许志琴, 侯立玮. 松潘—甘孜造山带的造山过程[M]. 北京: 地质出版社, 1992. 1~57.
Xu Zhiqing, Hou Liwei. Orogenic Process of Songpan – Ganze Orogenic Belts [M]. Beijing: Geological Publishing House, 1992, 1~57 (in Chinese with English abstract).
- [21] 潘桂棠, 陈智梁, 李兴振, 等. 东特提斯地质构造形成演化[M]. 北京: 地质出版社, 1997. 104~128.
Pan Guitang, Chen Zhiliang, Li Xingzhen, et al. Geological – Tectonic Evolution in the Eastern Tethys [M]. Beijing: Geological Publishing House, 1997. 104~128 (in Chinese with English abstract).
- [22] 李勇, 曾允孚. 龙门山前陆盆地沉积及构造演化[M]. 成都: 成都科技大学出版社, 1995. 1~91.
Li Yong, Zhen Yufu. Sedimentary and Tectonic Evolution in Longmenshan Foreland Basin [M]. Chengdu: Chengdu University of Science and Technology Press, 1995. 1~91 (in Chinese with English abstract).

Geochemistry of the Shaximiao Formation in a dinosaur fossil site, Guangyuan, Sichuan, and its implications for the source area and paleoweathering

KAN Ze-zhong^{1,3} LIANG Bin² WANG Quan-wei³ ZHU Bing³

(1. *Chengdu University of Technology, Chengdu 610059, Sichuan, China;*

2. *Faculty of Resources and Environment, Southwest University of Science and Technology, Mianyang 621000, Sichuan, China;*

3. *Sichuan Institute of Geological Survey, Chengdu 610081, Sichuan, China*)

Abstract: The site of the Guangyuan dinosaur fossil is an important fossil site of Middle Jurassic dinosaurs in the Sichuan basin. Dinosaur fossils are buried in argillaceous rocks of the Middle Jurassic Shaximiao Formation. The major element, trace element and REE compositions of argillaceous rocks of the Shaximiao Formation in the dinosaur fossil site in Guangyuan, Sichuan, are studied and the provenance, tectonic setting and weathering of the provenance are discussed according to the geochemical characteristics of the argillaceous rocks. The major and trace elements indicate that felsic rocks predominate in the provenance and that the tectonic setting is the passive continental margin. The chemical index of alteration (CIA) and index of chemical variation (ICV) indicate that their provenance underwent moderate chemical weathering processes, which suggests that the dinosaurs lived in a semiarid climatic environment in the Middle Jurassic.

Key words: geochemistry; dinosaur; Jurassic; Sichuan basin

About the first author: KAN Ze-zhong, male, born in 1963, master candidate and senior engineer; specializes in regional geology and mineral deposit geology; E-mail: scddyjcb@vip.sina.com.