

扬子克拉通北缘碎屑沉积岩地球化学特征及意义

周 炼, 高山, 刘勇胜, 凌文黎, 张 利

中国地质大学地质过程与矿产资源国家重点实验室, 湖北武汉 430074

摘要: 通过系统研究扬子克拉通北缘西乡—碑坝小区后太古代变质沉积岩的主量元素、微量元素和 Nd 同位素组成, 得出如下结论: (1) 扬子北缘中、晚元古代三花石组杂砂岩的 $\epsilon_{\text{Nd}}(t)$, 分别为 +2.72 和 +0.69, T_{DM} 分别为 1.40 Ga 和 1.57 Ga, 与扬子北缘同时期西乡群火山岩具有相近的 Nd 同位素组成, 扬子克拉通北缘新元古代存在的岛弧物质控制着该区中、晚元古代沉积物源的地球化学组成, 后河群碎屑物质对火地垭群沉积岩有一定的影响; (2) 扬子克拉通北缘古生代沉积物源区以再旋回沉积物源为主, 并随时间变化对再旋回沉积物源的接受逐渐加强, 沉积源区的长英质物质逐渐增多, 分异程度越来越高; 西乡—碑坝小区从寒武纪—志留纪沉积物源很可能是扬子克拉通基底崆岭群和基性火山岩等风化剥蚀后混合的产物, 本区从晚泥盆世开始, 其沉积物源区与秦岭群片麻岩的风化剥蚀有明显的关系; (3) 扬子北缘西乡—碑坝小区从晚二叠世到早侏罗世碎屑沉积岩的 $\epsilon_{\text{Nd}}(t)$ 比早古生代碎屑沉积岩的明显偏大, 结合微量元素数据分析, 这与晚二叠世峨眉山玄武岩的多次喷发(火山灰)和风化剥蚀作用有关。

关键词: 扬子克拉通北缘; Sm-Nd 同位素; 微量元素; 碎屑沉积岩。

中图分类号: P591

文章编号: 1000-2383(2007)01-0029-10

收稿日期: 2006-04-06

Geochemistry and Implications of Clastic Sedimentary Rocks from the Northern Margin of Yangtze Craton

ZHOU Lian, GAO Shan, LIU Yong-sheng, LING Wen-li, ZHANG Li

State Key Laboratory of Geological Processes and Mineral Resources, China University of Geosciences, Wuhan 430074, China

Abstract: This paper presents Sm-Nd and geochemical data on fine-grained sediments of the north margin from the Yangtze craton, China. Systematic research leads to the following conclusions; (1) Nd isotope composition of the clastic sedimentary rocks from the Middle-Upper Proterozoic has the $\epsilon_{\text{Nd}}(t)$ values of +2.72 to +0.69, with the Nd model ages of 1.40 Ga and 1.57 Ga, which corresponds to that of the contemporaneous volcanic rocks from Xixiang Group. It indicates that the arc materials from the Proterozoic control the geochemical composition of main provenances of the Middle-Upper Proterozoic sedimentary rocks. (2) The probable provenances of the Paleozoic sedimentary rocks are dominantly the recycled products of Proterozoic crust as indicated by the decrease of the $\epsilon_{\text{Nd}}(t)$ with the time. The sedimentary rocks from the Cambrian-Silurian were derived ultimately from a polycyclic mixture of the old continental crust materials from the Kongling strata and arc materials from the Proterozoic volcanic in the north margin of the Yangtze craton. The derivation is markedly of sources relatively more felsic extreme weathering. The geochemical and isotopic data indicate that the provenance of Devonian terrain has changed with the progressively increasing proportions of materials from the Qinling complex by erosion. (3) The more prominent increase in the $\epsilon_{\text{Nd}}(t)$ values of the Upper Permian formation probably reflects the significant incorporation of the mantle-derived materials. The comparison between the data of trace element and the data of EMS indicates that the dust of volcano from EMS was related to the Late Permian strata during the Late Permian when the volcanism, represented by Emeishan flood basalts (251–258) in the south-western margin of the Yangtze block was extremely active.

Key words: northern margin of Yangtze craton; Sm-Nd isotope; trace element; clastic sedimentary rocks.

秦岭造山带是中国著名的大陆造山带之一,具有漫长的地质演化历史和复杂多样的物质组成及构造特点,历来受到中外地质界的重视。秦岭造山带经历了长期的改造和变动,其自身地质的复杂性使得很多现象被掩盖起来或者消失了,即使保留下来的一些现象也由于多次变化而面目全非,因此在很多重要问题上存在严重的分歧。主要问题包括:扬子与华北克拉通有无统一的基底;两克拉通之间是否存在古洋;秦岭古洋盆的闭合时限及演化历史;秦岭造山带加里东构造事件的性质及其与印支期最终陆—陆碰撞之间的关系等(李晋僧等,1994;张本仁等,1994)。近 10 年来,有关秦岭造山带及邻区地球化学研究成果已有大量的积累(Gao *et al.*, 1991, 1995, 1999;陈江峰等,1989;李曙光等,1994;李献华和 McCulloch, 1996;高山等,2005;张宏飞等,2006),相比之下,对扬子克拉通北缘显生宙碎屑沉积岩的微量元素地球化学及其配套的 Sm-Nd 同位素研究相对薄弱。本文以扬子克拉通北缘西乡—碑坝小区为研究对象,根据微量元素和 Sm-Nd 同位素地球化学特征,重点对该区显生宙细粒碎屑岩源区及其随时代变化的规律进行探讨,力图用多种地球化学方法加深对扬子克拉通显生宙沉积物源和构造演化的认识。

1 地质背景

扬子克拉通北缘西乡—碑坝小区,在构造上位于大巴山弧形断裂以南,扬子克拉通北缘向北突出的弧形地带,是扬子北缘中晚元古代的隆起区,米仓山脉构成了本区的次级隆起带。该区最老基底为米仓山以南碑坝地区的火地垭群,其上部为震旦系地层不整合覆盖。火地垭群底部为后河群,主要由 TTG 片麻岩和斜长角闪岩等组成。高山(1989)对后河群英云闪长—奥长花岗质片麻岩进行系统的元素地球化学研究表明,其地球化学特征与全球太古宙 TTG 片麻岩相似,后河群中极有可能存在太古宙岩石,因此,后河群是区内已知的最古老基底地层;该区中部为不整合于后河群之上的上两组和麻窝子组变沉积岩系,由变质砾岩、石英岩、硅质白云质大理岩、硅质岩及碳质黑云母板岩等组成;上部的铁船山组变火山岩系,由具双峰特征的大陆裂谷拉斑玄武岩、碱性安山流纹岩、流纹质凝灰岩和火山角砾岩组成。米仓山以北出露的地层主要为西乡群,自下而上可分为白沔峡组、三湾组、三花石组、孙家河组和大

石沟组。研究区扬子克拉通盖层包括震旦系—侏罗系,盖层首次沉积为早震旦世的南沱组冰积岩。震旦纪—中三叠世地层为典型的扬子克拉通沉积,以海相为主。晚三叠世—中侏罗世为陆相地层。上述盖层沉积大多可与三峡地区扬子克拉通标准地层剖面对比(陕西省地质矿产局,1989;高山,1989)。

2 样品和分析方法

本文研究的样品采自扬子克拉通北缘西乡—碑坝小区和高川小区(图 1)。为了使得所选择的碎屑沉积岩更能反映源区的组成,尽量选择粒度较细的泥质岩(包括板岩和千枚岩)和粉砂岩。野外采集的样品,首先经鄂式破碎机粗碎,然后细分为 2~4 份,将其中的一份用玛瑙罐研磨机细碎, H₂O 和 CO₂ 含量分别用容积分析法和体积法测定,主量元素氧化物用 X 荧光法分析,分析精度优于 10%。微量元素及稀土元素分析利用 ICP-MS 进行测定,稀土元素分析精度优于 5%,其他微量元素的分析精度在 5%~15% 之间。微量元素和 Sm、Nd 同位素分析在中国地质大学地质过程与矿产资源国家重点实验室完成,分析过程如下:采用聚四氟乙烯的密封 bomb 进行溶解样品,利用十万分之一的天平对每个样品各称取 2 份,分别测定样品的 ¹⁴³Nd/¹⁴⁴Nd 同位素比值和 Sm、Nd 含量,在测定 Sm-Nd 含量的 bomb 中加入 ¹⁴⁵Nd 和 ¹⁴⁹Sm 的混合稀释剂,并进行充分混合。在

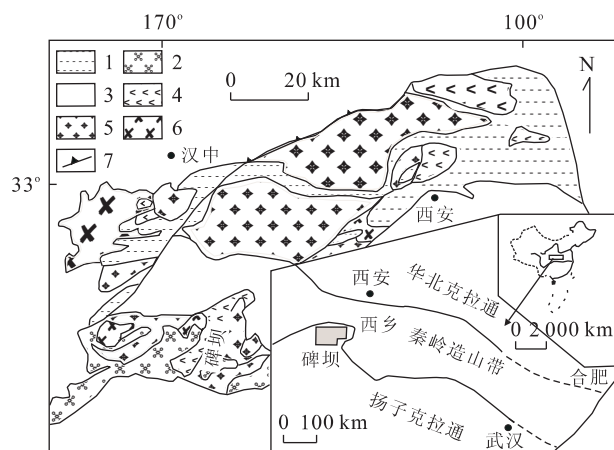


图 1 扬子克拉通北缘西乡—碑坝地区区域地质略图(高山, 1989)

Fig. 1 Generalized geological map of Xixiang-Beiba subunit
1. 西乡群; 2. 后河群、火地垭群; 3. 震旦纪—显生宙沉积岩; 4. 基性—超基性岩; 5. 英云闪长岩、奥长花岗岩; 6. 偏碱性或碱性花岗岩类; 7. 断层

表 1 扬子克拉通西乡—碑坝小区和高川小区碎屑沉积岩主量元素(%)和微量元素含量(10^{-6})

Table 1 Concentration of trace elements of clastic sediment from Xixiang-Beiba subunit

样品号	5311	5307	4417	4424	4002	4016	4326	4513	4335	4348	4358	4607	4618	4814	4820	4915	4919	4939
时代	Pt ₂	Pt ₂	Pt ₃	Pt ₃	Pt	Pt	∈ ₁	∈ ₁	O ₂	S ₁	S ₂	D ₃	C ₁	P ₂	P ₂	T ₃	J ₁	J ₂
SiO ₂	63.19	68.39	55.5	59.1	71	58.42	73.34	57.12	49.58	63.56	62.41	48.63	31.04	49.43	35.56	68.01	59.77	59.87
TiO ₂	0.79	0.67	0.88	0.73	0.96	1.39	0.57	0.69	0.58	0.73	0.76	0.79	0.63	0.55	3.11	1.05	1.37	0.88
Al ₂ O ₃	16.2	14.9	20.4	20.2	11	17.4	11.8	18.03	10.9	16.8	16.9	22.38	16.1	14.9	32.01	18.08	15.66	17.5
Fe ₂ O ₃	3.17	2.44	4.85	4.19	4.48	7.42	4.68	3.4	2.79	1.21	2.27	2.62	1.82	2.0	13.95	0.83	4.8	5.03
FeO	2.41	2.04	1.83	1.99	5.9	3.76	1.9	2.86	1.72	4.83	4.17	1.78	2.35	1.74	0.09	1.50	3.82	2.26
MgO	2.14	1.33	2.58	2.28	0.80	1.53	1.49	3.15	6.98	2.55	2.65	1.18	1.43	1.70	0.38	1.10	2.63	2.93
MnO	0.1	0.09	0.09	0.02	0.07	0.17	0.04	0.04	0.04	0.07	0.06	0.05	0.07	0.10	0.01	0.03	0.11	0.14
CaO	3.02	1.44	1.2	0.25	0.5	1.4	0.45	2.04	7.69	0.55	0.7	6.78	21.81	11.68	0.95	0.45	1.400	1.40
Na ₂ O	4.06	3.4	1.26	0.98	0.36	1.85	1.16	0.84	0.29	1.19	1.04	0.33	0.35	0.26	0.09	0.11	2.09	0.06
K ₂ O	2.27	2.86	6.13	4.88	2.71	2.8	4.03	5.78	6.19	3.89	4.09	3.24	2.05	3.33	0.48	3.33	2.14	2.89
P ₂ O ₅	0.22	0.18	0.14	0.08	0.14	0.58	0.13	0.1	0.14	0.13	0.12	0.13	0.13	0.19	0.12	0.05	0.25	0.19
CO ₂	0.12	0.19	0.17	0.14	0.32	0.31	2.81	1.36	10.76	0.28	0.48	4.95	17.03	8.53	0.74	0.31	0.77	0.88
H ₂ O ⁺	2.01	1.84	4.77	4.89	1.65	2.58		4.44	2.19	4.17	4.4	6.57	4.57	3.87	11.47	4.74	4.41	4.5
SUM	100	100	100	100	100	100	101	100	100	100	100	99	99	98	99	100	99	99
CIW	57	65	83	91	88	76	81	78	43	85	85	63	29	41	94	95	72	87
Al ₂ O ₃ /SiO ₂	0.26	0.22	0.37	0.34	0.15	0.30	0.16	0.32	0.22	0.26	0.27	0.46	0.52	0.30	0.90	0.27	0.26	0.29
K ₂ O/Na ₂ O	0.56	0.84	4.87	4.98	7.53	1.51	3.49	6.88	21.34	3.27	3.93	9.82	5.86	12.81	5.33	30.27	1.02	48.17
Sc	10	7	12	17	17	14	10	19	7	18	14	17	17	15	25	17	23	16
V	153	52	80	154	135	161	89	116	79	108	114	111	88	130	187	110	461	119
Cr	92	21	48	65	65	67	61	106	58	96	95	96	90	78	107	64	742	114
Co	20	8	10	14	16	29	12	18	10	18	17	16	14	17	27	5.3	4.7	20
Ni	42	279	290	29	34	44	90	44	96	47	50	45.1	36	81	53	23	94	61
Cu	34	17	19	30	46	15	9	21	15	29	33	24.9	19	42	212	88	140	29
Zn	75	60	66	52	31	151	48	81	53	91	93	71.1	63	91	109	88	28	98
Ga	18	16	16	20	14	23	14	26	15	22	21	26	21	19	19	21	35	23
Rb	36	52	59	85	50	31	72	188	125	157	82	95	89	124	65	105	5.5	119
Sr	461	238	50	43	185	86	59	28	54	62	37	92	142	179	64	51	23	104
Ba	377	471	376	1553	266	577	557	521	764	546	495	257	177	252	678	497	51	542
Pb	16	22	170	20	4.5	20	8.4	13	10	7.5	8	38	22	34	26	5	81	34
Cs	3	4.4	2.4	5	2.1	1.4	3.2	10	5.9	11	9.4	18	9.8	10	3.1	11	0.9	6.8
Th	4.6	5.6	6.5	7.8	4.8	4.2	7.8	19	12	17	9.1	15	14	13	6.2	8.9	31	17
U	1.0	0.8	1.2	3.8	1.1	1.7	2.1	2.8	2.7	2.8	2.5	2.5	2.0	5.3	1.1	2.4	12	2.7
Zr	113	143	165	131	97	220	217	153	153	165	156	145	107	109	184	297	630	163
Hf	3.1	4.3	4.7	3.8	2.9	6.5	6	4.9	4.3	4.9	4.5	4.6	3.0	3.2	5.6	8.7	19	4.7
Nb	4.4	6.4	8.3	8.5	7.3	14	8.3	14	11.3	14	10	16	13	11	16	17	25	15
Ta	0.3	0.4	0.5	0.6	0.5	0.9	0.6	1.0	0.8	1.0	0.6	1.2	0.9	0.8	1.0	1.1	0.6	1.0
Y	15	17	20	21	20	33	22	18	23	27	18	19	16	20	26	23	42	24
La	13.6	11.8	17.8	22.1	15.5	16.4	23.6	37.3	33	36.9	20.2	29.1	26.5	30.7	39.17	34.04	36.75	38.3
Ce	26.7	25.1	36.7	41	26.5	41	54	64.8	60.9	70.5	41.9	57.2	51.8	58.9	40.96	59.35	34.03	73.6
Pr	4.21	3.47	5.4	6.47	4.1	6.44	7.15	9.02	8.44	9.9	6.5	7.65	6.89	8.23	9.48	8.06	8.95	10.5
Nd	18.2	14.2	22.4	26.6	16.5	29.5	29.2	32.3	32.4	38.9	26.5	29.5	26.2	32	36.29	29.05	33.07	41.7
Sm	4.18	3.3	4.96	5.65	3.81	7.95	5.39	5.35	6.5	7.9	6.01	6.2	5.33	6.4	7.27	5.66	6.71	8.23
Eu	1.31	0.82	1.27	1.62	1.15	2.07	1.33	1.16	1.46	1.68	1.33	1.31	1.1	1.3	1.62	1.53	1.51	1.81
Gd	3.32	2.75	3.99	4.47	3.53	7.08	4.5	4.56	5.43	6.29	4.77	4.89	4.36	5.08	6.21	4.81	5.35	6.43
Tb	0.54	0.49	0.68	0.76	0.61	1.26	0.74	0.69	0.86	1.0	0.81	0.8	0.64	0.77	1.18	0.83	1.13	0.91
Dy	2.96	2.96	3.82	4.06	3.59	7.12	4.13	3.73	4.59	5.27	4.36	4.19	3.41	4.07	7.8	4.43	7.23	4.6
Ho	0.63	0.68	0.81	0.85	0.78	1.52	0.89	0.79	0.94	1.08	0.89	0.87	0.66	0.8	1.78	0.97	1.72	0.92
Er	1.72	1.88	2.27	2.37	2.13	4.19	2.54	2.35	2.64	3.01	2.56	2.48	1.86	2.26	5.64	2.65	4.91	2.53
Tm	0.3	0.35	0.41	0.4	0.36	0.72	0.44	0.42	0.46	0.52	0.44	0.44	0.32	0.39	0.9	0.48	0.92	0.43
Yb	1.76	2.05	2.47	2.33	2.11	4.18	2.63	2.46	2.61	3.03	2.61	2.69	1.91	2.35	6.04	3.07	5.61	2.53
Lu	0.26	0.32	0.36	0.36	0.34	0.66	0.41	0.39	0.41	0.47	0.41	0.43	0.29	0.36	0.9	0.5	0.92	0.38

续表 1

样品号	5311	5307	4417	4424	4002	4016	4326	4513	4335	4348	4358	4607	4618	4814	4820	4915	4919	4939
时代	Pt ₂	Pt ₂	Pt ₃	Pt ₃	Pt	Pt	Є ₁	Є ₁	O ₂	S ₁	S ₂	D ₃	C ₁	P ₂	P ₂	T ₃	J ₁	J ₂
ΣREE	79.71	70.2	103	119	81	130	137	165	160	186	119	148	131	153	149	155	139	192
Eu/Eu*	1.07	0.83	0.87	0.98	0.96	0.84	0.82	0.72	0.75	0.73	0.76	0.73	0.7	0.69	0.77	0.9	0.78	0.76
Ce/Ce*	0.83	0.92	0.88	0.8	0.78	0.93	0.97	0.83	0.85	0.86	0.86	0.9	0.9	0.87	0.44	0.84	0.86	0.86
La/Yb	5.20	3.91	4.86	6.41	4.97	2.66	6.06	10.26	8.54	8.21	5.21	7.32	9.34	8.83	4.42	7.5	6.85	10.23
Gd/Yb	1.53	1.09	1.31	1.56	1.36	1.37	1.39	1.5	1.68	1.68	1.48	1.48	1.85	1.76	0.77	1.27	1.25	2.06
Sm/Nd	0.23	0.23	0.22	0.21	0.23	0.27	0.18	0.17	0.20	0.20	0.23	0.21	0.20	0.20	0.20	0.19	0.20	0.20
Th/Sc	0.47	0.76	0.53	0.45	0.28	0.30	0.75	1.00	1.57	0.91	0.66	0.89	0.89	0.86	0.25	0.52	0.25	1.05
Zr/Sc	11.48	19.34	13.39	7.53	5.76	15.81	20.84	8.03	20.57	9.02	11.29	8.79	6.92	7.38	17.26	17.31	7.39	10.27
Cr/Th	20.07	3.80	7.39	8.30	13.46	16.08	7.82	5.60	4.92	5.73	10.44	6.56	6.51	6.16	24.28	7.20	17.33	6.83
La/Th	2.95	2.11	2.75	2.83	3.23	3.94	3.04	1.97	2.83	2.21	2.21	1.99	1.92	2.41	6.32	3.84	4.83	2.30
La/Nb	3.11	1.85	2.15	2.60	2.12	1.17	2.84	2.71	2.93	2.57	2.04	1.83	2.05	2.89	2.45	1.86	1.26	2.58

表 2 南秦岭和扬子克拉通各小区碎屑沉积岩及部分火山岩 Sm-Nd 同位素数据
Table 2 Sm-Nd isotopic composition of clastic sediment from Xixiang-Beiba subunit

样品号	时代	¹⁴³ Nd/ ¹⁴⁴ Nd	±2σ	Nd(μg/g)	Sm(μg/g)	¹⁴⁷ Sm/ ¹⁴⁴ Nd	t(Ga)	T _{DM} (Ga)	ε _{Nd} (0)	ε _{Nd} (t)
4939	中侏罗世	0.511 904	9	40.72	7.76	0.115 1	0.10	2.08	−14.32	−13.28
4919	早侏罗世	0.512 329	8	29.22	6.03	0.124 7	0.10	1.38	−6.03	−5.11
4915	晚三叠世	0.512 368	15	30.60	6.33	0.125 0	0.15	1.32	−5.27	−3.89
4820	晚二叠世	0.512 474	9	37.00	7.88	0.128 7	0.25	1.15	−3.20	−1.03
4814	晚二叠世	0.511 972	8	30.02	5.68	0.114 4	0.25	1.95	−12.99	−10.90
4358	中志留世	0.511 886	9	29.90	5.98	0.120 8	0.40	2.11	−14.67	−10.80
4348	早志留世	0.512 078	19	37.94	7.28	0.116 0	0.42	1.76	−10.92	−6.60
4335	中奥陶世	0.511 952	8	28.14	5.64	0.121 1	0.50	2.00	−13.38	−8.56
4326	早寒武世	0.512 143	13	29.64	5.20	0.106 0	0.58	1.58	−9.66	−2.93
4107	火地垭群	0.511 591	9	21.75	4.52	0.125 5	1.20	2.64	−20.42	−9.51
4002	火地垭群	0.511 733	17	17.10	3.71	0.131 1	1.20	2.48	−17.65	−7.59
4424	晚元古代	0.512 387	25	29.86	5.94	0.120 3	0.70	1.26	−4.90	+1.95
4417	晚元古代	0.512 392	11	22.05	4.75	0.130 2	0.70	1.33	−4.80	+1.15
5307	三花石组	0.512 355	9	16.43	3.50	0.129 0	0.95	1.40	−5.52	+2.72
5311	三花石组	0.512 303	9	17.37	3.95	0.137 3	0.95	1.57	−6.53	+0.69
高川小区										
4618	早石炭世	0.512 032	10	24.66	4.61	0.112 9	0.30	1.84	−11.82	−8.62
4607	晚泥盆世	0.512 009	10	31.42	5.97	0.114 8	0.37	1.88	−12.27	−8.41
4513	早寒武世	0.512 004	9	29.47	4.59	0.094 1	0.58	1.74	−12.37	−4.77

计算参数数据 Peucat *et al.* (1988)和 Goldstein *et al.* (1984): (¹⁴³Nd/¹⁴⁴Nd)_{DM} = 0.513 15, (¹⁴⁷Sm/¹⁴⁴Nd)_{DM} = 0.213 7, λ = 0.654 × 10^{−11} a^{−1}, (¹⁴³Nd/¹⁴⁴Nd)_{CHUR}(0) = 0.512 638, (¹⁴⁷Sm/¹⁴⁴Nd)_{CHUR}(0) = 0.196 7, 其中地壳的 Sm/Nd 比值采用文献(Gao *et al.* , 1992)中南秦岭上地壳的平均值, 对于¹⁴⁷Sm/¹⁴⁴Nd < 0.11 的样品, 采用两阶段模式年龄方法进行计算(李献华和 McCulloch, 1996).

bomb 中加入 HF+HNO₃ 混合酸 3 mL, 在电热板上低温溶解, 以溶解大部分 SiO₂, 然后再次加入 HF+HNO₃ 混合酸 3 mL, 密封 bomb 后, 放置 190 ℃ 的烘箱中, 溶解 48 h, 直至样品完全溶解, 采用 AG50X8 阳离子树脂柱和 HDEHP 进行 Sm-Nd 分离. 全过程本底为: Sm = 3 × 10^{−11}, Nd = 1.2 × 10^{−10}. 样品 ¹⁴³Nd/¹⁴⁴Nd 比值用 ¹⁴⁶Nd/¹⁴⁴Nd = 0.721 900 标准化. 标准样品 (BCR-2) 测定值为 ¹⁴³Nd/¹⁴⁴Nd = 0.512 643 ± 0.000 015 (2σ), ¹⁴⁷Sm/¹⁴⁴Nd = 0.136 5, Nd = 28.32 × 10^{−6}, Sm =

6.521 × 10^{−6}, La Jolla: ¹⁴³Nd/¹⁴⁴Nd = 0.511 856 ± 0.000 012. 同位素分析在 MAT261 同位素质谱仪上完成, 微量元素和 Sm-Nd 同位素结果分别见表 1、表 2.

3 结果和讨论

3.1 主量元素

扬子克拉通北缘西乡—碑坝小区显生宙沉积岩的 K₂O/Na₂O 平均值为 12.68, 从二叠纪到侏罗纪

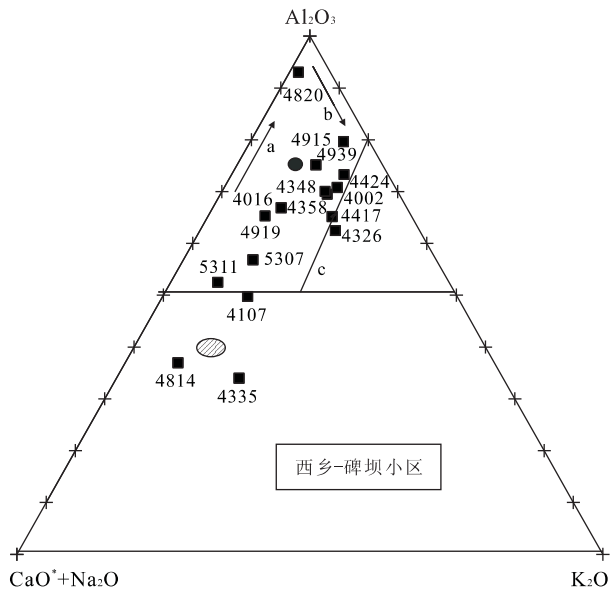


图 2 扬子北缘西乡—碑坝小区沉积岩 Al_2O_3 — $(\text{CaO}^* + \text{Na}_2\text{O})$ — K_2O 三角图(Nesbitt and Young, 1989)

Fig. 2 Ternary plot of Al_2O_3 — $(\text{CaO}^* + \text{Na}_2\text{O})$ — K_2O for the Xixiang-Beiba metasediments

图中 a 线表示风化趋势; b 线表示钾质交代趋势; c 线表示风化线; 黑色圆点表示平均页岩组成; 斜线花圆点表示上地壳组成

样品的 $\text{K}_2\text{O}/\text{Na}_2\text{O}$ 明显增高(样品 4820 除外, SiO_2 含量为 35.56%), 表明其源区可能受到钾质花岗质的影响, 在 A-CN-K 图解上的投影中, 除 4326 和 4417 样品超出风化线外(图 2), 其他时期样品没有超出风化限线, 说明其源区富钾, 此外, 扬子克拉通北缘显生宙沉积岩的 $\text{K}_2\text{O}/\text{Na}_2\text{O}$ 和 $\text{Al}_2\text{O}_3/\text{SiO}_2$ 明显高于中、晚元古代火地垭群和西乡群变碎屑岩, 表明该区显生宙时期的沉积环境比较稳定, 沉积地球

化学分异作用较强, 而火地垭群和西乡群变碎屑岩相对较低的 SiO_2 含量和 $\text{SiO}_2/\text{Al}_2\text{O}_3$ 比值, 可能与沉积区大量的中晚元古代基性和中基性岛弧火山碎屑物质有关, 也说明扬子克拉通北缘基底元古宙仍处于不稳定的沉积环境, 沉积地球化学分异作用较弱。早石炭世(4618)和晚二叠世(4820) SiO_2 含量较低(31.04%, 35.56%), 同时早石炭世(4618)具有较高的 CaO (21.81%), 这也许在一定程度上受到了生物碎屑物质的影响。

3.2 微量元素

扬子克拉通西乡—碑坝小区中、晚元古代变沉积岩没有明显 Eu 负异常(图 3), Eu/Eu^* 在 0.84~1.07 之间, 大于 PAAS 的 Eu/Eu^* (0.65), 重稀土亏损不严重, $\text{La}_\text{N}/\text{Yb}_\text{N}$ 在 2.66~6.41 之间, 低于 PAAS 的 9.17, 其 $\text{Gd}_\text{N}/\text{Yb}_\text{N}$ 在 1.56~1.09 之间, 与 PAAS(1.36) 的比较接近。西乡—碑坝小区显生宙沉积岩的稀土配分曲线显示(图 3), 杂色页岩(4820)具有明显 Ce/Ce^* 负异常, 不明显 Eu/Eu^* 负异常和重稀土富集, 同时 TiO_2 、 V 、 Cr 、 Ni 、 Cu 、 Zr 等元素含量较高, Cr/Th 比值增大(24.28, 表 1), 具有明显的地球化学异常, 而晚二叠世晚期大隆组(4814)碳质页岩与其他时期沉积岩的稀土配分曲线总体上与后太古宙平均页岩的相似(图 3), 即富集轻稀土元素, 重稀土元素分布模式平坦并普遍存在 Eu 负异常, 说明源区以花岗岩占主导地位。该区晚三叠世和早侏罗世 2 个样品(4915, 4919) Th/Sc 比值小于 1(0.52, 0.25), 表明该时期沉积物源区有幔源物质的加入, 与张本仁等(1994)的研究结果一致。

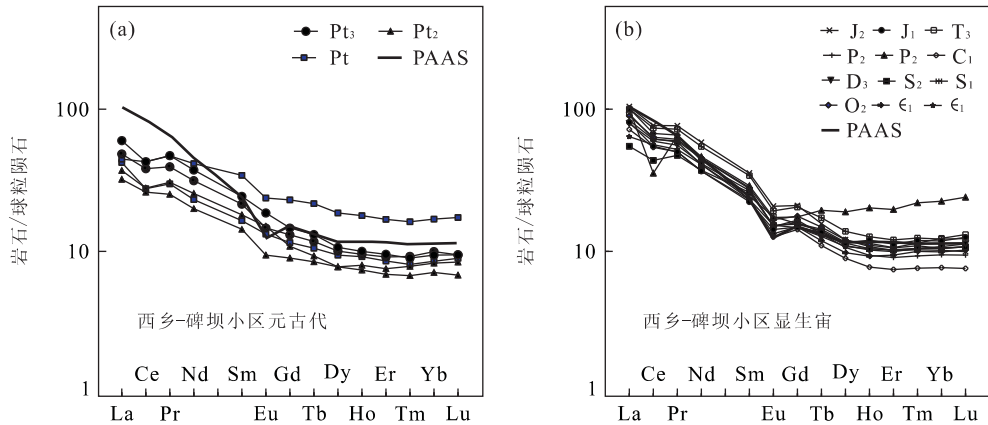


图 3 西乡—碑坝小区中晚元古代(a)和显生宙(b)碎屑沉积岩稀土元素配分曲线

Fig. 3 Chondrite-normalized REE diagram of clastic sediments for the Middle-Upper Proterozoic (a) and the Phanerozoic (b) from Xixiang-Beiba subunit

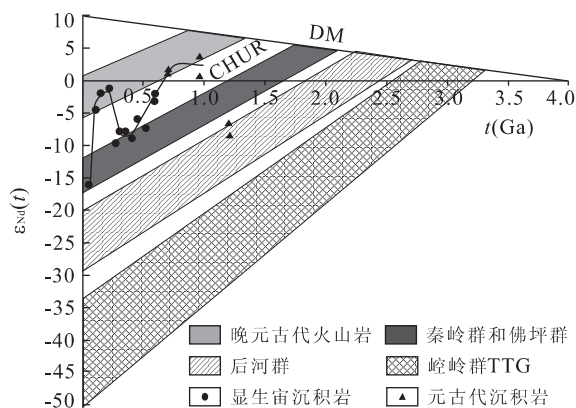


图 4 扬子克拉通西乡—碑坝小区沉积岩 $\epsilon_{\text{Nd}}(t)$ 随时间 t 演化图

Fig. 4 $\epsilon_{\text{Nd}}(t)$ versus t for the sediments from Xixiang-Beiba subunit, Yangtze craton

图中新元古火山岩包括二郎坪群火山岩(张宗清等, 1994), 耀岭河群火山岩(黄董和吴利仁, 1990), 西乡群火山岩, 毛堂群(待刊); 佛坪群和秦岭群包括佛坪群黑云石榴片麻岩(王居里和张国伟, 1999), 秦岭群蛇尾黑云石榴片麻岩和斜长透灰岩(张宗清等, 1994), 陡岭群变质碎屑沉积岩(沈洁等, 1997); 后河群包括奥长花岗岩和英云闪长岩(凌文黎, 1994), 鱼洞子群黑云斜长片麻岩(张宏飞等, 1997); 崆岭群为奥长花岗岩和英云闪长岩(马大铨等, 1997; Gao *et al.*, 2001); 其余为本文数据, 根据沉积岩地层年龄计算样品的 $\epsilon_{\text{Nd}}(t)$, 由于部分地层还没有准确的年龄限制, 因此本文所用沉积年龄是近似值, 计算参数: $(^{143}\text{Nd}/^{144}\text{Nd})_{\text{CHUR}}(0) = 0.512638$, $(^{147}\text{Sm}/^{144}\text{Nd})_{\text{CHUR}}(0) = 0.1967$

3.3 Sm-Nd 同位素

通过对扬子克拉通西乡—碑坝小区和高川小区早寒武世到中侏罗世 13 个碎屑沉积岩的 Sm-Nd 同位素分析, $^{147}\text{Sm}/^{144}\text{Nd}$ 在 0.106 0~0.128 7 之间, $^{143}\text{Nd}/^{144}\text{Nd}$ 在 0.511 904~0.512 474 之间, 变化范围较大(表 2), 从 $\epsilon_{\text{Nd}}(t)$ 随时间演化图(图 4), 总体上, 扬子北缘西乡—碑坝小区从寒武纪到石炭纪, $\epsilon_{\text{Nd}}(t)$ 值从大向小(偏负)逐渐演化, 但是, 从晚二叠世开始到早侏罗世碎屑沉积岩 $\epsilon_{\text{Nd}}(t)$ 比早古生代沉积岩的 $\epsilon_{\text{Nd}}(t)$ 明显偏大, 并以晚二叠世杂色页岩(样品 4820)最为明显, 反映出幔源物质一定程度上影响了该时期沉积物源的组成。

3.4 沉积物源

从扬子克拉通北缘西乡—碑坝小区沉积岩 $\epsilon_{\text{Nd}}(t)$ 随时间演化图(图 4), 寒武纪的 2 个样品(4513, 4326)明显位于该小区显生宙奥陶纪—早石炭世碎屑岩钕同位素的演化范围之上, 中志留世(4358)和中奥陶世(4335)与秦岭群片麻岩有相似的钕同位素演化规律, 早志留世、晚泥盆世和中石炭世

沉积岩样品的 $\epsilon_{\text{Nd}}(t)$ 偏离秦岭群片麻岩演化线之上, 晚二叠世到早侏罗世碎屑沉积岩 $\epsilon_{\text{Nd}}(t)$ 比早古生代碎屑岩的 $\epsilon_{\text{Nd}}(t)$ 明显偏大, 同时从晚二叠世—早侏罗世碎屑岩 $\epsilon_{\text{Nd}}(t)$ 明显减小, 这种钕同位素变化特征反映了扬子北缘从古生代—中生代构造环境经历的复杂变化。

为了较全面地了解扬子克拉通北缘显生宙沉积物源区的变化, 有必要追溯扬子克拉通北缘中、晚元古代的演化规律。通过对该区中、晚元古代三花石组 2 个杂砂岩的钕同位素测定, 其 $\epsilon_{\text{Nd}}(t)$ 分别为 +2.72 和 +0.69, T_{DM} 分别为 1.40 Ga 和 1.57 Ga, 变化范围很小, 与扬子克拉通北缘同时期西乡群火山岩具有相同或相近的 Nd 同位素组成。这一方面反映了源岩成分是均一的; 另一方面也反映来源于上地幔的年轻物质在该区沉积岩物源中占优势。高山等(1989)对扬子北缘新元古代沉积岩微量元素的研究结果表明, 该时期存在岛弧物质, 相比之下, 在三花石组以南向扬子克拉通内陆延伸的火地垭群碎屑岩的 $\epsilon_{\text{Nd}}(t)$ 值为负值, 在 -7.59~-9.51 之间变化; 在 $\epsilon_{\text{Nd}}(t)$ 随时间的演化图中, 处于该区古老基底后河群钕同位素演化线的上方(图 4), 表明后河群碎屑物质对火地垭群沉积岩有一定的影响。此外, 西乡—碑坝小区陡山沱组和南沱冰积岩的 $\epsilon_{\text{Nd}}(t)$ 的演化线与南秦岭基底耀岭河群、毛堂群火山岩的演化线一致, 钕同位素模式年龄也一致, 为 1.24 Ga 左右, 推断扬子克拉通北缘南沱冰积岩与南秦岭基底毛堂群、耀岭河群可能具有相同或相似的物源区。

已有研究表明(张本仁等, 1994), 扬子克拉通于 1.0~0.9 Ga 的晋宁期与其周边陆块发生汇聚拼合, 这种拼合为该区在古生代逐渐接受再循环的碎屑物质沉积提供了必要条件。从图 4 上也可以看出, 从寒武纪到石炭纪, 总体上 $\epsilon_{\text{Nd}}(t)$ 值是从大向小逐渐演化的。因此, 从总的变化规律上看, 扬子克拉通北缘从寒武纪到古生代晚期对再旋回沉积物源的接受随着时间的推移而逐渐加强。表 1 中, 该区古生代碎屑岩与中、晚元古代碎屑岩相比, 具有较高的 REE、Th、U 含量, 而 Sc、Ni 含量降低, 同时 Cr/Th、Sc/Th 比值减小, 说明沉积源区的长英质物质逐渐增多, 分异程度越来越高, 更富长英质。

根据以上分析, 扬子克拉通北缘古生代沉积物源区以再旋回沉积物源为主。后河群构造位置处于大巴山弧形断裂带以南, 扬子克拉通北缘中段向北突出部分, 主要由 TTG 片麻岩和斜长角闪岩等组

成。后河群是区内已知最古老基底地层(高山, 1989), 不可能单独作为一个地块为扬子克拉通北缘西乡小区古生代沉积岩提供物源。根据目前出露的古老基底, 还不能判断扬子克拉通古生代沉积物源区属于哪一个特定的地块; 而扬子克拉通北缘中、晚元古代三花石组沉积岩的 $\epsilon_{\text{Nd}}(t)$ 明显在该区古生代沉积岩的演化线之上(图 4), 也不可能作为一个单独地块为扬子克拉通北缘古生代提供物源。因此, 不同地块风化剥蚀的混合构成了该区古生代沉积岩的组成。

扬子克拉通北缘西乡一碑坝小区晚元古代由于受基底岛弧火山岩的影响, 碎屑岩表现出较低的 ΣREE , 低于秦岭群杂砂岩 ΣREE 含量 ($197 \mu\text{g/g}$) (表 1)。西乡一碑坝小区寒武纪—中侏罗世碎屑沉积岩样品的 Th、Sc、Pb 含量随时间有明显的变化规律, 即从寒武纪—中志留世, 具有明显低的 Sc、Th、Pb 含量, 而从晚泥盆世开始, Sc、Th、Pb 含量明显增大(表 1)。据高山(1989)研究, La/Th 比值可将扬子克拉通和华北克拉通与北秦岭的物源区完全分开(两台物源区的主体 $\text{La/Th} > 3$, 北秦岭 $\text{La/Th} < 3$)。北秦岭具有较低的 La/Th 比值主要由于具有很高的 Th 含量, 如北秦岭上地壳 Th 的丰度为 $10.0 \mu\text{g/g}$, 而华北克拉通、南秦岭和扬子克拉通上地壳 Th 的丰度偏低分别为 $6.0 \mu\text{g/g}$ 、 $7.0 \mu\text{g/g}$ 、 $4.5 \mu\text{g/g}$, 这是由于构成北秦岭碎屑岩主体的秦岭群杂砂岩是大陆裂谷碱性双峰基性—酸性火山物质近距离搬运与混合的产物, 因此它具有异常高的 Li、Be、Ba、Th 和 Sc 含量。

在此基础上, 将西乡一碑坝小区寒武纪—志留纪碎屑岩 La/Th、Th、Sc、Pb 的平均值与该区泥盆纪的数据进行对比, 同时参考秦岭杂砂岩的微量元素数据(高山, 1989), 从图 5 可以看出, 该区泥盆纪样品 Th、Sc、Pb 含量相对于寒武纪—志留纪碎屑岩, 比较接近秦岭杂砂岩, 并且具有较低的 La/Th 比值; 而寒武纪—志留纪碎屑岩具有较高的 La/Th 比值, 表现出与扬子克拉通相似的地球化学特征。因此, 可以推测西乡一碑坝小区寒武纪—志留纪沉积物源不可能来源于秦岭群杂砂岩的风化剥蚀, 很可能是扬子克拉通基底和基性火山岩等风化剥蚀混合的产物。

3.5 晚二叠世地球化学异常

如何解释该区晚二叠世到早侏罗世碎屑岩具有比早古生代碎屑岩明显偏大的 $\epsilon_{\text{Nd}}(t)$, 同时, 从晚二

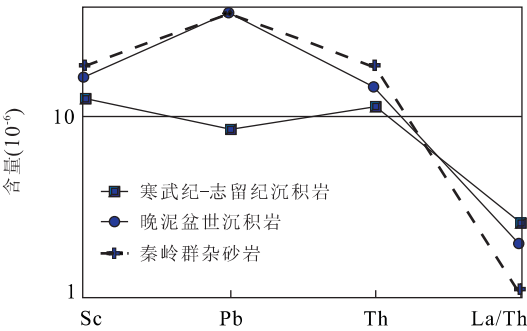


图 5 扬子克拉通北缘西乡一碑坝小区沉积岩与秦岭群杂砂岩微量元素对比

Fig. 5 Comparison of average trace elements contents of sediments between the Xixiang-Beiba subunit and Qinling terrain

图中秦岭群杂砂岩据高山(1989); 西乡一碑坝小区碎屑沉积岩据表 1

叠世、晚三叠世到早侏罗世 ($4820, 4915, 4919$) $\epsilon_{\text{Nd}}(t)$ 随时间逐渐降低? 根据已有研究(张本仁等, 1994), 东秦岭华北与扬子板块边缘早古生代末和晚古生代初发生对接以后, 并不像通常认为的那样立即转入陆—陆碰撞的造山阶段, 因为明显的碰撞造山的迹象只有在晚古生代才显露出来, 具体表现为地层的缺失、地层的挤压、褶皱、变质和隆起以及大规模的碰撞型花岗岩类岩浆活动。在本区商丹断裂带两侧分布一系列较大规模的花岗岩 ($323 \sim 262 \text{ Ma}$), 如宝鸡岩体、翠华山岩体、蟒岭岩体、光头山岩体等, 其地球化学特征表明为碰撞型花岗岩, 是扬子、华北两克拉通碰撞的结果(张本仁等, 1994)。根据张宏飞等(1995)对南秦岭晚古生代—早中生代花岗岩的钨同位素研究结果, 光头山、西坝、五龙和老城等较大规模岩体的 $\epsilon_{\text{Nd}}(t)$ 在 $-3.8 \sim -8.1$ 之间, Th/Sc 比值在 5.5 左右(张本仁等, 1990), 说明南秦岭晚古生代—早中生代花岗岩对西乡一碑坝小区晚二叠世—晚三叠世的沉积物源影响不大。

峨眉山玄武岩是我国唯一被国际学术界认可的大火成岩省, 从早二叠世晚期到晚二叠世晚期, 其间经历多期次喷发, 在平面上呈西厚东薄的舌状, 其最东端在南部位于贵州瓮安、福泉一带, 北部则在川东梁平、华蓥山等地(Courtillon *et al.*, 1999; Zhou *et al.*, 2002)。峨眉山玄武岩东部的岩性比较单一, 厚度近为几十至几百米, 主要为高钛玄武岩; 西区的低钛玄武岩体积远大于高钛玄武岩, 而东区尚未发现低钛玄武岩(Xu *et al.*, 2001)。徐义刚和钟孙霖(2001)对峨眉山高钛玄武岩的分析结果表明, TiO_2

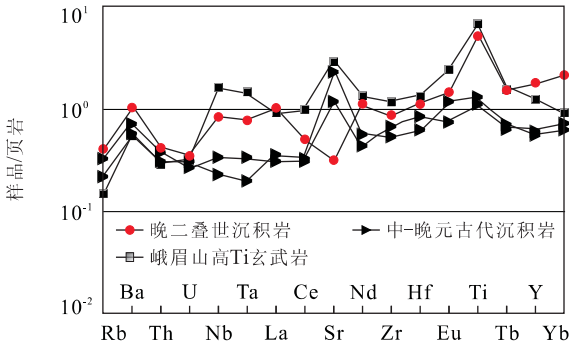


图 6 扬子克拉通北缘西乡小区中晚元古代部分变沉积岩和晚二叠世碎屑岩微量元素分配模式

Fig. 6 Comparison of normalized trace element pattern of metasediments between Middle-Late Proterozoic and Late Permian from Xixiang-Beiba subunit

页岩标准化值据 Taylor and McLennan(1985);峨眉山高 Ti 玄武岩据 Xu et al. (2001)

在 2.37%~4.66% 之间,而西乡一碑坝小区晚二叠世碎屑岩样品(4820)具有异常高的 TiO_2 (3.11%),明显高于南秦岭和扬子克拉通北缘显生宙其他时期沉积岩 TiO_2 的含量、 Fe_2O_3 含量(13.95%)和 Al_2O_3 含量(32.01%),见表 1。因此,可能与峨眉山东部高钛玄武岩有关。

如前所述,扬子克拉通北缘中、晚元古代沉积物源明显受到岛弧物质的影响。在微量元素组成上,三花石组 2 个变沉积岩的 Ti、Y、Nb、Zr 含量相对低,类似岛弧火山岩的特征,而晚二叠世碎屑岩(样品 4820)Nb、Ta、Ti、Y、Zr、Hf 的含量相对较高(图 6),类似 OIB(洋岛玄武岩)特征。徐义刚和钟孙霖(2001)对峨眉山玄武岩 Nd 同位素组成的研究表明,该区东部高钛玄武岩与西部低钛玄武岩相比, $\epsilon_{\text{Nd}}(t)$ 有较大的变化范围,在 +4.84~-3.56 之间,并且大部分样品的 $\epsilon_{\text{Nd}}(t)$ 为正值。Chung and Jahn (1995)对峨眉山玄武岩钕同位素的研究也有类似的结果, $\epsilon_{\text{Nd}}(t)$ 有较大的范围(3.95~-3.95),平均值为 +1.48;而本文样品 4820 的 $\epsilon_{\text{Nd}}(t)$ 为 -1.03。因此,可以推测晚二叠世峨眉山玄武岩的多次喷发产生的火山灰使得扬子克拉通北缘西乡一碑坝小区晚二叠世碎屑岩具有明显的幔源特征。也有证据表明(牛志军等,2000),这些火山灰已经影响到扬子克拉通鄂西建始县等地区,而峨眉山玄武岩的东端距工作区西乡堰口一带较近。因此,从空间分布上峨眉山玄武岩的多次喷发和风化作用有可能影响到西乡一碑坝小区的沉积物源组成。

4 结论

扬子克拉通北缘新元古代存在的岛弧物质控制着该区中、晚元古代三花石组沉积地球化学组成,后河群碎屑物质对火地垭群沉积岩有一定的影响。西乡一碑坝小区从寒武纪一志留纪沉积物源很可能是扬子克拉通基底崆岭群和基性火山岩等风化剥蚀后混合的结果,西乡一碑坝小区从晚泥盆世开始,其沉积物源区与秦岭群片麻岩的风化剥蚀有明显的关系。晚二叠世峨眉山玄武岩的多次喷发(火山灰)和 风化剥蚀使得扬子北缘西乡一碑坝小区晚二叠世碎屑沉积岩具有明显的幔源特征。

References

- Chen, J. F., Zhou, T. X., Xing, F. M., et al., 1989. The sediment source and Nd isotopic composition of low-grade metamorphic rocks and sediments from South Anhui. *Chinese Sci. Bull.*, 20:1572-1574 (in Chinese).
- Chung, S. L., Jahn, B. M., 1995. Plume-lithosphere interaction in generation of the Emeishan flood basalts at the Permian-Triassic boundary. *Geology*, 23 (10): 889-892.
- Courtillon, V., Jaupart, C., Manighetti, I., et al., 1999. On causal links between flood basalts and continental breakup. *Earth Planet. Sci. Lett.*, 166:177-195.
- Editor Group of Shaanxi Regional Strata, Bureau of Geology and Mineral Resources of shaanxi Province, 1989. Regional strata table of northwest area of China—Fascicle of Shaanxi Province. Geological Publishing House, Beijing, 1-258 (in Chinese).
- Gao, S., 1989. Structure, composition and evolution of the continental crust in the Qinling orogenic belt and its adjacent North China and Yangtze cratons (Dissertation). China University of Geosciences, Wuhan (in Chinese with English abstract).
- Gao, S., Lin, W. L., Qiu, Y. M., et al., 1999. Contrasting geochemical and Sm-Nd isotopic compositions of Archean metasediments from the Kongling high-grade terrain of the Yangtze craton: Evidence for cratonic evolution and redistribution of REE during crustal anatexis. *Geochim. Cosmochim. Acta*, 63:2071-2088.
- Gao, S., Qiu, Y. M., Ling, W. L., et al., 2001. SHRIMP single zircon U-Pb dating of the Kongling high-grade metamorphic terrain: Evidence for >3.2 Ga old continental crust in the Yangtze craton. *Sci. in China (Series D)*, 44(4):326-335.

- Gao, S., Zhang, B. R., Gu, X. M., et al., 1995. Silurian-Devonian provenance changes of South Qinling basins; Implications of accretion of Yangtze (South China) to the North China cratons. *Tectonophysics*, 250: 183—197.
- Gao, S., Zhang, B. R., Luo, T. C., et al., 1992. Chemical composition of the continental crust in the Qinling orogenic belt and its adjacent North China and Yangtze cratons. *Geochim. Cosmochim. Acta*, 56: 3933—3950.
- Gao, S., Zhang, B. R., Xie, Q. L., et al., 1991. Average chemical compositions of Post-Archean sedimentary and volcanic rocks from the Qinling orogenic belt and its adjacent North China and Yangtze cratons. *Chem. Geol.*, 92: 261—236.
- Gao, S., Zhou, L., Ling, W. L., et al., 2005. Age and geochemistry of volcanic rocks of Angou Group at the Archean-Proterozoic boundary. *Earth Science—Journal of China University of Geosciences*, 30(3): 259—263 (in Chinese with English abstract).
- Goldstein, S. L., O'Nions, R. K., Hamilton, P. J., 1984. A Sm-Nd isotopic study of atmospheric dusts and particulates from major river systems. *Earth Planet. Sci. Lett.*, 70: 221—236.
- Huang, X., Wu, L. R., 1990. Nd-Sr isotopic characteristics of granitoids from Shaanxi Province and their significances for tectonic evolution. *Acta Petrologica Sinica*, 6(2): 1—11 (in Chinese with English abstract).
- Li, J. S., Cao, X. Z., Yang, J. L., 1994. Phanerozoic ancient marine basin and its environment of Qinling belt. Geological Publishing House, Beijing, 1—206 (in Chinese).
- Li, S. G., Liu, D. L., Chen, Y. Z., et al., 1994. Neodymium isotopic compositions of continental crust in the northern margin of Yangtze block and its tectonic implications. *Geochimica*, 23(Suppl.): 10—17 (in Chinese with English abstract).
- Li, S. G., Sun, W. D., Zhang, G. W., et al., 1996. Chronology and geochemistry of metavolcanic rocks from Heigouxia valley in the Mian-Lue tectonic zone, South Qinling—Evidence for a Paleozoic oceanic basin and its close time. *Sci. in China (Series D)*, 39(3): 301—310.
- Li, X. H., McCulloch, M. T., 1996. Nd isotopic evolution of sediments from the southern margin of the Yangtze block and its tectonic significance. *Acta Petrologica Sinica*, 12(3): 359—370 (in Chinese with English abstract).
- Ling, W. L., 1994. Isotopic study on the Precambrian tectonic features and upper mantle evolution of Yangtze craton (Dissertation). China University of Geosciences, Wuhan (in Chinese with English abstract).
- Ling, W. L., Gao, S., Ouyang, J. P., et al., 2002. Time and tectonic setting of the Xixiang Group: Constraints from the zircon U-Pb geochronology and geochemistry. *Sci. in China (Series D)*, 45(9): 818—831.
- Ma, D. Q., Li, Z. C., Xiao, Z. F., 1997. The constitute, geochronology and geologic evolution of the Kongling complex, West Hubei. *Acta Geoscientia Sinica*, 18(3): 233—241 (in Chinese with English abstract).
- Nesbitt, H. W., Young, G. M., 1989. Formation and diagenesis of weathering profiles. *Journal of Geology*, 97: 129—147.
- Niu, Z. J., Xu, A. W., Duan, Q. F., et al., 2000. Origin and enrichment of selenium in Permian strata in the northern part of Jianshi, Hubei. *Regional Geology of China*, 19(4): 396—401 (in Chinese with English abstract).
- Peucat, J. J., Vidal, P. B., Griffiths, J., et al., 1988. Sr, Nd and Pb isotopic systematics in the Archean low to high-grade transition zone of southern Indian: Syn-accretion vs. post-accretion granulites. *J. Geol.*, 97: 537—550.
- Shen, J., Zhang, Z. Q., Liu, D. Y., 1997. Sm-Nd, Rb-Sr, ⁴⁰Ar/³⁹Ar, ²⁰⁷Pb/²⁰⁶Pb age of the Douling metamorphic complex from eastern Qinling orogenic belt. *Acta Geoscientia Sinica*, 18(3): 248—254 (in Chinese with English abstract).
- Taylor, R. S., McLennan, S. M., 1985. The continental crust: Its composition and evolution. Blackwell, London.
- Wang, J. L., Zhang, G. W., 1999. Geological and geochemical features of the cover rock series of Foping dome, Qinling orogenic belt. *Journal of Northwest University (Natural Science Edition)*, 29(5): 417—421 (in Chinese with English abstract).
- Xu, Y. G., Chung, S. L., Jahn, B. M., et al., 2001. Petrologic and geochemical constraints on the petrogenesis of Permian-Triassic Emeishan flood basalts in southwestern China. *Lithos*, 58: 145—168.
- Xu, Y. G., Zhong, S. L., 2001. The Emeishan large igneous province: Evidence for mantle plume activity and melting conditions. *Geochimica*, 30(1): 1—9 (in Chinese with English abstract).
- Zhang, B. R., Luo, T. C., Gao, S., et al., 1990. Geochemistry evolution of the lithosphere in the Qinling-Dabashan characteristics and region, and their geological significance. In: Zhang, B. R., et al., eds., Contribution to regional geochemistry of Qinling and Dabashan Mountains. China University of Geosciences Press, Wuhan (in Chinese).
- Zhang, B. R., Luo, T. C., Gao, S., et al., 1994. Geochemical

- study of the lithosphere, tectonism and metallogenesis in the Qinling-Dabashan region. China University of Geosciences Press, Wuhan (in Chinese with English abstract).
- Zhang, G. W., Zhang, B. R., Yuan, X. C., et al., 2001. Qinling orogenic belt and continental dynamics. Science Press, Beijing (in Chinese).
- Zhang, H. F., Jin, L. L., Zhang, L., et al., 2006. Pb and Nd isotopic compositions of basement and granitoid in the Qilianshan; Constraints on tectonic affinity. *Earth Science—Journal of China University of Geosciences*, 31(1): 59—65 (in Chinese with English abstract).
- Zhang, H. F., Zhang, B. R., Ling, W. L., et al., 1997. Late Proterozoic crustal accretion of South Qinling; Nd isotopic study from granitic rocks. *Geochimica*, 26(5): 16—24 (in Chinese with English abstract).
- Zhang, H. F., Zhao, Z. D., Luo, T. C., et al., 1995. Crustal growth and lower crust nature of North Qinling; Study of Sm-Nd isotopic model ages. *Acta Petrologica Sinica*, 11(2): 160—170 (in Chinese with English abstract).
- Zhang, Z. Q., Liu, D. Y., Fu, G. M., 1994. Study on the isotopic chronology of metamorphic strata in North Qinling. Geological Publishing House, Beijing (in Chinese).
- Zhou, M. F., John, M., Xie, Y. S., et al., 2002. A temporal link between the Emeishan large igneous province (SW China) and the end-Guadalupian mass extinction. *Earth Planet. Sci. Lett.*, 196: 113—122.
- ### 附中文参考文献
- 陈江峰, 周泰禧, 邢凤鸣, 等, 1989. 皖南浅变质岩和沉积岩的钨同位素组成及沉积物物源区. 科学通报, 20: 1572—1574.
- 高山, 1989. 秦岭造山带及其邻区大陆地壳结构、成分与演化的地球化学研究[博士学位论文]. 武汉: 中国地质大学.
- 高山, 周炼, 凌文黎, 等, 2005. 华北克拉通南缘太古—元古宙界线安沟群火山岩的年龄及地球化学. 地球科学——中国地质大学学报, 30(3): 259—263.
- 黄莹, 吴利仁, 1990. 陕西地区岩浆岩 Nd, Sr 同位素特征及其与大地构造发展的关系. 岩石学报, 6(2): 1—11.
- 李晋僧, 曹宣泽, 杨家禄, 1994. 秦岭显生宙古海盆和演化. 北京: 地质出版社, 1—206.
- 李曙光, 刘德良, 陈移之, 等, 1994. 扬子陆块北缘地壳的钨同位素组成及其构造意义. 地球化学, 23(增刊): 10—17.
- 李献华, McCulloch, M. T., 1996. 扬子南缘沉积岩的 Nd 同位素演化及其大地构造意义. 岩石学报, 12(3): 359—370.
- 凌文黎, 1994. 扬子克拉通北缘前寒武纪古大地构造性质及演化的同位素地球化学研究[博士学位论文]. 中国地质大学.
- 马大钊, 李志昌, 肖志发, 1997. 鄂西崆岭杂岩的组成、时代及地质演化. 地球学报, 18(3): 233—241.
- 牛志军, 徐安武, 段其发, 等, 2000. 湖北建始北部二叠纪地层硒的来源与富集. 中国区域地质, 19(4): 396—401.
- 陕西省地质矿产局, 1989. 陕西省区域地质志. 北京: 地质出版社, 1—258.
- 沈洁, 张宗清, 刘敦一, 1997. 东秦岭陡岭群变质杂岩 Sm-Nd, Rb-Sr, $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$, $^{207}\text{Pb}/^{206}\text{Pb}$ 年龄. 地球学报, 18(3): 248—254.
- 王居里, 张国伟, 1999. 秦岭佛坪穹隆盖层岩系的地质和地球化学特征. 西北大学学报(自然科学版), 29(5): 417—421.
- 徐义刚, 钟孙霖, 2001. 峨眉山火山成岩省: 地幔柱活动的证据及其熔融条件. 地球化学, 30(1): 1—9.
- 张本仁, 骆庭川, 高山, 等, 1990. 秦巴地区岩石圈地球化学特征和演化及其地质意义. 见: 张本仁, 等, 1990. 秦岭区域地球化学文集. 武汉: 中国地质大学出版社.
- 张本仁, 骆庭川, 高山, 等, 1994. 秦巴岩石圈构造及成矿规律地球化学研究. 武汉: 中国地质大学出版社.
- 张国伟, 张本仁, 袁学诚, 等, 2001. 秦岭造山带与大陆动力学. 北京: 科学出版社.
- 张宏飞, 靳兰兰, 张利, 等, 2006. 基底岩系和花岗岩类 Pb-Nd 同位素组成限制祁连山带的构造属性. 地球科学——中国地质大学学报, 31(1): 59—65.
- 张宏飞, 张本仁, 凌文黎, 等, 1997. 南秦岭新元古代地壳增生事件: 花岗质岩石钨同位素示踪. 地球化学, 26(5): 16—24.
- 张宏飞, 赵志丹, 骆庭川, 等, 1995. 从岩石 Sm-Nd 同位素模式年龄论北秦岭地壳增生和深部地壳性质. 岩石学报, 11(2): 160—170.
- 张宗清, 刘敦一, 付国民, 1994. 北秦岭变质地层同位素年代研究. 北京: 地质出版社.