

扬子地块南缘元古代浊积岩源区风化特征和源岩性质的沉积地球化学记录

顾雪祥^{1,2} 刘建明³ Oskar Schulz⁴ Franz Vavtar⁴ 唐菊兴² 王 乾²

(1. 中国科学院地球化学研究所, 贵阳 550002; 2. 成都理工大学; 3. 中国科学院地质与地球物理研究所; 4. Institute of Mineralogy and Petrography, University of Innsbruck, A-6020 Innsbruck, Austria)

[摘要] 对扬子地台南缘元古代浊积岩的常量元素和微量元素地球化学研究表明, 源区遭受了中等程度的风化作用影响, 这种影响记录在碱金属和碱土金属元素的丰度与分布型式、蚀变化学指数(CIA)以及 Th/U 比值等方面。稀土元素的组成和配分型式、Th/Sc 和 La/Sc 比值以及其他常量和微量元素之间的关系表明, 沉积岩不具备成熟的再旋回沉积物的特征, 其源岩主要为由酸性岩浆岩等长英质组分构成的古老上地壳, 源岩曾受到了显著的壳内分异作用的影响。中元古界冷家溪群地层的源岩较新元古界板溪群含有较高的 Co, Cr, Ni, Sc, V 等基性组分, 且基性的铁镁质成分主要反映在粘土级组分的沉积记录中。

[关键词] 地球化学记录; 源区风化特征; 源岩性质; 浊积岩; 扬子地块南缘

[分类号] P512.2 **[文献标识码]** A

20 世纪 70 年代以来, 砂岩的碎屑格架模型 (detrital framework modes of sandstone) 被广泛地用于识别沉积物的源区特征和沉积盆地的构造背景^{[1]~[10]}。然而, 砂岩的碎屑格架并不总是真实地反映物源类型和沉积构造环境^{[11]~[14]}。首先, 碎屑物的特征在沉积后的成岩和后生作用改造下可能会被掩盖甚至破坏, 尤其是在造山带的较为古老的砂岩中, 很大一部分基质可能是由长石碎屑或岩屑退变而来^{[15]~[17]}, 从而使碎屑格架模型中石英的含量相对增高。其次, 在遭受变质作用改造较为强烈的砂岩中, 碎屑物的颗粒结构几乎难以识别。此外, 岩相学的方法通常无法鉴别细碎屑岩中基质或杂基的成分特征。因此, 砂岩的碎屑格架模型仅主要反映岩石中粗粒径组分(石英、长石、岩屑), 而不是全岩的源岩特征^{[18]~[20]}。

陆源沉积物的化学组成受诸如物源类型、风化条件、搬运方式、成岩后生作用以及沉积构造环

境等多种因素的制约, 其中物源和沉积构造环境被认为是最重要的制约因素^{[11],[17],[21],[22]}。因此, 沉积物的化学组成, 尤其是某些特征的常量元素和微量元素组成真实地记录了源区的母岩性质和 风化特征^{[17],[23],[24]}。近二十年来, 陆源碎屑岩的地球化学组成在识别物源区特征和沉积盆地构造背景中发挥了重要作用, 这是因为地史时期的物源区多被剥蚀破坏, 因而有关这些物源区性质(母岩类型、风化条件等)和盆地构造环境的信息仅保留于沉积物的地球化学记录中^[12]。本文通过对扬子地块南缘江南造山带雪峰隆起区元古代浊积岩的地球化学组成研究, 探讨物源区的风化特征和源岩的性质。

1 地质背景

中国南方大陆基底由北部的扬子克拉通和南部的华夏古陆于晚元古代拼贴而成^{[25]~[31]}。在扬

[收稿日期] 2002-12-10

[基金项目] 中国国家自然科学基金(49872038)、奥地利国家科学基金(P12026-GEO)、中国科学院百人计划和科技部基础研究重大项目(G1999043210)联合资助

[作者简介] 顾雪祥(1964—), 男, 博士, 教授, 博士生导师, 矿床学和地球化学专业。(E-mail: gxx@cdut.edu.cn)

子克拉通的南缘有一条引人注目的前震旦纪基底出露带,大致呈北东东-南西西向延伸 1000 余公里(图 1),常被称为江南造山带^[32]、“江南古陆”或“江南地块”^[33]、“江南地轴”^[34]、“江南古岛弧带”^[35]等。雪峰隆起区位于该造山带的西段,东起湘东北的平江、浏阳一带,向西经益阳、桃江、常德、桃源、沅陵,然后转折为南南向经溆浦延至会同、靖县一带进入黔桂两省。本文的研究区即位于湖南省境内的雪峰隆起区(图 1)。

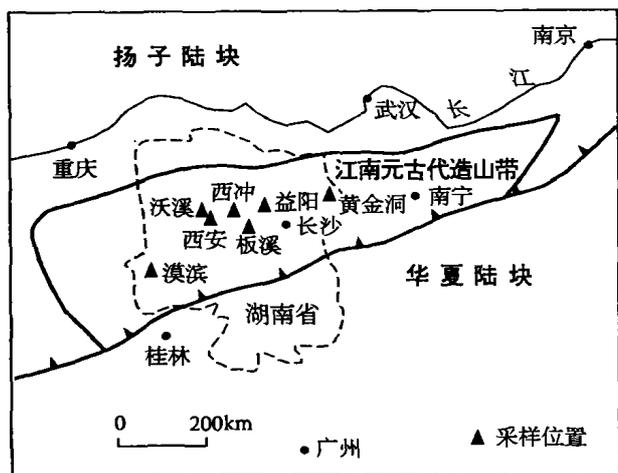


图 1 中国东南部大地构造略图及本研究的大致采样位置(三角形)

Fig. 1 Sketchy tectonic map of southeast China showing sampling locations of this study (triangles)

研究区出露的地层由元古代浅变质基底和震旦系一显生宙沉积盖层两部分构成。元古代基底由中元古界冷家溪群和上元古界板溪群组成,两者以平行不整合或角度不整合接触。冷家溪群(Pt_2ln)主要为浅变质(绿片岩相)的灰绿色砂岩、粉砂岩和板岩,厚 800~2500 m 不等,局部地段底部夹浅变质基性一超基性火山岩。这套地层中常发育鲍马层序、粒序层理、重荷模、槽模、沟模等浊流沉积构造。全岩 Rb-Sr, Pb-Pb 等时线年龄和 Nd 模式年龄所限定的沉积时代约为 1400~1050 Ma^{[30],[31],[36]~[41]}。板溪群(Pt_3bn)为一套厚 1250~6200 m 的复理石沉积,主要由浅变质(绿片岩相)的紫红色和灰绿色砂岩、粉砂岩、砂质板岩和板岩组成,分为下部马底驿组(Pt_3bnm)和上部五强溪组(Pt_3bnw)两部分。该套地层中所夹的变质长英质火山岩的锆石 U-Pb 年龄值变化于 1000~800 Ma,大致代表了地层的沉积时代^[42]。区域地层对比、构造分析和沉积物的地球化学研究表明,包括

冷家溪群和板溪群在内的研究区元古代沉积岩代表了一套扬子地台南缘沟-弧-盆体系中的弧后盆地浊积岩^[42]。

2 样品选择和分析方法

本研究所分析的样品采自湖南省境内,代表了元古界不同群、组的沉积地层,大致的采样位置见图 1。采样时,既考虑到空间上的代表性,同时又尽量避免蚀变、矿化、构造等后期地质作用的叠加与改造。

主元素分析在中国科学院地质与地球物理研究所采用 Shimadzu 1500 X 射线荧光仪完成,所用标样为日本地调所的火成岩标样,分析误差除 P_2O_5 约为 5% 外,其余氧化物均小于 1%。包括 14 个稀土元素在内的微量元素分析在中国科学院地球化学研究所采用 Finnigan MAT ELEMENT 等离子质谱仪(ICP-MS)完成,所用标样为 JG-2 和 GSR-3,分析误差小于 5%~10%。分析结果列于表 1~3,表中同时列出了文献中收集的部分数据^{[32],[43]~[45]}。

3 分析结果

3.1 主量元素

研究区元古代各群、组地层在主量元素成分上无明显区别(表 1),总体上以中等的 SiO_2 含量($Al_2O_3/SiO_2 = 0.03 \sim 0.3$, 一般为 $0.1 \sim 0.3$)和 K_2O/Na_2O 比值(一般 $1 \sim 5$, 平均 2.5)以及较高的 $Fe_2O_3^* + MgO$ 含量(一般 $5\% \sim 10\%$, 平均 8%; $Fe_2O_3^*$ 指以 Fe_2O_3 形式表示的全铁含量)为特征。多数样品的 CaO 含量低(一般 $< 1\%$)而 $Al_2O_3/(Na_2O + CaO)$ 比值高(一般 > 4)。

对比同时代地层中共生的砂岩和板岩,两者在主元素含量上存在一定的差异。与砂岩相比,板岩的 SiO_2 含量较低(板岩和砂岩的平均 Al_2O_3/SiO_2 分别为 0.24 和 0.18),而 K_2O (平均分别为 3.2% 和 2.7%)、 Al_2O_3 (分别为 16% 和 13%)和 $Fe_2O_3^* + MgO$ (分别为 8.5% 和 7.0%)含量则较高,反映了板岩中粘土矿物(主要为伊利石和绢云母)和基性组分的含量相对较高。

岩石中随着 SiO_2 含量的增高, Al_2O_3 , $Fe_2O_3^*$, MgO , TiO_2 , K_2O 和 CaO 含量一致地降低(SiO_2 与这些组分的相关系数 r 依次为一 0.77, -0.71, -0.64, -0.54, -0.50),表明随着成分

表 1 扬子地块南缘元古代浊积岩的主要元素分析结果(c/%)
Table 1 Major element compositions of the Proterozoic turbidites from the southern margin of the Yangtze block

样号	岩性	时代	采样地	SiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	FeO	CaO	MgO	Na ₂ O	K ₂ O	TiO ₂	MnO	P ₂ O ₅	Fe ₂ O ₃ +MgO	Al ₂ O ₃ /SiO ₂	K ₂ O/Na ₂ O	Al ₂ O ₃ /(Na ₂ O+CaO)	CIA	资料来源
五强溪组(Pt ₃ brw)																				
Zhang-2	石英砂岩	Pt ₃ brw	沃溪	74.76	12.54	1.41	2.90	1.15	1.60	1.68	3.46	0.46	0.03		6.24	0.17	2.06	4.43	66	3
Luo9-3(N=1)	石英砂岩	Pt ₃ brw	沃溪	94.46	2.64	0.51	0.91	0.19	0.27	0.14	0.71	0.10	0.02	0.04	1.80	0.03	5.00	7.88	72	6
BnWu(N=4)	砂岩	Pt ₃ brw	沃溪	78.99	10.61	1.21	2.59	0.68	1.66	0.76	3.04	0.39	0.05	0.03	5.74	0.13	3.99	7.36	70	2
BnWu(N=3)	砂岩	Pt ₃ brw	沃溪	72.16	15.58	2.43	2.08	0.49	0.45	4.03	2.10	0.56	0.04	0.07	5.19	0.22	0.52	3.45	64	2
WP-1	粉砂岩	Pt ₃ brw	沃溪	64.07	16.86	6.45	&	2.46	2.80	1.51	4.49	1.11	0.09	0.17	9.24	0.26	2.99	4.25	70	1
BnWu(N=2)	板岩	Pt ₃ brw	沃溪	67.73	17.43	2.69	3.71	0.34	1.58	1.87	3.64	0.84	0.08	0.10	8.40	0.26	1.95	7.92	71	2
Zhang-1	板岩	Pt ₃ brw	沃溪	70.40	15.26	1.13	3.87	1.09	3.17	0.98	3.41	0.54	0.13	0.02	8.59	0.22	3.47	7.38	74	3
BnWu(N=6)	板岩	Pt ₃ brw	漠溪	68.13	17.01	2.31	3.60	0.75	1.10	1.57	4.69	0.60	0.08	0.16	7.41	0.25	2.99	7.34	69	2
BnWu175/1(N=4)	板岩	Pt ₃ brw	漠溪	74.53	14.60	1.10	2.80	0.50	0.81	1.86	3.22	0.46	0.06	0.07	5.01	0.20	1.73	6.18	69	2
BnWu175/2(N=4)	板岩	Pt ₃ brw	漠溪	70.88	16.51	1.16	3.24	0.30	0.89	3.00	3.24	0.63	0.09	0.06	5.65	0.23	1.08	5.00	66	2
BnWu175/3(N=5)	板岩	Pt ₃ brw	漠溪	69.56	16.20	1.63	3.60	0.69	1.00	3.37	3.18	0.54	0.09	0.13	6.63	0.23	0.94	3.99	64	2
Luo-4	板岩	Pt ₃ brw	板溪	74.33	13.21	0.14	4.12	0.67	1.51	3.36	1.89	0.41	0.13	0.22	6.24	0.18	0.56	3.28	64	5
Luo9-1(N=1)	板岩	Pt ₃ brw	沃溪	65.45	17.85	4.19	3.91	0.34	1.74	1.82	3.60	0.89	0.06	0.15	10.27	0.27	1.98	8.27	72	6
Luo9-2(N=1)	板岩	Pt ₃ brw	沃溪	67.91	16.48	4.21	3.40	0.33	1.35	1.85	3.56	0.76	0.10	0.05	9.34	0.24	1.92	7.57	70	6
马底驿组(Pt ₃ brm)																				
WP-3	粉砂岩	Pt ₃ brm ³	沃溪	69.54	15.54	6.38	&	0.29	1.87	1.79	3.65	0.82	0.07	0.06	8.25	0.22	2.04	7.46	69	1
WP-5	粗砂岩	Pt ₃ brm ³	沃溪	82.10	9.74	2.09	&	0.06	0.28	4.09	1.32	0.24	0.06	0.02	2.37	0.12	0.32	2.35	54	1
WP-12	细砂岩	Pt ₃ brm ³	沃溪	87.31	6.61	2.02	&	0.07	0.37	2.78	0.67	0.12	0.03	0.02	2.40	0.08	0.24	2.32	55	1
WP-16	粉砂岩	Pt ₃ brm ¹	沃溪	71.02	15.76	6.07	&	0.14	1.40	1.34	3.40	0.78	0.03	0.06	7.47	0.22	2.53	10.65	73	1
WP-17	粉砂岩	Pt ₃ brm ¹	沃溪	68.95	16.81	6.53	&	0.54	1.40	1.24	3.64	0.79	0.02	0.06	7.93	0.24	2.94	9.42	74	1
BnMa(N=3)	砂岩	Pt ₃ brm	沃溪	75.25	12.64	2.82	3.51	0.19	1.44	1.14	2.22	0.65	0.05	0.09	8.16	0.17	1.95	9.57	75	2
WP-9	板岩	Pt ₃ brm ³	沃溪	87.38	6.59	1.98	&	0.07	0.37	2.77	0.67	0.12	0.03	0.01	2.35	0.08	0.24	2.32	56	1
WP-27	板岩	Pt ₃ brm ²	沃溪	63.66	17.77	8.79	&	0.44	1.91	2.29	4.01	0.89	0.10	0.14	10.71	0.28	1.75	6.51	69	1
WP-26	板岩	Pt ₃ brm ²	沃溪	68.19	17.08	6.16	&	0.15	1.51	2.59	3.42	0.76	0.10	0.05	7.67	0.25	1.32	6.26	68	1
WP-14	板岩	Pt ₃ brm ²	沃溪	67.72	18.57	7.03	&	0.03	0.98	0.75	4.07	0.78	0.02	0.04	8.01	0.27	5.41	23.78	77	1
WP-15	板岩	Pt ₃ brm ²	沃溪	74.18	14.32	5.81	&	0.02	0.88	1.02	2.90	0.73	0.11	0.03	6.69	0.19	2.85	13.79	75	1
WP-19	板岩	Pt ₃ brm ²	沃溪	68.41	15.58	6.83	&	1.79	1.87	1.28	3.25	0.80	0.14	0.05	8.70	0.23	2.54	5.08	73	1
WP-20	板岩	Pt ₃ brm ¹	沃溪	67.89	16.59	8.04	&	0.14	2.18	0.96	3.16	0.83	0.13	0.09	10.23	0.24	3.30	15.13	77	1
Zhang-4	板岩	Pt ₃ brm	沃溪	64.40	18.64	5.50	2.16	0.49	2.40	1.87	3.37	0.87	0.27	0.03	10.30	0.29	1.80	7.89	73	3
Zhang-5	板岩	Pt ₃ brm	沃溪	60.89	18.00	3.17	3.05	7.53	2.13	0.92	3.10	0.74	0.44	0.03	8.68	0.30	3.37	2.13	79	3
Zhang-6	板岩	Pt ₃ brm	沃溪	66.67	16.79	3.94	3.62	0.94	2.27	1.55	3.21	0.78	0.19	0.05	10.23	0.25	2.07	6.73	74	3
Zhang-7	板岩	Pt ₃ brm	沃溪	69.23	17.13	3.40	3.07	0.29	1.78	1.05	3.07	0.79	0.14	0.04	8.59	0.25	2.91	12.78	77	3
Zhang-8	板岩	Pt ₃ brm	沃溪	67.65	14.54	5.36	1.79	2.52	2.35	1.82	2.95	0.69	0.35		9.69	0.21	1.62	3.35	70	3
Zhang-9	板岩	Pt ₃ brm	沃溪	65.82	17.80	5.63	1.97	1.05	1.68	1.68	3.47	0.72	0.17		9.50	0.27	2.06	6.50	73	3
Zhang-10	板岩	Pt ₃ brm	沃溪	67.91	17.35	5.84	1.88	0.68	1.34	0.63	3.50	0.76	0.10		9.27	0.26	5.58	13.26	78	3

续表 1

样号	岩性	时代	采样地	SiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	FeO	CaO	MgO	Na ₂ O	K ₂ O	TiO ₂	MnO	F ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃ * +MgO	Al ₂ O ₃ /SiO ₂	K ₂ O /Na ₂ O	Al ₂ O ₃ /(Na ₂ O +CaO)	ClA	资料来源
Zhang-11	板岩	Pt ₃ bn	沃溪	69.81	15.56	3.27	2.35	0.78	1.42	1.58	3.53	0.74	0.96		7.29	0.22	2.23	6.58	71	3
Zhang-12	板岩	Pt ₃ bn	沃溪	65.20	18.65	2.36	4.50	0.21	1.68	1.50	3.81	0.52	1.57		9.04	0.29	2.54	10.86	74	3
Zhang-13	板岩	Pt ₃ bn	沃溪	69.32	17.22	4.78	1.65	0.21	1.41	1.20	3.54	0.47	0.19		8.03	0.25	2.96	12.22	75	3
Zhang-14	板岩	Pt ₃ bn	沃溪	70.50	16.02	4.06	2.17	0.21	1.49	1.26	3.61	0.56	0.12		7.96	0.23	2.87	10.92	73	3
Zhang-15	板岩	Pt ₃ bn	沃溪	70.24	16.00	3.87	1.98	0.30	1.08	1.14	4.57	0.73	0.08		7.15	0.23	4.02	11.10	70	3
Zhang-16	板岩	Pt ₃ bn	沃溪	50.28	10.07	2.77	1.74	26.00	2.50	4.10	1.23	0.44	0.87		7.20	0.20	0.30	0.33	55	3
Zhang-17	板岩	Pt ₃ bn	沃溪	66.39	15.86	5.41	2.12	3.42	2.23	1.84	1.84	0.69	0.21		9.99	0.24	1.00	3.02	76	3
Zhang-18	板岩	Pt ₃ bn	沃溪	67.27	17.19	4.59	2.83	1.25	2.01	1.99	1.99	0.71	0.17		9.74	0.26	1.00	5.30	76	3
Zhang-19	板岩	Pt ₃ bn	沃溪	73.89	13.60	3.46	2.17	0.57	1.62	1.58	2.44	0.59	0.08		7.49	0.18	1.55	6.34	72	3
Zhang-20	板岩	Pt ₃ bn	沃溪	70.98	14.88	3.52	4.06	0.49	1.00	1.22	3.05	0.77	0.04	0.15	9.02	0.21	2.50	8.71	74	3
BnMa(N=8)	板岩	Pt ₃ bn	沃溪	67.95	16.75	4.58	2.53	0.60	1.79	1.59	3.12	0.80	0.14	0.15	9.17	0.25	1.96	7.65	74	2
BnMa(N=6)	板岩	Pt ₃ bn	沃溪	68.53	16.92	1.99	4.44	0.33	1.87	1.82	3.04	0.80	0.15	0.11	8.79	0.25	1.67	7.87	73	2
BnMa(N=2)	板岩	Pt ₃ bn	沃溪	60.94	17.05	3.37	3.53	7.28	2.63	0.96	3.17	0.68	0.30	0.07	9.93	0.28	3.29	2.07	77	2
W-77-3	板岩	Pt ₃ bn	沃溪	69.79	15.56	3.26	2.34	0.78	1.42	1.60	3.52	0.74	0.97	0.01	7.28	0.22	2.20	6.54	71	4
W-60	板岩	Pt ₃ bn	沃溪	69.28	17.21	4.78	1.65	0.21	1.41	1.20	3.54	0.47	0.19	0.05	8.02	0.25	2.95	12.21	75	4
W-58	板岩	Pt ₃ bn	沃溪	64.99	18.59	2.35	4.48	0.43	1.18	1.50	3.80	0.31	1.56	0.12	8.51	0.29	2.53	9.63	74	4
W-61	板岩	Pt ₃ bn	沃溪	70.46	16.01	4.06	2.17	0.21	1.49	1.26	3.61	0.56	0.12	0.06	7.96	0.23	2.87	10.89	73	4
W-63-2	板岩	Pt ₃ bn	沃溪	69.23	15.77	3.82	1.96	0.30	1.68	1.12	4.51	0.72	0.82	0.06	7.68	0.23	4.03	11.11	70	4
Luo9-4(N=3)	板岩	Pt ₃ bn	沃溪	64.77	16.91	5.05	2.87	2.67	2.00	1.52	3.00	0.80	0.15	0.26	10.24	0.26	1.97	4.03	75	6
Luo9-5(N=1)	板岩	Pt ₃ bn	沃溪	67.96	17.24	2.12	5.00	0.17	1.59	2.05	2.82	0.86	0.11	0.07	9.26	0.25	1.37	7.77	73	6
冷家溪群(Pt ₂ ln)																				
WP-25	粉砂岩	Pt ₂ ln	沃溪	70.72	13.94	6.91	&	1.12	2.03	1.64	2.67	0.73	0.11	0.13	8.94	0.20	1.63	5.06	71	1
WP-23	粉砂岩	Pt ₂ ln	沃溪	65.12	17.98	8.11	&	0.24	2.34	1.35	3.88	0.80	0.08	0.10	10.45	0.28	2.87	11.33	74	1
WP-22	粉砂岩	Pt ₂ ln	沃溪	66.66	16.92	7.96	&	0.28	2.20	1.38	3.52	0.86	0.07	0.13	10.17	0.25	2.55	10.20	74	1
B-11	砂岩	Pt ₂ ln	黄金洞	73.34	13.78	2.47	3.19	0.23	1.33	2.14	2.52	0.71	0.07	0.22	7.35	0.19	1.17	5.81	69	2
B-101	砂岩	Pt ₂ ln	黄金洞	77.31	11.07	1.43	4.01	0.28	1.30	2.15	1.57	0.63	0.09	0.15	7.18	0.14	0.73	4.55	68	2
B-110	砂岩	Pt ₂ ln	黄金洞	71.44	16.28	1.44	3.03	0.20	1.18	2.24	3.25	0.72	0.07	0.16	5.98	0.23	1.45	6.67	69	2
B-71	砂岩	Pt ₂ ln	黄金洞	72.92	14.28	1.66	3.90	0.21	1.35	1.89	2.91	0.67	0.06	0.14	7.35	0.20	1.54	6.80	70	2
Lj(N=1)	砂岩	Pt ₂ ln	益阳	74.93	11.52	1.41	6.04	0.31	1.86	0.10	2.59	0.91	0.04	0.27	9.98	0.15	25.00	27.75	79	2
Lj(N=2)	砂岩	Pt ₂ ln	沃溪	75.84	11.46	1.98	4.23	0.34	1.84	1.67	1.72	0.70	0.12	0.10	8.53	0.15	1.03	5.72	71	2
Lj(N=6)	板岩	Pt ₂ ln	沃溪	67.51	17.17	2.39	4.78	0.26	2.00	1.27	3.67	0.74	0.07	0.13	9.71	0.25	2.89	11.19	74	2
Lj(N=3)	板岩	Pt ₂ ln	西冲	69.81	13.49	0.93	5.57	1.34	3.27	2.59	2.06	0.69	0.12	0.15	10.38	0.19	0.79	3.43	67	2
Zhang-21	板岩	Pt ₂ ln	沃溪	64.48	18.72	1.86	6.22	0.45	2.85	1.49	3.04	0.69	0.13	0.05	11.63	0.29	2.03	9.61	76	3
Zhang-22	板岩	Pt ₂ ln	沃溪	70.35	15.77	2.38	4.53	0.34	1.41	1.65	2.68	0.74	0.15	0.00	8.82	0.22	1.62	7.90	74	3
Luo9-7(N=9)	板岩	Pt ₂ ln	沃溪	69.54	15.95	2.39	4.35	0.28	1.85	1.38	3.31	0.74	0.08	0.11	9.08	0.23	2.40	9.59	73	6

注: a. 所有分析值均已换算为干体系, Fe₂O₃* 代表全铁以 Fe₂O₃ 形式给出, & 指 FeO 包含于 Fe₂O₃, 空格为未分析项目; ClA = (Al₂O₃/(Al₂O₃ + CaO + Na₂O + K₂O)) * 100, 其中氧化物为摩尔数, CaO 指岩石中硅酸盐组分中的 CaO^[52]; b. 资料来源: 1. 本研究; 2. 刘英俊等(1993)^[52]; 3. 张永固等(1981); 湖南桃源沅溪金锡矿床地质特征(内部资料); 4. 涂光煜等(1984)^[54]; 5. 罗献林(1994)^[55]; 6. 罗献林等(1996)^[56]。

表 3 扬子地块南缘元古代冷家溪群(Pt₂ln)浊积岩的微量元素组成

Table 3 Trace element compositions of the Proterozoic turbidites from the southern margin of the Yangtze block

样号	WP-22	WP-25	HJ3-1	WP-23	HJ-2	HJ3-2	HJ3-4	HJ3-5	HJ3-6
岩性	粉砂岩	粉砂岩	粉砂岩	粉砂岩	板岩	板岩	板岩	板岩	板岩
采样点	沃溪	沃溪	黄金洞	沃溪	黄金洞	黄金洞	黄金洞	黄金洞	黄金洞
Li	49.7	47.3	17.8	65.4	16.5	16.1	21.3	79.8	82.2
Be	1.1	2.2	2.9	2.6	3.6	6.3	3.1	2.5	3.3
Sc	16.9	16.2	17.4	19.1	17.6	19.7	19.5	19.9	20.9
V	130.9	116.6	113.9	142.1	106.2	125.2	123.3	123.0	133.8
Cr	157.5	175.4	141.3	148.3	111.4	196.5	171.7	181.6	118.0
Co	20.3	18.7	19.6	21.0	20.7	18.5	18.1	20.3	17.7
Ni	42.6	36.6	35.8	42.6	51.0	41.8	43.2	43.6	44.2
Cu	60.2	27.0	56.2	59.3	47.2	33.1	37.0	38.3	34.7
Zn	118.8	85.6	106.8	141.3	119.8	118.2	117.8	97.9	115.4
Ga	23.3	18.2	24.0	24.7	23.1	25.8	23.5	23.8	28.2
Ge	2.5	1.7	2.0	2.5	1.4	1.8	2.1	2.3	2.2
Rb	172.8	123.6	171.0	192.2	195.7	203.2	194.9	179.2	208.5
Sr	40.4	55.2	75.9	40.9	176.0	72.4	68.9	74.5	75.1
Y	36.1	31.1	26.8	33.1	25.9	28.1	32.5	28.3	30.7
Zr	206.3	179.3	197.2	194.2	147.5	172.8	171.9	180.1	181.9
Nb	14.7	11.2	12.1	13.8	9.2	11.2	11.2	11.8	11.9
Cd	0.4	0.3	0.7	0.5	0.3	0.5	0.6	0.3	0.2
Sn	5.1	4.4	17.1	5.9	5.0	10.9	6.4	6.3	6.3
Cs	12.3	9.6	21.8	14.9	19.8	26.9	28.4	16.1	18.3
Ba	365	295	413	396	421	422	409	425	456
La	44.7	38.6	38.7	45.4	31.3	38.8	42.0	38.9	39.2
Ce	90.1	79.9	81.6	91.7	70.4	79.2	87.2	80.5	82.5
Pr	10.5	9.5	9.6	10.6	7.4	9.3	10.3	9.3	9.8
Nd	37.7	33.0	33.9	37.3	26.7	32.4	35.9	32.5	33.7
Sm	7.6	6.7	6.7	6.9	5.4	6.2	7.0	6.6	6.6
Eu	1.4	1.2	1.5	1.4	1.3	1.5	1.6	1.4	1.6
Gd	6.4	5.8	5.8	5.8	5.1	5.7	6.9	5.8	6.1
Tb	1.0	0.9	0.8	0.9	0.8	0.8	1.0	0.8	0.9
Dy	6.5	5.5	5.0	5.8	4.8	5.4	6.1	5.2	5.7
Ho	0.9	0.8	0.7	0.9	0.7	0.8	0.9	0.8	0.9
Er	3.6	3.0	2.7	3.3	2.7	2.8	3.2	2.8	3.3
Tm	0.5	0.5	0.4	0.5	0.4	0.4	0.5	0.5	0.5
Yb	3.9	3.3	3.2	3.8	2.8	3.1	3.5	3.1	3.4
Lu	0.6	0.5	0.5	0.6	0.4	0.5	0.5	0.5	0.5
Hf	6.1	5.3	6.5	5.8	5.0	5.7	5.6	6.1	6.1
Ta	1.3	1.0	1.2	1.2	0.9	1.2	1.1	1.2	1.2
Tl	0.8	0.6	0.8	0.9	0.9	1.0	1.0	0.9	1.0
Pb	24.3	29.2	75.8	23.4	5.9	59.5	36.3	20.6	9.6
Th	19.6	14.9	15.3	19.2	12.5	15.6	15.6	16.0	15.8
U	4.5	3.5	4.1	4.1	3.1	3.4	4.0	4.1	4.0

注:所有资料来自本研究;Au的含量为 10^{-9} ,其余均为 10^{-6}

成熟度的增高, 不稳定组分(长石、岩屑等)的含量降低。CaO 与 SiO₂ 之间的负相关性还表明, 无论岩石中的碎屑碳酸盐岩还是基质(杂基)中的碳酸盐组分均系原生而非次生, 因为次生碳酸盐矿物的影响会导致 CaO 和 SiO₂ 之间的离散^{[18],[19],[46]}。

3.2 微量元素和稀土元素

大离子亲石元素 Rb, Cs, Ba 和 Sr 的含量变化较大(表 2), 但总体上与北美页岩(NASC)^[47]

和太古代后平均页岩(PAAS)^[17]的成分相当。冷家溪群和板溪群地层在大离子亲石元素含量上无明显区别, 仅前者 Ba 的含量相对较低。相对于砂岩, 板岩的 Rb, Cs 和 Sr 含量较高, Ba/Rb 和 Ba/Sr 比值较低, 而 Rb/Sr 和 Ba/Rb 比值相当。K 与 Rb, Cs 均呈明显的正相关(相关系数 r 分别为 0.76 和 0.50, 图 2), 表明含钾的粘土矿物(伊利石、绢云母)是控制这些元素含量变化的主要因素^{[18],[46],[48]}。

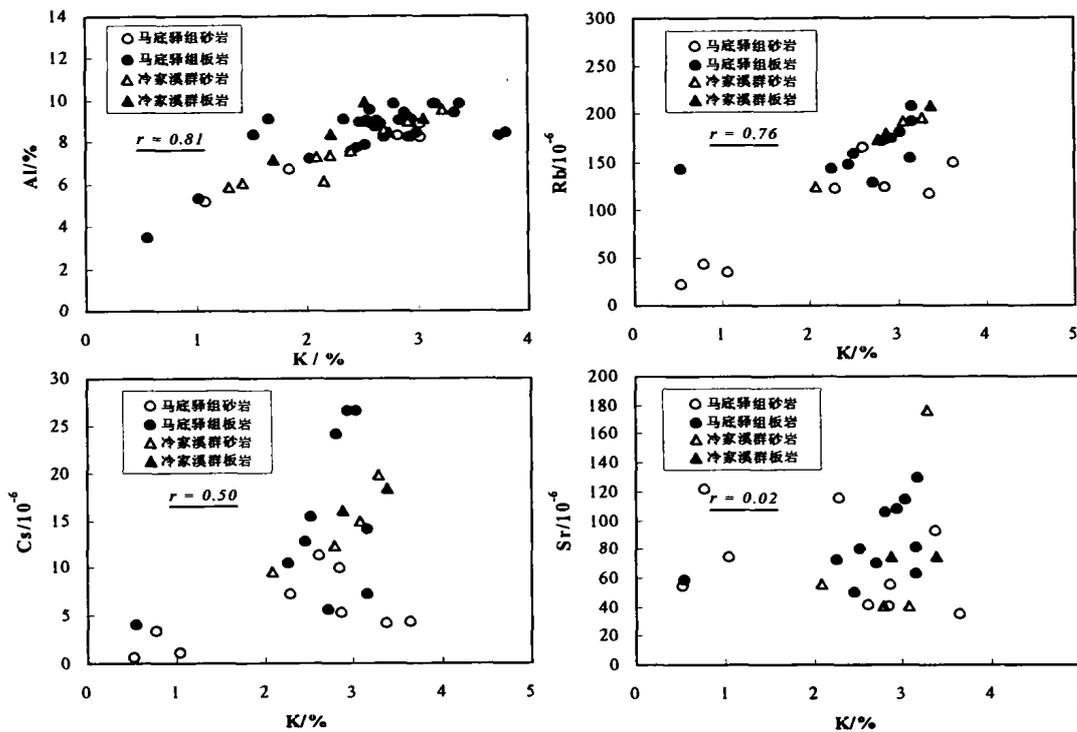


图 2 元古浊积岩中 K 与 Al, Rb, Cs 和 Sr 之间的相关关系
Fig. 2 Plots showing correlations of K vs. Al, Rb, Cs, and Sr

尽管稀土元素的总量变化较大, 但其球粒陨石标准化曲线与典型的太古代后页岩(如 PAAS 或 NASC) 和上陆壳^{[17],[47],[48]}相似(图 3), 以轻稀土富集、重稀土平坦和显著的负铈异常(Eu/Eu^* 一般为 0.6~0.7)为特征。所有样品均无铈异常(Ce/Ce^* 约为 1)。除板溪群马底驿组板岩较同组的砂岩, 轻稀土相对富集和负铈异常更为明显(Eu/Eu^* 分别为 0.65 和 0.72)外, 元古代各群、组地层之间以及共生的砂岩与板岩之间, 稀土元素的配分型式和特征参数无明显的差异。

研究区元古代沉积岩中 Co, Cr, Ni, Sc 和 V 等铁镁族元素的含量以及 Cr/Ni, Ni/Co, Sc/Ni, Sc/Cr 等比值尽管显示一定的变化, 但总体上类

似于上地壳和太古代后页岩^[17]。冷家溪群较板溪群(马底驿组)地层铁镁族元素含量较高, 可能暗示前者基性组分含量较高。

4 讨论

4.1 物源区的风化特征

物源区的风化条件影响着陆源沉积岩中许多元素, 尤其是碱金属和碱土金属元素的丰度和分布型式, 因此沉积岩的地球化学组成记录了源区的风化特征^{[18]~[20],[49]~[56]}。在碱金属和碱土金属元素中, 具较大离子半径的 Cs, Rb 和 Ba 通过选择性离子交换作用和粘土矿物的吸附作用固定于风化剖面中; 而较小离子半径的 Na, Ca 和 Sr 则

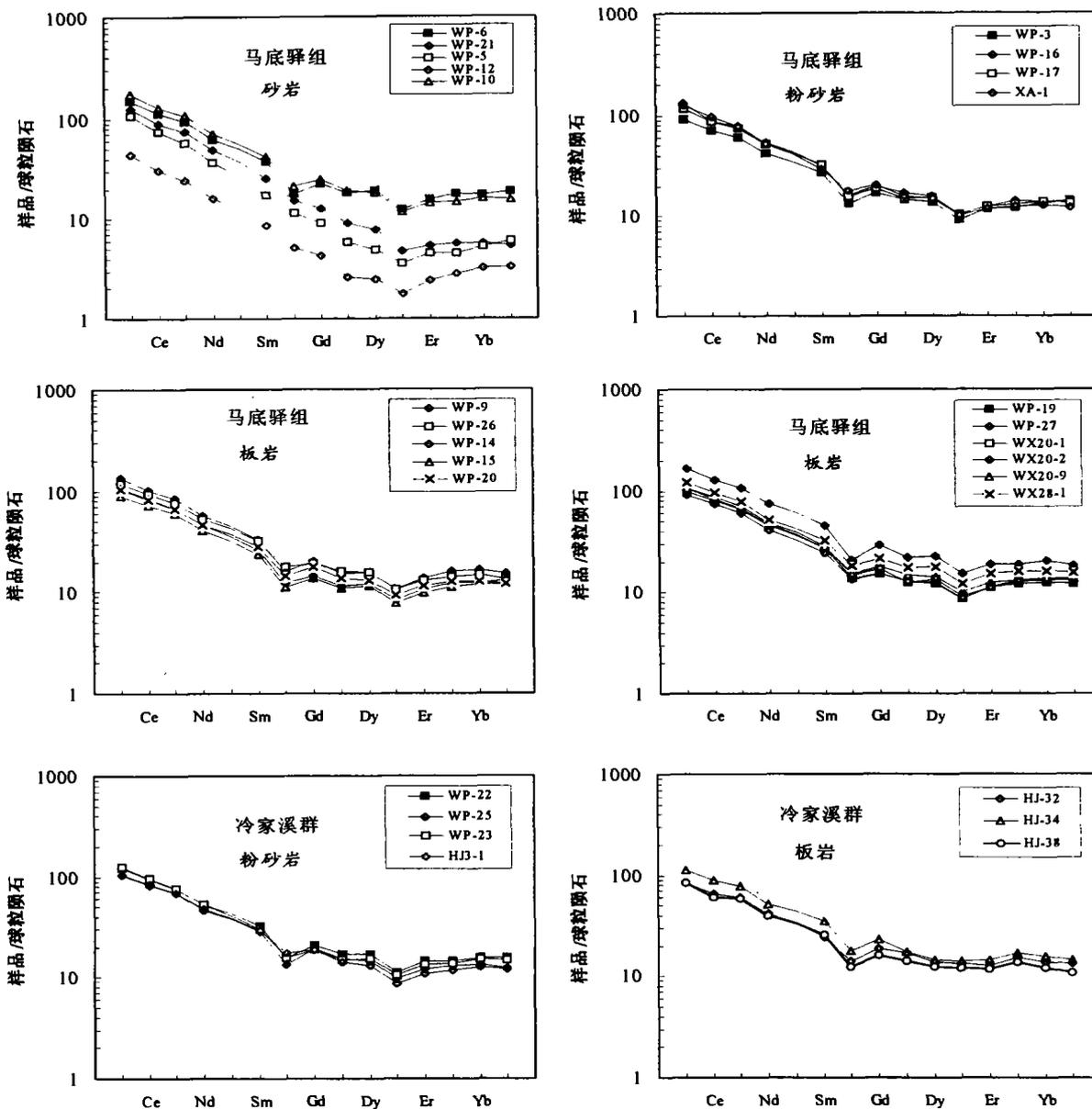


图 3 稀土元素的球粒陨石标准化曲线
Fig. 3 Chondrite-normalized diagrams of the rare earth elements

选择性地从风化壳中流失^[50]。元素 Mg 和 K 同时受上述两种作用过程的控制,因而其行为难以预测。图 4 表示元古代各群、组地层中碱金属和碱土金属(Mg 和 Ca 除外)相对于上地壳的丰度变化。从图中可以清楚地看出,随着离子半径的减小,碱金属和碱土金属元素的亏损程度加剧。这一趋势与现代风化壳剖面中观察到的现象一致,表明这些沉积物的源岩受到了中等程度风化作用的影响^[50]。相对于其他较小离子半径的元素而言,Sr 的亏损特别显著,这要么表明源岩中以酸性斜长

石和钾长石为主而缺乏中基性斜长石,要么暗示源区的风化作用以中基性斜长石的分解为优势。在图中还可以看出,较小离子半径的碱金属和碱土金属元素的亏损趋势似乎在垂向剖面的下部层位(Pt_2ln , Pt_3brn^1)较上部层位(Pt_3brn^{2-3})更为明显。这与在川西北中生代特提斯油积岩系剖面中所观察到的情形相反^{[18],[49]},可能表明随着沉积作用的进行,源区的化学风化作用有所减弱。鉴于陆源的风化程度主要受气候和构造隆升速率的影响^[57],上述化学风化程度的减弱可能反映了物

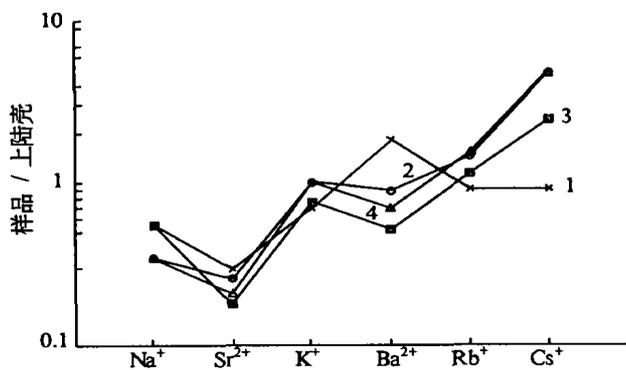


图 4 元古代各群、组地层中碱金属和碱土金属相对于上陆壳的丰度变化

Fig. 4 Plot of alkali and alkaline earth elements in order of increasing ionic radius for the samples from different Proterozoic stratigraphic units
横坐标从左至右按离子半径增大的顺序排列,
纵坐标所取的上陆壳标准化值据 Taylor and McLennan (1985)^[17]

1. 马底驿组上段($n=8$); 2. 马底驿组中段($n=9$);
3. 马底驿组下段($n=4$); 4. 冷家溪群($n=9$)

源区构造活动性的增强抑或气候条件向着更适合于物理风化的方向演化。

图 3 示岩石中 K 与 Al, Rb, Cs, Sr 的相关关系。鉴于大量岩浆岩中 K 和 Al 的原始含量呈负相关^{[58], [59]}, 因此研究区浊积岩中 K-Al ($r=0.81$)、K-Rb ($r=0.76$) 和 K-Cs ($r=0.50$) 之间的正相关关系应归因于源区含钾矿物的风化分解^[46]。Sr 通常富集于斜长石中, 因此, 斜长石的风化分解导致母岩中 Sr 的淋失以及 K 因离子交换作用而进入粘土矿物(形成于风化过程), 从而造成 K 与 Sr 之间的离散关系($r=0.02$)。在地表化学风化过程中, Na 相对于 K 优先被淋滤带出风化壳^[50]; 因此, Na 的显著亏损和高比值的 K_2O/Na_2O (砂岩和板岩分别为 3.13 和 2.27, 远高于上地壳的平均值 0.9) 表明源区斜长石的风化分解远甚于钾长石。值得注意的是, 冷家溪群地层中 Rb 和 Cs 的含量及 Rb/Sr, K_2O/Na_2O 的比值多高于板溪群的同类岩石, 表明前者的源岩经历了更为强烈的化学风化过程。

Nesbitt and Young (1982)^[52]提出的“蚀变化学指数 CIA”(Chemical Index of Alteration) 是定量表征源区岩石风化程度的重要参数。随着风化作用程度的增强, CIA 值逐渐升高(未风化的上地壳为 50, 强烈风化的残留粘土约为 100^[17])。与源区遭受不同风化程度的现代沉积物相比, 本区元

古代沉积岩显示中等程度的源区风化历史, CIA 指数变化于 54~79(表 1), 板岩(CIA 平均 72)略高于砂岩(CIA 平均 69), 与太古代后页岩的平均 CIA 值(70~75^[17])相当, 表明源区的风化作用尚未进行到使碱金属和碱土金属显著地从粘土矿物中淋失的阶段^[17]。在 $Al_2O_3-(Na_2O+CaO^*)-K_2O$ 摩尔分数三角图解(图 5)中, 数据点落在理想的斜长石与伊利石矿物成分的连线附近, 表明源区的化学风化主要是斜长石向粘土矿物(伊利石、绢云母)的转化过程。图 6 表示蚀变化学指数(CIA)与风化过程中最为灵敏的组分或参数之间的关系。CIA 值与 Na_2O 含量($r=-0.82$)呈负相关而与 K_2O/Na_2O ($r=0.51$) 和 $Al_2O_3/(Na_2O+CaO)$ ($r=0.57$) 比值呈正相关, 但 CIA 与 CaO 之间较为离散($r=-0.24$), 表明随着源区化学风化程度的增强, Na 的淋失(主要是钠长石的分解)渐进加剧, 风化物的化学成熟度逐渐增高。

源区的风化作用和沉积物的再旋回过程均可导致 U 的氧化淋失和 Th/U 比值的升高^{[17], [24], [60], [61]}。通常, $Th/U > 4.0$ 被认为与风化作用有关^[24]。图 7 表明, 除个别样品(如 WP-7)外, 研究区沉积岩较高的 Th/U 比值显然与源区的风化作用直接相关。

4.2 沉积物的源岩性质

稀土元素的组成及其配分型式提供了指示沉积物源岩性质最为可靠的信息^{[17], [24], [62]}。研究区元古代浊积岩显著的轻稀土富集、明显的负铈异常和平坦的重稀土分配型式, 表明其来源为主要由长英质组分构成的古老的上地壳; 负铈异常同时表明, 源岩曾受到了使斜长石分离的壳内分异作用(如部分熔融、分离结晶作用)的影响^[17]。

Th/Sc 和 La/Sc 比值能灵敏地指示沉积物源区岩石的成分特征^[17]。在缺乏沉积再旋回的情况下, 这些比值能很好地区分铁镁质/超铁镁质和长英质组分^[57]。研究区样品的 Th/Sc(0.70~1.60) 和 La/Sc(1.78~11.70) 比值变化均较大, 表明这些比值未受到沉积再旋回作用的显著均一化; 换言之, 本区元古代浊积岩不具备成熟的再旋回沉积物的特征。冷家溪群地层的 Th/Sc 比值与板溪群相似, 但 La/Sc 比值却低于后者; 各群、组中板岩的 Th/Sc 和 La/Sc 比值均低于共生的砂岩。这一方面表明冷家溪群地层中含有相对较多的基性组分(这与其中 Co, Cr, Ni, Sc, V 的含量较高相一

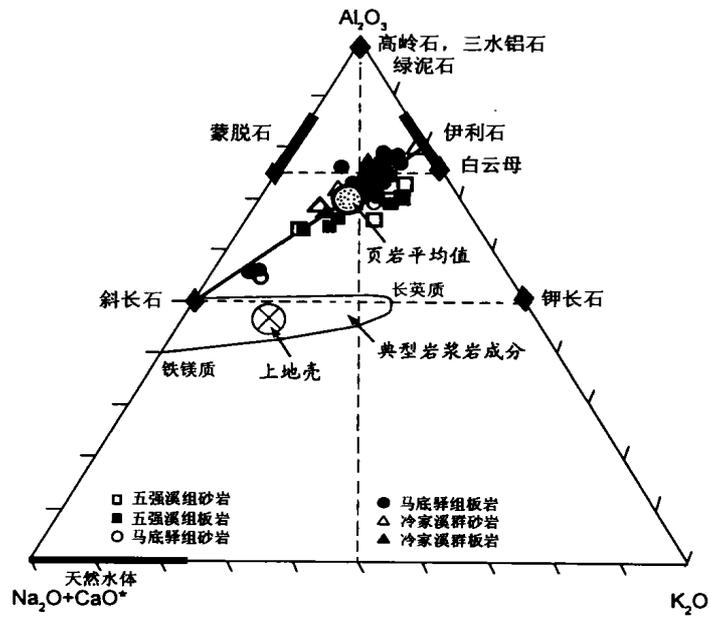


图 5 研究区元古代沉积岩的 $Al_2O_3-(Na_2O+CaO^*)-K_2O$ 摩尔分数三角图解

Fig. 5 Ternary plot of molecular proportions $Al_2O_3-(Na_2O+CaO^*)-K_2O$ for the Proterozoic turbidites from the study area

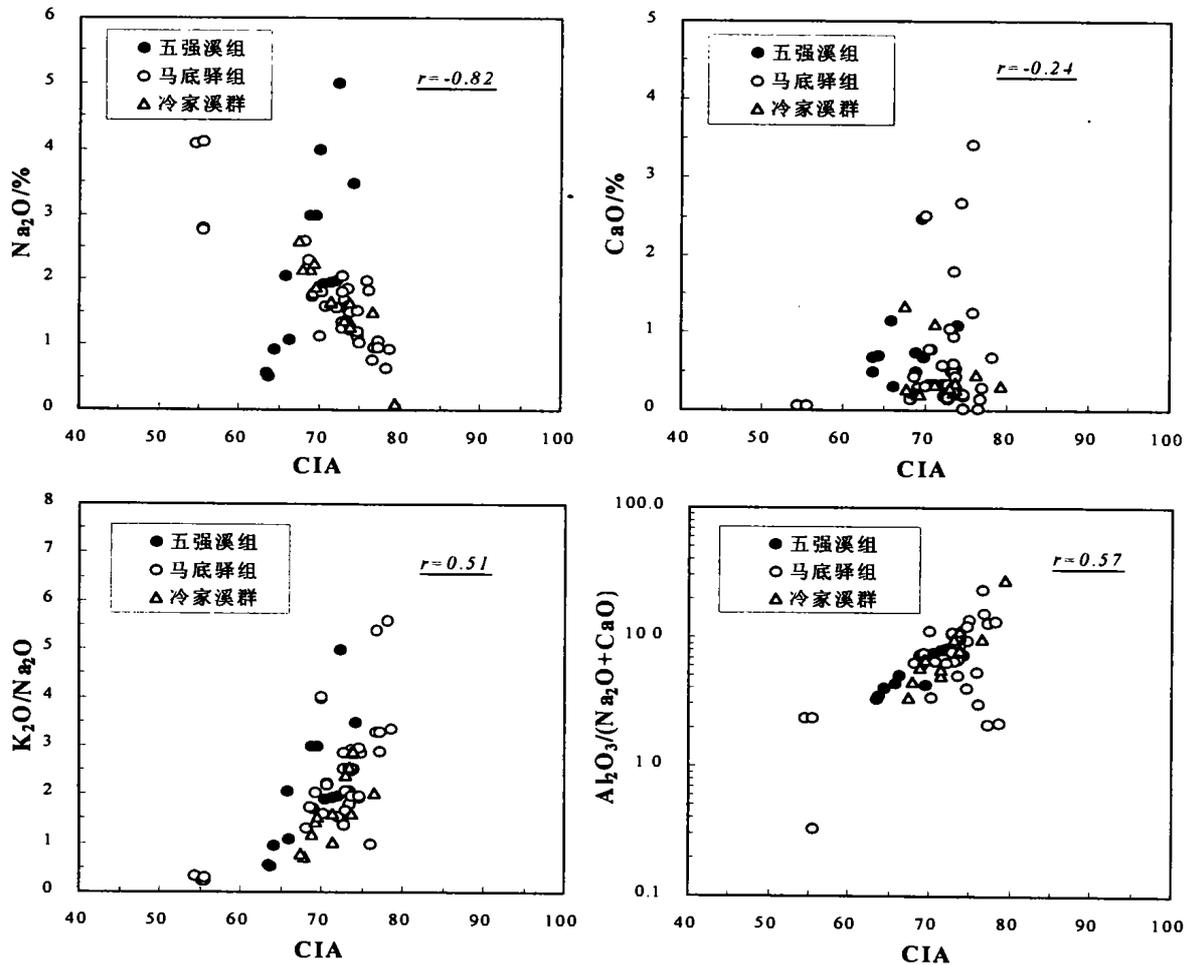


图 6 蚀变化学指数(CIA)与 $Na_2O, CaO, K_2O/Na_2O$ 和 $Al_2O_3/(Na_2O+CaO)$ 的关系

Fig. 6 Plot of CIA (Chemical Index of Alteration) vs. $Na_2O, CaO, K_2O/Na_2O$, and $Al_2O_3/(Na_2O+CaO)$

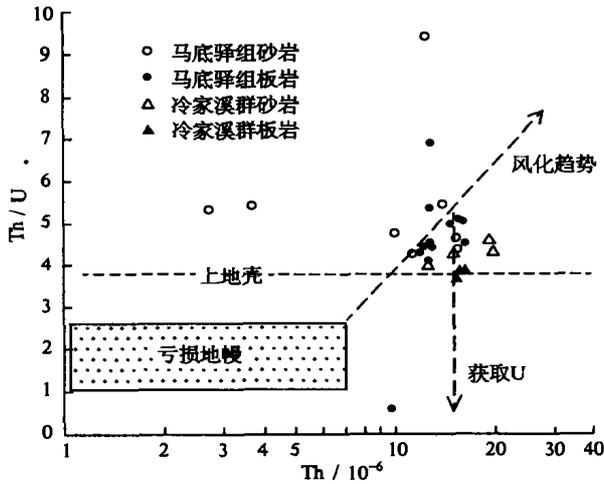


图 7 元古代浊积岩的 Th 含量与 Th/U 比值的关系
Fig. 7 Plot of Th/U ratio vs. Th abundance for the Proterozoic turbidites

致), 另一方面可能暗示基性的铁镁质主要加入到了粘土级组分的沉积记录中。

Floyd and Leveridge (1987) 利用 La/Th-Hf 图解区分沉积物的不同源岩成分^[63]。在图 8-A 中, 极大多数样品落入长英质源区并聚集于上地壳平均成分附近, 仅个别样品落入安山质岛弧区及长英质-基性混合源区。在 La/Sc-Co/Th 关系图中(图 8-B), 本区浊积岩的 Co/Th 比值变化较小(0.61~1.89, 平均 1.27)但 La/Sc 比值变化相当大(1.78~11.70), 同样表明其源岩以长英质组分占绝对优势^{[17],[65]}。

岩石中 TiO₂ 与 Ni 的关系(图 9-A)表明, 其源岩主要为酸性的岩浆岩, 而且不具备成熟的再旋回沉积物的特征^{[66],[67]}。值得注意的是, 冷家溪群的样品大多更靠近基性源岩区方向, 表明其中

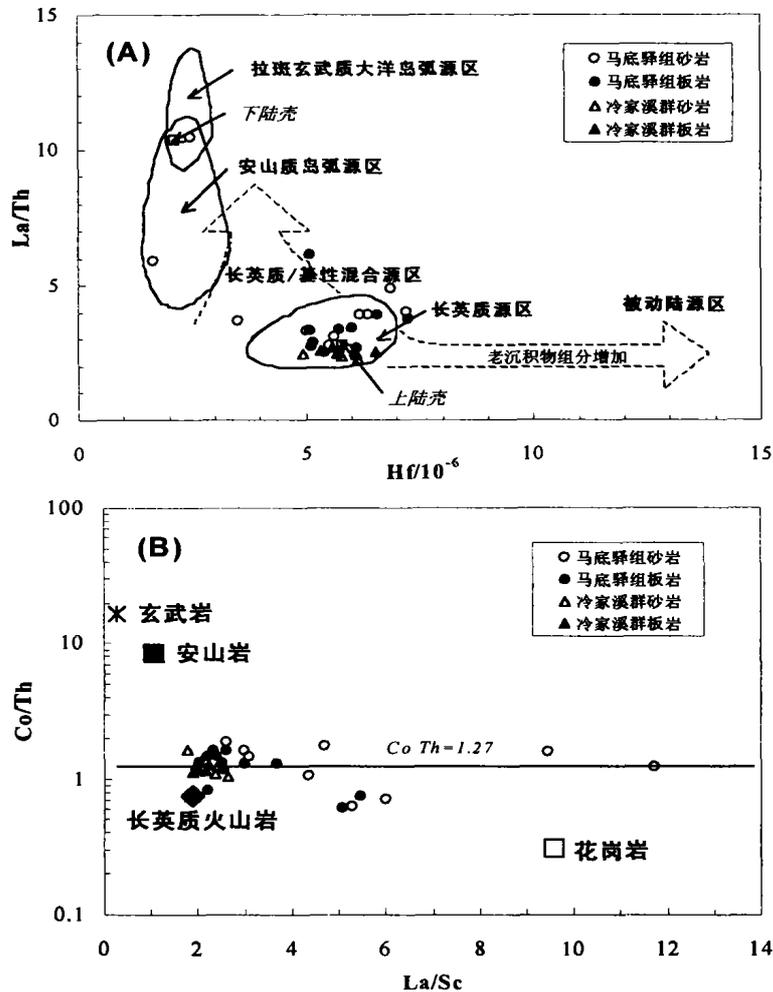


图 8 元古代浊积岩源岩成分的 La/Th-Hf(A)和 La/Sc-Co/Th(B)判别图
Fig. 8 La/Th vs. Hf(A) and La/Sc vs. Co/Th(B) plots for the discrimination of source rocks of the Proterozoic turbidites
图(A)中不同源区据 Floyd and Leveridge (1987)^[63], 图(B)中不同岩浆岩的平均成分据 Condie (1993)^[64]

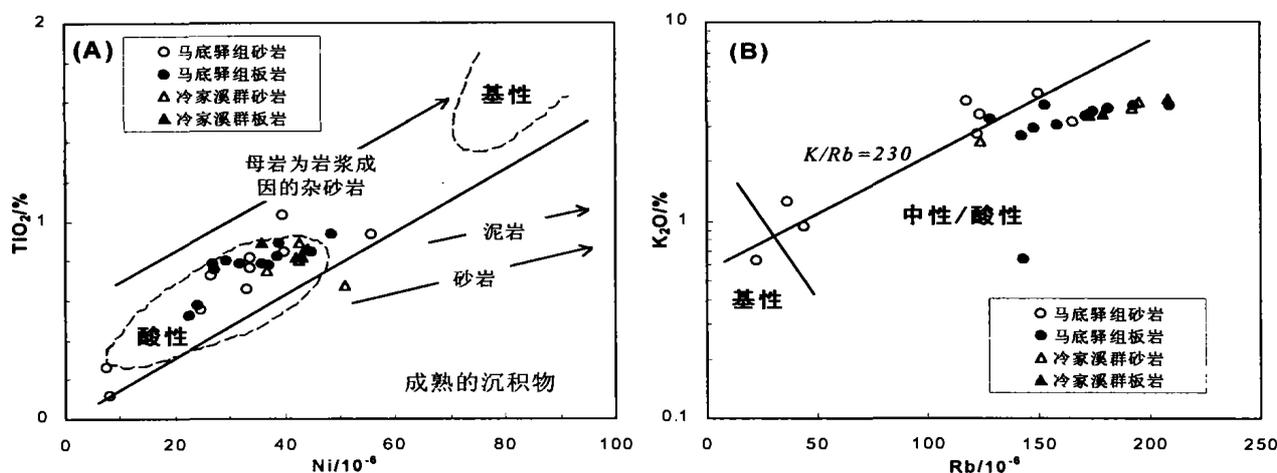


图 9 研究区浊积岩母岩性质的 TiO_2 -Ni(A)和 K_2O -Rb(B)判别图

Fig. 9 TiO_2 -Ni (A) and K_2O -Rb (B) plots for the discrimination of source rocks of the studied turbidites

图(A)中酸性和基性岩浆岩区域以及成熟沉积物的成分变化趋势据 Floyd et al. (1989)^[66],

图(B)中基性与中酸性组分之间的界线据 Floyd and Leveridge (1987)^[63]

含相对较多的铁镁质组分。Floyd and Leveridge (1987)和 McCann(1991)认为, K_2O 与 Rb 之间的关系可用于区分来源于中酸性或基性源岩的沉积物^[63]、^[68]。图 9-B 同样表明,研究区元古代沉积岩的源岩应属中酸性(主要是酸性)的岩浆岩。

5 结 论

扬子地台南缘元古代浊积岩的地球化学组成良好地记录了物源区的风化特征和源岩的性质。沉积物的化学组成,尤其是碱金属和碱土金属元素的丰度与分布型式、蚀变化学指数(CIA)和 Th/U 比值等指示了源区遭受了中等程度的风化作用影响;并且随着时间的推移和沉积作用的进行,源区的化学风化程度渐为减弱而构造活动性则渐为增强。稀土元素的组成和配分型式、Th/Sc 和 La/Sc 比值以及 TO_2 -Ni 和 K_2O -Rb 关系等表明,沉积岩不具备成熟的再旋回沉积物的特征,其源岩主要为由酸性岩浆岩等长英质组分构成的古老的上地壳,源岩曾受到了显著的壳内分异作用的影响。冷家溪群地层的源岩较板溪群含有较高的 Co, Cr, Ni, Sc 和 V 等基性组分,且基性的铁镁质成分主要反映在粘土级组分的沉积记录中。

[参 考 文 献]

- [1] Dickinson W R. Interpreting detrital modes of graywacke and arkose[J]. J Sediment Petrol, 1970, 40: 695-707.
[2] Crook K A W. Lithogenesis and geotectonics: The

significance of compositional variations in flysch arenites (graywackes)[A]. Doot R H, Shaver R H, eds. Modern and Ancient Geosynclinal Sedimentation[C]. SEPM Spec Pub, 1974, 19: 304-310.

- [3] Schwab F L. Framework mineralogy and chemical composition of continental margin-type sandstone [J]. Geology, 1975, 3: 487-490.
[4] Dickinson W R, Suczek C A. Plate tectonics and sandstone compositions [J]. Amer Assoc Petrol Geol, 1979, 63: 2164-2182.
[5] Ingersoll R V, Suczek C A. Petrology and provenance of Neogene sand from Nicobar and Bengal Fans, D. S. D. P. Sites 211 and 218[J]. J Sediment Petrol, 1979, 49: 1217-1228.
[6] Dickinson W R, Valloni R. Plate settings and provenance of sands in modern ocean basins[J]. Geology, 1980, 8: 82-86.
[7] Valloni R, Maynard J B. Detrital modes of recent deep-sea sands and their relation to tectonic setting; A first approximation [J]. Sedimentology, 1981, 28: 75-83.
[8] Dickinson W R, Beard L S, Brakenridge G R, et al. Provenance of North American Phanerozoic sandstones in relation to tectonic setting [J]. Geol Soc Amer Bull, 1983, 94: 222-235.
[9] Ingersoll R V. Petrofacies and provenance of late Mesozoic forearc basin, northern and central California [J]. Amer Assoc Petroleum Geol Bull, 1983, 67: 1125-1142. 0
[10] Dickinson W R. Provenance and sediment dispersal in relation to paleotectonics and paleogeography of

- sedimentary basins[A]. Kleinsehn K L, Paola C, eds. *Frontiers in Sedimentary Geology: New Perspectives in Basin Analysis*[C]. New York: Springer Verlag, 1988. 3-25.
- [11] Bhatia M R. Plate tectonics and geochemical composition of sandstones[J]. *J Geol*, 1983, 91: 611-627.
- [12] Bhatia M R, Crook K A W. Trace element characteristics of graywackes and tectonic setting discrimination of sedimentary basin [J]. *Contrib Mineral Petrol*, 1986, 92: 181-193.
- [13] Thornburg T M, Kulm L D. Sedimentation in the Chile Trench; petrofacies and provenance[J]. *J Sediment Petrol*, 1987, 57: 55-74.
- [14] Haughton P D W, Todd S P, Morton A C. Sedimentary provenance studies[A]. Morton A C, Todd S P, Haughton P D W, eds. *Developments in Sedimentary Provenance Studies* [C]. *Geol Soc Spec Pub*, 1991, 57: 1-11.
- [15] Cummins W A. The graywacke problem[J]. *Geol Jour*, 1962, 3: 51-72.
- [16] Hawkins J W Jr, Whetten J T. Graywacke matrix minerals; Hydrothermal reactions with Columbia River sediments[J]. *Science*, 1969, 66: 868-870.
- [17] Taylor S R, McLennan S M. *The Continental Crust: Its Composition and Evolution*[M]. Oxford: Blackwell, 1985, 1-312.
- [18] Gu X X. Geochemical characteristics of the Triassic Tethys - turbidites in the northwestern Sichuan, China: Implications for provenance and interpretation of the tectonic setting[J]. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 1994, 58: 4615-4631.
- [19] Gu X X. Turbidite-Hosted Micro-Disseminated Gold Deposits[M]. Chengdu: Chengdu University of Science and Technology Press, 1996. 1-239.
- [20] 顾雪祥. 沉积物地球化学特征与沉积盆地构造背景分析[A]. *当代地质科学技术进展-1995*[C]. 北京: 中国地质大学出版社, 1996. 205-212.
- [21] Blatt H, Middleton G V, Murray R. *Origin of Sedimentary Rocks* [M]. Englewood Cliffs, NJ, Prentice-Hall, 1980. 1-782.
- [22] Pettijohn F J, Potter P E, Siever R. *Sand and Sandstone (second edition)* [M]. New York: Springer-Verlag, 1987. 1-553.
- [23] Taylor S R, McLennan S M. The geochemical evolution of the continental crust [J]. *Rev Geophys*, 1995, 33: 241-265.
- [24] McLennan S M, Hemming S R, Taylor S R, *et al.* Early Proterozoic crustal evolution: Geochemical and Nd-Pb isotopic evidence from metasedimentary rocks, southwestern North America [J]. *Geochim Cosmochim Acta*, 1995, 59: 1153-1177.
- [25] 水涛. 中国东南大陆基底构造格局[J]. *中国科学(B)*, 1987, 30 (4): 414-422.
- [26] Chen J, Foland K A, Xing F, *et al.* Magmatism along the southeast margin of the Yangtze block; Precambrian collision of the Yangtze and Cathaysia blocks of China[J]. *Geology*, 1991, 19: 815-818.
- [27] 刘宝珺, 许效松, 潘杏南, 等. 中国南方古大陆沉积地壳演化与成矿[M]. 北京: 科学出版社, 1993. 1-236.
- [28] Li Z X, Zhang L, Powell C Mc A. South China in Rodinia; Part of the missing link between Australia-East Antarctica and Laurentia? [J]. *Geology*, 1995, 23: 407-410.
- [29] 李献华, McCulloch M T. 扬子南缘沉积岩的 Nd 同位素演化及其大地构造意义[J]. *岩石学报*, 1996, 12 (3): 359-369.
- [30] 李献华. 华南晋宁期造山运动-地质年代学和地球化学制约[J]. *地球物理学报*, 1998, 41(增刊): 184-193.
- [31] Chen J, Jahn B-M. Crustal evolution of southeastern China: Nd and Sr isotopic evidence [J]. *Tectonophysics*, 1998, 284: 101-133.
- [32] 刘英俊, 孙承轅, 马东升. 江南金矿及其成矿地球化学背景[M]. 南京: 南京大学出版社, 1993. 1-260.
- [33] 黄汲清. 中国主要地质构造单元[M]. 北京: 地质出版社, 1956. 1-162.
- [34] 张文佑. 中国及邻区海陆大地构造[M]. 北京: 科学出版社, 1986. 1-575.
- [35] 郭令智, 施央申, 马瑞士. 江南元古代板块运动和岛弧构造的形成和演化[A]. 26 届国际地质大会论文集(1)[C]. 北京: 地质出版社, 1986. 30-37.
- [36] 王任衡. 湖南的上前寒武系[J]. *湖南地质*, 1987, 6 (4): 1-13.
- [37] 徐备, 乔广生. 赣东北新元古代蛇绿岩套的 Sm-Nd 同位素年龄及原始构造环境[J]. *南京大学学报(地球科学)*, 1989, (3): 108-114.
- [38] 周新民, 邹海波, 扬杰东, 等. 安徽歙县伏川蛇绿岩套的 Sm-Nd 等时线年龄及其地质意义[J]. *科学通报*, 1989, 34 (16): 1243-1245.
- [39] 李献华, 周国新, 赵建新, 等. 赣东北蛇绿岩的离子探针锆石 U-Pb 年龄及其构造意义[J]. *地球化学*, 1994, 23 (2): 117-123.

- [40] 刘海臣,朱炳泉. 湘西板溪群及冷家溪群的时代研究[J]. 科学通报, 1994, 39 (2): 148—150.
- [41] 甘晓春,李献华,赵凤清,等. 广西龙胜丹洲群细碧岩锆石 U-Pb 及 Sm-Nd 等时线年龄[J]. 地球化学, 1996, 25 (3): 270—276.
- [42] Gu X X, Liu J M, Schulz O, *et al.* Jungproterozoische submarine Primäranreicherung und metamorphogene Weiterentwicklung der stratiformen W-Sb-Au-Erzlagerstätten vom "Typ Woxi" in Hunan (Süd-China)[M]. Vienna: Arch f Lagerst forsch Geol B-A, 2002. 1—204.
- [43] 罗献林,钟东球,李高生. 湖南省沃溪式层控金矿地质[M]. 北京:地震出版社, 1996. 1—313.
- [44] 涂光炽. 中国层控矿床地球化学(第一卷)[M]. 北京:科学出版社, 1984. 1—354.
- [45] 罗献林. 湖南前寒武系锑矿床的成矿地质特征[J]. 桂林冶金地质学院学报, 1994, 14 (4): 335—349.
- [46] Feng R, Kerrich R. Geochemistry of fine-grained clastic sediments in the Archean Abitibi greenstone belt, Canada; Implications for provenance and tectonic setting[J]. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 1990, 54: 1061—1081.
- [47] Gromet L P, Dymek R F, Haskin L A, *et al.* The North American Shale Composite: Its composition, major and trace element characteristics [J]. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 1984, 48: 2469—2482.
- [48] McLennan S M, Taylor S R, Eriksson K A. Geochemistry of Archean shales from the Pilbara Supergroup, Western Australia [J]. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 1983, 47: 1211—1222.
- [49] 顾雪祥. 川西北中生代特提斯沉积物的地球化学特征对陆源风化条件的指示意义[J]. 矿物岩石地球化学通报, 1996, 15 (1): 22—27.
- [50] Nesbitt H W, Markovics G, Price R C. Chemical processes affecting alkalis and alkaline earths during continental weathering[J]. *Geochim Cosmochim Acta*, 1980, 44: 1659—1666.
- [51] Kronberg B I, Nesbitt H W. Quantification of weathering soil geochemistry and soil fertility[J]. *J Soil Sci*, 1981, 32: 453—459.
- [52] 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.
- [53] Nesbitt H W, Young G M. Prediction of some weathering trends of plutonic and volcanic rocks based on thermodynamic and kinetic considerations [J]. *Geochim Cosmochim Acta*, 1984, 48: 1523—1534.
- [54] Nesbitt H W, Young G M. Formation and diagenesis of weathering profiles[J]. *J Geol*, 1989, 97: 129—147.
- [55] Schau M, Henderson J B. Archean chemical weathering at three localities on the Canadian Shield[J]. *Precamb Res*, 1983, 20: 189—224.
- [56] Grandstaff D E, Edelman M J, Foster R W, *et al.* Chemistry and mineralogy of Precambrian paleosols at the base of the Dominion and Pongola Groups, south Africa[J]. *Precamb Res*, 1986, 32: 97—132.
- [57] 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.
- [58] Plank T, Langmuir C H. An evaluation of the global variations in the major element chemistry of arc basalts[J]. *Earth Planet Sci Lett*, 1988, 90: 349—370.
- [59] Maniar P D, Piccoli P M. Tectonic discrimination of granitoids[J]. *Geol Soc Amer Bull*, 1989, 101: 635—643.
- [60] McLennan S M, Taylor S R. Sedimentary rocks and crustal evolution: Tectonic setting and secular trends [J]. *J Geol*, 1991, 99: 1—21.
- [61] McLennan S M, Taylor S R, McCulloch M T, *et al.* Geochemical and Nd—Sr isotopic composition of deep—sea turbidites: Crustal evolution and plate tectonic associations[J]. *Geochim Cosmochim Acta*, 1990, 54: 2015—2050.
- [62] McLennan S M. Rare earth elements in sedimentary rocks: Influence of provenance and sedimentary processes[J]. *Rev Mineral*, 1989, 21: 169—200.
- [63] Floyd P A, Leveridge B E. Tectonic environment of the Devonian Gramscatho basin, south Cornwall: Framework mode and geochemical evidence from turbiditic sandstones [J]. *J Geol Soc London*, 1987, 144: 531—542.
- [64] 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.
- [65] McLennan S M, Taylor S R. Geochemistry of Archean metasedimentary rocks from West Green-

- land[J]. *Geochim Cosmochim Acta*, 1984, 48: 1—13.
- [66] Floyd P A, Winchester J A, Park R G. Geochemistry and tectonic setting of Lewisian clastic metasediments from the early Proterozoic Loch Maree Group of Gairloch, N. W. Scotland[J]. *Precambrian Research*, 1989, 45: 203—214.
- [67] Floyd P A, Shail R, Leveridge B E, *et al.* Geochemistry and provenance of Rhenohercynian synorogenic sandstones: implications for tectonic environment discrimination [A]. Morton A C, Todd S P, Haughton P D W. *Developments in Sedimentary Provenance Studies*[C]. *Geol Soc Spec Pub*, 1991, 57: 173—188.
- [68] McCann T. Petrological and geochemical determination of provenance in the southern Welsh Basin[A]. Morton A C, Todd S P, Haughton P D W. *Developments in Sedimentary Provenance Studies* [C]. *Geol Soc Spec Pub*, 1991, 57: 215—230.

SEDIMENTARY GEOCHEMICAL RECORDS FOR THE SOURCE AREA WEATHERING AND NATURE OF SOURCE ROCKS OF THE PROTEROZOIC TURBIDITES FROM THE SOUTHERN MARGIN OF THE YANGTZE BLOCK

GU Xue-xiang^{1,2}, LIU Jian-ming³, Oskar SCHULZ⁴, Franz VAVTAR⁴,
TANG Ju-xing², WANG Qian²

(1. *Institute of Geochemistry, Chinese Academy of Sciences, Guiyang, China*; 2. *Chengdu University of Technology, China*; 3. *Institute of Geology and Geophysics, Chinese Academy of Sciences, Beijing, China*;
4. *Institute of Mineralogy and Petrography, University of Innsbruck, A-6020 Innsbruck, Austria*)

Abstract: Studies on the major and trace element geochemistry of the Proterozoic turbidites from the southern margin of the Yangtze block indicate that the source area was affected by a moderate weathering regime, as recorded by the contents and distribution patterns of alkali and alkaline earth elements, the Chemical Index of Alteration (CIA), and Th/U ratios. Rare earth element compositions and chondrite-normalized patterns, Th/Sc and La/Sc ratios, as well as the relationship among other major and trace elements indicate that the turbidites do not exhibit characteristics of recycled metasediments and were derived from an old continental crust dominated chiefly by felsic rocks of magmatic origin. The source rocks were significantly affected by intracrustal differentiation. The source rocks of the Mesoproterozoic Lengjiaxi Group contain more mafic materials like Co, Cr, Ni, Sc, and V compared to those of the Neoproterozoic Banxi Group, and the incorporation of these mafic components is mainly concentrated in clay size fraction.

Key words: geochemical records; weathering characteristics of source area; nature of source rocks; Proterozoic turbidites; southern margin of the Yangtze block