

文章编号: 0379-1726(2003)05-0406-21

江南造山带雪峰隆起区元古宙浊积岩
沉积构造背景的地球化学制约顾雪祥^{1,2}, 刘建明³, Oskar Schulz⁴, Franz Vavtar⁴, 郑明华²

(1. 中国科学院地球化学研究所, 贵州 贵阳 550002; 2. 成都理工大学地球科学学院, 四川 成都 610059; 3. 中国科学院地质与地球物理研究所, 北京 100029; 4. 茵斯布鲁克大学矿物与岩石研究所, A-6020 茵斯布鲁克, 奥地利)

摘要: 江南造山带雪峰隆起区元古宙浊积岩的地球化学组成良好地反映了沉积盆地的板块构造性质, 并为解释区域大地构造的性质和演化提供了有用的信息。中元古代冷家溪群和新元古代板溪群(包括下部马底驿群和上部五强溪组)地层在主元素成分上无明显区别, 总体上以中等 SiO₂ 含量和 K₂O/Na₂O 比值以及较高的 (Fe₂O₃ + MgO) 含量为特征。稀土元素球粒陨石标准化曲线与典型的后太古宙页岩(如 PAAS 或 NASC)和上陆壳相似, 以轻稀土富集、显著的铈负异常和重稀土平坦为特征。大离子亲石元素和铁钛族元素的含量中等。主元素和微量元素特征指示了研究区元古宙浊积岩很可能代表了一套活动大陆边缘弧后沉积盆地的产物。陆内裂谷盆地模式对于解释新元古代华南地区的构造性质和演化可能并不合适。华夏陆块与扬子陆块的拼接以及 Rodinia 超大陆的最终形成可能发生在约 0.8 Ga 左右的晋宁(雪峰)造山运动期, 而不是全球 Grenville 造山期末的四堡(东安)运动期。

关键词: 地球化学制约; 构造背景; 浊积岩; 元古宙; 雪峰隆起; 江南造山带**中图分类号:** P59; P548**文献标识码:** A

0 引言

近年来,对于华南的大地构造格局,人们已逐步形成了南北分野的认识,即位于北北西的扬子克拉通和位于南南东的华夏古陆焊接成中国南方大陆基底^[1-6]。在扬子克拉通的东南缘有一条引人注目前震旦纪基底出露带,呈向北西弧形突出的北东东-南西西向延伸 1 000 余 km, 常被称为江南造山带^[7], “江南古陆”或“江南地块”^[8]、“江南地轴”^[9]、“江南古岛弧带”^[10, 11]等(图 1a)。刘英俊等^[7]按地层地体理论将江南造山带划分为 5 个地层地体,由东向西依次为:浙东(会稽)地体、怀玉地体、九岭地体、雪峰地体和黔桂地体(图 1b)。雪峰隆起区即大致与雪峰地体相对应,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,然后转折为南西向经溆浦延至会同、靖县一带进入黔桂两省。

江南造山带作为华南大陆的主要组成部分,在

解译扬子陆块与华夏陆块的拼接、演化以及中国南方大陆岩石圈的结构和增长机制等方面起着极为重要的作用,因而长期以来受到国际地学界的广泛关注^[2, 4-6, 12-31]。然而,有关江南造山带元古宙巨厚的浅变质碎屑岩系的物源以及沉积构造背景仍长期存在争议。一些研究者认为元古宙浊积岩(包括中元古界冷家溪群和新元古界板溪群)代表了一套沟、弧、盆体系的沉积物^[10, 11, 32-34], 华夏陆块通过晋宁(雪峰)运动(~0.8 Ga)拼贴于扬子陆块;但另一些研究者则将新元古界板溪群解释为华夏陆块与扬子陆块拼接、Rodinia 超大陆形成(约 1.0 Ga 的四堡运动或东安运动,相当于 Grenville 造山运动末)后的早期裂谷沉积^[4, 20, 29]。

为了检验上述两种不同的观点,进一步探讨中国东南部元古宙的沉积-构造演化历史,我们对扬子陆块南缘江南造山带西段雪峰隆起区的元古宙沉积岩开展了系统的主元素、微量元素和稀土元素地球化学研究。迄今为止的大量研究表明,沉积岩的化学组成真实地记录了物源区的性质和沉积盆地的

收稿日期: 2002-10-14; **接受日期:** 2003-05-23**基金项目:** 国家自然科学基金(49602029, 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)**作者简介:** 顾雪祥(1964-),男,博士、研究员,矿物学、岩石学、矿床学和地球化学专业。E-mail: gxx@cdut.edu.cn; xuexiang.gu@263.net

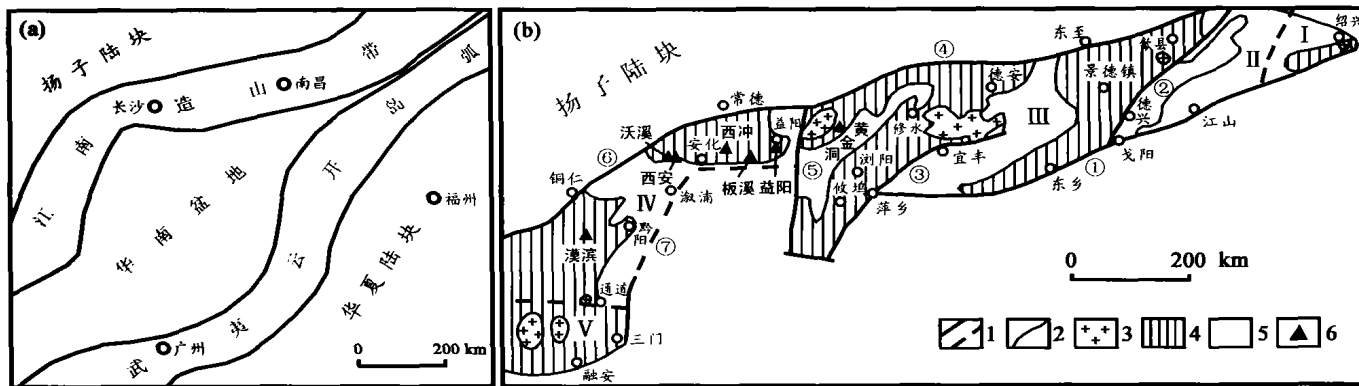


图 1 华南大地构造格架(a)及江南造山带构造分区略图(b)

Fig. 1 Geotectonic framework of South China (a) and tectonics of the Jiangnan orogenic belt (b)

图 1a 据刘宝琪等^[1]修改, 图 1b 据刘英俊等^[7]修改。

- I. 浙东(会稽)地体; II. 怀玉地体; III. 九岭地体; IV. 雪峰地体; V. 黔桂地体。1. 实测或推测断裂: ①绍兴-江山-萍乡断裂; ②赣东北断裂; ③南昌-万载-萍乡断裂; ④江南断裂; ⑤汨罗-湘潭断裂; ⑥湘黔断裂; ⑦安化-溆浦-黔阳断裂; 2. 地质界限;
- 3. 元古宙花岗岩; 4. 中元古代—新元古代早期地层分布区; 5. 震旦纪—第四纪盖层分布区; 6. 本研究采样位置。

构造背景^[35-50]。本文的研究也将表明, 江南造山带元古宙浊积岩的地球化学组成良好地反映了沉积盆地的板块构造性质, 并为解释区域大地构造的性质和演化提供了有用的信息。

1 地质背景

雪峰隆起区出露的地层由元古宙浅变质基底和震旦系—显生宙沉积盖层两部分构成。元古宙基底由中、新元古界两套浅变质岩系组成, 两者以平行不整合或角度不整合接触。中元古界冷家溪群(Pt₃ln)及其相应地层(包括赣北九岭群、贵州梵净山群和桂北四堡群等)主要为浅变质(低绿片岩相)的灰绿色砂岩、粉砂岩和板岩, 厚 800~25 000 m 不等, 局部地段夹浅变质基性-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 1 400~1 050 Ma^[6, 12, 13, 19, 22, 51-53]。

新元古界板溪群(Pt₃bn, 对应于皖南上溪群、赣北修水群和桂北丹洲群等)为一套厚 1 250~6 200 m 的复理石沉积, 主要由浅变质(低绿片岩相)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(Pt₃bnm)和上部五强溪组(Pt₃bnw), 两者呈整合接触。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 1 000~800 Ma 之间, 大致代表了地层的沉积时代^[51, 54]。

假整合或不整合覆盖于元古宙基底之上的是震

旦系海陆交互相(含冰水沉积)碎屑岩和浅海台地相碳酸盐岩, 包括下震旦统江口组含砾砂岩、莲沱组长石石英砂岩、南沱组冰碛岩以及上震旦统陡山沱组硅质-碳质板岩和留茶坡组硅质岩^[51, 54]。下寒武统黑色页岩整合覆盖于震旦系之上。

2 分析方法及结果

2.1 分析方法

本研究所分析的样品采自湖南省境内, 代表了元古宙不同群、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 荧光仪完成, 所用标样为日本地质调查研究所的火成岩标样, 分析误差除 P₂O₅ 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 和表 2, 表中同时列出了文献中收集的部分数据。

2.2 主元素

研究区元古宙各群、组地层在主元素成分上无明显区别(表 1), 总体上以中等的 SiO₂ 含量(Al₂O₃/

表 1 江南造山带元古宙浊积岩

Table 1 Major element compositions (%) of the Proterozoic

样号	岩性	时代	采样地	SiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	FeO	CaO
五强溪组 (Pt₃bnw)								
Zhang-2	石英砂岩	Pt ₃ bnw	沃溪	74.76	12.54	1.41	2.90	1.15
Luo9-3(N=1)	石英砂岩	Pt ₃ bnw	沃溪	94.46	2.64	0.51	0.91	0.19
BnWu(N=4)	砂岩	Pt ₃ bnw	沃溪	78.99	10.61	1.21	2.59	0.68
BnWu(N=3)	砂岩	Pt ₃ bnw	沃溪	72.16	15.58	2.43	2.08	0.49
WP-1	灰绿色粉砂岩	Pt ₃ bnw	沃溪	64.07	16.86	6.45	&	2.46
BnWu(N=2)	板岩	Pt ₃ bnw	沃溪	67.73	17.43	2.69	3.71	0.34
Zhang-1	灰绿色板岩	Pt ₃ bnw	沃溪	70.40	15.26	1.13	3.87	1.09
BnWu(N=6)	砂质板岩	Pt ₃ bnw	漠滨	68.13	17.01	2.31	3.60	0.75
BnWu175/1(N=4)	砂质板岩	Pt ₃ bnw	漠滨	74.53	14.60	1.10	2.80	0.50
BnWu175/2(N=4)	板岩	Pt ₃ bnw	漠滨	70.88	16.51	1.16	3.24	0.30
BnWu175/3(N=5)	凝灰质板岩	Pt ₃ bnw	漠滨	69.56	16.20	1.63	3.60	0.69
Luo-4	绢云母板岩	Pt ₃ bnw	板溪	74.33	13.21	0.14	4.12	0.67
Luo9-1(N=1)	紫灰色板岩	Pt ₃ bnw	沃溪	65.45	17.85	4.19	3.91	0.34
Luo9-2(N=1)	灰色条带状板岩	Pt ₃ bnw	沃溪	67.91	16.48	4.21	3.40	0.33
马底驿组 (Pt₃bnm)								
WP-3	灰色粉砂岩	Pt ₃ bnm ³	沃溪	69.54	15.54	6.38	&	0.29
WP-5	长石岩屑石英粗砂岩	Pt ₃ bnm ³	沃溪	82.10	9.74	2.09	&	0.06
WP-12	灰绿色细砂岩	Pt ₃ bnm ³	沃溪	87.31	6.61	2.02	&	0.07
WP-16	灰-灰绿色粉砂岩	Pt ₃ bnm ¹	沃溪	71.02	15.76	6.07	&	0.14
WP-17	灰-灰绿色粉砂岩	Pt ₃ bnm ¹	沃溪	68.95	16.81	6.53	&	0.54
BnMa-N=3	砂岩	Pt ₃ bnm	沃溪	75.25	12.64	2.82	3.51	0.19
WP-9	灰绿色粉砂质板岩	Pt ₃ bnm ³	沃溪	87.38	6.59	1.98	&	0.07
WP-27	灰绿-紫红色条带状板岩	Pt ₃ bnm ²	沃溪	63.66	17.77	8.79	&	0.44
WP-26	灰绿色粉砂质板岩	Pt ₃ bnm ²	沃溪	68.19	17.08	6.16	&	0.15
WP-14	紫红色粉砂质板岩	Pt ₃ bnm ²	沃溪	67.72	18.57	7.03	&	0.03
WP-15	紫红色粉砂质板岩	Pt ₃ bnm ²	沃溪	74.18	14.32	5.81	&	0.02
WP-19	紫红色板岩	Pt ₃ bnm ²	沃溪	68.41	15.58	6.83	&	1.79
WP-20	灰绿色粉砂质板岩	Pt ₃ bnm ¹	沃溪	67.89	16.59	8.04	&	0.14
Zhang-4	紫红色板岩	Pt ₃ bnm	沃溪	64.40	18.64	5.50	2.16	0.49
Zhang-5	紫红色板岩	Pt ₃ bnm	沃溪	60.89	18.00	3.17	3.05	7.53
Zhang-6	紫红色板岩	Pt ₃ bnm	沃溪	66.67	16.79	3.94	3.62	0.94
Zhang-7	紫红色板岩	Pt ₃ bnm	沃溪	69.23	17.13	3.40	3.07	0.29
Zhang-8	紫红色板岩	Pt ₃ bnm	沃溪	67.65	14.54	5.36	1.79	2.52
Zhang-9	紫红色板岩	Pt ₃ bnm	沃溪	65.82	17.80	5.63	1.97	1.05
Zhang-10	紫红色板岩	Pt ₃ bnm	沃溪	67.91	17.35	5.84	1.88	0.68
Zhang-11	紫红色板岩	Pt ₃ bnm	沃溪	69.81	15.56	3.27	2.35	0.78
Zhang-12	紫红色板岩	Pt ₃ bnm	沃溪	65.20	18.65	2.36	4.50	0.21
Zhang-13	紫红色板岩	Pt ₃ bnm	沃溪	69.32	17.22	4.78	1.65	0.21
Zhang-14	紫红色板岩	Pt ₃ bnm	沃溪	70.50	16.02	4.06	2.17	0.21
Zhang-15	紫红色板岩	Pt ₃ bnm	沃溪	70.24	16.00	3.87	1.98	0.30
Zhang-16	紫红色板岩	Pt ₃ bnm	沃溪	50.28	10.07	2.77	1.74	26.00
Zhang-17	紫红色板岩	Pt ₃ bnm	沃溪	66.39	15.86	5.41	2.12	3.42
Zhang-18	紫红色板岩	Pt ₃ bnm	沃溪	67.27	17.19	4.59	2.83	1.25
Zhang-19	紫红色板岩	Pt ₃ bnm	沃溪	73.89	13.60	3.46	2.17	0.57
Zhang-20	紫红色板岩	Pt ₃ bnm	沃溪	70.98	14.88	3.52	4.06	0.49
BnMa-N=8	紫红色砂质板岩	Pt ₃ bnm	沃溪	67.95	16.75	4.58	2.53	0.60
BnMa-N=6	灰绿色砂质板岩	Pt ₃ bnm	沃溪	68.53	16.92	1.99	4.44	0.33
BnMa-N=2	紫红色钙质板岩	Pt ₃ bnm	沃溪	60.94	17.05	3.37	3.53	7.28
W-77-3	板岩	Pt ₃ bnm	沃溪	69.79	15.56	3.26	2.34	0.78
W-60	板岩	Pt ₃ bnm	沃溪	69.28	17.21	4.78	1.65	0.21
W-58	板岩	Pt ₃ bnm	沃溪	64.99	18.59	2.35	4.48	0.43
W-61	板岩	Pt ₃ bnm	沃溪	70.46	16.01	4.06	2.17	0.21
W-63-2	板岩	Pt ₃ bnm	沃溪	69.23	15.77	3.82	1.96	0.30
Luo9-4(N=3)	紫红色板岩	Pt ₃ bnm	沃溪	64.77	16.91	5.05	2.87	2.67
Luo9-5(N=1)	黄绿色板岩	Pt ₃ bnm	沃溪	67.96	17.24	2.12	5.00	0.17
冷家溪群 (Pt₂ln)								
WP-25	青灰色粉砂岩	Ptln	沃溪	70.72	13.94	6.91	&	1.12
WP-23	灰色粉砂岩夹泥质条带	Ptln	沃溪	65.12	17.98	8.11	&	0.24
WP-22	灰色粉砂岩	Ptln	沃溪	66.66	16.92	7.96	&	0.28
B-11	砂岩	Ptln	黄金洞	73.34	13.78	2.47	3.19	0.23
B-101	砂岩	Ptln	黄金洞	77.31	11.07	1.43	4.01	0.28
B-110	砂岩	Ptln	黄金洞	71.44	16.28	1.44	3.03	0.20
B-71	砂岩	Ptln	黄金洞	72.92	14.28	1.66	3.90	0.21
Lj-N=1	灰黑色砂岩	Ptln	益阳	74.93	11.52	1.41	6.04	0.31
Lj-N=2	砂岩	Ptln	沃溪	75.84	11.46	1.98	4.23	0.34
Lj-N=6	砂质板岩	Ptln	沃溪	67.51	17.17	2.39	4.78	0.26
Lj-N=3	砂质板岩	Ptln	西冲	69.81	13.49	0.93	5.57	1.34
Zhang-21	灰绿色板岩	Ptln	沃溪	64.48	18.72	1.86	6.22	0.45
Zhang-22	千枚状板岩	Ptln	沃溪	70.35	15.77	2.38	4.53	0.34
Luo9-7(N=9)	灰绿色板岩	Ptln	沃溪	69.54	15.95	2.39	4.35	0.28

注: 1. 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。

2. 资料来源: (1)张永固等, 湖南桃源沃溪金铋钨矿床地质特征(内部资料), 1981。

的主元素分析结果 (%)

turbidites from the Jiangnan orogenic belt

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)	资料来源
1.60	1.68	3.46	0.46	0.03		6.24	0.17	2.06	4.43	(1)
0.27	0.14	0.71	0.10	0.02	0.04	1.80	0.03	5.00	7.88	[54]
1.66	0.76	3.04	0.39	0.05	0.03	5.74	0.13	3.99	7.36	[7]
0.45	4.03	2.10	0.56	0.04	0.07	5.19	0.22	0.52	3.45	[7]
2.80	1.51	4.49	1.11	0.09	0.17	9.24	0.26	2.99	4.25	本研究
1.58	1.87	3.64	0.84	0.08	0.10	8.40	0.26	1.95	7.92	[7]
3.17	0.98	3.41	0.54	0.13	0.02	8.59	0.22	3.47	7.38	(1)
1.10	1.57	4.69	0.60	0.08	0.16	7.41	0.25	2.99	7.34	[7]
0.81	1.86	3.22	0.46	0.06	0.07	5.01	0.20	1.73	6.18	[7]
0.89	3.00	3.24	0.63	0.09	0.06	5.65	0.23	1.08	5.00	[7]
1.00	3.37	3.18	0.54	0.09	0.13	6.63	0.23	0.94	3.99	[7]
1.51	3.36	1.89	0.41	0.13	0.22	6.24	0.18	0.56	3.28	[55]
1.74	1.82	3.60	0.89	0.06	0.15	10.27	0.27	1.98	8.27	[54]
1.35	1.85	3.56	0.76	0.10	0.05	9.34	0.24	1.92	7.57	[54]
1.87	1.79	3.65	0.82	0.07	0.06	8.25	0.22	2.04	7.46	本研究
0.28	4.09	1.32	0.24	0.06	0.02	2.37	0.12	0.32	2.35	本研究
0.37	2.78	0.67	0.12	0.03	0.02	2.40	0.08	0.24	2.32	本研究
1.40	1.34	3.40	0.78	0.03	0.06	7.47	0.22	2.53	10.6	本研究
1.40	1.24	3.64	0.79	0.02	0.06	7.93	0.24	2.94	9.42	本研究
1.44	1.14	2.22	0.65	0.05	0.09	8.16	0.17	1.95	9.57	[7]
0.37	2.77	0.67	0.12	0.03	0.01	2.35	0.08	0.24	2.32	本研究
1.91	2.29	4.01	0.89	0.10	0.14	10.71	0.28	1.75	6.51	本研究
1.51	2.59	3.42	0.76	0.10	0.05	7.67	0.25	1.32	6.26	本研究
0.98	0.75	4.07	0.78	0.02	0.04	8.01	0.27	5.41	23.8	本研究
0.88	1.02	2.90	0.73	0.11	0.03	6.69	0.19	2.85	13.8	本研究
1.87	1.28	3.25	0.80	0.14	0.05	8.70	0.23	2.54	5.08	本研究
2.18	0.96	3.16	0.83	0.13	0.09	10.23	0.24	3.30	15.1	本研究
2.40	1.87	3.37	0.87	0.27	0.03	10.30	0.29	1.80	7.89	(1)
2.13	0.92	3.10	0.74	0.44	0.03	8.68	0.30	3.37	2.13	(1)
2.27	1.55	3.21	0.78	0.19	0.05	10.23	0.25	2.07	6.73	(1)
1.78	1.05	3.07	0.79	0.14	0.04	8.59	0.25	2.91	12.8	(1)
2.35	1.82	2.95	0.69	0.35		9.69	0.21	1.62	3.35	(1)
1.68	1.68	3.47	0.72	0.17		9.50	0.27	2.06	6.50	(1)
1.34	0.63	3.50	0.76	0.10		9.27	0.26	5.58	13.3	(1)
1.42	1.58	3.53	0.74	0.96		7.29	0.22	2.23	6.58	(1)
1.68	1.50	3.81	0.52	1.57		9.04	0.29	2.54	10.9	(1)
1.41	1.20	3.54	0.47	0.19		8.03	0.25	2.96	12.2	(1)
1.49	1.26	3.61	0.56	0.12		7.96	0.23	2.87	10.9	(1)
1.08	1.14	4.57	0.73	0.08		7.15	0.23	4.02	11.1	(1)
2.50	4.10	1.23	0.44	0.87		7.20	0.20	0.30	0.33	(1)
2.23	1.84	1.84	0.69	0.21		9.99	0.24	1.00	3.02	(1)
2.01	1.99	1.99	0.71	0.17		9.74	0.26	1.00	5.30	(1)
1.62	1.58	2.44	0.59	0.08		7.49	0.18	1.55	6.34	(1)
1.00	1.22	3.05	0.77	0.04		9.02	0.21	2.50	8.71	(1)
1.79	1.59	3.12	0.80	0.14	0.15	9.17	0.25	1.96	7.65	[7]
1.87	1.82	3.04	0.80	0.15	0.11	8.79	0.25	1.67	7.87	[7]
2.63	0.96	3.17	0.68	0.30	0.07	9.93	0.28	3.29	2.07	[7]
1.42	1.60	3.52	0.74	0.97	0.01	7.28	0.22	2.20	6.54	[56]
1.41	1.20	3.54	0.47	0.19	0.05	8.02	0.25	2.95	12.2	[56]
1.18	1.50	3.80	0.31	1.56	0.12	8.51	0.29	2.53	9.63	[56]
1.49	1.26	3.61	0.56	0.12	0.06	7.96	0.23	2.87	10.9	[56]
1.68	1.12	4.51	0.72	0.82	0.06	7.68	0.23	4.03	11.1	[56]
2.00	1.52	3.00	0.80	0.15	0.26	10.24	0.26	1.97	4.03	[54]
1.59	2.05	2.82	0.86	0.11	0.07	9.26	0.25	1.37	7.77	[54]
2.03	1.64	2.67	0.73	0.11	0.13	8.94	0.20	1.63	5.06	本研究
2.34	1.35	3.88	0.80	0.08	0.10	10.45	0.28	2.87	11.3	本研究
2.20	1.38	3.52	0.86	0.07	0.13	10.17	0.25	2.55	10.2	本研究
1.33	2.14	2.52	0.71	0.07	0.22	7.35	0.19	1.17	5.81	[7]
1.30	2.15	1.57	0.63	0.09	0.15	7.18	0.14	0.73	4.55	[7]
1.18	2.24	3.25	0.72	0.07	0.16	5.98	0.23	1.45	6.67	[7]
1.35	1.89	2.91	0.67	0.06	0.14	7.35	0.20	1.54	6.80	[7]
1.86	0.10	2.59	0.91	0.04	0.27	9.98	0.15	25.00	27.7	[7]
1.84	1.67	1.72	0.70	0.12	0.10	8.53	0.15	1.03	5.72	[7]
2.00	1.27	3.67	0.74	0.07	0.13	9.71	0.25	2.89	11.2	[7]
3.27	2.59	2.06	0.69	0.12	0.15	10.38	0.19	0.79	3.43	[7]
2.85	1.49	3.04	0.69	0.13	0.05	11.63	0.29	2.03	9.61	(1)
1.41	1.65	2.68	0.74	0.15	0.00	8.82	0.22	1.62	7.90	(1)
1.85	1.38	3.31	0.74	0.08	0.11	9.08	0.23	2.40	9.59	[54]

表2 江南造山带元古宙浊积岩

Table 2 Trace elements compositions ($\mu\text{g/g}$) of the

时代	板溪群 (Pt ₃ bn)														
	WP-1	WP-6	WP-21	WP-16	WP-17	WP-5	WP-12	WP-10	WP-3	XA-1	WP-7	WP-9	WP-26	WP-14	WP-15
岩性	粉砂岩	粗砂岩	粗砂岩	粉砂岩	粉砂岩	粗砂岩	细砂岩	细砂岩	粉砂岩	粉砂岩	板岩	板岩	板岩	板岩	板岩
采样点	沃溪	沃溪	沃溪	沃溪	沃溪	沃溪	沃溪	沃溪	沃溪	西安	沃溪	沃溪	沃溪	沃溪	沃溪
Li	41.5	38.4	108	50.2	50.5	2.7	6.0	33.2	31.6	149	26.2	36.1	51.7	33.9	38.4
Be		2.2		3.0	1.9		1.2	3.1		0.3	1.1	1.7	0.4	0.9	
Sc	10.2	10.6	9.9	15.6	16.5	3.3	1.7	10.8	15.6	15.3	10.9	9.9	14.8	18.1	13.1
V	79.4	70.0	63.0	117	119	17.2	11.3	66.1	93.9	90.9	56.5	56.4	86.8	131	94.1
Cr	76.6	109	130	120	135	71.9	65.2	116	91.6	151	66.5	69.9	124	164	115
Co	12.1	8.7	22.1	22.4	28.7	4.6	4.5	9.3	13.6	19.2	7.2	7.8	16.8	13.1	15.0
Ni	39.4	33.1	24.8	39.8	33.6	7.4	8.0	26.5	33.6	55.4	22.5	24.2	37.2	26.8	27.3
Cu	42.9	10.0	43.9	33.8	88.0	7.6	12.0	14.3	55.0	40.1	14.4	9.0	34.8	25.2	13.1
Zn	92.3	83.7	58.4	159	103	26.6	38.9	134	116	102	63.9	74.7	104	86.4	74.4
Ga	22.4	23.1	13.9	22.2	22.4	8.6	5.8	24.3	20.0	23.9	18.9	23.1	23.8	25.0	19.2
Ge	1.5	2.1	1.8	2.7	2.2	0.7	0.8	2.0	1.9	1.7	1.9	2.0	2.0	2.6	2.3
Rb	118	150	43.8	165	173	35.9	22.1	144	124	122	113	143	128	193	142
Sr	93.5	35.8	122	41.5	40.5	74.5	54.8	65.5	55.5	115	403	58.3	71.0	81.1	73.2
Y	37.1	41.8	15.0	36.1	31.6	10.3	5.5	39.5	30.2	30.0	174	36.2	32.9	26.8	25.2
Zr	220	249	125	192	192	89.1	63.6	242	182	199	207	213	206	189	203
Nb	20.4	16.4	7.4	12.1	11.8	5.7	3.2	16.5	10.4	13.1	12.4	15.4	13.0	11.4	10.3
Cd	0.7	0.4	0.3	0.6	0.4	0.3	0.3	0.4	0.3	0.5	0.4	0.3	0.4	0.4	0.5
Sn	9.5	5.8	2.2	6.3	5.1	3.6	2.8	3.6	4.3	2.7	3.6	5.6	4.7	5.8	8.1
Cs	4.3	4.4	3.4	11.4	10.1	1.2	0.6	5.1	5.3	7.3	3.5	4.1	5.6	14.0	10.6
Ba	943	1 645	112	360	372	775	266	1 531	564	975	1 115	1 473	448	566	475
La	44.3	55.7	46.4	47.8	42.6	39.0	16.3	64.6	33.2	45.8	59.2	50.1	44.0	39.5	33.1
Ce	89.2	107	84.9	83.7	83.6	71.3	29.5	125	67.5	92.4	133	97.5	89.7	80.2	68.8
Pr	10.4	12.8	10.2	10.8	10.3	7.8	3.4	14.8	8.3	10.9	17.7	11.7	10.5	9.3	8.2
Nd	37.5	44.2	35.0	38.3	37.1	26.5	11.3	50.1	29.6	37.0	77.2	40.4	37.8	33.0	29.4
Sm	7.3	8.7	6.0	7.4	7.5	4.0	2.0	9.7	6.3	6.8	23.3	7.6	7.5	6.1	5.6
Eu	1.4	1.6	1.3	1.4	1.4	1.0	0.5	1.9	1.2	1.6	5.0	1.4	1.5	1.1	1.0
Gd	6.0	6.8	3.9	6.1	5.8	2.8	1.3	7.7	5.2	6.2	30.9	6.2	5.9	4.4	4.3
Tb	0.9	1.1	0.5	1.0	0.9	0.3	0.2	1.1	0.9	0.9	4.5	0.9	0.9	0.7	0.6
Dy	6.1	7.3	3.0	6.0	5.8	1.9	1.0	7.0	5.3	5.6	26.4	5.9	5.9	4.6	4.4
Ho	1.0	1.1	0.4	0.9	0.9	0.3	0.2	1.0	0.8	0.9	3.7	0.9	0.9	0.7	0.7
Er	3.6	3.9	1.3	3.1	3.1	1.1	0.6	3.7	2.9	2.9	12.0	3.4	3.3	2.6	2.5
Tm	0.6	0.6	0.2	0.5	0.5	0.2	0.1	0.5	0.4	0.4	1.7	0.6	0.5	0.4	0.4
Yb	4.1	4.3	1.4	3.4	3.4	1.3	0.8	4.0	3.3	3.2	10.9	4.1	3.7	3.0	3.0
Lu	0.8	0.7	0.2	0.5	0.5	0.2	0.1	0.6	0.5	0.5	1.7	0.6	0.5	0.5	0.5
Hf	6.3	7.2	3.5	5.6	5.5	2.5	1.7	6.9	5.0	6.2	5.1	6.6	6.0	5.4	5.7
Ta	1.5	1.4	0.6	1.1	1.1	0.4	0.2	1.1	0.8	1.1	0.9	1.1	1.0	1.0	0.9
Tl	0.5	0.7	0.2	0.7	0.7	0.2	0.1	0.7	0.5	0.5	0.5	0.6	0.6	0.8	0.5
Pb	64.3	9.9	19.9	23.4	47.1	5.2	5.3	8.9	14.0	12.7	19.8	6.3	9.0	21.0	16.6
Tb	11.2	13.9	12.4	15.3	15.1	3.7	2.8	13.1	10.0	11.7	9.7	12.7	12.8	15.5	12.8
U	2.6	2.5	1.3	3.3	3.5	0.7	0.5	1.9	2.1	2.7	15.5	1.8	2.4	3.0	2.8

注: 所有资料来自本研究; 表内空格代表元素含量低于检出限。

的微量元素组成($\mu\text{g/g}$)

Proterozoic turbidites from the Jiangnan orogenic belt

							冷家溪群 (Pt ₂ ln)								
WP-19	WP-27	WP-20	WX20-1	WX20-2	WX20-9	WX28-1	WP-22	WP-25	HJ3-1	WP-23	HJ-2	HJ3-2	HJ3-4	HJ3-5	HJ3-6
板岩	板岩	板岩	板岩	板岩	板岩	板岩	粉砂岩	粉砂岩	粉砂岩	粉砂岩	板岩	板岩	板岩	板岩	板岩
沃溪	沃溪	沃溪	沃溪	沃溪	沃溪	沃溪	沃溪	沃溪	黄金洞	沃溪	黄金洞	黄金洞	黄金洞	黄金洞	黄金洞
33.9	43.0	108.1	9.9	6.5	10.2	8.8	49.7	47.3	17.8	65.4	16.5	16.1	21.3	79.8	82.2
0.5	1.5	1.4	1.2		3.1	2.6	1.1	2.2	2.9	2.6	3.6	6.3	3.1	2.5	3.3
15.8	16.7	16.0	16.8	16.6	16.8	17.0	16.9	16.2	17.4	19.1	17.6	19.7	19.5	19.9	20.9
103	109	112	107	105	105	108	131	117	114	142	106	125	123	123	134
177	133	179	112	120	143	153	158	175	141	148	111	197	172	182	118
19.5	21.3	23.6	18.7	16.2	19.3	21.4	20.3	18.7	19.6	21.0	20.7	18.5	18.1	20.3	17.7
31.7	48.5	44.7	38.5	29.3	35.7	39.0	42.6	36.6	35.8	42.6	51.0	41.8	43.2	43.6	44.2
19.6	33.2	39.7	117	62.9	27.9	23.8	60.2	27.0	56.2	59.3	47.2	33.1	37.0	38.3	34.7
84.6	117	154	103	88.7	99.7	104	119	85.6	107	141	120	118	118	97.9	115
20.8	25.0	21.9	22.0	21.2	21.9	22.2	23.3	18.2	24.0	24.7	23.1	25.8	23.5	23.8	28.2
2.2	1.9	2.4	2.2	2.0	1.8	2.1	2.5	1.7	2.0	2.5	1.4	1.8	2.1	2.3	2.2
158	153	148	172	181	175	209	173	124	171	192	196	203	195	179	209
80.0	63.5	50.5	105	114	108	129	40.4	55.2	75.9	40.9	176	72.4	68.9	74.5	75.1
27.3	47.6	29.1	27.0	27.6	31.8	37.9	36.1	31.1	26.8	33.1	25.9	28.1	32.5	28.3	30.7
211	250	212	182	177	181	201	206	179	197	194	148	173	172	180	182
11.2	16.7	12.1	11.2	10.3	10.7	11.9	14.7	11.2	12.1	13.8	9.2	11.2	11.2	11.8	11.9
0.4	0.3	0.4	0.4	0.4	0.4	0.3	0.4	0.3	0.7	0.5	0.3	0.5	0.6	0.3	0.2
4.5	4.3	5.1	4.5	4.0	6.3	3.7	5.1	4.4	17.1	5.9	5.0	10.9	6.4	6.3	6.3
15.4	7.4	12.8	24.2	26.6	26.7	32.6	12.3	9.6	21.8	14.9	19.8	26.9	28.4	16.1	18.3
417	519	324	535	515	521	527	365	295	413	396	421	422	409	425	456
39.6	61.3	38.6	36.8	33.7	39.3	44.3	44.7	38.6	38.7	45.4	31.3	38.8	42.0	38.9	39.2
80.1	123	79.4	76.5	71.0	82.3	92.2	90.1	79.9	81.6	91.7	70.4	79.2	87.2	80.5	82.5
9.2	14.8	9.3	9.1	8.2	9.6	10.8	10.5	9.5	9.6	10.6	7.4	9.3	10.3	9.3	9.8
32.8	53.4	32.9	32.1	29.2	34.3	37.0	37.7	33.0	33.9	37.3	26.7	32.4	35.9	32.5	33.7
6.2	10.4	6.6	6.4	5.6	6.6	7.6	7.6	6.7	6.7	6.9	5.4	6.2	7.0	6.6	6.6
1.2	1.8	1.3	1.3	1.2	1.3	1.6	1.4	1.2	1.5	1.4	1.3	1.5	1.6	1.4	1.6
4.7	8.9	5.4	5.2	4.7	5.5	6.6	6.4	5.8	5.8	5.8	5.1	5.7	6.9	5.8	6.1
0.7	1.3	0.8	0.7	0.7	0.9	1.0	1.0	0.9	0.8	0.9	0.8	0.8	1.0	0.8	0.9
4.6	8.5	5.0	5.1	4.7	5.4	6.7	6.5	5.5	5.0	5.8	4.8	5.4	6.1	5.2	5.7
0.7	1.3	0.8	0.8	0.7	0.9	1.0	0.9	0.8	0.7	0.9	0.7	0.8	0.9	0.8	0.9
2.8	4.6	2.9	2.8	2.8	3.1	3.8	3.6	3.0	2.7	3.3	2.7	2.8	3.2	2.8	3.3
0.4	0.7	0.5	0.5	0.5	0.5	0.6	0.5	0.5	0.4	0.5	0.4	0.4	0.5	0.5	0.5
3.1	5.1	3.2	3.3	3.3	3.4	4.0	3.9	3.3	3.2	3.8	2.8	3.1	3.5	3.1	3.4
0.5	0.7	0.5	0.5	0.5	0.5	0.6	0.6	0.5	0.5	0.6	0.4	0.5	0.5	0.5	0.5
6.1	7.2	6.1	5.2	5.1	5.1	5.7	6.1	5.3	6.5	5.8	5.0	5.7	5.6	6.1	6.1
1.0	1.3	1.0	0.9	0.9	0.8	1.0	1.3	1.0	1.2	1.2	0.9	1.2	1.1	1.2	1.2
0.7	0.7	0.6	0.7	0.7	0.7	0.8	0.8	0.6	0.8	0.9	0.9	1.0	1.0	0.9	1.0
14.3	20.8	7.0	20.1	15.1	18.3	13.7	24.3	29.2	75.8	23.4	5.9	59.5	36.3	20.6	9.6
14.6	16.3	16.0	12.5	12.2	11.8	13.0	19.6	14.9	15.3	19.2	12.5	15.6	15.6	16.0	15.8
2.9	3.6	3.1	3.0	2.7	2.7	2.9	4.5	3.5	4.1	4.1	3.1	3.4	4.0	4.1	4.0

$\text{SiO}_2 = 0.03 \sim 0.30$, 一般为 $0.10 \sim 0.30$) 和 $\text{K}_2\text{O}/\text{Na}_2\text{O}$ 比值 (一般 $1.00 \sim 5.00$, 平均 2.50) 以及较高的 ($\text{Fe}_2\text{O}_3^* + \text{MgO}$) 含量 (一般 $5.00\% \sim 10.00\%$, 平均 8.00% ; Fe_2O_3^* 指以 Fe_2O_3 形式表示的全铁含量) 为特征。除个别外, 多数样品的 CaO 含量低 (一般小于 1.00%) 而 $\text{Al}_2\text{O}_3/(\text{Na}_2\text{O} + \text{CaO})$ 比值高 (一般大于 4.00)。

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 $\text{Al}_2\text{O}_3/\text{SiO}_2$ 分别为 0.24 和 0.18), 而 K_2O (平均分别为 3.20% 和 2.70%)、 Al_2O_3 (分别为 16.0% 和 13.0%) 和 ($\text{Fe}_2\text{O}_3^* + \text{MgO}$) (分别为 8.50% 和 7.00%) 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。

2.3 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)^[57] 和后太古宙平均页岩 (PAAS)^[38] 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 均呈明显的正相关关系 (相关系数 r 分别为 0.76 和 0.50), 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^[47, 58]。

稀土元素的含量、特征比值和球粒陨石标准化后的分布模式示于表 3 和图 2。尽管稀土组分的绝对含量变化较大, 但球粒陨石标准化曲线与典型的后太古宙页岩 (如 PAAS 或 NASC) 和上陆壳^[38] 相似, 以轻稀土富集 [$(\text{La}/\text{Yb})_N$ 、 $(\text{La}/\text{Sm})_N$ 和 LREE/HREE 比值高]、显著的铕负异常 (Eu/Eu^* 一般为 $0.60 \sim 0.70$) 和重稀土平坦 [$(\text{Gd}/\text{Yb})_N = 1.14 \sim 2.29$, 平均 1.42] 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 [$(\text{La}/\text{Yb})_N$ 、 $(\text{La}/\text{Sm})_N$ 和 LREE/HREE 较高] 和铕负异常更为明显 (Eu/Eu^* 分别为 0.65 和 0.72) 外, 元古宙各群、组地层之间以及共生的砂岩与板岩之间, 稀土元素的分布模式和特征参数无明显的差异。

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

壳和后太古宙页岩^[38]。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。

3 讨论

3.1 沉积盆地构造背景

陆源沉积物的化学组成受诸如物源类型、风化条件、搬运方式以及成岩后生作用等多种因素的制约, 而这些因素又主要受沉积盆地的构造环境所控制^[40, 62, 63]。因此, 长期以来, 许多地质学家一直致力于探索沉积物化学组成与板块构造之间的联系, 用于识别古代沉积盆地的构造环境^[35, 40~48, 64~72]。大量的研究表明, 尽管沉积物地球化学组成与沉积构造环境之间的关系较为复杂^[35, 67, 68, 73~75], 但沉积岩的某些主元素和特征微量元素在判别古代, 尤其是中生代以前的沉积盆地板块构造性质中发挥了重要作用。这是因为, 地史时期的物源区多被剥蚀破坏, 有关这些物源区性质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^[43]。

Roser *et al.*^[45] 将沉积盆地划分为三个大的构造类别, 即被动大陆边缘 (passive continental margin, PM)、活动大陆边缘 (active continental margin, ACM) 和大洋岛弧 (oceanic island arc, ARC), 并发现来自这三类不同构造环境的砂岩和泥岩在 $\text{K}_2\text{O}/\text{Na}_2\text{O}-\text{SiO}_2$ 图上落入明显不同的区域。Maynard *et al.*^[65] 提出了类似的判别现代沉积物构造环境的 $\text{K}_2\text{O}/\text{Na}_2\text{O}-\text{SiO}_2/\text{Al}_2\text{O}_3$ 关系图。在上述两个图解中, 本区元古宙沉积岩样品位于活动大陆边缘 (ACM) 与被动大陆边缘 (PM) 分界线附近, 但多数落入 ACM 区域 (图 3a, 图 3b)。根据 Roser *et al.* 的定义, 活动大陆边缘包括了一系列复杂的位于活动板块边界之上或邻近活动板块边界的构造上活动的大陆边缘, 石英含量中等的沉积物来自于大陆边缘岩浆弧 (沉积于包括海沟、弧前、弧间和弧后在内的一系列盆地环境) 或与走滑断层有关的隆升区 (沉积于拉张盆地)^[45], 这类环境相当于 Reading^[76] 所定义的和俯冲作用有关的盆地、大陆碰撞盆地和与平移断裂有关的拉张盆地。被动大陆边缘包括了稳定大陆边缘的板内盆地和克拉通内部盆地, 相当于 Reading 定义的陆壳上的盆地和与洋底扩张、夭折裂谷及大西洋型大陆边缘有关的盆地, 与这一构造环境有关的富含石英的沉积物来自稳定的大陆地区并沉积于远离活动板

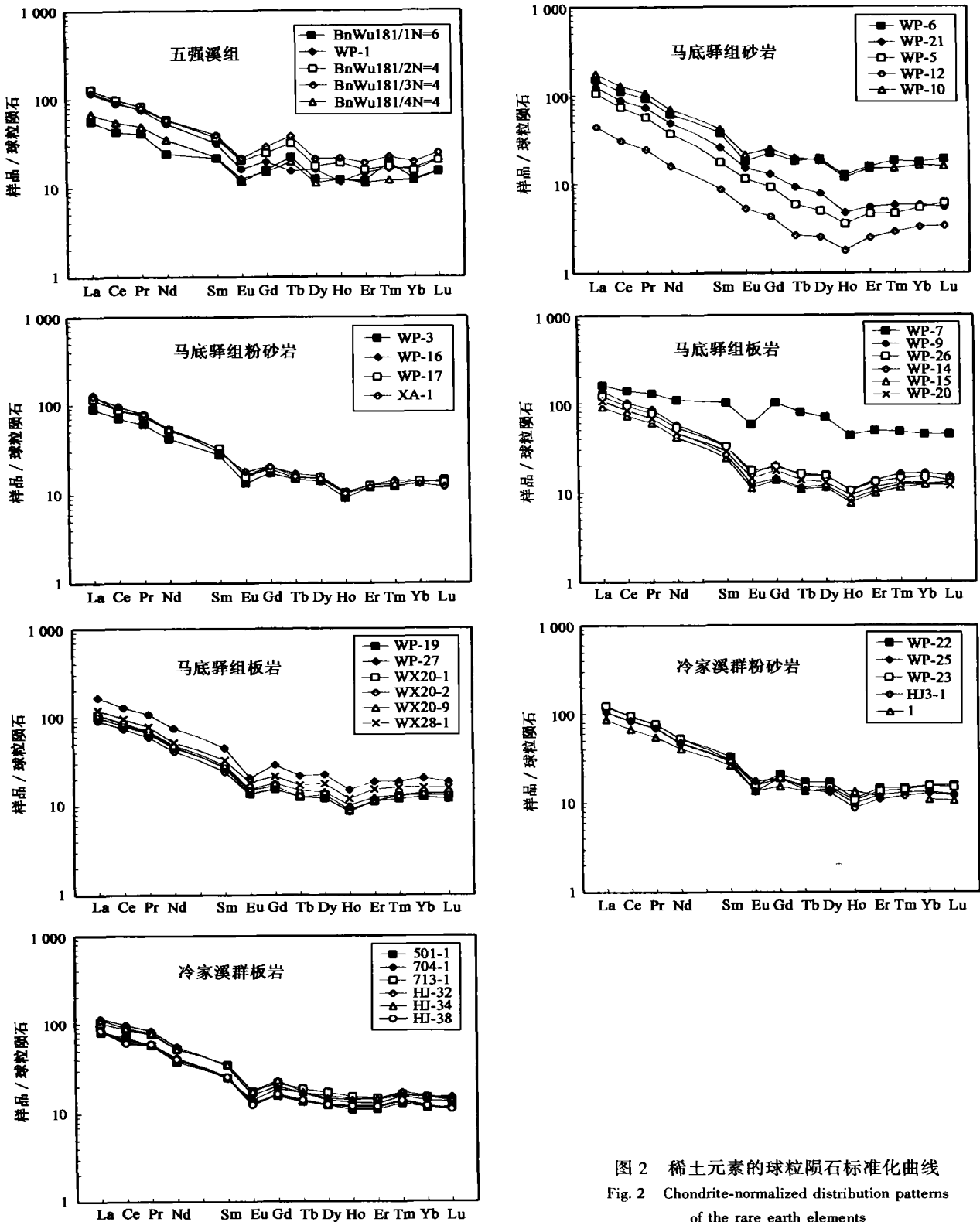


图 2 稀土元素的球粒陨石标准化曲线
Fig. 2 Chondrite-normalized distribution patterns of the rare earth elements

块边缘的地方^[76]。

Bhatia^[40] 和 Bhatia *et al.*^[43] 根据地壳性质将大陆边缘和大洋盆地划分为 4 种构造类型，即大洋岛弧 (oceanic arc)、大陆岛弧 (continental arc)、活动大

陆边缘 (active continental margin) 和被动大陆边缘 (passive margin)。他们通过对澳大利亚东部不同构造背景的盆地内形成的古生代杂砂岩化学组成的系统对比研究，提出了判别沉积盆地板块构造环境的

表 3 江南造山带元古宙浊积岩的
Table 3 REE contents ($\mu\text{g/g}$) and characteristic parameters of the

样号	样品名称	时代	采样地	La	Ce	Pr	Nd	Sm	Eu	Gd	Tb	Dy	Ho
五强溪组 (Pt ₃ bnw)													
BnWu181/1N=6	砂岩	Pt ₃ bnw	漠滨	20.8	40.8	5.57	17.2	4.97	1.02	4.79	1.27	4.74	1.04
WP-1	粉砂岩	Pt ₃ bnw	沃溪	44.4	89.2	10.4	37.5	7.30	1.41	5.96	0.89	6.06	0.98
BnWu181/2N=4	板岩	Pt ₃ bnw	漠滨	47.4	94.1	11.4	41.6	8.49	1.77	7.46	1.83	6.58	1.60
BnWu181/3N=4	凝灰质板岩	Pt ₃ bnw	漠滨	42.9	85.6	10.8	41.5	9.12	1.87	8.82	2.20	7.99	1.82
BnWu181/4N=4	沉凝灰岩	Pt ₃ bnw	漠滨	25.0	52.8	6.75	24.7	5.07	1.10	4.58	1.13	4.26	1.05
马底驿组 (Pt ₃ bnm)													
WP-6	含砾砂岩	Pt ₃ bnm ³	沃溪	55.7	107	12.8	44.3	8.72	1.57	6.82	1.05	7.32	1.06
WP-21	含砾砂岩	Pt ₃ bnm ¹	沃溪	46.4	84.9	10.2	35.0	5.96	1.32	3.93	0.53	2.96	0.40
WP-5	粗砂岩	Pt ₃ bnm ³	沃溪	39.0	71.3	7.82	26.5	4.03	0.99	2.82	0.34	1.87	0.30
WP-12	细砂岩	Pt ₃ bnm ³	沃溪	16.3	29.5	3.37	11.3	2.00	0.45	1.30	0.15	0.95	0.15
WP-10	细砂岩	Pt ₃ bnm ³	沃溪	64.6	125	14.8	50.1	9.65	1.86	7.65	1.13	7.00	1.01
WP-3	粉砂岩	Pt ₃ bnm ³	沃溪	33.2	67.6	8.29	29.6	6.33	1.17	5.22	0.85	5.29	0.77
WP-16	粉砂岩	Pt ₃ bnm ¹	沃溪	47.8	83.7	10.8	38.3	7.37	1.41	6.12	0.98	6.03	0.89
WP-17	粉砂岩	Pt ₃ bnm ¹	沃溪	42.6	83.6	10.3	37.1	7.47	1.37	5.83	0.87	5.84	0.89
XA-1	粉砂岩	Pt ₃ bnm	沃溪	45.8	92.4	10.9	37.0	6.84	1.57	6.23	0.92	5.62	0.87
WP-7	板岩	Pt ₃ bnm ³	沃溪	59.2	133	17.7	77.2	23.4	4.99	30.9	4.54	26.4	3.67
WP-9	板岩	Pt ₃ bnm ³	沃溪	50.1	97.5	11.7	40.4	7.64	1.42	6.18	0.90	5.91	0.91
WP-26	板岩	Pt ₃ bnm ²	沃溪	44.0	89.7	10.5	37.8	7.46	1.54	5.86	0.95	5.92	0.90
WP-14	板岩	Pt ₃ bnm ²	沃溪	39.5	80.2	9.26	33.0	6.11	1.08	4.43	0.66	4.61	0.72
WP-15	板岩	Pt ₃ bnm ²	沃溪	33.1	68.8	8.22	29.4	5.55	0.99	4.26	0.64	4.39	0.66
WP-20	板岩	Pt ₃ bnm ¹	沃溪	38.6	79.4	9.26	33.0	6.63	1.26	5.40	0.81	4.97	0.80
WP-19	板岩	Pt ₃ bnm ²	沃溪	39.6	80.1	9.21	32.8	6.24	1.20	4.74	0.73	4.61	0.74
WP-27	板岩	Pt ₃ bnm ²	沃溪	61.3	123	14.8	53.4	10.4	1.81	8.87	1.27	8.53	1.29
WX20-1	板岩	Pt ₃ bnm	沃溪	36.8	76.5	9.06	32.1	6.35	1.30	5.16	0.72	5.09	0.77
WX20-2	板岩	Pt ₃ bnm	沃溪	33.7	71.0	8.21	29.2	5.60	1.18	4.70	0.75	4.69	0.73
WX20-9	板岩	Pt ₃ bnm	沃溪	39.3	82.3	9.61	34.4	6.63	1.34	5.52	0.87	5.43	0.86
WX28-1	板岩	Pt ₃ bnm	沃溪	44.3	92.2	10.8	37.0	7.59	1.60	6.58	1.00	6.74	1.02
冷家溪群 (Pt ₂ ln)													
WP-22	粉砂岩	Pt ₂ ln	沃溪	44.7	90.1	10.5	37.8	7.59	1.37	6.38	0.99	6.51	0.94
WP-25	粉砂岩	Pt ₂ ln	沃溪	38.6	79.9	9.48	33.0	6.66	1.17	5.85	0.89	5.55	0.84
WP-23	粉砂岩	Pt ₂ ln	沃溪	45.4	91.7	10.6	37.3	6.91	1.36	5.77	0.87	5.76	0.91
HJ3-1	粉砂岩	Pt ₂ ln	黄金洞	38.7	81.6	9.56	33.9	6.75	1.52	5.78	0.82	5.00	0.74
1	砂岩	Pt ₂ ln	黄金洞	32.0	64.7	7.55	28.9	6.03	1.18	4.69	0.79	5.40	1.14
HJ3-2	板岩	Pt ₂ ln	黄金洞	38.8	79.2	9.34	32.4	6.18	1.50	5.74	0.85	5.39	0.81
HJ3-4	板岩	Pt ₂ ln	黄金洞	42.0	87.3	10.3	35.9	7.01	1.61	6.85	1.02	6.06	0.92
HJ3-5	板岩	Pt ₂ ln	黄金洞	38.9	80.5	9.33	32.5	6.62	1.40	5.80	0.84	5.21	0.80
HJ3-6	板岩	Pt ₂ ln	黄金洞	39.2	82.5	9.79	33.7	6.55	1.57	6.09	0.92	5.66	0.87
HJ-2	板岩	Pt ₂ ln	黄金洞	31.3	70.4	7.44	26.7	5.39	1.34	5.13	0.80	4.84	0.74
2	板岩	Pt ₂ ln	黄金洞	33.5	62.2	7.96	30.9	6.61	1.36	5.28	0.96	5.85	1.13
3	板岩	Pt ₂ ln	黄金洞	38.5	76.3	9.34	36.9	8.72	1.60	7.36	1.33	7.63	1.56
501-1	板岩	Pt ₂ ln	黄金洞	29.7	67.4	7.95	27.0	5.84	1.16	4.78	0.78	4.68	0.94
704-1	板岩	Pt ₂ ln	黄金洞	42.1	93.8	11.5	39.5	7.77	1.40	6.15	0.98	5.99	1.24
713-1	板岩	Pt ₂ ln	黄金洞	37.5	83.3	10.5	37.4	8.10	1.52	6.73	1.09	6.51	1.30
HJ-32	板岩	Pt ₂ ln	黄金洞	30.8	63.4	8.19	29.9	5.68	1.23	5.77	0.98	5.31	1.13
HJ-34	板岩	Pt ₂ ln	黄金洞	41.1	86.0	10.8	37.1	8.16	1.55	7.15	1.00	5.59	1.20
HJ-38	板岩	Pt ₂ ln	黄金洞	31.0	58.4	8.09	28.8	5.95	1.09	4.98	0.81	4.74	1.02

注: ΣREE 为元素 La ~ Lu 含量总和, $\text{Eu}/\text{Eu}^* = \text{Eu}_N / (\text{Sm}_N \times \text{Gd}_N)^{1/2}$, $\text{Ce}/\text{Ce}^* = \text{Ce}_N / (\text{La}_N \times \text{Pr}_N)^{1/2}$, $\text{LREE}/\text{HREE} = \Sigma(\text{La} \sim \text{Sm}) / \Sigma(\text{Gd} \sim \text{Lu})^{[61]}$,

稀土元素含量($\mu\text{g/g}$)及特征值

Proterozoic turbidites from the Jiangnan orogenic belt

Er	Tm	Yb	Lu	ΣREE	Eu/Eu*	Ce/Ce*	La/Yb	$(\text{La}/\text{Yb})_N$	$(\text{La}/\text{Sm})_N$	$(\text{Gd}/\text{Yb})_N$	LREE/HREE	资料来源
2.94	0.68	3.06	0.58	109	0.64	0.89	6.78	4.58	2.63	1.27	4.67	[7]
3.59	0.58	4.08	0.79	213	0.65	0.97	10.9	7.35	3.82	1.19	8.23	本研究
3.91	0.61	3.82	0.77	231	0.68	0.95	12.4	8.38	3.51	1.58	7.63	[7]
4.70	0.79	4.79	0.93	224	0.64	0.93	8.96	6.06	2.96	1.49	5.93	[7]
2.78	0.43	2.95	0.57	133	0.70	0.95	8.49	5.74	3.11	1.26	6.44	[7]
3.86	0.64	4.35	0.72	256	0.62	0.94	12.8	8.67	4.02	1.27	8.85	本研究
1.34	0.20	1.41	0.20	195	0.83	0.92	32.9	22.3	4.90	2.26	16.6	本研究
1.12	0.16	1.31	0.23	158	0.90	0.96	29.8	20.2	6.08	1.75	18.2	本研究
0.61	0.10	0.80	0.13	67.2	0.86	0.93	20.4	13.8	5.15	1.31	14.9	本研究
3.66	0.53	3.96	0.60	291	0.66	0.94	16.3	11.0	4.21	1.57	10.3	本研究
2.94	0.43	3.29	0.54	166	0.62	0.95	10.1	6.83	3.30	1.29	7.50	本研究
3.11	0.51	3.45	0.52	211	0.64	0.86	13.9	9.38	4.09	1.44	8.70	本研究
3.12	0.46	3.44	0.51	203	0.64	0.93	12.4	8.38	3.59	1.37	8.64	本研究
2.95	0.45	3.19	0.46	215	0.73	0.97	14.4	9.71	4.21	1.58	9.33	本研究
12.0	1.68	10.9	1.68	407	0.57	0.96	5.42	3.66	1.60	2.29	3.38	本研究
3.41	0.57	4.07	0.58	231	0.63	0.94	12.3	8.31	4.13	1.23	9.21	本研究
3.26	0.51	3.71	0.52	213	0.71	0.98	11.9	8.02	3.71	1.28	8.77	本研究
2.61	0.44	3.04	0.50	186	0.64	0.98	13.0	8.78	4.07	1.18	9.88	本研究
2.47	0.40	3.03	0.45	162	0.62	0.98	10.9	7.38	3.75	1.14	8.90	本研究
2.87	0.46	3.17	0.46	187	0.64	0.98	12.2	8.24	3.67	1.38	8.82	本研究
2.78	0.43	3.10	0.46	187	0.67	0.98	12.8	8.63	3.99	1.24	9.55	本研究
4.63	0.67	5.06	0.70	296	0.57	0.96	12.1	8.18	3.70	1.42	8.49	本研究
2.82	0.46	3.28	0.50	181	0.69	0.98	11.2	7.57	3.64	1.28	8.55	本研究
2.82	0.46	3.35	0.53	167	0.70	1.00	10.1	6.80	3.79	1.14	8.20	本研究
3.09	0.47	3.43	0.52	194	0.68	0.99	11.5	7.74	3.73	1.30	8.53	本研究
3.80	0.57	3.98	0.60	218	0.69	0.99	11.2	7.53	3.67	1.34	7.90	本研究
3.61	0.52	3.85	0.60	215	0.60	0.97	11.6	7.84	3.70	1.34	8.14	本研究
3.03	0.46	3.29	0.47	189	0.57	0.98	11.7	7.92	3.65	1.44	8.23	本研究
3.35	0.50	3.82	0.57	215	0.66	0.98	11.9	8.04	4.14	1.22	8.92	本研究
2.72	0.42	3.16	0.46	191	0.74	0.99	12.2	8.27	3.60	1.48	8.92	本研究
2.90		2.69	0.40	158	0.68	0.98	11.9	8.03	3.34	1.41	7.72	[7]
2.76	0.42	3.13	0.50	187	0.77	0.97	12.4	8.38	3.95	1.49	8.47	本研究
3.22	0.49	3.45	0.51	207	0.71	0.98	12.2	8.24	3.77	1.61	8.11	本研究
2.81	0.46	3.15	0.48	189	0.69	0.99	12.4	8.36	3.70	1.49	8.60	本研究
3.26	0.51	3.42	0.52	195	0.76	0.99	11.5	7.75	3.77	1.44	8.08	本研究
2.65	0.40	2.80	0.41	160	0.78	1.08	11.2	7.57	3.66	1.49	7.95	本研究
3.03		2.98	0.45	162	0.70	0.89	11.2	7.59	3.19	1.44	7.17	[7]
4.04		3.71	0.54	198	0.61	0.94	10.4	7.02	2.78	1.61	6.49	[7]
2.77	0.46	2.87	0.45	157	0.67	1.03	10.3	6.98	3.20	1.35	7.77	[59]
3.57	0.56	3.78	0.58	219	0.62	1.00	11.1	7.52	3.41	1.32	8.52	[59]
3.67	0.58	3.72	0.53	202	0.63	0.99	10.1	6.82	2.92	1.47	7.33	[59]
3.20	0.55	3.44	0.51	160	0.66	0.94	8.96	6.05	3.42	1.36	6.61	[60]
3.61	0.61	3.85	0.55	208	0.62	0.96	10.7	7.21	3.17	1.51	7.78	[60]
2.95	0.49	2.99	0.42	152	0.61	0.86	10.4	7.00	3.28	1.35	7.18	[60]

球粒隕石标准化参数数据 Taylor *et al.* [38]。

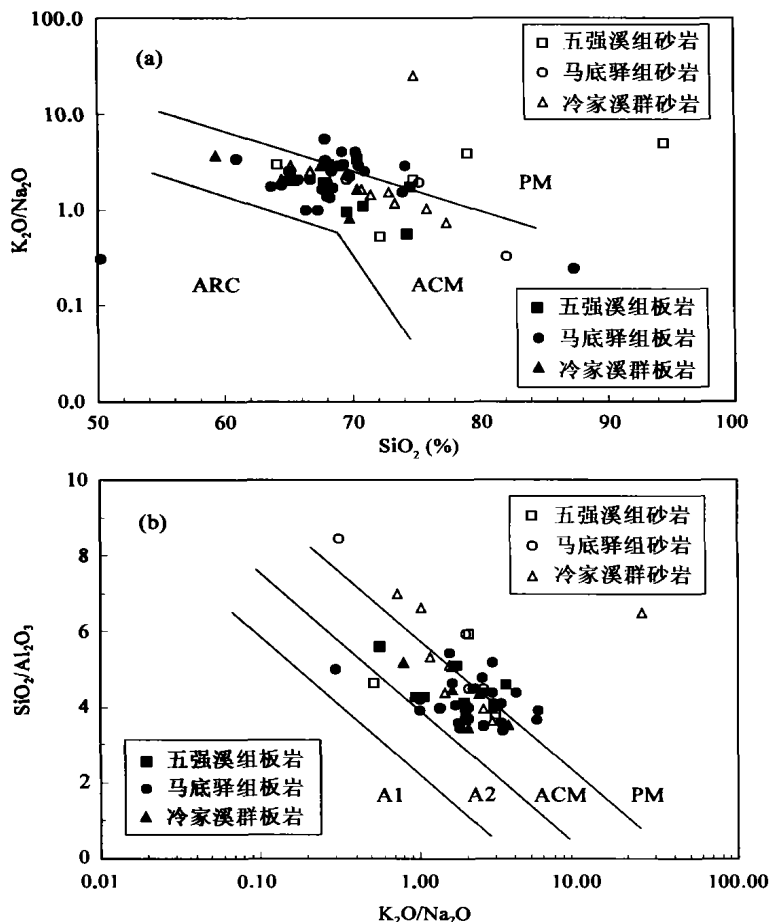


图 3 元古宙浊积岩的 K_2O/Na_2O-SiO_2 (a) 和 $SiO_2/Al_2O_3-K_2O/Na_2O$ (b) 构造环境判别图

Fig. 3 Tectonic setting discrimination diagrams of K_2O/Na_2O-SiO_2 (a) and $SiO_2/Al_2O_3-K_2O/Na_2O$ (b) for the Proterozoic turbidites

不同构造环境的界线据 Roser *et al.* [45]: ARC. 大洋岛弧; ACM. 活动大陆边缘; PM. 被动大陆边缘; A1. 玄武质和安山质碎屑的岛弧环境; A2. 长英质侵入岩碎屑的进化岛弧环境。

若干主元素地球化学参数。最具判别意义的参数包括 $(Fe_2O_3^* + Mg)$ (%)、 TiO_2 (%) 和 Al_2O_3/SiO_2 、 K_2O/Na_2O 和 $Al_2O_3/(CaO + Na_2O)$ 比值。其中, $(Fe_2O_3^* + Mg)$ 代表岩石中相对基性的组分, Al_2O_3/SiO_2 大致表示石英的富集程度(或长石与石英的比例), K_2O/Na_2O 代表了岩石中钾长石和云母与斜长石的比例, 而 $Al_2O_3/(CaO + Na_2O)$ 则大致代表了沉积岩中最不活动组分与最活动组分之间的比率。如表 4 所示, 研究区元古宙浊积岩的 TiO_2 和 $(Fe_2O_3^* + Mg)$ 大致与大陆岛弧杂砂岩相当, Al_2O_3/SiO_2 在大陆岛弧与活动大陆边缘杂砂岩之间, 而 K_2O/Na_2O 和 $Al_2O_3/(CaO + Na_2O)$ 比值则异常高。值得指出的

是, 在沉积物的沉积过程以及随后的成岩乃至变质作用过程中, 主元素中的 Na_2O 和 CaO 等活性组分通常最易发生改变, 如在大多数沉积盆地中, 与源岩相比, 砂岩中 Na_2O 和 CaO 常显著亏损而 SiO_2 则相对富集 [40]。因此, 我们认为, 对于古代沉积岩, 尤其是对遭受一定程度变质的古老沉积岩来说, 主元素中的 K_2O/Na_2O 和 $Al_2O_3/(CaO + Na_2O)$ 比值将增高, 从而在一定程度上失去了构造环境的判别意义。基于这一认识, 我们进而认为本区浅变质的元古宙浊积岩在初始沉积时, K_2O/Na_2O 和 $Al_2O_3/(CaO + Na_2O)$ 比值可能低于现今的测定值, 因而图 3 中的数据点主要落入或更靠近于活动大陆边缘构造环境区。

利用 Bhatia [40] 给出的主元素构造环境判别分析系数, 对研究区沉积岩的 11 个主元素氧化物变量所作的判别分析表明 (图 4), 大多数样品 (70%) 位于活动大陆边缘构造环境, 少量位于被动大陆边缘 (28%) 和大陆岛弧 (2%) 区。图中横坐标“判别函数 I”的主要载荷因子为 CaO 和 Na_2O , 纵坐标“判别函数 II”的主要载荷因子为 SiO_2 和 CaO 。鉴于如上所述的原因, 考虑到如果沉积岩在形成之初的 CaO 和 Na_2O 含量高于现今的测定值, 则数据点将会向右侧偏移, 即更多的点将落入活动大陆边缘和大陆岛弧区。

Kumon *et al.* [70] 通过对日本岛代表不同源区和构造环境的浊积岩盆地中典型砂岩

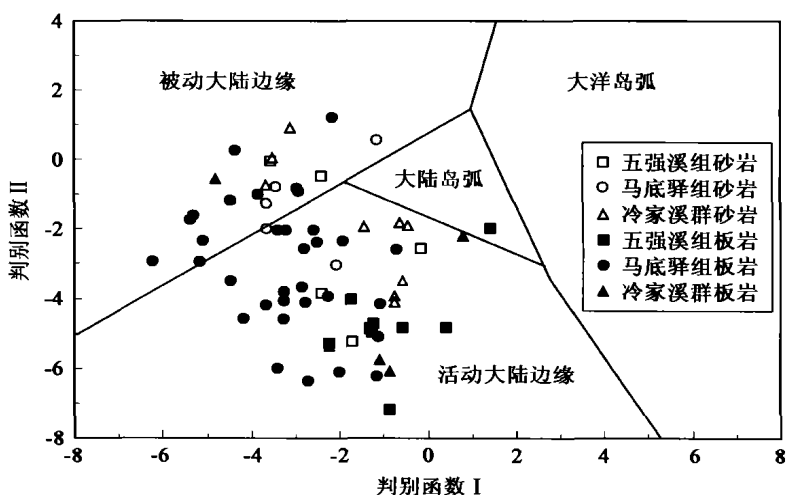


图 4 元古宙沉积岩的主元素构造环境判别分析图

Fig. 4 Diagram of discriminant scores for the Proterozoic sedimentary rocks 构造环境判别分析系数和不同构造环境的分布区域据 Bhatia [40]。

表 4 研究区元古宙浊积岩与不同构造环境下杂砂岩的化学组成对比

Table 4 Comparison of chemical compositions of the study turbidites with the graywackes from various tectonic settings

	研究区元古宙浊积岩								显生宙不同构造环境下杂砂岩				PAAS	上陆壳
	冷家溪群		板溪群				元古宙平均		大洋岛弧	大陆岛弧	活动大陆边缘	被动大陆边缘		
	砂岩	板岩	马底驿组		五强溪组		砂岩	板岩						
			砂岩	板岩	砂岩	板岩								
SiO ₂	72.03	68.34	75.70	67.88	76.89	69.88	74.35	68.30	58.83	70.69	73.86	81.95	62.80	66.00
Al ₂ O ₃	14.14	16.22	12.85	16.17	11.65	16.06	13.13	16.16	17.11	14.04	12.89	8.41	18.9	15.20
Fe ₂ O ₃	3.71	1.99	4.32	4.44	2.40	2.06	3.56	3.74	1.95	1.43	1.30	1.32		
FeO	4.07	5.09	3.51	2.74	2.12	3.58	3.41	3.14	5.52	3.05	1.58	1.76	6.50	4.50
CaO	0.35	0.54	0.22	1.84	1.00	0.55	0.47	1.46	5.83	2.68	2.48	1.89	1.30	4.20
MgO	1.71	2.28	1.13	1.68	1.36	1.46	1.45	1.70	3.65	1.97	1.23	1.39	2.20	2.20
Na ₂ O	1.62	1.68	2.06	1.57	1.62	2.19	1.75	1.69	4.10	3.12	2.77	1.07	1.20	3.90
K ₂ O	2.74	2.95	2.48	3.17	2.76	3.38	2.67	3.19	1.60	1.89	2.90	1.71	3.70	3.40
TiO ₂	0.75	0.72	0.57	0.68	0.52	0.63	0.64	0.68	1.06	0.64	0.46	0.49	1.00	0.50
MnO	0.08	0.11	0.04	0.33	0.05	0.09	0.06	0.23	0.15	0.10	0.10	0.05	0.11	
P ₂ O ₅	0.16	0.09	0.05	0.07	0.08	0.11	0.11	0.08	0.26	0.16	0.09	0.12	0.16	
Fe ₂ O ₃ * + MgO	8.44	9.92	6.09	8.54	5.64	7.50	7.04	8.49	11.73	6.79	4.63	2.89	9.35	7.15
Al ₂ O ₃ /SiO ₂	0.20	0.24	0.18	0.24	0.16	0.23	0.18	0.24	0.29	0.2	0.18	0.10	0.30	0.23
K ₂ O/Na ₂ O	4.22	1.95	1.67	2.43	2.91	1.85	3.13	2.27	0.39	0.61	0.99	1.60	3.08	0.87
Al ₂ O ₃ / (Na ₂ O + CaO)	9.32	8.35	6.96	8.25	5.47	6.33	7.65	7.90	1.72	2.42	2.56	4.15	7.56	1.88
n	9	5	6	34	5	9	20	48	7	9	7	7		
La	39.9	36.5	43.5	43.3	32.6	38.4	41.0	39.6	8.20	27.0	37.0	39.0	38.0	30.0
Ce	81.6	76.2	82.7	89.5	65.0	77.5	80.2	82.0	19.4	59.0	78.0	85.0	80.0	64.0
Nd	34.2	33.0	34.3	39.1	27.3	35.9	33.4	35.9	11.2	28.3	35.8	42.0	32.0	26.0
ΣREE	194	184	196	219	161	196	191	200	58.0	146	186	210	183	146
Eu/Eu*	0.65	0.68	0.72	0.65	0.65	0.67	0.69	0.67	1.04	0.80	0.60	0.55	0.66	0.65
La/Yb	11.9	11.0	18.1	11.2	8.83	9.95	15.0	11.0	4.20	11.0	12.5	15.9	13.6	13.6
(La/Yb) _N	8.02	7.42	12.2	7.57	5.97	6.72	10.1	7.41	2.80	7.50	8.30	10.8	9.20	9.20
(Gd/Yb) _N	1.38	1.45	1.54	1.35	1.23	1.44	1.45	1.41	1.31	1.49	1.26	2.75	1.36	1.40
LREE/HREE	8.39	7.70	11.5	8.35	6.45	6.67	9.87	7.86	3.80	7.70	9.10	8.50	9.45	9.47
n	5	13	9	12	2	3	16	28	11	32	10	15		
Rb	156	196	110	160			120	172	18	67	115	61	160	112
Sr	57	85	70	111			67	103	637	250	141	66	200	350
Ba	358	421	754	619			663	553	370	444	522	253	650	550
Pb	43.1	25.9	21.1	15.2			26.2	18.7	6.9	15.1	24	16	20	20
K/Rb	146	125	187	164			185	154	578	219	189	178	192	250
Rb/Sr	2.92	2.77	2.04	1.89			2.24	2.18	0.05	0.65	0.89	1.19	0.8	0.32
Ba/Rb	2.31	2.16	8.28	4.13			6.90	3.47	21.3	7.5	4.5	4.7	4.06	4.91
Ba/Sr	6.61	5.93	13.2	7.17			11.7	6.76	0.95	3.55	3.8	4.7	3.25	1.57
U	4.01	3.78	2.11	3.89			2.55	3.85	1.09	2.53	3.9	3.2	3.1	2.8
Th	16.6	15.8	10.9	13.3			12.2	14.1	2.27	11.1	18.8	16.7	14.6	10.7
Zr	194	175	175	202			180	193	96	229	179	298	210	190
Hf	6.0	5.7	5.0	5.8			5.3	5.8	2.1	6.3	6.8	10.1	5.0	5.8
Nb	12.7	11.5	11.7	12.2			11.9	12.0	2	8.5	10.7	7.9	19	25
K/Th	1370	1552	1885	1976			1 812	1 873	4 055	1 296	1 252	681	2 103	2 617
K/U	5672	6479	9757	6765			8 692	6 878	8 682	5 631	5 956	3 950	9 903	10 000
Th/U	4.1	4.2	5.5	4.6			5.2	4.4	2.1	4.6	4.8	5.6	4.7	3.8
Zr/Hf	32.5	30.6	35.2	35.2			34.6	33.7	45.7	36.3	26.3	29.5	42.00	32.76

(续表4)

	研究区元古宙浊积岩				显生宙不同构造环境下杂砂岩				PAAS	上陆壳		
	冷家溪群		板溪群		元古宙平均		大洋岛弧	大陆岛弧			活动大陆边缘	被动大陆边缘
	砂岩	板岩	马底驿组		五强溪组		砂岩	板岩			砂岩	板岩
			砂岩	板岩	砂岩	板岩						
Zr/Th	11.8	11.1	17.4	15.4	16.1	14.0	48	21.5	9.5	19.1	14.4	17.8
Zr/Nb	15.5	15.2	15.8	16.8	15.7	16.3	49.3	31.5	16.7	37.2	11.0	7.60
La/Th	2.47	2.50	4.62	3.33	4.12	3.05	4.26	2.36	1.77	2.2	2.60	2.80
La/Y	1.31	1.32	1.93	1.24	1.79	1.27	0.48	1.02	1.33	1.31	1.41	1.36
Nb/Y	0.41	0.39	0.45	0.36	0.44	0.37	0.11	0.36	0.43	0.3	0.70	1.14
Sc	16.8	19.4	10.9	15.2	12.3	16.6	19.5	14.8	8	6	16	11
V	120	126	72.7	97.8	83.8	107	131	89	48	31	150	60
Co	19.5	19.4	14.5	16.7	15.7	17.6	18	12	10	5	23	10
Cr	158	155	107	130	118	138	37	51	26	39	110	35
Ni	38.3	44.4	30.2	33.8	32.1	37.3	11	13	10	8	55	20
Zn	104	118	91.4	96.3	94.2	104	89	74	52	26	85	71
La/Sc	2.41	2.02	5.22	2.99	4.58	2.67	0.55	1.82	4.55	6.25	2.38	2.73
Th/Sc	0.99	0.81	1.09	0.89	1.07	0.87	0.15	0.85	2.59	3.06	0.91	0.97
Cr/Ni	4.14	3.53	4.52	3.90	4.43	3.77	3.4	3.9	2.6	4.9	2.00	1.75
Ni/Co	1.96	2.30	2.27	2.14	2.20	2.19	0.62	1.22	1.04	1.42	2.39	2.00
Sc/Ni	0.44	0.44	0.37	0.46	0.38	0.46	2.3	1.44	0.77	1.9	0.29	0.55
Sc/Cr	0.11	0.13	0.10	0.12	0.10	0.13	0.57	0.32	0.3	0.16	0.15	0.31
Ti/Zr	26.0	27.6	22.4	23.1	23.2	24.6	56.8	19.7	15.3	6.74	28.6	15.8
n	3	6	10	12	13	18	11	32	10	15		

注: 1. 主元素为%, 微量元素为 μg/g, n 为样品数; 稀土元素球粒陨石标准化参数数据 Taylor *et al.* [38]; 2. 不同构造环境杂砂岩的数据据 Bhatia^[40,41]和 Bhatia *et al.* [43]; 后太古宙平均页岩(PAAS)和上陆壳成分据 Taylor *et al.* [38]; 3. 带下划线的参数为最具构造环境判别意义的参数 (Bhatia^[40,41]和 Bhatia *et al.* [43]); 4. $Eu/Eu^* = Eu_N / (Sm_N \times Gd_N)^{1/2}$, $Ce/Ce^* = Ce_N / (La_N \times Pr_N)^{1/2}$, $LREE/HREE = \sum(La \sim Sm) / \sum(Gd \sim Lu)^{[61]}$.

化学组成的研究,提出了一种用于区分不成熟岛弧 (immature island arc)、进化岛弧 (evolved island arc) 和成熟岩浆弧 (mature magmatic arc) 的 $Al_2O_3/SiO_2 - (FeO + MgO) / (SiO_2 + K_2O + Na_2O)$ 判别图。其中, Al_2O_3/SiO_2 大致代表长石与石英的比例, 而 $(FeO + MgO) / (SiO_2 + K_2O + Na_2O)$ 则代表岩石中相对基性组分(火山岩)与长英质组分(火山岩)的比率, 后者又被称作“基性指数”(Basicity Index)。在图5中, 本区元古宙浊积岩大多位于进化岛弧区和成熟岩浆弧区。Kumon *et al.* [70]所定义的进化岛弧和成熟岩浆弧分别相当于 Bhatia^[40]及 Bhatia *et al.* [43]的大陆岛弧和活动大陆边缘环境。

沉积岩中的微量元素, 尤其是 La、Ce、Nd、Y、Th、Zr、Hf、Nb、Ti 和 Sc 等活动性较弱且在海水中停留时间较短的

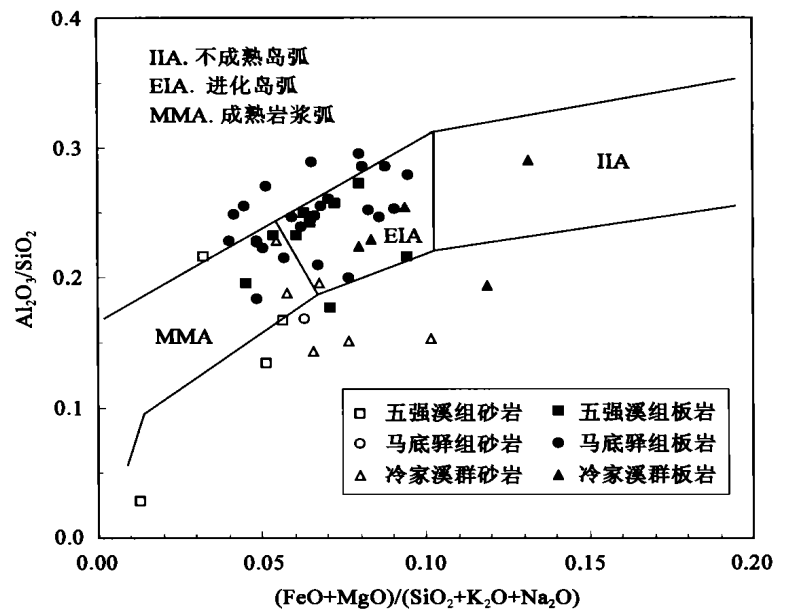


图5 研究区元古宙浊积岩沉积构造环境的 $Al_2O_3/SiO_2 - (FeO + MgO) / (SiO_2 + K_2O + Na_2O)$ 判别图

Fig. 5 Tectonic setting discrimination diagram for the Proterozoic turbidites in the study area
不同构造环境之间的界线据 Kumon *et al.* [70]

元素,在风化、搬运和沉积过程中能定量地转移到碎屑沉积物中,因而这些元素能良好地反映母岩性质和沉积盆地的构造环境^[35, 38, 43, 47-49, 77]。在表 4 中所列出的最具判别意义的特征微量元素及其比值参数中,研究区元古宙沉积岩的 Nd、Nb、Zr/Nb、Th/Sc、Sc/Ni 等(可能还包括 Ce、LREE/HREE 和 Zr/Th)与活动大陆边缘杂砂岩相似,K/Th、Zr/Hf、La/Th、Sc、V、Ti、Th/Sc 和 Ti/Zr 等与大陆岛弧杂砂岩相似,而 Th、Zr、Hf、Th/U、La/Sc、La/Yb、(La/Yb)_N 和 (Gd/Yb)_N 等则均大致与上述两种构造环境下形成的杂砂岩相当。在 Ti/Zr-La/Sc 构造环境判别图中(图 6),绝大多数点均落于活动大陆边缘构造区内或其附近靠近大陆岛弧方向。在 Bhatia *et al.*^[43] 认为最具构造判别意义的 La-Th-Sc、Th-Co-Zr/10 和 Th-Sc-Zr/10 三角图解(图 7)中,多数样品落入大陆岛弧区靠近活动大陆边缘一侧(图 7a),或部分位于大陆岛弧区、部分位于活动大陆边缘区(图 7b, c)。

McLennan *et al.*^[35] 对深海浊积岩 Nd 同位素的研究表明,活动大陆边缘沉积物以较高的 ¹⁴³Nd/¹⁴⁴Nd ($\epsilon_{Nd} = -13.8 \sim +8.3$) 区别于被动大陆边缘沉积物 ($\epsilon_{Nd} = -26 \sim -10$)。据李献华等的研究^[5],扬子陆块南缘中晚元古代沉积岩的 ϵ_{Nd} 值分布范围较宽 (-16.6 ~ -6.2),但主要变化于 -14.8 ~ -8.2 之间,与活动大陆边缘浊积岩更为相似,表明沉积物主要为年轻的岛弧物质与古老上地壳的混合^[35]。

需要指出的是,利用沉积物化学组成判别沉积盆地古构造环境是建立在这样一个基本假设之上的,即物源区的性质与控制邻区沉积盆地的构造作

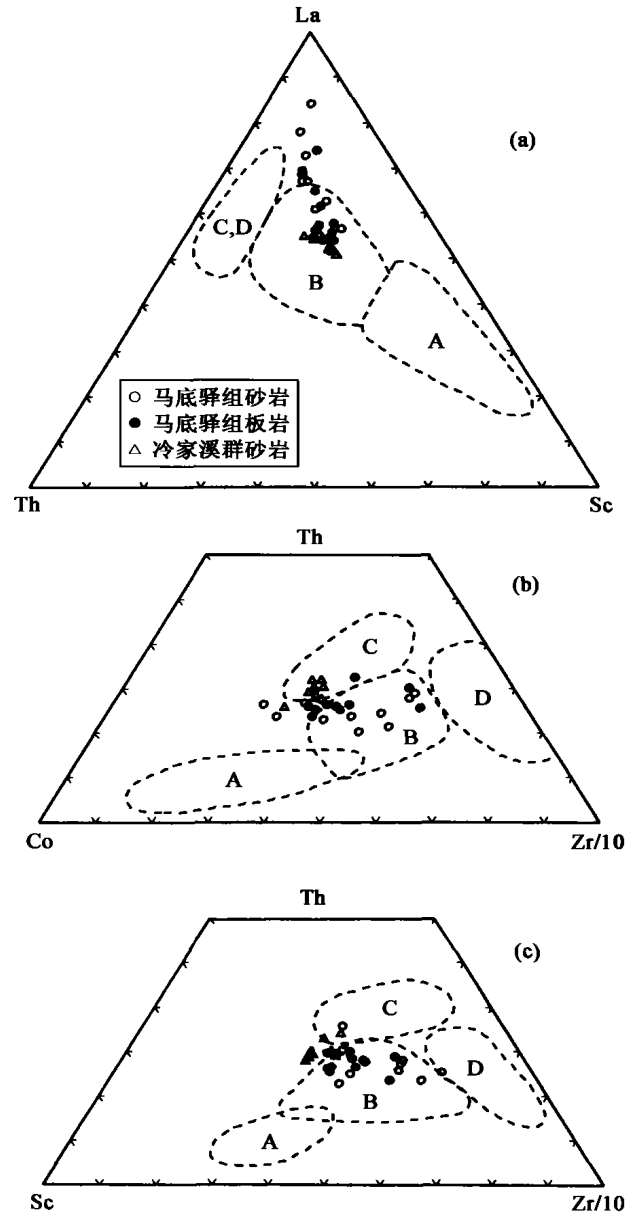


图 7 研究区浊积岩沉积构造环境的 La-Th-Sc (a)、Th-Co-Zr/10 (b) 和 Th-Sc-Zr/10 (c) 判别图
Fig. 7 La-Th-Sc (a), Th-Co-Zr/10 (b), and Th-Sc-Zr/10 (c) diagrams of the study turbidites for tectonic setting discrimination 不同构造环境的分布区域据 Bhatia *et al.*^[43]: A. 大洋岛弧; B. 大陆岛弧; C. 活动大陆边缘; D. 被动大陆边缘。

用过程密切相关。尽管在少量一些研究实例中,物源区的构造环境未必与沉积区的构造环境一致,但我们认为,从上述讨论中得出的一个符合逻辑的结论是,研究区的元古宙浊积岩代表了在一个活动大陆边缘弧后沉积盆地(类似于现代太平洋西岸的许多盆地)内的充填记录,沉积物一部分来自盆地北侧的扬子陆块,一部分则来自盆地南侧的岛弧带

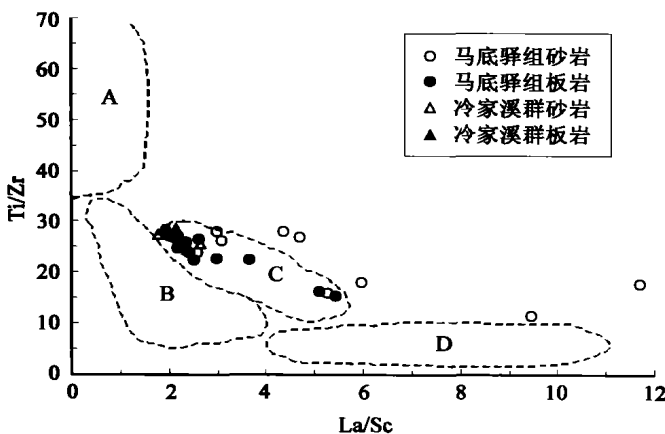


图 6 元古宙浊积岩构造环境的 Ti/Zr-La/Sc 判别图
Fig. 6 Ti/Zr-La/Sc diagram for tectonic setting discrimination of the Proterozoic turbidites

不同构造环境的分布区域据 Bhatia *et al.*^[43]: A. 大洋岛弧; B. 大陆岛弧; C. 活动大陆边缘; D. 被动大陆边缘。

(梵净山 - 大雍岛弧带或四堡 - 益阳岛弧带^[78])。

3.2 对华南大地构造格局的制约

从更广阔的视野来看, 本文的上述研究结果为解释中国东南部的构造演化和江南元古宙造山带在全球构造演化格局中的位置提供了新的地球化学制约。

在中元古代的 1.4 ~ 0.7 Ga 这段时间内, 全球构造演化主要表现为: Grenville 造山事件 (1.4 ~ 1.0 Ga) — Rodinia 超大陆形成 (1.0 ~ 0.8 Ga) — 超大陆裂解 (0.8 ~ 0.7 Ga)^[79-83]。由于华南的东安造山运动 (或四堡运动, 1.05 ~ 1.00 Ga) 在时间上与全球 Grenville 造山事件的末期相吻合, 人们自然会联想到东安运动在全球构造演化进程中的位置和意义。通过地层对比和构造分析, Li *et al.*^[14, 20] 认为华夏古陆属中元古代劳亚大陆的西缘, 扬子克拉通则位于劳亚大陆和澳大利亚 - 东南极大陆之间, 两者通过东安运动 (Grenville 造山运动末期) 碰撞拼合, 使劳亚大陆和澳大利亚 - 东南极大陆连接在一起, 形成了统一的 Rodinia 超大陆。超大陆形成后不久, 华南的东南部、西部和北部边缘出现裂谷和被动大陆边缘环境, 板溪群便是 Rodinia 超大陆解体前的早期夭折陆内裂谷 (failed intracontinental rift) 沉积。

然而, 本文的地球化学资料似乎并不支持上述观点。雪峰地区中元古代冷家溪群与新元古代板溪群在地球化学组成上并没有明显的区别, 两者的主元素和微量元素特征显示出相同的物源类型和相似的沉积构造背景。板溪群地层的地球化学组成与以被动大陆边缘为主要源区的裂谷沉积物有着明显的区别。这表明, 雪峰地区在经历了东安运动 (~1.0 Ga) 后的新元古代板溪群地层沉积时期 (1 000 ~ 800 Ma), 总体上仍继承了中元古代 (冷家溪群, 1 400 ~ 1 050 Ma) 活动大陆边缘弧后沉积盆地的构造格局; 发生在 0.8 Ma 左右的晋宁运动 (雪峰运动) 才使该地区最终碰撞造山, 其上被下震旦统的海陆交互碎屑岩系不整合覆盖。李献华^[6, 25] 及 Li *et al.*^[30] 新近获得的扬子克拉通东南缘桂北地区本洞、三防和元宝山三个花岗岩体的高精度锆石 U-Pb 年龄分别为 (820 ± 7) Ma、(825 ± 8) Ma 和 (824 ± 4) Ma, 表明该区花岗岩浆活动的时代主要为晋宁期, 而不存在约 1.0 Ga 的四堡期 (或晋宁早期) 花岗岩; 迄今为止, 尚没有确凿的年代学证据表明华南存在中元古代晚期的 Grenville 期造山运动和岩浆活动^[6, 25]。同

时, 岩石学和同位素资料表明^[6, 25, 84, 85], 上述三个岩体均属过铝质的 S 型造山花岗岩, 物质来源于经历过表壳沉积过程的地壳源岩。这些资料显示, 以 S 型花岗岩侵位为标志的华夏陆块和扬子陆块的最终拼接可能发生在新元古代的晋宁期 (雪峰期), 这与周新民等^[86] 关于扬子陆块东南缘新元古代晋宁运动以浙江富阳前陆盆地磨拉石和陆相双峰式火山岩 (~0.8 Ga) 形成而告终的时限相一致。新近的研究资料表明, 包括桂北地区在内的华南 820 ~ 825 Ma 左右的各类花岗岩 (包括典型的 S 型、I 型和 S-I 过渡型花岗岩) 与 Grenville 期造山运动无关, 而很可能与导致 Rodinia 超大陆裂解的地幔柱上升诱发岩石圈伸展和下地壳物质重熔有关^[26, 87-89]。这进一步说明, 820 ~ 825 Ma 左右与超大陆裂解有关的裂谷构造环境应主要出现在板溪群地层沉积后, 即板溪群并非为裂谷沉积产物。

有关扬子地块南缘的元古宙浅变质沉积岩已积累了较多的 Sm-Nd 同位素资料^[5, 6, 17, 22, 24, 28, 90]。研究表明, 桂北地区中元古界四堡群沉积岩 (1.6 ~ 1.0 Ga) 具有一致的 Nd 模式年龄 ($t_{DM} \approx 1.8$ Ga); 上覆的新元古界丹洲群下部 (白竹组和合洞组及其相应地层) 沉积岩 (0.9 ~ 0.77 Ga) 的 t_{DM} 年龄也大致为 1.8 Ga, 而丹洲群上部的拱洞组 (及其相应地层) 以及下震旦统 (长安组和富禄组及其相当地层) 沉积岩的 t_{DM} 年龄急剧降低至约 1.3 Ga; 上震旦统 (包括陡山沱组和老堡组及其相当地层) 和显生宙沉积岩 (0.66 ~ 0.27 Ga) 的 t_{DM} 年龄又恢复到 1.8 Ga 左右^[5, 6]。换言之, 大致在 0.8 Ga 左右, 沉积岩的 t_{DM} 年龄迅速降低 (≈ 1.3 Ga), 而其余时代的沉积岩具有较一致的 t_{DM} 年龄 (≈ 1.8 Ga)。这似乎暗示了 0.8 Ga 前后可能是华南地区一个重要的构造转折时期, 该时期伴随碰撞造山过程的地壳迅速抬升使大量新的幔源物质被风化剥蚀并保留到沉积记录中^[5, 6]。然而, 本文的研究显示, 通常认为与桂北丹洲群相对应的湘西地区板溪群下部马底驿组和上部五强溪组地层之间, 在主元素和微量元素组成上并没有明显的区别, 这可能暗示该地区缺失与桂北丹洲群上部拱洞组相对应的沉积记录, 即湘西的板溪群 (包括马底驿组和五强溪组) 可能仅对应于桂北丹洲群的下部地层 (白竹组和合洞组)。如果考虑到桂北本洞岩体 (~820 Ma) 侵入四堡群并被丹洲群不整合覆盖^[7, 25], 则丹洲群的底界年龄应小于 820 Ma, 那么湘西地区沉积时代为 1 000 ~ 800 Ma^[7, 51, 54] 的板溪群可能与桂北地区更老的地层 (丹洲群底部和四堡

群顶部?)相对应。事实上,桂北丹洲群顶部的拱洞组和震旦系底部的长安组为连续沉积,因此丹洲群很可能代表发育在晋宁期造山运动夷平作用面之上震旦纪盆地的海相沉积^[91]。

江南造山带中、上元古界之间的区域性不整合面代表了一次重要的地质构造事件(四堡运动/东安运动),因而对于认识华南地区前寒武纪地质构造演化历史具有重要意义。在雪峰隆起区,冷家溪群与板溪群的接触关系曾经是一个长期争论不休的问题。但目前已基本清楚,大致以安化-溆浦-黔阳断裂为界,在雪峰山区西北部靠近扬子陆块一侧为典型的角度不整合,而往东南方向则不整合角度逐渐变小并过渡为假整合,至桃江以东则为整合接触^[11,78,92]。这似乎暗示了中元古代末东安运动的影响由西北向东南方向逐渐减弱。同样值得注意的是,大致沿安化-溆浦-黔阳断裂的东南侧,存在一个板溪群地层厚度陡增的条形地带,呈 NE-NEE 向延伸,长约 300 km,宽约 50 km,板溪群地层厚度可达 7 000~8 000 m,呈现出过渡的深水洼陷特征;而该断裂带北东的板溪群地层厚度仅为 1 000~3 000 m^[51,93]。据此推测,上述板溪群地层厚度陡增的条形地带乃新元古代的一个强烈洼陷地带,空间上正位于江南造山带与华南褶皱带(以华夏古陆为基底)之间,很可能大致代表了板溪群地层沉积时期板块俯冲系统的古海沟或增生楔位置,向北西依次出现岛弧-弧后盆地-陆棚-滨海-扬子古陆,向南东则可能在洋壳俯冲殆尽后与华夏古陆相接^[94]。

因此,东安运动在雪峰隆起区表现为相对微弱的造山过程(冷家溪群与板溪群之间不同程度的角度不整合/平行不整合/整合、变质-变形程度浅),而并未使扬子陆块和华夏陆块碰撞对接,其间的华南洋并未闭合。东安运动后 1.0~0.8 Ga 的新元古代,总体上继承了中元古代活动大陆边缘弧后盆地的沉积构造格局,沉积了数千米厚的板溪群地层。表现在沉积物地球化学记录上,正如本文所展示的那样,冷家溪群与板溪群地层无论在主元素和微量元素组成还是在元素组合所反映的沉积构造背景上,均没有显著的区别。事实上,从更广的视野来看,江南古岛弧造山带的东段为 NEE 走向,西段则为 NNE-NE 走向,整体呈向北西突出的弧形,而雪峰隆起段正位于其中部的弧型折转部位。这一独特的几何学特征决定了雪峰段在整个板块俯冲、沉积盆地演化以及随后的拼贴碰撞造山作用等方面都有所区别于其他地段。其两侧向南突出的部位在整个

板块俯冲和碰撞造山过程中都将成为支撑点而遭受各方面的强烈作用,如增生楔的拼贴、强烈的火山岩浆活动、亲洋壳型的岩石组合、变形推覆和较高程度(绿片岩相-低角闪岩相)的变质作用等^[7],而雪峰段本身则成为一个相对安全的“避风港”,具有火山-岩浆活动较弱、缺乏同碰撞花岗岩侵入、以成熟度相对较高的陆壳亲缘型岩石组合为主、变质-变形程度较浅、以及南界不清楚等一系列特征^[7]。

综合上述讨论,作者认为至少在江南造山带的雪峰隆起区,四堡(东安)运动并未使华夏陆块和扬子陆块碰撞对接;当全球的 Grenville 造山运动结束时(~1.0 Ga),在华夏陆块和扬子陆块之间仍是一多岛弧的洋盆,洋盆的最终闭合是在 0.8 Ga 左右的晋宁(雪峰)期。这意味着,要么全球 Grenville 造山运动对华南的构造演化并未产生重要影响,要么 Grenville 运动在华南地区的响应推迟了约 0.2 Ga。倘若华南块体的确是连接劳亚大陆和澳大利亚-东南极大陆的纽带^[4,20],那么很可能是晋宁运动,而不是四堡运动,才标志了 Rodinia 超大陆的最终形成。

4 结 论

江南造山带雪峰隆起区元古宙浊积岩的地球化学组成良好地反映了沉积盆地的板块构造性质,并为解释区域大地构造的性质和演化提供了有用的信息。主元素和微量元素特征指示了研究区元古宙浊积岩很可能代表了一套活动大陆边缘弧后沉积盆地的产物。陆内裂谷盆地模式对于解释新元古代雪峰地区的构造性质和演化可能并不合适。华夏陆块与扬子陆块的拼接以及 Rodinia 超大陆的最终形成可能发生在约 0.8 Ga 左右的晋宁(雪峰)造山运动期,而不是全球 Grenville 造山期末的四堡(东安)运动期。

野外工作得到了湘西金矿彭炳根总工程师、张克荣副总工程师以及雷鸣波、罗禄锦、高元宏、刘正庚、刘开友、杨仁双、梁巨宏、陈中平和袁寿松等同志的热情帮助;审稿人和编辑部提出了建设性意见,在此深表谢意!

参考文献(References):

- [1] 水涛. 中国东南大陆基底构造格局[J]. 中国科学(B), 1987, 17(4): 414~422.

- Shui Tao. Tectonic framework of the southeastern China continental basement[J]. *Sci China(B)*, 1987, 17(4): 414 ~ 422 (in Chinese).
- [2] Chen J F, 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.
- [3] 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.
Liu Bao-jun, Xu Xiao-song, Pan Xing-nan, *et al.* Sedimentary-Crustal Evolution and Metallogensis of the South China Palecontinent[M]. Beijing: Science Press, 1993. 1 ~ 236 (in Chinese).
- [4] Li Z X, Zhang L H, Powell C McA. South China in Rodinia: Part of the missing link between Australia-East Antarctica and Laurentia? [J] *Geology*, 1995, 23(5): 407 ~ 410.
- [5] 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.
Li Xian-hua, McCulloch M T. Nd isotopic evolution of sediments from the southern margin of the Yangtze block and its tectonic significance [J]. *Acta Petrol Sinica*, 1996, 12(3): 359 ~ 369 (in Chinese with English abstract).
- [6] 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.
Li Xian-hua. The Jingning orogeny in South China: Geochronological and geochemical constraints [J]. *Acta Geophys Sinica*, 1998, 41(suppl): 184 ~ 193 (in Chinese with English abstract).
- [7] 刘英俊, 孙承轶, 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.
Liu Ying-jun, Sun Cheng-yuan, Ma Dong-sheng. Jiangnan-Type Gold Deposits and Their Ore-Forming Geochemical Background [M]. Nanjing: Nanjing University Press, 1993. 1 ~ 260 (in Chinese).
- [8] 黄汲清. 中国主要地质构造单元 [M]. 北京: 地质出版社, 1956. 1 ~ 162.
Huang Ji-qing. Principal Geotectonic Units of China [M]. Beijing: Geological Publishing House, 1956. 1 ~ 162 (in Chinese).
- [9] 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.
Zhang Wen-you. Oceanic and Continental Geotectonics in China and Adjacent Regions [M]. Beijing: Science Press, 1986. 1 ~ 575 (in Chinese).
- [10] 郭令智, 施央申, 马瑞士. 华南大地构造格架和地壳演化 [A]. 26 届国际地质大会论文集(1) [C]. 北京: 地质出版社, 1980. 109 ~ 116.
Guo Ling-zhi, Shi Yang-shen, Ma Rui-shi. Geotectonic framework and crustal evolution in South China [A]. Proceedings of the 26th IGC(vol. 1) [C]. Beijing: Geological Publishing House, 1980. 109 ~ 116 (in Chinese).
- [11] 郭令智, 施央申, 马瑞士, 等. 江南元古代板块运动和岛弧构造的形成和演化 [A]. 中国地质学会, 中国地质科学院. 国际前寒武纪地壳演化讨论会论文集(1) [C]. 北京: 地质出版社, 1986. 30 ~ 37.
Guo Ling-zhi, Shi Yang-shen, Ma Rui-shi, *et al.* Proterozoic plate movement in Jiangnan and the formation and evolution of arc tectonics [A]. Geological Society of China, Chinese Academy of Geological Sciences. Proceedings of the International Symposium on Precambrian Crustal Evolution(vol. 1) [C]. Beijing: Geological Publishing House, 1986. 30 ~ 37 (in Chinese).
- [12] 周新民, 邹海波, 杨杰东, 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): 1 243 ~ 1 245.
Zhou Xin-min, Zou Hai-bo, Yang Jie-dong, *et al.* Sm-Nd isochron age of Fuchuan ophiolite suite in Shexian County, Anhui Province and its geological significance [J]. *Chinese Sci Bull*, 1989, 34(16): 1 243 ~ 1 245 (in Chinese).
- [13] 徐备, 乔广生. 赣东北晚元古代蛇绿岩套的 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.
Xu Bei, Qiao Guang-sheng. Sm-Nd isotopic age and tectonic setting of the late Proterozoic ophiolites in northeastern Jiangxi Province [J]. *J Nanjing Univ (Geosciences)*, 1989, (3): 108 ~ 114 (in Chinese with English abstract).
- [14] Hsü K J, Li J, Chen H. Tectonics of South China: Key to understanding West Pacific geology [J]. *Tectonophysics*, 1990, 183: 9 ~ 39.
- [15] Hsü K J, Sun S, Li J. Mesozoic overthrust tectonics in south China [J]. *Geology*, 1988, 16: 418 ~ 421.
- [16] Jahn B M, Zhou X H, Li J L. Formation and tectonic evolution of Southeastern China and Taiwan: Isotopic and geochemical constraints [J]. *Tectonophysics*, 1990, 183: 145 ~ 160.
- [17] 沈渭洲, 凌洪飞, 章邦桐. 江南元古宙岛弧基底变质岩 Sm-Nd 同位素研究 [J]. *南京大学学报(自然科学版)*, 1993, 29(3): 460 ~ 467.
Shen Wei-zhou, Ling Hong-fei, Zhang Bang-dong. A Sm-Nd isotopic study on the metamorphic rocks of the Jiangnan Proterozoic island arc basement [J]. *J Nanjing Univ (Natural Sciences)*, 1993, 29(3): 460 ~ 467 (in Chinese).
- [18] Shi Y S, Shu L S, Brewer R C. Late Proterozoic terrane tectonics in the central Jiangnan belt, southeast China [J]. *J South Am Earth Sci*, 1994, 7(3/4): 367 ~ 375.
- [19] 李献华, 周国庆, 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): 125 ~ 131.
Li Xian-hua, Zhou Guo-qing, Zhao Jian-xin, *et al.* SHRIMP ion microprobe zircon U-Pb age of the NE Jiangxi ophiolite and its tectonic implications [J]. *Geochimica*, 1994, 23(2): 125 ~ 131 (in Chinese with English abstract).
- [20] Li Z X, Zhang L, Powell C McA. Positions of the East Asian cratons in the Neoproterozoic supercontinent Rodinia [J]. *Aust J Earth Sci*, 1996, 43(6): 593 ~ 604.
- [21] Bai J, Dai F Y. The early Precambrian crustal evolution of China [J]. *J Southeast Asian Earth Sci*, 1996, 13(3-5): 205 ~ 214.
- [22] Chen J, Jahn B M. Crustal evolution of southeastern China: Nd and Sr isotopic evidence [J]. *Tectonophysics*, 1998, 284: 101 ~ 133.
- [23] 陆松年. 新元古时期 Rodinia 超大陆研究进展述评 [J]. *地质论评*, 1998, 44(5): 489 ~ 495.

- Lu Song-nian. A review of advance in the research on the Neoproterozoic Rodinia supercontinent [J]. *Geol Rev*, 1998, 44(5): 489 ~ 495 (in Chinese with English abstract).
- [24] 李献华. 扬子块体南缘四堡群 Sm-Nd 同位素体系及其地壳演化意义[J]. *地质科学*, 1996, 31(3): 218 ~ 228.
Li Xian-hua. Sm-Nd isotopic systematics of Sibao Group from the southern margin of Yangtze block: Implications for the crustal evolution [J]. *Scientia Geologica Sinica*, 1996, 31(3): 218 ~ 228 (in Chinese with English abstract).
- [25] 李献华. 广西北部新元古代花岗岩锆石 U-Pb 年代学及其构造意义[J]. *地球化学*, 1999, 28(1): 1 ~ 9.
Li Xian-hua. U-Pb zircon ages of granites from northern Guangxi and their tectonic significance [J]. *Geochimica*, 1999, 28(1): 1 ~ 9 (in Chinese with English abstract).
- [26] 李献华, 李正祥, 葛文春, 等. 华南新元古代花岗岩的锆石 U-Pb 年龄及其构造意义 [J]. *矿物岩石地球化学通报*, 2001, 20(4): 271 ~ 273.
Li Xian-hua, Li Zheng-xiang, Ge Wen-chun, *et al.* U-Pb zircon ages of the Neoproterozoic granitoids in South China and their tectonic implications [J]. *Bull Mineral Petrol Geochem*, 2001, 20(4): 271 ~ 273 (in Chinese with English abstract).
- [27] 葛文春, 李献华, 李正祥, 等. 桂北龙胜丹洲群火山岩的地幔源区及大地构造环境 [J]. *长春科技大学学报*, 2001, 31(1): 20 ~ 24.
Ge Wen-chun, Li Xian-hua, Li Zheng-xiang, *et al.* Mantle source and tectonic settings for the volcanic rocks from Danzhou Group in Longsheng area, northern Guangxi [J]. *J Changchun Univ Sci Technol*, 2001, 31(1): 20 ~ 24 (in Chinese with English abstract).
- [28] Li X H, McCulloch M T. Secular variation in the Nd isotopic composition of Neoproterozoic sediments from the southern margin of the Yangtze block: Evidence for a Proterozoic continental collision in southeast China [J]. *Precambrian Res*, 1996, 76: 67 ~ 76.
- [29] Li Zheng-xiang, Li Xian-hua, Zhou Han-wen, *et al.* Grenvillian continental collision in South China: New SHRIMP U-Pb zircon results and implications for the configuration of Rodinia [J]. *Geology*, 2002, 30(2): 163 ~ 166.
- [30] Li Xian-hua, Li Zheng-xiang, Zhou Han-wen, *et al.* U-Pb zircon geochronology, geochemistry, and Nd isotopic study of Neoproterozoic bimodal volcanic rocks in the Kangdian Rift of South China: Implications for the initial rifting of Rodinia [J]. *Precambrian Res*, 2002, 113: 135 ~ 154.
- [31] Zhou Mei-fu, Yan Dan-ping, Kennedy A K, *et al.* SHRIMP U-Pb zircon geochronological and geochemical evidence for Neoproterozoic arc-magmatism along the western margin of the Yangtze Block, South China [J]. *Earth Planet Sci Lett*, 2002, 196(1-2): 51 ~ 67.
- [32] 王鸿祯, 乔秀夫. 中国元古代构造单元及其边界性质 [A]. 中国地质学会, 中国地质科学院. 国际前寒武纪地壳演化讨论会论文集(3) [C]. 北京: 地质出版社, 1986. 1 ~ 13.
Wang Hong-zhen, Qiao Xiu-fu. Proterozoic geotectonic units of China and the nature of their boundaries [A]. *Geological Society of China, Chinese Academy of Geological Sciences. Proceedings of the International Symposium on Precambrian Crustal Evolution (vol. 3)* [C]. Beijing: Geological Publishing House, 1986. 1 ~ 13 (in Chinese with English abstract).
- [33] 张淑玲. 湘西北晚元古代构造古地理轮廓 [A]. 王鸿祯, 杨巍然, 刘本培. 华南地区古大陆边缘构造史 [C]. 武汉: 武汉地质学院出版社, 1986. 113 ~ 123.
Zhang Shu-ling. Outline of the tectono-palaeogeography and sedimentary characteristics in the late Proterozoic, Northwestern Hunan [A]. Wang Hong-zhen, Yang Wei-ran, Liu Ben-pei. *Tectonic History of the Ancient Continental Margins of South China* [C]. Wuhan: Wuhan College of Geology Press, 1986. 113 ~ 123 (in Chinese with English abstract).
- [34] 徐备. 论赣东北-皖南晚元古代沟弧盆体系 [J]. *地质学报*, 1990, 64(1): 33 ~ 42.
Xu Bei. The late Proterozoic trench-basin-arc system in north-eastern Jiangxi-southern Anhui Provinces [J]. *Acta Geologica Sinica*, 1990, 64(1): 33 ~ 42 (in Chinese with English abstract).
- [35] 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(7): 2 015 ~ 2 050.
- [36] McLennan S M, Hemming S, McDaniel D K, *et al.* Geochemical approaches to sedimentation, provenance, and tectonics [J]. *Geol Soc Am, Special Paper* [J]. 1993, 284: 21 ~ 40.
- [37] 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(6): 1 153 ~ 1 177.
- [38] Taylor S R, McLennan S M. *The Continental Crust: Its Composition and Evolution* [M]. Oxford: Blackwell, 1985. 1 ~ 312.
- [39] Taylor S R, McLennan S M. The geochemical evolution of the continental crust [J]. *Rev Geophys*, 1995, 33(2): 241 ~ 265.
- [40] Bhatia M R. Plate tectonics and geochemical composition of sandstones [J]. *J Geol*, 1983, 91: 611 ~ 627.
- [41] Bhatia M R. Rare earth element geochemistry of Australian Paleozoic graywackes and mudrocks: Provenance and tectonic control [J]. *Sediment Geol*, 1985, 45: 97 ~ 113.
- [42] Bhatia M R. Composition and classification of Paleozoic flysch mudrocks of eastern Australia: Implication in provenance and tectonic setting interpretation [J]. *Sediment Geol*, 1985, 41: 249 ~ 268.
- [43] Bhatia M R, Crook K A W. Trace element characteristics of graywackes and tectonic setting discrimination of sedimentary basins [J]. *Contrib Mineral Petrol*, 1986, 92: 181 ~ 193.
- [44] Roser B P, Korsch R J. Plate tectonics and geochemical composition of sandstones: A discussion [J]. *J Geol*, 1985, 93(1): 81 ~ 84.
- [45] Roser B P, Korsch R J. Determination of tectonic setting of sandstone-mudstone suites using SiO₂ content and K₂O/Na₂O ratio [J]. *J Geol*, 1986, 94(5): 635 ~ 650.
- [46] Roser B P, Korsch R J. Provenance signatures of sandstone-mudstone suites determined using discriminant functions analysis of major element data [J]. *Chem Geol*, 1988, 67: 119 ~ 139.
- [47] 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]. *Geochim Cosmochim Acta*, 1994, 58(21): 4 615 ~ 4 631.
- [48] Gu X X. Turbidite-Hosted Micro-Disseminated Gold Deposits[M]. Chengdu: Chengdu Univ Sci Technol Press, 1996. 1 ~ 239.
- [49] 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.
Gu Xue-xiang. Geochemical characteristics of sediments and tectonic setting analysis of sedimentary basins[A]. *Developments in Geosciences and Technology - 1995*[C]. Beijing: China Univ Geosci Press, 1996. 205 ~ 212 (in Chinese with English abstract).
- [50] 顾雪祥. 川西北中生代特提斯沉积物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.
Gu Xue-xiang. Geochemical characteristics of the Mesozoic Tethys sediments in NW-Sichuan and its implication for the weathering conditions of source area [J]. *Bull Mineral Petrol Geochem*, 1996, 15(1): 22 ~ 27 (in Chinese with English abstract).
- [51] 王任衡. 湖南的上前寒武系[J]. *湖南地质*, 1987, 6(4): 1 ~ 13.
Wang Ren-heng. The upper Precambrian in Hunan [J]. *Hunan Geology*, 1987, 6(4): 1 ~ 13 (in Chinese).
- [52] 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.
Liu Hai-chen, Zhu Bing-quan. On the age of Banxi and Lengjiaxi Groups in Western Hunan [J]. *Chinese Sci Bull*, 1994, 39(2): 148 ~ 150 (in Chinese).
- [53] 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.
Gan Xiao-chun, Li Xian-hua, Zhao Feng-qing, *et al.* Zircon U-Pb and Sm-Nd isochron ages of spilite from Danzhou Group, Guangxi Zhuang Autonomous Region [J]. *Geochimica*, 1996, 25(3): 270 ~ 276 (in Chinese with English abstract).
- [54] 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.
Luo Xian-lin, Zhong Dong-qiu, Li Gao-sheng. *Geology of the Woxi-type Stratabound Gold Deposits in Hunan Province*[M]. Beijing: Seismic Press, 1996. 1 ~ 313 (in Chinese).
- [55] 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.
Luo Xian-lin. Geological characteristics of Precambrian antimony metallogeny in Hunan [J]. *J Guilin College Geol*, 1994, 14(4): 335 ~ 349 (in Chinese with English abstract).
- [56] 涂光焯. 中国层控矿床地球化学(第一卷)[M]. 北京: 科学出版社, 1984. 1 ~ 354.
Tu Guang-chi, *et al.* *Geochemistry of Stratabound Ore Deposits in China (vol. 1)* [M]. Beijing: Science Press, 1984. 1 ~ 354 (in Chinese).
- [57] Gromet L P, Haskin L A, Korotev R L, *et al.* The "North American shale composite": Its compilation, major and trace element characteristics [J]. *Geochim Cosmochim Acta*, 1984, 48 (12): 2 469 ~ 2 482.
- [58] Feng R, Kerrich R. Geochemistry of fine-grained clastic sediments in the Archean Abitibi greenstone belt, Canada: Implications for provenance and tectonic setting [J]. *Geochim Cosmochim Acta*, 1990, 54(4): 1 061 ~ 1 081.
- [59] 林方成. 湖南黄金洞金矿床成矿物质来源及成矿热力学条件研究[D]. 成都: 成都地质学院, 1988.
Lin Fang-cheng. Source of ore-forming materials and thermodynamic conditions for metallogenesis of the Huangjingdong gold deposit, Hunan [D]. Chengdu: Chengdu College of Geology, 1988 (in Chinese with English abstract).
- [60] 张乾, 曹裕波, 张宝贵, 等. 湖南黄金洞金矿床的稀土与微量元素地球化学——矿石成因证据 [J]. *地质与勘探*, 1992, 28 (11): 12 ~ 17.
Zhang Qian, Cao Yu-bo, Zhang Bao-gui, *et al.* Rare and trace element geochemistry of the Huangjingdong Au-deposit, Hunan Province: The evidence of ore genesis[J]. *Geology and Prospecting*, 1992, 28(11): 12 ~ 17 (in Chinese with English abstract).
- [61] McLennan S M. Rare earth elements in sedimentary rocks: Influence of provenance and sedimentary processes [J]. *Rev Mineral*, 1989, 21: 169 ~ 200.
- [62] Pettijohn F J, Potter P E, Siever R. *Sand and Sandstone* [M]. New York: Springer-Verlag, 1972. 1 ~ 618.
- [63] Blatt H, Middleton G V, Murray R. *Origin of Sedimentary Rocks* [M]. Englewood Cliffs, NJ: Prentice-Hall, 1980. 1 ~ 782.
- [64] Bhatia M R, Taylor S R. Trace element geochemistry and sedimentary provinces: A study from the Tasman Geosyncline, Australia [J]. *Chem Geol*, 1981, 33(1-4): 115 ~ 125.
- [65] Maynard J B, Valloni R, Yu H. Composition of modern deep-sea sands from arc-related basins [J]. *Geol Soc London Spec Pub*, 1982, 10: 551 ~ 561.
- [66] 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.
- [67] Cullers R L, Basu A, Suttner L J. Geochemical signature of provenance in sand-size material in soils and stream sediments near the Tobacco Root batholith, Montana, U. S. A. [J]. *Chem Geol*, 1988, 70(7): 335 ~ 348.
- [68] Frost C D, Coombs D S. Nd isotope character of New Zealand sediments: Implications for terrane concepts and crustal evolution [J]. *Am J Sci*, 1989, 289: 744 ~ 770.
- [69] Floyd P A, Shail R, Leveridge B E, *et al.* Geochemistry and provenance of Rhenohercynian synorogenic sandstones: Implications for tectonic environment discrimination. *Developments in sedimentary provenance studies* [J]. *Geol Soc London Spe Pub*, 1991, 57: 173 ~ 188.
- [70] Kumon F, Kiminami K. Modal and Chemical Compositions of the Representative Sandstones from the Japanese Islands and Their Tectonic Implications [A]. Kumon F, Yu K M. *Proceedings 29th IGC, Part A*[C]. Utrecht: VSP, 1994. 135 ~ 151.
- [71] Hemming S R, McLennan S M, Hanson G N. Geochemical and Nd/Pb isotopic evidence for the provenance of the Early Proterozoic Virginia Formation, Minnesota: Implications for the tectonic setting of the Animikie basin[J]. *J Geol*, 1995, 103: 147 ~

- 168.
- [72] Plint A G. Sedimentary Facies Analysis[M]. Oxford: Blackwell, 1995. 1 ~ 384.
- [73] Kroonenberg S B. Effect of Provenance, Sorting and Weathering on the Geochemistry of Fluvial Sands from Different Tectonic and Climatic Environments[A]. Kumon F, Yu K M. Proceedings 29th IGC, Part A[C]. Utrecht: VSP, 1994. 69 ~ 81.
- [74] Van der Kamp P C, Leake B E. Petrography and geochemistry of feldspathic and mafic sediments of the northeastern Pacific margin [J]. Trans R Soc Edinb, 1985, 76: 411 ~ 449.
- [75] Haughton P D W, Todd S P, Morton A C. Sedimentary provenance studies – how and why? [J]. Geol Soc London Spec Pub, 1991. 57: 1 ~ 11.
- [76] Reading H G. Sedimentary Basins and Global Tectonics [J]. Proc Geologists Assoc, 1982, 93: 321 ~ 350.
- [77] McLennan S M, Taylor S R. Sedimentary rocks and crustal evolution: Tectonic setting and secular trends [J]. J Geol, 1991, 99: 1 ~ 21.
- [78] Gu X X, Schulz O, Vavtar F, et al. Jungproterozoische submarine Primärenreicherung und metamorphe 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.
- [79] Hoffman P F. Did the breakout of Laurentia turn Gondwanaland inside-out? [J]. Science, 1991, 252: 1 409 ~ 1 412.
- [80] Hoffman P F. Supercontinents [A]. Encyclopedia of earth system science, Vol. 4 [C]. San Diego: Academic Press, 1992. 323 ~ 328.
- [81] Dalziel I W D. On the organization of American plates in the Neoproterozoic and the breakout of Laurentia[J]. GSA Today, 1992, 2(11): 240 ~ 241.
- [82] McLelland J, Daly J S, McLelland J M. The Grenville orogenic cycle (ca. 1350 – 1000 Ma): An Adirondack perspective [J]. Tectonophysics, 1996, 265: 1 ~ 28.
- [83] Windley B F. The Evolving Continents (3rd ed) [M]. New York: John Wiley, 1995. 1 ~ 526.
- [84] 赵子杰, 马大铨. 桂北前寒武纪花岗岩本洞、三防岩体的研究 [A]. 宜昌地质矿产研究所. 南岭地质矿产科研报告集 (一) [C]. 武汉: 武汉地质学院出版社, 1987. 1 ~ 27.
- Zhao Zi-jie, Ma Da-quan. Study on the Precambrian Bendong and Sanfang granitoids in northern Guangxi [A]. Yichang Institute of Geology and Mineral Resources. Collected Papers of Geology and Mineral Resources of Nanling (vol. 1) [C]. Wuhan: Wuhan College of Geology Press, 1987. 1 ~ 27 (in Chinese).
- [85] 李志昌, 赵子杰. 广西晚元古代本洞和三防花岗岩类岩体 Nd、Sr 同位素特征[J]. 广西地质, 1991, 4(1): 53 ~ 60.
- Li Zhi-chang, Zhao Zi-jie. The characteristics of neodymium and strontium isotopes from late Proterozoic granite masses in Bendong and Sanfang, Guangxi[J]. Guangxi Geology, 1991, 4(1): 53 ~ 60 (in Chinese with English abstract).
- [86] 周新民, 朱云鹤. 江绍断裂带的岩浆混合作用及其两侧的前寒武纪地质[J]. 中国科学(B辑), 1992, 35(3): 296 ~ 303.
- Zhou Xin-min, Zhu Yun-he. Magma contamination of the Jiangshan-Shaoxing fault zone and Precambrian geology in its adjacent regions[J]. Sci China (B), 1992, 35(3): 296 ~ 303 (in Chinese).
- [87] 葛文春, 李献华, 李正祥, 等. 桂北新元古代两类过铝花岗岩的地球化学研究[J]. 地球化学, 2001, 30(1): 24 ~ 34.
- Ge Wen-chun, Li Xian-hua, Li Zheng-xiang, et al. Geochemical studies on two types of Neoproterozoic peraluminous granitoids in northern Guangxi [J]. Geochimica, 2001, 30(1): 24 ~ 34 (in Chinese with English abstract).
- [88] Li Xian-hua, Li Zheng-xiang, Ge Wen-chun, et al. Neoproterozoic granitoids in South China: Crustal melting above a mantle plume at ca. 825 Ma? [J]. Precambrian Res, 2003, 122(1–4): 45 ~ 83.
- [89] Li Z X, Li X H, Kinny P D, et al. Geochronology of Neoproterozoic syn-rift magmatism in the Yangtze Craton, South China and correlations with other continents: Evidence for a mantle superplume that broke up Rodinia [J]. Precambrian Res, 2003, 122(1–4): 85 ~ 109.
- [90] Ling Hong-fei, Shen Wei-zhou, Zhang Bang-tong, et al. Nd isotopic composition and material source of Pre- and Post-Sinian sedimentary rocks in Xiushui area, Jiangxi Province [J]. Chinese J Geochem, 1992, 11(1): 80 ~ 87.
- [91] 郝杰, 李曰俊, 胡文虎. 晋宁运动和震旦系有关问题[J]. 中国区域地质, 1992, 11(2): 131 ~ 140.
- Hao Jie, Li Yue-jun, Hu Wen-hu. Jinning movement and related problems of Sinian [J]. Regional Geology in China, 1992, 11(2): 131 ~ 140 (in Chinese).
- [92] 徐树桐, 陆镜元, 张维明, 等. 皖南祁门-歙县地区元古界变质岩地层原始构造环境与变形[J]. 地质科学, 1979, 14(2): 101 ~ 115.
- Xu Shu-tong, Lu Jing-yuan, Zhang Wei-ming, et al. Primary tectonic environment and deformation of strata of Proterozoic metamorphics in the Qimen-Shexian region of southern Anhui [J]. Scientia Geologica Sinica, 1979, 14(2): 101 ~ 115 (in Chinese with English abstract).
- [93] 刘忠伟, 杨舜全. 湖南省构造体系主要特征[A]. 地矿部地质力学所. 中国分省构造体系研究文集(二)[C]. 北京: 地质出版社, 1985. 29 ~ 47.
- Liu Zhong-wei, Yang Shun-quan. Major features of tectonic systems in Hunan [A]. Institute of Geomechanics, Ministry of Geology and Mineral Resources. Study on Tectonic Systems in China, (vol. 2) [C]. Beijing: Geological Publishing House, 1985. 29 ~ 47 (in Chinese).
- [94] 刘建明, 顾雪祥, 刘家军, 等. 华南巨型锑矿带的特征及其制约因素[J]. 地球物理学报, 1998, 41(增刊): 206 ~ 215.
- Liu Jian-ming, Gu Xue-xiang, Liu Jia-jun, et al. Giant metallogenic Sb belt in South China and its constraints [J]. Acta Geophys Sinica, 1998, 41(suppl): 206 ~ 215 (in Chinese with English abstract).

Geochemical constraints on the tectonic setting of the Proterozoic turbidites in the Xuefeng Uplift region of the Jiangnan orogenic belt

GU Xue-xiang^{1,2}, LIU Jian-ming³, SCHULZ Oskar⁴, VAVTAR Franz⁴, ZHENG Ming-hua²

(1. *Institute of Geochemistry, Chinese Academy of Sciences, Guiyang 550002, China*; 2. *College of Earth Sciences, Chengdu University of Technology, Chengdu 610059, China*; 3. *Institute of Geology and Geophysics, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100029, China*; 4. *Institute of Mineralogy and Petrography, University of Innsbruck, A-6020 Innsbruck, Austria*)

Abstract: The geochemical compositions of the Proterozoic turbidites in the Jiangnan orogenic belt well reflect plate tectonic setting of the sedimentary basin and provides some useful information for interpretation of the nature and evolutionary history of the regional tectonics of South China. In terms of major element compositions, different Proterozoic groups and formations have no distinct differences and on the whole are characterized by intermediate SiO₂ contents and K₂O/Na₂O ratios and relatively high Fe₂O₃* + MgO contents. The REE distribution patterns are uniform and similar to typical post-Archean shales (e. g., PAAS and NASC) and the upper continental crust, with LREE enrichment, flat HREE, and significant negative Eu-anomalies. Abundances of ferromagnesian trace elements and large-ion lithophile (LIL) elements are moderate. Characteristics of major and trace elements indicate that the Proterozoic turbidites of the study area most probably represent the infill of an active continental back arc basin. An intracontinental rift model, as proposed by some workers, is invalid as interpreting the Neoproterozoic tectonic setting of South China. Suturing between the Yangtze and Cathaysia blocks as well as the final assembly of the supercontinent Rodinia in South China occurred during the Jingning (Xuefeng) orogeny at around 0.8 Ga, rather than the Sibao (Dong'an) orogeny at the late stage of the global Grenville movement.

Key words: geochemical constraints; tectonic setting; turbidites; Proterozoic; Xuefeng Uplift; Jiangnan orogenic belt