

西乡群的时代与构造背景: 同位素年代学及地球化学制约*

凌文黎^{①②} 高山^{①③} 欧阳建平^① 张本仁^① 李惠民^④

(①中国地质大学地球科学学院, 武汉 430074; ②岩石圈构造、深部过程及探测技术教育部重点实验室, 武汉 430074;

③西北大学地质系, 西安 710069; ④天津地质矿产研究所, 天津 300170)

摘要 对西乡群下部白勉峡组和上部孙家河组进行了颗粒级锆石 U-Pb 同位素定年, 分别获得了 (946 ± 18) 和 (904 ± 18) Ma 的谐和年龄. 西乡群火山岩具有岛弧岩浆岩组合的元素和同位素地球化学特征, 且其形成环境具有由早期的前弧向晚期的弧后拉张盆地转变的演化趋势, 表明扬子西北缘于约 0.95~0.90 Ga 的晋宁期为活动性大陆边缘. 西乡群火山岩受到了后期(0.83~0.75 Ga)较大规模构造热事件的影响, 并使其 Rb-Sr 同位素体系发生了重置.

关键词 扬子陆块 西乡群 年代学 地球化学 构造背景

秦岭-大别造山带是扬子与华北陆块于显生宙拼合的接合部, 伴随造山过程所引起的地壳抬升, 使得造山带及两侧陆缘大量的前寒武纪基底岩系被暴露出来, 其中许多岩系的形成与晋宁期构造-岩浆事件有关^[1~5]. 晋宁运动是我国东部岩石圈前寒武纪演化过程中一次重要的造山运动, 如导致了扬子陆块与华夏陆块的拼合而形成了统一的华南陆块^[6,7]. 南秦岭及相邻的扬子西北缘出露有众多晋宁期地质体或构造岩石单元, 如南秦岭武当群火山岩、耀岭河群火山岩和扬子西北缘汉中地区的汉南杂岩体及西乡群火山岩等^[8], 这些区域因而成为研究晋宁构造运动性质与演化的代表性地区.

秦岭造山带及两侧陆缘晋宁期构造-岩浆事件的研究工作虽已有相当的积累, 但仍存在一些亟待解决的问题. 如汉南米仓山地区出露有多处晋宁期地质体, 但其同位素定年数值十分分散, 所报导的结果分布在 600~1100 Ma 的年龄范围内. 显然, 将晋宁运动的持续时间理解为几乎相当于整个显生宙并不合理, 况且许多地质体受到了震旦系的覆盖, 而其底部莲沱组内凝灰岩中锆石 SHRIMP U-Pb 定年结果为 (748 ± 12) Ma^[9]. 此外, 不精确的年代学定值也给探讨不同构造环境下岩浆事件之间的相互关系及岩石圈构造演化带来困难. 因此, 以高精度同位素年代学研究为基础, 结合系统配套的元素和同位素地球化学研究, 将对提高本地区晋宁期构造性质与演化的研究程度起到重要的推动作用.

本文报道了陕南西乡群火山岩颗粒级锆石 U-Pb 同位素高精度定年结果, 结合系统的元素和 Sm-Nd, Rb-Sr 同位素地球化学示踪研究, 对其形成时代和构造背景进行了探讨.

2001-08-29 收稿, 2001-10-08 收修稿稿

* 国家自然科学基金(批准号: 49873010, 49794043, 49573138)、国土资源部“十五”科技(编号: 20001010203)资助项目

1 地质概况

西乡群位于扬子陆块西北缘向北突出的米仓山系, 其北缘紧邻秦岭造山带, 而东、西两侧分别为龙门山和大巴山推覆构造带(图 1(a)). 米仓山地区基本地质单元由老至新可分为: 新太古代(?) - 古元古代结晶基底(后河杂岩)、中-新元古代火地垭群和新元古代西乡群变形基底、震旦纪和显生宙表壳岩系.

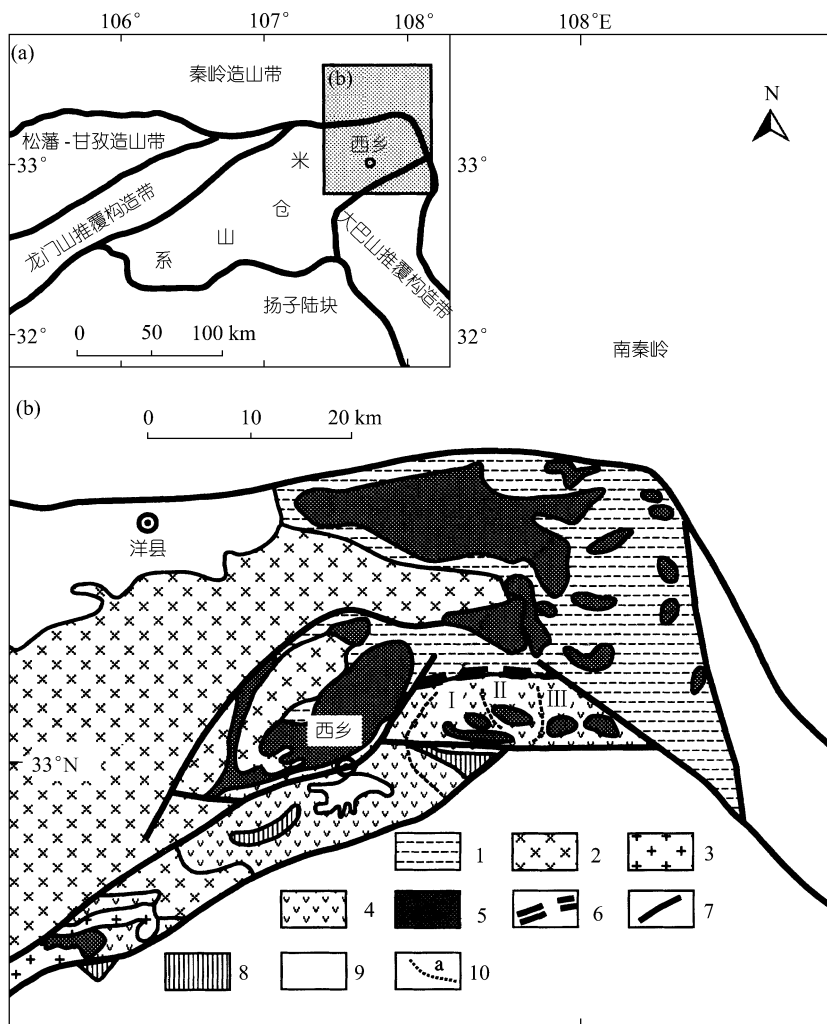


图 1 西乡地区简要地质图

1. 火地垭群; 2. 闪长质侵入岩; 3. 花岗质侵入岩; 4. 西乡群火山岩; 5. 辉长质侵入岩; 6. 韧性剪切带; 7. 断裂; 8. 震旦系; 9. 显生宙; 10. 采样剖面及编号

后河杂岩(或称后河岩群)可与四川境内康定群对比, 主要由高角闪岩相 TTG 片麻岩、斜长角闪片岩和副片麻岩组成, 分布于米仓山系西南部的碑坝-马元及其以西区域. 片麻岩中锆石蒸发法 $^{207}\text{Pb}/^{206}\text{Pb}$ 定年得到了新太古代至古元古代的年龄^[10], 其 Sm-Nd 同位素模式年龄也多为新太古代^[11].

火地垭群由绿片岩相麻窝子组、上两组变沉积岩和铁船山组火山岩组成, 不整合于后河杂

岩之上. 上两组变凝灰岩锆石蒸发法 $^{207}\text{Pb}/^{206}\text{Pb}$ 定年和麻窝子组内所含叠层石化石表明, 其形成时代约为 $1.6\sim 1.1\text{ Ga}^{[10]}$. 本文作者(未刊数据)曾对铁船山组流纹岩进行了颗粒级锆石 U-Pb 同位素定年, 获得了 $(806 \pm 14)\text{ Ma}$ 的谐和年龄. 火地垭群定名于碑坝及其以西区域内岩系, 但近年将区域东北缘、原定名三花石群的元古宙变质地层划入火地垭群, 并认为与上两组相当.

西乡群位于米仓山系东北部, 呈近北东-南西向分布, 出露面积约 400 km^2 , 并以断裂带或韧性剪切带与周边地质单元接触(图 1(b)). 西乡群分为底部的白勉峡组、三湾组和中上部的孙家河、三郎铺及大石沟组. 虽组间地质界线野外观察困难, 但大石沟组和三郎铺组含有孙家河组流纹质熔岩角砾, 以及白勉峡组、三湾组的变质略强于其他组, 其时间层序应大体合理. 三湾组和白勉峡组岩性以玄武质和安山质熔岩为主, 含少量长英质熔岩或凝灰岩. 孙家河组以长英质熔岩为主, 并与一定数量的玄武-安山质熔岩互层, 部分区段流纹质熔岩含钾长石斑晶, 并与次火山岩相过渡. 大石沟组和三郎铺组以其底部含流纹质火山岩角砾为标志, 向上渐变为砂砾岩和砂岩, 部分区段出现流纹质熔岩或凝灰岩, 局部有爆破火山岩相组合.

晋宁期岩体侵入西乡群和火地垭群, 并受震旦系覆盖. 东段代表性岩体有望江山辉长岩群(图 1(b))和汉南中酸性杂岩体, 西南段则以碑坝辉长岩和天平河、扬家沟闪长岩岩体和铁船山碱性花岗岩等为代表.

表壳岩底部为震旦系, 下震旦统缺失, 上震旦统发育较完整(观音崖组和灯影组). 显生宇与震旦系呈平行不整合, 分布有从寒武纪至侏罗纪地层(其中泥盆纪-石炭纪有缺失).

2 样品与分析

沿西乡群各定组剖面进行了系统样品采集(图 1(b)), 其中大石沟组和孙家河组样品取自剖面 I, 而三湾组和白勉峡组分别取自剖面 II 和 III. 基于野外与镜下观察、岩石化学组成, 选取了 28 件新鲜火山岩熔岩样品进行微量元素和同位素分析. 岩石化学分析由湖北地质矿产局岩矿分析测试中心完成, 所有氧化物误差(RSD)小于 5%. 微量元素分析在中国科学院广州地球化学研究所用 Perkin-Elmer Sciex ELAN 6000 等离子体质谱(ICP-MS)完成, 经国际标样(GSR-1 花岗岩、BHVO-2 安山岩和 BCR1 玄武岩)监测, 绝大多数元素误差(RSD)小于 5%~10%, 部分过渡族元素(Sc, Ni)和部分 HREE 相对误差为 10%~20%. 微量元素样品制备与测试流程参见文献[12]. 样品 5416 微量元素组成未测定.

Sm-Nd 和 Rb-Sr 同位素分析由中国地质大学岩石圈构造、深部过程及探测技术教育部重点实验室完成. 每件样品称取约 60~100 mg 粉末(约 200 目)两份于溶样弹(bomb)内, 其中一份按近似最佳稀释比加入 ^{85}Rb , ^{84}Sr , ^{145}Nd 和 ^{149}Sm 混合稀释剂用作 Rb, Sr, Nd 和 Sm 含量定量分析, 另一份用于 $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ 和 $^{143}\text{Nd}/^{144}\text{Nd}$ 同位素比值测定. 样品加入 1:1 浓 HF 和浓 HNO_3 , 置于电热板上(约 105°C)过夜蒸干. 再次加入 1:1 浓 HF 和浓 HNO_3 , 并装入溶样弹金属外套中, 置入恒温箱内, 在 190°C 温度下恒温 48 h. 溶毕样品在电热板上用 HClO_4 赶尽 HF 后, 转化为氯化物盐类. 按标准流程用 AG50WX8 阳离子交换树脂分离、纯化 Rb, Sr 和 REE, 用 P_{204} 树脂(HDEHP)实现 Nd 与 Sm 的分离与纯化, 并备作质谱分析. 同位素分析全程本底 Sm 和 Nd 分别约为 35 和 100 pg, Rb 和 Sr 分别约为 100 pg. 质谱分析采用静态多接收方式采集数据, $^{143}\text{Nd}/^{144}\text{Nd}$ 和 $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ 内部分析精度优于 0.005%(RSD, $2\sigma_m$), $^{143}\text{Nd}/^{144}\text{Nd}$ 和 $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ 比值分别按 $^{146}\text{Nd}/^{144}\text{Nd} = 0.7219$ 和 $^{88}\text{Sr}/^{86}\text{Sr} = 8.37521$ 进行校正. La Jolla 标准 $^{143}\text{Nd}/^{144}\text{Nd}$ 测定值为

$0.511860 \pm 5 (n = 3)$, GBW04419 玄武岩标准分析结果($n = 2$)为 $^{143}\text{Nd}/^{144}\text{Nd} = 0.512723 \pm 5$, $\text{Nd} = 10.14 \times 10^{-6}$, $\text{Sm} = 3.032 \times 10^{-6}$. NBS987 标准 $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ 的测定值为 $0.710271 \pm 10 (n = 5)$, GBW04411 钾长石标准测定结果为 $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr} = 0.760024 \pm 12$, $\text{Sr} = 158.1 \times 10^{-6}$, $\text{Rb} = 246.1 \times 10^{-6} (n = 2)$.

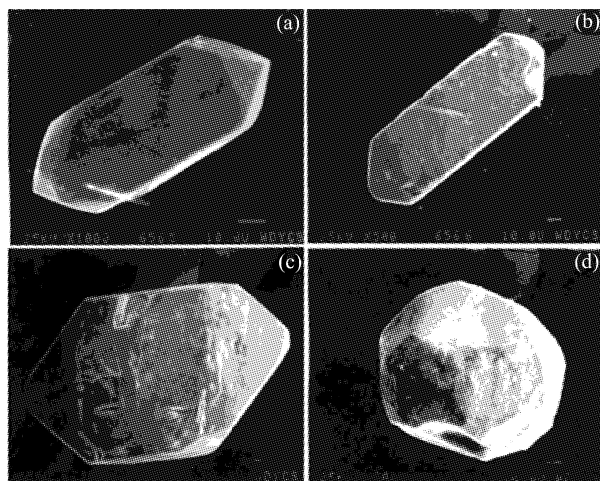


图 2 西乡群火山岩锆石晶体 SEM 扫描图

(a), (b) 示孙家河组; (c), (d) 示白勉峡组

对西乡群白勉峡组和孙家河组样品进行了大样采集以分选锆石单矿物. 孙家河组大样与 SGH-2(流纹岩)采于同一露头, 而白勉峡组大样为采于剖面Ⅲ的独立样品(英安岩). 样品经重矿物富集后, 用手选方法选出锆石晶体. 孙家河组锆石晶形完整, 多为长柱状浅紫红色透明晶体(图 2(a), (b)). 白勉峡组锆石晶形完整, 但多为短柱状浅紫红色透明晶体(图 2(c), (d)). 经扫描电子显微镜(SEM)成像检查, 尤其是对垂直于晶体断面进行的扫描表明, 未发现环带或继承核. 对两件样品进行了颗粒级锆石 U-Pb 同位素定年, 每件样品测定 4 组, 每组由 1~5

粒锆石晶体组成. 分析由国土资源部天津地质研究所同位素实验室完成. 溶样采用组合式溶样弹和 ^{205}Pb - ^{235}U 混合稀释剂, 并在 VG-354 质谱仪上用 Daly 检测器进行单杯动态 U, Pb 同位素测定, 详细分析流程参见文献[13].

3 年代学和地球化学特征

3.1 锆石 U-Pb 年龄

白勉峡和孙家河组锆石 U-Pb 同位素分析数据列于表 1, 其各组锆石 U-Pb 同位素组成均落于 $^{207}\text{Pb}/^{235}\text{U}$ - $^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$ 图解的谐和曲线上(图略), 无明显的放射成因铅丢失. 白勉峡组和孙家河组锆石 $^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$, $^{207}\text{Pb}/^{235}\text{U}$ 和 $^{207}\text{Pb}/^{206}\text{Pb}$ 加权平均表面年龄分别为(946 ± 18), (949 ± 10), (950 ± 12)和(904 ± 18), (900 ± 12), (895 ± 8) Ma, 在统计学意义上, 各样品 3 组同位素比值所获年龄相同, 代表了火山熔岩的形成年龄. 张宗清等^[4]从西乡古城北东约 500 m 黄土梁附近的孙家河组火山岩(距本文孙家河组样品点约 2.3 km)中获得了(896 ± 13) Ma 的锆石蒸发法 $^{207}\text{Pb}/^{206}\text{Pb}$ 年龄, 与本文数据相符. 由于白勉峡和孙家河组分别位于西乡群火山岩系的下、上部, 它们之间 40~50 Ma 的年龄差异代表了岩浆作用的持续时间.

3.2 地球化学特征

样品主量、微量元素及 Sm-Nd 和 Rb-Sr 同位素组成分别列于表 2 和 3. 在 TAS 图解上(图略), 样品岩性呈由玄武质向流纹质的连续分布, 且除孙家河组少量流纹岩外, 均为亚碱性. 西乡群火山岩总体上表现出底部以镁铁质为主, 上部以长英质为主, 但各组均存在不同比例的安山质岩石; 火山岩组合主体为亚碱性, 且依 SiO_2 与 K_2O 关系, 镁铁质岩类主要为中钾-高钾质系列, 但部分样品分别为低钾质(如 5408, 5410, 5413 和 5414)或钾玄质(shoshonitic)岩系(如 5520).

表 1 西乡群火山岩锆石 U-Pb 同位素组成与表面年龄^{a)}

颗粒样号		重量 /g	U × 10 ⁶	Pb × 10 ⁶	普通 Pb /ng	²⁰⁶ Pb/ ²⁰⁴ Pb	放射成因同位素比值				表面年龄/Ma		
							²⁰⁸ Pb/ ²⁰⁶ Pb	²⁰⁶ Pb/ ²³⁸ U	²⁰⁷ Pb/ ²³⁵ Th	²⁰⁷ Pb/ ²⁰⁶ Pb	²⁰⁶ Pb/ ²³⁸ U	²⁰⁷ Pb/ ²³⁵ Th	²⁰⁷ Pb/ ²⁰⁶ Pb
BMX-Zir	1	15	308	57	0.068	682	0.1602	0.1602 (16)	1.563 (21)	0.07073 (55)	958 (9)	955 (8)	950 (16)
	2	15	156	29	0.037	629	0.1706	0.1590 (30)	1.552 (41)	0.07082 (118)	951 (17)	951 (16)	952 (34)
	3	15	220	40	0.056	758	0.1590	0.1569 (23)	1.522 (37)	0.07035 (132)	940 (13)	939 (15)	939 (38)
	4	15	141	24	0.009	2362	0.1645	0.1551 (34)	1.523 (47)	0.07120 (138)	930 (19)	940 (19)	963 (40)
											946 (18) ^{b)}	949 (10) ^{b)}	950 (12) ^{b)}
SJH-Zir	1	10	908	146	0.046	1836	0.1429	0.1493 (8)	1.420 (11)	0.06897 (32)	897 (5)	897 (5)	898 (10)
	2	10	538	94	0.094	537	0.1581	0.1495 (13)	1.413 (19)	0.06857 (60)	898 (7)	894 (8)	886 (18)
	3	10	267	44	0.009	2649	0.1686	0.1498 (27)	1.420 (33)	0.06876 (91)	900 (15)	898 (14)	891 (27)
	4	10	237	40	0.020	1109	0.1574	0.1538 (21)	1.459 (28)	0.06880 (85)	922 (12)	913 (12)	893 (26)
											904 (18) ^{b)}	900 (12) ^{b)}	895 (8) ^{b)}

a) ²⁰⁶Pb/²⁰⁴Pb 比值已进行全程本底(Pb = 0.050 ng, U = 0.002 ng)和稀释剂校正, 括号内数字表示误差(2σ), 数值精确到末位(或末二位)

b) 加权平均年龄(95%置信度)

表 2 西乡群火山岩主量元素(%)和微量元素($\times 10^{-6}$)组成^{a)}

样品 岩性*	大石沟组					孙家河组								
	5002	5006	5008	5109	5112	SGH-1	SGH-2	5201	5204	5208	5211	5212	5215	
	RHY	RHY	BAA	AND	AND	AND	RHY	BAS	DAC	RHY	RHY	BAA	TRD	
SiO ₂	69.16	69.92	54.79	58.58	59.49	61.59	74.28	48.81	66.82	74.22	74.20	52.77	64.79	
TiO ₂	0.40	0.40	1.37	0.97	1.05	0.70	0.22	2.49	0.91	0.25	0.22	1.21	0.83	
Al ₂ O ₃	15.47	15.93	17.60	16.91	15.52	16.73	12.75	14.67	15.21	12.69	13.54	17.77	16.07	
Fe ₂ O ₃	2.67	2.26	7.99	6.09	4.24	2.37	1.10	8.19	1.37	3.05	1.60	3.95	1.27	
FeO	0.25	0.13	0.91	1.18	2.53	3.33	1.38	5.50	2.86	0.34	0.18	4.36	2.86	
MnO	0.04	0.03	0.15	0.12	0.14	0.11	0.04	0.23	0.12	0.13	0.03	0.16	0.11	
MgO	0.30	0.43	3.13	4.24	5.60	2.01	0.21	4.65	1.25	0.10	0.10	3.41	1.28	
CaO	0.25	0.43	5.39	1.84	1.35	3.51	0.47	7.77	1.84	0.24	0.24	7.22	2.33	
Na ₂ O	3.60	4.84	3.29	3.04	4.16	5.66	4.20	2.50	5.76	3.73	4.06	4.53	4.84	
K ₂ O	6.41	4.38	1.49	2.66	2.36	1.39	3.97	1.65	1.65	4.38	4.51	0.59	3.03	
P ₂ O ₅	0.09	0.08	0.26	0.20	0.23	0.17	0.02	0.22	0.28	0.02	0.01	0.43	0.28	
CO ₂						0.02	0.15							
H ₂ O ⁺	1.04	0.86	3.29	3.86	3.33	2.20	0.96	2.95	1.59	0.92	0.75	3.27	1.60	
总计	99.68	99.69	99.66	99.69	100.00	99.79	99.75	99.63	99.66	100.07	99.44	99.67	99.29	
Cr	2.71	0.790	113	102	83.6	27.0	4.44	131	7.23	2.02	2.31	64.4	4.34	
Ni			56.7	47.8	37.5	15.4		19.2	0.940			26.9		
Rb	170	131	31.3	105	52.1	36.6	104	69.8	73.5	106	152	27.1	84.9	
Sr	201	175	361	158	148	373	105	384	414	48.7	40.3	751	461	
Y	29.4	24.5	28.2	20.6	33.4	20.7	88.3	40.3	34.1	100	82.6	27.6	28.9	
Zr	241	274	155	128	190	127	380	125	234	383	427	148	190	
Nb	8.13	9.33	5.82	4.45	7.59	5.40	18.9	3.07	7.59	19.4	19.6	6.91	6.83	
Cs	2.83	2.83	3.10	4.98	2.65	0.417	1.16	2.27	1.47	1.11	1.31	0.887	1.08	
Ba	815	888	464	433	573	411	934	420	1300	763	751	497	1351	
La	34.8	29.9	18.9	14.8	20.8	21.8	52.5	9.56	36.9	53.1	37.9	28.5	29.7	
Ce	61.2	55.8	40.7	32.8	42.1	45.2	110	24.8	76.5	113	90.1	60.6	62.5	
Pr	7.79	6.51	5.41	4.31	5.53	5.66	14.9	3.76	9.85	14.1	11.0	7.83	8.29	
Nd	27.0	23.6	21.8	17.3	22.2	23.2	57.2	17.6	37.2	56.6	42.6	31.6	32.8	
Sm	5.52	4.40	5.04	4.13	5.57	4.91	14.2	5.16	8.18	12.7	10.3	7.06	7.02	
Eu	1.13	1.14	1.52	1.24	1.63	1.46	2.28	2.04	2.11	2.25	1.64	2.08	1.92	
Gd	5.78	4.85	5.54	4.34	5.93	4.50	15.3	6.66	8.13	15.4	11.5	6.71	6.77	
Tb	0.856	0.755	0.875	0.671	0.957	0.674	2.57	1.16	1.15	2.69	2.22	0.944	0.982	
Dy	5.08	4.38	5.24	3.92	5.86	3.85	16.6	7.45	6.48	17.6	15.0	4.95	5.46	
Ho	1.03	0.872	1.01	0.736	1.09	0.710	3.45	1.45	1.28	3.53	2.99	0.944	1.09	
Er	3.09	2.56	2.91	2.22	3.22	2.10	10.3	4.16	3.77	10.6	9.41	2.71	3.08	
Tm	0.467	0.407	0.434	0.308	0.485	0.315	1.53	0.585	0.564	1.60	1.52	0.376	0.459	
Yb	3.34	2.78	2.82	2.05	3.15	2.00	10.4	3.79	3.74	10.2	10.3	2.49	3.06	
Lu	0.497	0.441	0.423	0.328	0.458	0.313	1.59	0.575	0.558	1.53	1.63	0.396	0.487	
Hf	6.91	7.56	4.24	3.42	4.91	3.48	12.5	3.62	6.61	11.8	13.8	3.51	5.72	
Ta	0.775	0.843	0.417	0.341	0.531	0.335	1.39	0.245	0.494	1.34	1.46	0.399	0.429	
Th	15.9	18.2	4.67	4.21	6.01	4.36	14.2	1.45	9.28	13.7	14.7	4.73	6.97	
U	2.12	3.89	1.12	1.01	1.47	1.15	3.86	0.454	2.44	3.59	3.96	1.17	1.76	

表 2(续)

	孙家河组				三湾组				白勉峡组						
样品	5216	5220	5408	5410	5413	5414	5415	5416	5503	5509	5516	5519	5520	BMX-1	BMX-2
岩性*	DAC	RHY	BAS	BAA	AND	BAS	DAC	DAC	BAA	BAA	BAA	BAS	BAA	BAS	BAS
SiO ₂	68.46	74.82	50.35	56.37	57.65	48.93	64.24	65.61	53.54	56.65	52.12	49.00	53.07	48.54	50.94
TiO ₂	0.78	0.21	0.65	0.47	1.07	1.41	0.69	0.68	1.70	1.67	1.37	0.64	0.58	0.69	0.56
Al ₂ O ₃	15.74	13.05	14.78	12.82	13.67	16.53	16.76	16.48	13.24	13.63	16.69	12.67	13.08	17.36	15.59
Fe ₂ O ₃	2.25	2.06	2.94	3.82	6.09	6.41	4.37	3.64	6.88	11.35	4.24	5.82	4.59	6.77	3.01
FeO	1.24	0.31	7.03	5.11	4.15	5.02	0.97	0.65	7.35	1.85	5.52	4.35	4.24	4.18	7.22
MnO	0.09	0.07	0.36	0.19	0.15	0.18	0.10	0.06	0.18	0.07	0.15	0.14	0.16	0.15	0.12
MgO	0.98	0.73	9.63	8.65	3.82	4.21	1.70	1.51	4.59	4.90	6.78	11.73	8.20	5.35	6.58
CaO	0.98	0.43	6.85	5.39	4.81	8.79	1.59	1.63	5.26	1.86	3.30	8.00	7.59	10.17	3.71
Na ₂ O	5.00	4.90	3.09	3.19	4.35	3.49	4.84	2.08	3.04	0.48	3.98	1.52	1.85	2.44	4.29
K ₂ O	2.46	1.90	0.10	0.20	0.26	0.14	1.74	3.69	0.39	3.35	0.60	0.45	2.75	0.04	0.86
P ₂ O ₅	0.18	0.05	0.05	0.05	0.12	0.14	0.18	0.44	0.25	0.05	0.16	0.24	0.24	0.19	0.23
CO ₂					1.09	1.16		0.09		0.04	0.04	0.04		0.04	2.12
H ₂ O ⁺	1.69	1.15	4.08	3.44	2.52	3.37	2.46	3.19	3.34	3.93	4.84	5.07	3.28	3.85	4.61
总计	99.85	99.68	99.91	99.70	99.75	99.78	99.64	99.75	99.76	99.83	99.79	99.67	99.63	99.77	99.84
Cr	5.4	15.5	271	209	621	506	46.3		0.18	26.2	208	862	553	33.2	127
Ni		2.99	111	97.8	145	171	13.4		12.3	16.1	55.6	222	152	25.2	52.6
Rb	81.1	97.8	0.898	3.21	8.36	4.28	52.3		3.41	66.9	13.6	8.19	52.4	9.06	11.6
Sr	209	125	217	92.0	82.3	101	249		175	57.3	202	565	436	680	68.7
Y	35.3	64.7	16.7	15.6	32.9	30.3	22.0		47.9	28.5	31.0	13.3	12.7	13.3	13.0
Zr	270	160	17.5	13.4	47.0	67.9	111		151	123	126	39.6	42.2	40.9	39.9
Nb	8.44	16.4	1.15	0.629	2.77	3.62	6.79		13.4	6.13	4.18	2.61	2.49	2.54	2.00
Cs	2.04	2.36	0.097	0.106	0.519	0.187	2.12		0.116	2.15	0.578	0.19	0.713	0.290	0.360
Ba	999	440	45.4	48.1	76.0	35.2	599		91.9	178	112	173	1859	116	99.8
La	31.1	37.0	1.76	0.977	4.07	4.54	20.1		13.7	10.8	12.1	6.73	8.91	16.6	6.93
Ce	77.9	78.4	4.62	2.92	10.8	12.7	39.6		32.0	26.7	27.2	15.8	19.4	31.6	14.5
Pr	8.53	10.8	0.768	0.510	1.72	1.99	4.81		4.55	4.04	4.04	2.15	2.70	4.03	2.03
Nd	33.4	41.8	4.16	2.96	9.11	10.1	19.0		20.3	18.5	17.7	9.42	11.1	16.1	8.81
Sm	7.30	10.2	1.50	1.21	2.95	3.33	4.03		5.41	5.07	4.94	2.30	3.12	3.36	2.33
Eu	1.77	1.13	0.457	0.414	1.10	1.38	1.30		1.59	1.81	1.50	0.705	1.01	1.08	0.767
Gd	7.41	11.2	2.12	1.84	4.21	4.32	4.32		6.91	6.15	5.59	2.47	2.83	3.23	2.29
Tb	1.13	1.83	0.423	0.370	0.801	0.79	0.653		1.20	0.979	0.929	0.381	0.408	0.455	0.36
Dy	6.69	11.8	2.88	2.63	5.43	4.87	3.99		8.03	6.07	6.06	2.27	2.39	2.36	2.27
Ho	1.28	2.31	0.611	0.549	1.12	1.03	0.763		1.64	1.16	1.18	0.444	0.464	0.469	0.47
Er	4.02	7.15	1.81	1.66	3.11	2.97	2.34		5.10	3.30	3.34	1.30	1.37	1.39	1.37
Tm	0.589	1.12	0.276	0.242	0.485	0.45	0.371		0.763	0.482	0.507	0.201	0.207	0.197	0.208
Yb	3.89	7.35	1.82	1.66	2.99	2.88	2.47		5.23	3.06	3.34	1.31	1.38	1.29	1.44
Lu	0.622	1.07	0.278	0.255	0.463	0.431	0.401		0.784	0.450	0.486	0.205	0.208	0.195	0.217
Hf	7.79	6.23	0.678	0.560	1.34	2.07	3.48		4.06	3.41	3.63	1.19	1.28	1.106	1.00
Ta	0.554	1.30	0.082	0.048	0.180	0.244	0.443		0.939	0.369	0.305	0.148	0.153	0.132	0.112
Th	10.3	16.9	0.122	0.057	0.266	0.307	4.28		1.64	1.17	2.48	1.04	1.19	2.72	0.760
U	2.70	3.97	0.079	0.030	0.057	0.082	1.12		0.534	0.166	0.714	0.474	0.427	0.541	0.379

a) 表内 BAS 示玄武岩; BAA 示玄武安山岩; AND 示安山岩; DAC 示英安岩; TRD 示粗面英安岩; RHY 示流纹岩

表 3 西乡群火山岩 Sm-Nd, Rb-Sr 同位素组成^{a)}

样品	¹⁴³ Nd/ ¹⁴⁴ Nd	RE ^{a)}	Nd /10 ⁻⁶	Sm /10 ⁻⁶	¹⁴⁷ Sm/ ¹⁴⁴ Nd	⁸⁷ Sr/ ⁸⁶ Sr	RE ^{a)}	⁸⁷ Rb/ ⁸⁶ Sr	Sr /10 ⁻⁶	Rb /10 ⁻⁶	T _{DM} (Ga) ^{b)}	T _{2DM} (Ga) ^{c)}	ε _{Nd(t)} ^{d)}
大石沟组													
5002	0.512356	5	26.71	5.178	0.1172	0.731743	45	2.116	197.5	144.1	1.25	1.20	3.66
5006	0.512367	7	21.48	4.073	0.1146	0.726085	43	2.098	158.3	114.6	1.20	1.17	4.17
5008	0.512525	5	20.74	4.739	0.1381	0.706188	45	0.2382	358.9	29.54	1.26	1.14	4.55
5109	0.512548	8	17.40	3.950	0.1373	0.722285	33	1.721	152.6	90.64	1.20	1.10	5.10
5112	0.512400	5	23.50	5.404	0.1390	0.712360	48	0.9515	139.4	45.81	1.53	1.32	2.01
孙家河组													
5201	0.512866	5	16.18	4.722	0.1765	0.709263	35	0.4619	349.7	55.82	1.16	0.99	6.79
5204	0.512404	5	35.03	7.104	0.1226	0.709360	31	0.4699	385.8	62.65	1.25	1.18	3.98
5208	0.512575	5	54.83	13.28	0.1464	0.764902	65	5.955	42.98	87.98	1.30	1.14	4.57
5211	0.512572	5	40.35	10.01	0.1500	0.804765	33	9.183	36.74	115.5	1.38	1.17	4.10
5212	0.512491	5	31.43	6.493	0.1249	0.704959	24	0.0998	774.2	26.70	1.13	1.08	5.42
5215	0.512372	5	30.25	6.158	0.1231	0.709754	25	0.4893	413.5	69.93	1.31	1.23	3.30
5216	0.512370	6	30.59	6.374	0.1260	0.715209	18	1.042	192.1	69.11	1.35	1.25	2.93
5220	0.512447	7	37.80	9.016	0.1442	0.724965	29	2.436	100.6	84.56	1.54	1.30	2.32
SGH-1	0.512435	5	24.62	5.010	0.1230	0.706791	17	0.2528	369.7	32.30	1.20	1.14	4.53
SGH-2	0.512595	4	54.18	12.56	0.1401	0.731525	54	2.725	96.47	90.64	1.15	1.06	5.69
三湾组													
5408	0.513059	7	4.026	1.431	0.2149	0.704393	26	0.00861	369.0	1.098	-12.20	1.08	6.02
5410	0.513192	7	2.960	1.143	0.2336	0.705791	36	0.0669	184.9	4.275	0.32	1.06	6.34
5413	0.512997	6	8.724	2.863	0.1984	0.706679	40	0.2250	87.63	6.815	1.52	1.03	6.81
5414	0.513058	5	10.59	3.360	0.1918	0.704513	19	0.0780	138.6	3.735	0.64	0.89	8.81
5415	0.512458	6	17.08	3.524	0.1248	0.709325	23	0.5346	246.2	45.48	1.19	1.14	5.25
5416	0.512481	9	19.23	4.409	0.1386	0.729211	27	2.415	108.0	90.00	1.36	1.22	4.01
白勉峡组													
5503	0.512708	5	19.59	5.173	0.1597	0.704247	20	0.0363	227.6	2.852	1.25	1.09	5.88
5509	0.512666	5	17.52	4.650	0.1605	0.733602	33	2.782	57.99	55.62	1.38	1.16	4.96
5516	0.512664	5	19.24	4.959	0.1558	0.705101	33	0.1547	215.5	11.53	1.28	1.12	5.49
5519	0.512533	8	9.049	2.076	0.1387	0.703815	21	0.0317	638.4	6.991	1.25	1.15	5.01
5520	0.512519	5	11.78	2.567	0.1318	0.706398	19	0.2708	438.3	41.02	1.17	1.11	5.58
BMX-1	0.512398	5	17.26	3.440	0.1205	0.703519	26	0.0462	3085	49.25	1.23	1.18	4.59
BMX-2	0.512447	8	8.995	2.032	0.1366	0.709246	39	0.6539	66.35	14.99	1.39	1.25	3.59

a) 绝对误差(2σ_m), × 10⁻⁶
b) 计算时, (¹⁴³Nd/¹⁴⁴Nd)_{DM} = 0.51315, (¹⁴⁷Sm/¹⁴⁴Nd)_{DM} = 0.2137
c) 二阶段模式年龄, 其中地壳 Sm/Nd 比值采用文献[14]中的扬子克拉通北缘地壳平均值, 大石沟组和孙家河组 t = 900 Ma, 三湾组和白勉峡组 t = 950 Ma
d) 大石沟组和孙家河组 t = 900 Ma, 三湾组和白勉峡组 t = 950 Ma

西乡群多数火山岩在原始地幔标准化^[15]图解上(图 3)具明显的 Nb, Ta 负异常和 Cs, Rb, Ba, K 等亲石大离子元素(LILE)的相对富集, 即类似岛弧火山岩的地球化学特征。三湾组基性熔岩则相反, 缺乏明显的 Nb, Ta 异常和不同程度的 U, Sr, Zr 正异常及 Ti 负异常, 显示出基本未受地壳物质混染的源区特征(图 3(c))。白勉峡组部分基性岩样品(如 5503, 5509)的元素特征介于上述两种类型之间(图 3(d))。

经球粒陨石标准化^[15], 西乡群火山岩多数样品表现出不同程度的 LREE 相对富集

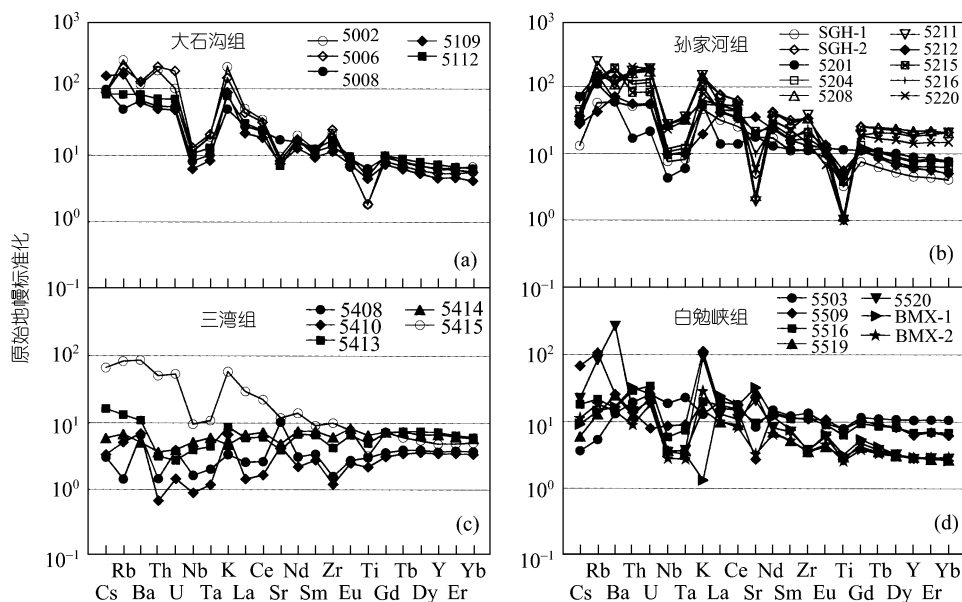


图3 西乡群火山岩多元素原始地幔标准化图

(a) 大石沟组; (b) 孙家河组; (c) 三湾组; (d) 白勉峡组. 实心符号为基性岩($\text{SiO}_2 \leq 63\%$), 其余为长英质岩石

((La/Yb)_N = 8.67~1.70, 平均 4.71 ± 0.43)和 Eu 负异常($\delta \text{Eu} = 0.32 \sim 1.07$, 平均 0.80 ± 0.04), 但三湾组基性岩却表现为 LREE 分布曲线相对平坦或亏损((La/Yb)_N = 1.07~0.40, 平均 0.76 ± 0.15)和无明显的 Eu 负异常($\delta \text{Eu} = 0.78 \sim 1.11$, 平均 0.92 ± 0.07).

西乡群所有样品 $\epsilon_{\text{Nd}}(t)$ 值均为正值(+2.0~+8.8, 其中大石沟组和孙家河组 t 取 900 Ma, 三湾组和白勉峡为 950 Ma). 三湾组基性岩具最高的 $\epsilon_{\text{Nd}}(t)$ 值(+6.02~+8.81, 平均 $+6.99 \pm 0.63$, 其中样品 5414 的高 $\epsilon_{\text{Nd}}(t)$ 值经重复分析确认), 与同时代 MORB 值(+7.99)相近(按亏损地幔 4.56 Ga 时 $\epsilon_{\text{Nd}} = 0$ 和 0 Ga 时 $\epsilon_{\text{Nd}} = +10$ 的线性演化模型计算^[16], 其中亏损地幔 ϵ_{Nd} 现代值为对全球中-新生代 MORB 的统计值^[17]). 样品亏损地幔模式年龄为 1.13~1.53 Ga(三湾组基性岩样品因其 $^{147}\text{Sm}/^{144}\text{Nd}$ 比值过高而未参加统计), 但其二阶段模式年龄则相对年轻, 为 0.89~1.32 Ga (平均 1.14 ± 0.02 Ga). 考虑到岛弧岩浆作用所处的特殊构造环境, 即可能受不同程度古壳源物质加入, 西乡群火山岩主体应代表了源于地幔的初生地壳.

西乡群样品 Sr 同位素组成因受后期构造热事件的影响而发生了重新均一化, 即其原岩 Sr 同位素体系发生过不同程度的开放, 影响了其对原始岩浆作用的指示(见后文讨论).

4 讨论

4.1 三湾组基性熔岩——前弧早期岛弧岩浆岩

三湾组岩性分基性熔岩(5408, 5410, 5413 和 5414)和英安岩(5415 和 5416, 其中 5416 微量元素未测定)两类, 其中英安岩的元素和同位素特征与西乡群其他组长英质岩石类似, 如 Nb, Ta, Ti 负异常和 LILE, Zr, Hf 正异常, 较高的 La/Yb 比值和相对同组基性岩具较低的 $\epsilon_{\text{Nd}}(t)$ 正值等, 显示出各组长英质岩石具类似的岩浆源区特征和岩浆作用过程.

三湾组基性岩(5408, 5410, 5413 和 5414)具较典型拉斑玄武质岩石特征, 其 LREE 相对亏

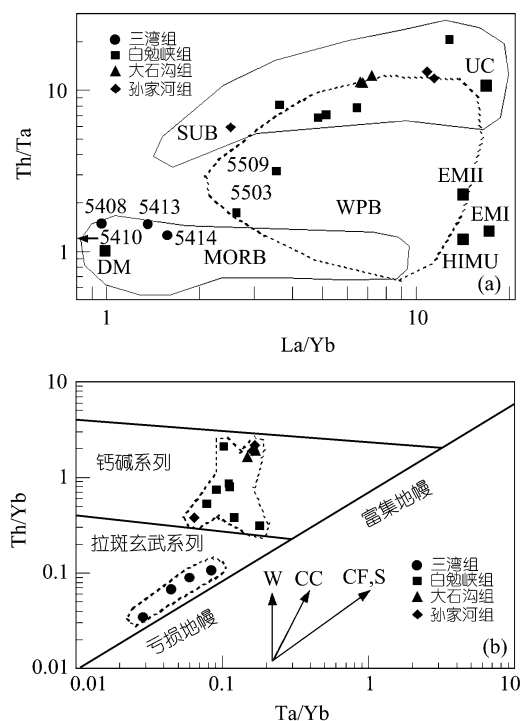


图 4 西乡群火山岩 La/Yb-Th/Ta(a)和 Ta/Yb-Th/Yb(b)构造判别图

(a) MORB-洋中脊玄武岩; SUB-俯冲带玄武岩; WPB-板内玄武岩. (b) W-流体交代富集地幔楔; CC-地壳混染; CF-结晶分异; S-源区富集地幔源

损、较低的 REE 含量水平、U 正异常和高 $\varepsilon_{\text{Nd}}(t)$ 值等特征均显示出其源于 LILE 相对亏损和(或)部分熔融程度较高的地幔源区. 在 La/Yb-Th/Ta 图^[18]上(图 4(a)), 它们落于 MORB 区域的 DM 端元附近, 而其他组镁铁质岩则位于俯冲带玄武岩(SUB)区域(样品 5503 和 5509 介于 MORB 和 SUB 之间); 类似地在 Ta/Yb-Th/Yb 图^[19]中(图 4(b)), 三湾组与其他组基性熔岩分属亏损的拉斑玄武岩和相对富集的钙碱性岩区域, 且三湾组岩浆演化主要受结晶分异作用的影响(沿 CF 方向演化), 而其他组基性岩浆的演化则与壳源物质混染和(或)地幔楔源区受流体交代有关(沿 W 或 CC 方向分布).

三湾组基性岩高 Mg(60~75, $100 \times \text{Mg}/[\text{Mg} + \text{Fe}^{2+}]$ 原子比)为其另一显著特征, 按高镁安山岩(boninite) $\text{SiO}_2 > 53\%$, $\text{Mg} > 60$ 的定义, 样品 5410 和 5413 (Mg 分别为 75.1 和 62.1)均属于此列. 高镁安山岩在俯冲带岩浆岩中并不常见, 主要出现于前弧(forearc)地区^[20,21]和蛇绿岩套中^[22,23]. 高镁安山岩常与高 Mg(> 60)拉斑玄武岩组合, 并由在水不饱合条件下与地幔源岩(橄榄岩)达化学平衡的初始岩浆所形成, 具相对较高的 Cr, Ni

等元素含量. 三湾组玄武岩(5408, 5414)和安山岩(5410, 5413)为较典型的高镁拉斑玄武岩与高镁安山岩组合, 其中样品 5410 的地球化学组成与 Tatsumi 和 Ishizaka^[24]所确定的日本西南岛弧安山岩原始岩浆组成十分相近. 此外, 所有基性岩样品均具有较高 ε_{Nd} 正值、较高的 Cr, Ni 元素含量(分别为 209~621, 平均 402, 98~171, 平均 131×10^{-6})和 LREE 相对亏损及无明显的 Nb, Ta 负异常等特征. 因此三湾组基性熔岩应代表了源于亏损地幔源区、基本未受地壳物质混染的岛弧岩浆作用较早期阶段的产物.

4.2 西乡群主体——岛弧火山岩

白勉峡组、孙家河组和大石沟组火山岩中, 基性岩以安山质岩石为主, 并具有与同组长英质熔岩类似的 Nb, Ta 亏损和高 LILE/HFSE 比值特征. 在 SiO_2 或 MgO 含量相近的条件下, 其 ε_{Nd} 值低于三湾组同类岩石, 且同组长英质与镁铁质火山岩间 ε_{Nd} 值相近, 与 SiO_2 或 MgO 含量之间无明显的相关性. 这些现象表明其成因与地幔岩浆上侵和结晶过程中的地壳混染(AFC)机制无关, 显示出俯冲带岛弧岩浆作用的成因特征.

白勉峡组底部两个安山岩样品(5503, 5509)的地球化学特征(La/Yb, Th/Ta 和 Nb, Ta 负异常等)介于三湾组和其他组基性火山岩之间, 可能代表了岛弧岩浆初步分异结晶的产物. 样品 5509 的 K_2O 含量(3.35%)相对其 SiO_2 和 Na_2O 含量(56.65%和 0.48%)偏高, 可能与后期富钾流体交代作用有关. 西乡群受到了后期钾长花岗质岩体(脉)侵入(距样点约 50 m 有钾长质细脉存

在), 而 5509 具同组样品中最高的 Rb, Cs 含量也为佐证. 但交代作用未明显影响其 HFSE 和 REE 组成, 如无显著的 Nb, Ta 异常和具+4.96 的 ϵ_{Nd} 值.

在 Y-Nd 和(Y+Nb)-Rb 构造环境判别图中(图略), 西乡长英质熔岩多数为岛弧花岗岩类, 但部分样品(如 SGH-2, 5208, 5211 和 5220)属板内花岗岩. 中钾-高钾系列岩性为西乡群中、上部岩系的特征, 甚至出现钾玄质系列(如 5002, 5006 和 5520). 钾玄质岩石主要形成于岛弧岩浆作用晚期或后碰撞弧阶段, 并在空间上远离海沟^[25,26]. 中晚期高钾质和板内花岗质熔岩的出现, 标志西乡岛弧岩浆作用构造背景由前弧向弧后拉张盆地演化.

4.3 区域构造意义

扬子东南缘-南缘存在多套 0.97~1.0 Ga 的晋宁期蛇绿岩系(赣东北、皖南和桂北)^[27~29], 显示扬子东南缘和南缘当时为活动大陆边缘属性, 并可能最终导致了华夏与扬子陆块之间的碰撞拼合而形成统一的华南陆块^[7]. 西乡群岛弧构造环境和 950~900 Ma 形成时代的厘定, 表明扬子西北缘当时亦为板块汇聚边缘. 虽尚无足够证据说明晋宁期扬子西北缘的洋壳俯冲是否导致了碰撞造山, 且南秦岭(以及北秦岭?)与扬子于晋宁期的相互关系也有待于进一步探讨, 但环扬子陆块多处活动性大陆边缘的存在则至少表明, 该陆块于 1.0~0.9 Ga 的晋宁期存在着与其周边陆块发生汇聚拼合的趋势.

西乡群 Rb-Sr 同位素组成沿(747 ± 23) Ma(2σ , MSWD = 389)的等时线分布, 该年龄明显小于其锆石 U-Pb 年龄, 表明其 Rb-Sr 同位素组成受到了后期构造热事件的重置. 侵入西乡群的望江山辉长岩体 Sm-Nd 同位素内部等时年龄(全岩+单斜辉石+基性斜长石)为 785 ± 88 Ma (2σ , MSWD = 0.08, 本文作者未刊数据), 与张宗清等^[30]于近期发表的汉南杂岩体同位素定年结果(837~800 Ma)相近. 汉南杂岩体的形成时代明显晚于西乡群火山岩, 它们代表了扬子陆块西北缘晋宁晚期(0.84~0.75 Ga)另一重要的大规模岩浆事件, 并导致了西乡群火山岩 Rb-Sr 同位素组成的重置.

值得指出, 王宗起等^[31]最近在孙家河组“内”泥质-硅质岩中发现了放射虫微古化石, 虽提出西乡群内存在构造混杂岩带, 但却认为该组岩系属泥盆-石炭系. 显然, 若将西乡群的时代视为晚古生代, 则不能解释如下现象: 受震旦系覆盖并侵入西乡群的汉南杂岩体多方法定年值为 840~750 Ma 的新元古代, 与西乡群样品构成的约 750 Ma Rb-Sr 等时年龄基本对应; 孙家河组和白勉峡组约 900 和 950 Ma 的颗粒级锆石 U-Pb 年龄与其蒸发法年龄能相互验证. 由于西乡群位于多期构造活动的复合部位, 尤其是印支期(南秦岭向扬子陆块北缘)推覆构造较发育, 不排除构造因素导致的不同时期和构造单元岩石混杂的可能.

西乡群火山岩为约 950~900 Ma 的晋宁早期形成于扬子陆块西北缘活动性大陆边缘的岛弧岩浆岩系, 并保存了早期(950 Ma)前弧环境至晚期(900 Ma)弧后盆地较完整的岛弧岩浆岩组合. 西乡群于约 0.84~0.75 Ga 受到了汉南杂岩体的侵入, 并使其 Rb-Sr 体系发生了重置, 汉南杂岩体的形成代表了区内晋宁晚期另一次较大规模的构造岩浆事件.

致谢 本文定稿得益于两位评审人的意见. 湖北地质矿产局、中国科学院广州地球化学研究所、中国地质大学测试中心为本文主量、微量元素分析和锆石 SEM 检测提供了帮助; 张宏飞参加了部分野外工作. 特此致谢.

参 考 文 献

- 1 张国伟, 孟庆任, 赖绍聪. 秦岭造山带的结构构造. 中国科学, B 辑, 1995, 25(9): 994~1003
- 2 张国伟, 孟庆任, 于在平, 等. 秦岭造山带的造山过程及其动力学特征. 中国科学, D 辑, 1996, 26(3): 193~200
- 3 张世红, 李正祥, 吴怀春, 等. 华北地台新元古代古地磁研究新成果及其古地理意义. 中国科学, D 辑, 2000, 30(增刊): 138~147
- 4 张宗清, 付国民, 唐索寒, 等. 秦岭变质地层年龄及其构造意义. 中国科学, D 辑, 1996, 26(3): 216~222
- 5 Gao S, Zhang B R, Wang D P, et al. Geochemical evidence of the Proterozoic tectonic evolution of Qinling Orogenic Belt and its adjacent margins of the North China and Yangtze Cratons. *Precambrian Res*, 1996, 80: 23~48
- 6 Chen J F, Foland K A, Xing F M, et al. Magmatism along the southeast margin of the Yangtze block: Precambrian collision of the Yangtze and Cathaysia blocks of China. *Geology*, 1991, 19: 815~818
- 7 李献华. 元古宙地壳增长和演化的地球化学制约——以华南为例. 见: 郑海飞主编. 化学地球动力学. 北京: 科学出版社, 1999. 288~316
- 8 Gao S, Zhang B R, Li Z J. Geochemical evidence for Proterozoic continental arc and continental-margin rift magmatism along the north margin of the Yangtze Craton, South China. *Precambrian Res*, 1990, 47: 205~221
- 9 中国地质年表工作组. 中国地质年表. 北京: 地质出版社, 1987. 148
- 10 刘登忠, 魏显贵, 杜思清, 等. 米亿山西段地质新进展. 矿物岩石, 1997, 17(增刊): 1~8
- 11 凌文黎, 高山, 张本仁, 等. 扬子克拉通北缘早前寒武纪地壳演化——后河杂岩元素和同位素地球化学限制. 矿物岩石, 1997, 17(4): 26~32
- 12 刘 颖, 刘海臣, 李献华. 用 ICP-MS 准确测定岩石样品中的 40 余种微量元素. 地球化学, 1996, 25(6): 552~558
- 13 李惠民, 董传万, 徐夕生, 等. 泉州辉长岩中单粒锆石 U-Pb 法定年——闽东南基性岩浆的起源. 科学通报, 1995, 40(2): 158~160
- 14 Gao S, Zhebg B R, Luo T C, et al. Chemical composition of the continental crust in Qinling Orogenic Belt and its adjacent North China and Yangtze cratons. *Geochim Cosmochim Acta*, 1992, 56: 3933~3950
- 15 Sun S S, McDonough W F. Chemical and isotopic systematics of oceanic basalt: implications for mantle composition and processes. In: Saunders A D, Norry M J, eds. *Magmatism in the Ocean Basins*. *Geol Soc Spec Pub*, 42. 1989. 528~548
- 16 Goldstein S L, O'Nions R K, Hamilton P J. A Sm-Nd isotopic study of atmospheric dust and particulates from major river systems. *Earth Planet Sci Lett*, 1984, 70: 221~236
- 17 Depaolo D J. Neodymium isotope geochemistry. New York: Springer-Verlag, 1988
- 18 Condie K C. Greenstones through time. In: Condie, K C, ed. *Archean crust evolution*. Amsterdam: Elsevier Sciences, 1994. 85~120
- 19 Pearce J A. Trace element characteristics of lavas from destructive plate boundaries. In: Thrope R S, ed. *Andesites: Orogenic Andesites and Related Rocks*. Chichester: Wiley, 1982. 525~548
- 20 Crawford A J, Fallon T J, Green D H. Classification, petrogenesis and tectonic setting of boninites. In: Crawford A J, ed. *Boninites*. London: Unwin Hyman, 1989. 1~49
- 21 Fallon T J, Green D H, McCullon M T. Petrogenesis of high-Mg and associated lavas from the north Tonga Trench. In: Crawford A J, ed. *Boninites*. London: Unwin Hyman, 1989. 357~395
- 22 Crawford A J, Cameron W E, Keays R R. The association boninite-low-Ti and site-tholeiite in the Heathcote Greenstone Belt, Victoria: ensimatic setting for the early Lachlan Foldbelt. *Austr J Earth Sci*, 1984, 31: 197~208
- 23 Cameron W E. Contrasting boninite-tholeiite associations from New Caledonia. In: Crawford A J, ed. *Boninites*. London: Unwin Hyman, 1989. 314~338
- 24 Tatsumi Y, Ishizaka K. Existence of andesitic primary magma: an example from southwest Japan. *Earth Planet Sci Lett*, 1981, 53: 124~130
- 25 Foley S F, Peccerillo A. Potassic and ultrapotassic magmas and their origin. *Lithos*, 1992, 28: 181~185
- 26 Turner S, Amaud N, Liu J, et al. Post collisional shoshonitic volcanism on the Tibetan plateau: implications for convective thinning of the lithosphere and the source of ocean island basalts. *J Petrol*, 1996, 37: 45~71
- 27 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. 科学通报, 1989, 34(16): 1243~1245
- 28 周国庆, 赵建新. 华南扬子克拉通东南缘赣东北蛇绿岩的 Sm-Nd 同位素研究. 科学通报, 1990, (2): 129~132
- 29 甘晓春, 李献华, 赵凤清, 等. 广西龙胜丹洲群细碧岩 U-Pb 及 Sm-Nd 等时线年龄. 地球化学, 1996, 25(3): 270~276
- 30 张宗清, 张国伟, 唐索寒, 等. 汉南侵入杂岩年龄及其快速冷凝原因. 科学通报, 2000, 45(23): 2567~2572
- 31 王宗起, 李继亮, 郝 杰, 等. 南秦岭西乡群放射虫化石的发现及其地质意义. 中国科学, D 辑, 1999, 29(1): 38~44