

四川盐边高家村镁铁-超镁铁质杂岩体的形成时代： 单颗粒锆石 U-Pb 和角闪石 $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$ 年代学制约

朱维光 邓海琳 刘秉光 李朝阳 覃喻 骆耀南
李志德 皮道会

(中国科学院地球化学研究所矿床地球化学重点实验室, 贵阳 550002; 中国科学院研究生院, 北京 100039; 中国科学院地质与地球物理研究所, 北京 100029; 四川省冶金地质勘查局 601 队, 攀枝花 617027; 四川省地矿局, 成都 610081; 中国地质大学(武汉), 武汉 430074. E-mail: wgzhu_gy@163.com)

摘要 四川盐边高家村镁铁-超镁铁质杂岩体是一个分异良好的似层状侵入体, 该岩体可以分为两个堆积旋回. 对高家村杂岩体主体岩相的角闪辉长岩进行系统的单颗粒锆石 U-Pb 定年以及单矿物角闪石 $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$ 定年的研究, 表明高家村杂岩体的主体岩相形成年龄为 840 ± 5 Ma. 对“盐边蛇绿岩”的提法提出了质疑, 认为高家村杂岩体的形成很可能与 Rodinia 超级大陆下的一个超级地幔柱活动有关. 以上的研究成果有助于重新认识盐边地区新元古代构造演化特征.

关键词 镁铁-超镁铁质杂岩体 地质年代学 高家村

Rodinia 超大陆的聚合和裂解是当今地学领域重要科学问题之一 [1-5]. 扬子地块西缘的镁铁质-超镁铁质杂岩体的形成时代和大地构造背景研究, 对认识华南地区新元古代时期的构造演化及华南在 Rodinia 超大陆的聚合和裂解研究中的争论将产生重要的影响.

四川盐边高家村杂岩体是扬子地块西缘最大的镁铁-超镁铁质杂岩体. 四川地矿局 106 地质队 [6] 基于下盐边群火山岩中枕状熔岩及高家村镁铁-超镁铁质深成岩的组合, 于 1975 年提出川西元古代“盐边蛇绿岩”, 从而引起不少研究人员从板块构造、岩石学、矿物学和地球化学等方面进行研究. 前人的研究主要得到两种认识: 一种观点认为它是蛇绿岩的组成部分, 但在其形成的构造环境有大洋盆地 [7,8]、陆间裂谷 [9]、弧前环境 [10-12] 和岛弧 [13,14] 等多种看法; 第 2 种观点认为它不是蛇绿岩, 而是中元古代末期或新元古代岛弧岩浆活动的产物 [15-18]. 可见, 高家村-冷水箐一带杂岩体的形成时代和构造环境是研究的关键问题.

前人研究给出了高家村杂岩体的 K-Ar 同位素年龄为 1112 Ma 和 1250 Ma [12], 但由于高家村杂岩体普遍具有一定程度的蚀变, 其全岩和单矿物的 K-Ar 年龄很难代表岩体的形成时代. 最近沈渭洲等人 [18] 得到单颗粒锆石 U-Pb 年龄为 936 ± 7 Ma, 但其数据点

沿一致曲线连续分布, 有较大的不确定性. 因此, 上述年龄数据仍不能很好地限定高家村镁铁-超镁铁质杂岩体的形成时代.

本文对高家村杂岩体进行系统的单颗粒锆石 U-Pb 年龄以及角闪石 $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$ 年龄研究, 目的是确定其形成时代并探讨构造意义. 同位素定年结果表明其主体岩相形成年龄为 840 ± 5 Ma. 本文对“盐边蛇绿岩”的提法提出了质疑, 认为高家村杂岩体形成很可能与 Rodinia 超级大陆下的一个超级地幔柱活动有关.

1 地质背景

高家村-冷水箐地区位于四川省原盐边县城南约 30 km 处, 由高家村及邻近数十个小岩体(群)组成. 该岩体呈 NW 向展布, 形态为不规则椭圆形, 南北长 9 km, 东西宽 7.5 km, 面积约 70 km² (图 1). 该岩体侵位于中元古代盐边群变质火山岩和片岩中, 岩体东侧为断层接触, 西侧与围岩呈侵入接触, 接触界线与围岩片理走向一致, 接触面向岩体倾斜, 倾角陡 (一般 55~65°). 接触带附近可见基性岩呈小岩枝插入围岩, 且在岩体边缘常见大小不一、成分各异的角砾状围岩捕虏体 [13,15]. 岩体东北侧产出冷水箐岩浆型 Cu-Ni 硫化物矿床. 岩体东南和西南侧被同德岩体侵入¹⁾.

1) 四川省地矿厅 106 地质队. 四川省盐边县高家村基性-超基性大岩体普查找矿报告. 1997

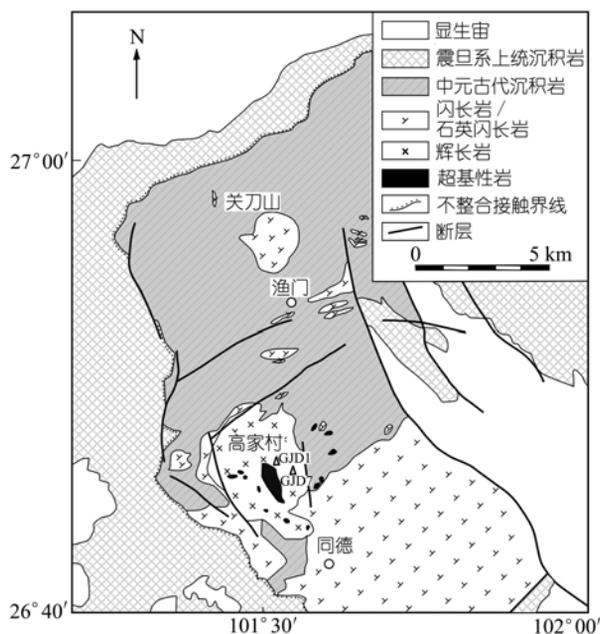


图1 川西盐边地区前寒武纪地质略图据李献华等人^[19]资料略做修改

高家村杂岩体是一个分异良好的似层状侵入体,可以分为两个堆积旋回。第1堆积旋回位于岩体中部和下部,结晶分异良好,总体上从下往上为纯橄榄岩

单辉橄榄岩 橄榄辉长苏长岩 橄长岩,常常互层产出,呈渐变过渡关系。该岩相带中矿物总体上从橄榄石、单斜辉石到斜长石的顺序结晶,岩石都含橄榄石,但大部分已蛇纹石化,辉石大部分为单斜辉石,含较少斜方辉石,且部分单斜辉石的边缘已蚀变成角闪石。该岩相带的岩石具明显的包橄结构,因而属于堆晶岩系,不属于变质橄榄岩。第2堆积旋回为主体岩相带,以角闪辉长岩为主,从中部往上下是由二辉角闪橄榄岩 角闪辉长岩变化,也为渐变过渡关系。矿物从橄榄石、单斜辉石、斜方辉石、斜长石到角闪石的顺序结晶,且含较多的原生角闪石。二辉角闪橄榄岩具包橄结构及填隙结构,因而也是堆晶岩系,不是变质橄榄岩。岩石中橄榄石普遍较新鲜,具两种辉石,其中斜方辉石稍多于单斜辉石。在二辉角闪橄榄岩中局部有Cu, Ni硫化物矿化。

2 样品采集和分析方法

本研究所用样品GJD1, GJD7采于高家村杂岩体地表主体岩相带的角闪辉长岩。GJD1为伟晶状角闪辉长岩,共采集新鲜岩石共50 kg,由贵州省地矿局区调队选出锆石20 mg;显微镜下观察到岩石中角闪

石无蚀变,破碎成20~80目后在双目显微镜下手工挑选纯角闪石5 g,并用去离子水清洗,自然晾干后用玛瑙碎成60~80目。本次共采集新鲜的GJD7样品85 kg,由四川省地矿局区调队选出锆石50 mg。单颗粒锆石的U-Pb年龄测试由国土资源部天津地质矿产研究所同位素实验室采用同位素稀释法完成。锆石的溶解和U-Pb分离采用Krogh^[20,21]改进的分析流程,在VG-354热离子发射质谱计上测定。全流程U和Pb本底分别为<2 pg和15~50 pg。锆石U-Pb分析结果见表1。角闪石的⁴⁰Ar/³⁹Ar定年样品在中国原子能科学院49-2反应堆H8孔道进行快中子照射,照射时间为53小时,积分中子通量为 1.23×10^{18} n/cm²。用于监测中子通量的标准样为:中国标准样ZBJ角闪石和ZBH-25黑云母,法国标准样B600黑云母,澳大利亚标准样77600角闪石,国际标准样BSP-1角闪石。经照射后的样品在中国科学院地质与地球物理研究所氦-氦实验室超真空析氦系统进行阶段加热提纯后的Ar用RGA-10质谱计测量氩同位素,原始数据做了时间零点、质量歧视、分馏、空白本底和K, Ca, Cl干扰同位素及³⁷Ar放射性衰变校正。详细的实验流程和方法请参阅^[22,23]。⁴⁰Ar/³⁹Ar分析结果见表2。

微量元素由中国科学院地球化学研究所分析测试中心采用湿化学方法分析,分析精度优于1%。微量元素含量由中国科学院矿床地球化学重点实验室ICP-MS分析,分析方法参见文献^[24]。分析过程中以国际标准样品GBPG-1, OU-6和法国标准样品UB-N(蛇纹岩)为标样,分析误差小于10%。岩石的Nd同位素分析在中国科学院地质与地球物理研究所Sm-Nd同位素超净实验室完成,在VG-354固体同位素质谱计上测量,Nd同位素分馏用¹⁴⁶Nd/¹⁴⁴Nd = 0.7219校正。Sm-Nd全流程空白本底约为 5×10^{-11} g。实验室测定La Jolla和BCR-1标样的¹⁴³Nd/¹⁴⁴Nd比值的平均值分别为 $0.511862 \pm 7(2\sigma)$ 和 $0.512633 \pm 9(2\sigma)$ 。

3 结果

3.1 单颗粒锆石 U-Pb 年龄

GJD1号样品的锆石绝大部分半透明,自形程度较差,大多数锆石的²⁰⁶Pb/²³⁸U, ²⁰⁷Pb/²³⁵U和²⁰⁷Pb/²⁰⁶Pb表面年龄有明显差异(表1,图2),显示这些锆石有不同程度的放射性成因铅丢失。1号数据点的锆石透明度较好,其U-Pb年龄在实验误差范围内是完全

表 1 高家村镁铁-超镁铁质杂岩体样品 GJD1, GJD7 的颗粒锆石 U-Pb 定年结果^{a)}

序号	锆石特征	质量/ μg	U/ $\mu\text{g}\cdot\text{g}^{-1}$	Pb/ $\mu\text{g}\cdot\text{g}^{-1}$	样品中普通铅含量/ ng	同位素原子比率					表面年龄/Ma		
						$^{206}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$	$^{208}\text{Pb}/^{206}\text{Pb}$	$^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$	$^{207}\text{Pb}/^{235}\text{U}$	$^{207}\text{Pb}/^{206}\text{Pb}$	$^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$	$^{207}\text{Pb}/^{235}\text{U}$	$^{207}\text{Pb}/^{206}\text{Pb}$
GJD1													
1	浅紫红色透明短柱状晶体	30	491	80	0.100	1219	0.2354	0.1383 (6)	1.278 (7)	0.06704 (15)	834.9	836.1	839.1
2	浅紫红色透明不规则粒状晶体	30	2083	306	0.200	2423	0.2853	0.1234 (3)	1.128 (4)	0.06630 (17)	750.0	766.8	816.0
3	浅紫红色半透明不规则粒状晶体	15	5183	749	0.390	1005	0.3331	0.1141 (1)	1.031 (3)	0.06556 (16)	696.3	719.5	792.3
4	浅紫红色半透明不规则粒状晶体	15	2721	379	0.110	1465	0.3029	0.1140 (1)	1.027 (6)	0.06536 (38)	696.0	717.6	785.8
5	浅紫红色半透明不规则粒状晶体	15	4549	526	0.340	822	0.2085	0.09875 (17)	0.8761 (37)	0.06435 (23)	607.1	638.9	753.0
6	浅紫红色半透明不规则粒状晶体	15	7679	712	0.430	974	0.1681	0.08255 (106)	0.7089 (21)	0.06229 (16)	511.3	544.1	683.9
GJD7													
1	浅紫红色透明长柱状自形晶体	20	165	33	0.140	220	0.2561	0.1387 (22)	1.284 (34)	0.06717 (132)	837	839	843
2	浅紫红色透明长柱状自形晶体	20	244	46	0.140	322	0.2805	0.1396 (17)	1.289 (23)	0.06700 (84)	842	841	838
3	浅紫红色透明长柱状自形晶体	20	338	60	0.100	590	0.2907	0.1392 (16)	1.287 (20)	0.06709 (64)	840	840	840
4	浅紫红色透明长柱状自形晶体	20	221	41	0.110	360	0.2764	0.1391 (16)	1.285 (21)	0.06703 (68)	839	839	839

a) 国土资源部天津地质矿产研究所李惠民完成单颗粒锆石 U-Pb 分析。 $^{206}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$ 已对实验空白 (Pb = 0.050 ng, U = 0.002 ng) 稀释剂做了校正, 其他比值中的铅同位素均为放射性成因同位素。括号内的数字为 2σ 绝对误差, 例如 0.1383(6) 表示 $0.1383 \pm 0.0006(2\sigma)$

和谐的, 即 $^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$, $^{207}\text{Pb}/^{235}\text{U}$ 和 $^{207}\text{Pb}/^{206}\text{Pb}$ 3 个表面年龄在实验误差范围内完全一致, 其中 $^{207}\text{Pb}/^{206}\text{Pb}$ 表面年龄 839 ± 6 Ma 应最接近于岩体的形成年龄。如果将 6 个颗粒锆石的 U-Pb 同位素分析结果拟合一直线, 这条直线与谐和线的上交点年龄 842 ± 5 Ma 应解释为这些锆石的生成(结晶)年龄, 即岩石的生成(侵位)年龄。

GJD7 号样品的锆石绝大部分透明度及自形度均较好, 所测定锆石都有完全谐和的 U-Pb 年龄(表 1, 图 2), 显示无放射性成因铅的丢失。在这种情况下, 通常用精确度和可靠性较好的 $^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$ 表面年龄的统计权重平均值 840 ± 5 Ma 作为这些锆石的生成(结晶)年龄, 即岩石的生成(侵位)年龄。

3.2 $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$ 同位素年龄

从表 2 和图 3 中可以看出, 样品 GJD1 的角闪石

经过了 11 个阶段的分步加热, 加热温度区间为 420~1450。其中在 780~1450 共 8 个加热阶段获得的视年龄之间的差异很小, 采用加权平均计算其坪年龄为 790 ± 1 Ma, $^{39}\text{Ar}_K$ 的析出量为 86.07%; 这 8 个加热阶段拟合的 $^{40}\text{Ar}/^{36}\text{Ar}$ - $^{39}\text{Ar}/^{36}\text{Ar}$ 的等时线年龄为 787 ± 4 Ma, MSWD = 0.89。可见, 该样品的等时线年龄与坪年龄的测试结果具有极好的一致性, 同时, 样品的初始 $^{40}\text{Ar}/^{36}\text{Ar}$ 值为 303.9 ± 5.69 , 在误差范围内与标准尼尔值 295.5 ± 5 基本一致, 指示所测试的样品中不存在过剩 Ar, 也无显著的 Ar 丢失。

3.3 元素地球化学

高家村镁铁-超镁铁杂岩体经过较强的蚀变 (LOI=1.03%~15.50%) (表 3)。在 ACM 图和 FAM 图上 (图略), 纯橄榄岩、单辉橄榄岩、橄榄辉长苏长岩和

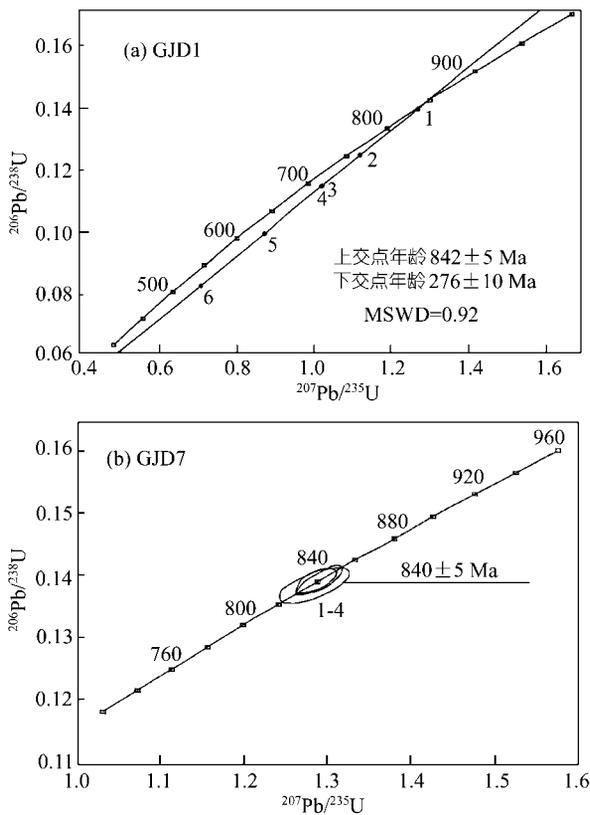


图2 高家村镁铁-超镁铁杂岩体样品 GJD1,GJD7 的单颗粒锆石 U-Pb 年龄曲线谐和图

二辉角闪橄榄岩投影于超镁铁质堆积岩区域，而橄长岩和角闪辉长岩落入镁铁质堆积岩区域，角闪辉长岩总体上表现出拉斑玄武岩的趋势。该岩体的橄榄苏辉长长岩、橄长岩和角闪辉长岩中部分样品含高的 CaO 和 CO₂，根据显微镜下观察是由于有碳酸盐蚀变所致。

该岩体的超镁铁质堆积岩具有不相容元素含量低，相容元素(Cr, Ni)含量高的特征(表 3)，与橄榄石和辉石的堆积作用有关；橄长岩的 REE 总量低且稀土分异明显(图 4(a))；角闪辉长岩的不相容元素含量高，其中含斜长石最多的 GJD7 稀土元素分异明显(图 4(a))。在微量元素蛛网图上(图 4(b))，它们亏损 Rb, U, Th, Nb, Ta, Zr 和 Hf 含量但富集 Ba 和 Sr，并显示出正 Eu 异常(Eu/Eu* = 1.22~8.69)，表明斜长石堆积的重要作用。所有样品的 Nb, Ta 相对于 La 亏损，且 Zr, Hf 相对于相邻元素亏损(Zr/Y=1.05~3.62, Zr/Sm=3.87~20.26)。

3.4 Nd 同位素

高家村杂岩体 6 个样品的 Nd 同位素组成列于表 4。¹⁴⁷Sm/¹⁴⁴Nd(0.1039~0.1981)和 ¹⁴³Nd/¹⁴⁴Nd(0.512200~0.512720)变化较大，具有正的 ε_{Nd} 值(+1.43~+4.18)。

4 讨论

4.1 岩体的形成时代及冷却历史

根据GJD1 和GJD7 的单颗粒锆石U-Pb年龄的分析结果，高家村镁铁-超镁铁质杂岩体主体岩相中角闪辉长岩侵位年龄应为 840 ± 5 Ma，表明该岩体是新元古代早期岩浆活动的产物。这与岩体东南和西南侧同德岩体中辉长岩和闪长岩的SHRIMP锆石U-Pb年龄分别为 820 ± 13 和 813 ± 14 Ma的地质事实相吻合^[25]。

由图 3 可见，在所获得的GJD1 角闪石的 ⁴⁰Ar-³⁹Ar坪年龄谱图上，低于 780 出现一些Ar同位素组成变化，指示矿物颗粒边缘发生了一定量的Ar丢失^[26,27]，但在 780~1450 的视年龄构成了平坦的坪

表2 高家村镁铁-超镁铁质杂岩体样品 GJD1 的角闪石 ⁴⁰Ar-³⁹Ar 年龄分析结果^{a)}

加热阶段	温度/	(⁴⁰ Ar/ ³⁹ Ar) _m	(³⁶ Ar/ ³⁹ Ar) _m	(³⁷ Ar/ ³⁹ Ar) _m	(³⁸ Ar/ ³⁹ Ar) _m	³⁹ Ar _K /mol	⁴⁰ Ar*/ ³⁹ Ar _K	³⁹ Ar _K /%	视年龄/Ma(±1σ)
1	420	94.552	0.0746	1.6593	0.14179	1.552 × 10 ⁻¹²	72.81 ± 0.081	3.79	1222.65 ± 73.28
2	540	40.208	0.062250	1.5574	0.11979	2.224 × 10 ⁻¹²	21.97 ± 0.018	5.44	462.91 ± 8.98
3	660	51.385	0.0602	2.8637	0.16265	1.921 × 10 ⁻¹²	33.96 ± 0.028	4.70	672.99 ± 17.38
4	780	56.956	0.0543	4.9171	0.15652	2.127 × 10 ⁻¹²	41.50 ± 0.032	5.20	793.52 ± 22.49
5	880	49.781	0.0291	4.0855	0.11386	3.169 × 10 ⁻¹²	41.63 ± 0.024	7.75	795.56 ± 17.70
6	960	46.789	0.0210	3.9144	0.09157	4.396 × 10 ⁻¹²	41.01 ± 0.021	10.7	785.99 ± 15.66
7	1040	45.762	0.0169	4.3860	0.0783	5.458 × 10 ⁻¹²	41.24 ± 0.020	13.3	789.55 ± 14.99
8	1120	44.021	0.0108	3.7295	0.0638	8.515 × 10 ⁻¹²	41.22 ± 0.0183	20.8	789.19 ± 14.00
9	1200	44.892	0.0143	4.4405	0.0737	6.429 × 10 ⁻¹²	41.13 ± 0.019	15.7	787.81 ± 14.51
10	1320	48.474	0.0259	5.1282	0.10909	3.560 × 10 ⁻¹²	41.38 ± 0.023	8.70	791.70 ± 16.92
11	1450	58.787	0.06060	6.6219	0.20757	1.524 × 10 ⁻¹²	41.67 ± 0.037	3.72	796.27 ± 25.19

a) 中国科学院地质与地球物理研究所氦-氟法定年实验室桑海清测定。GJD1 的样品质量分别为 0.1905 g，照射参数均为 J=0.013312

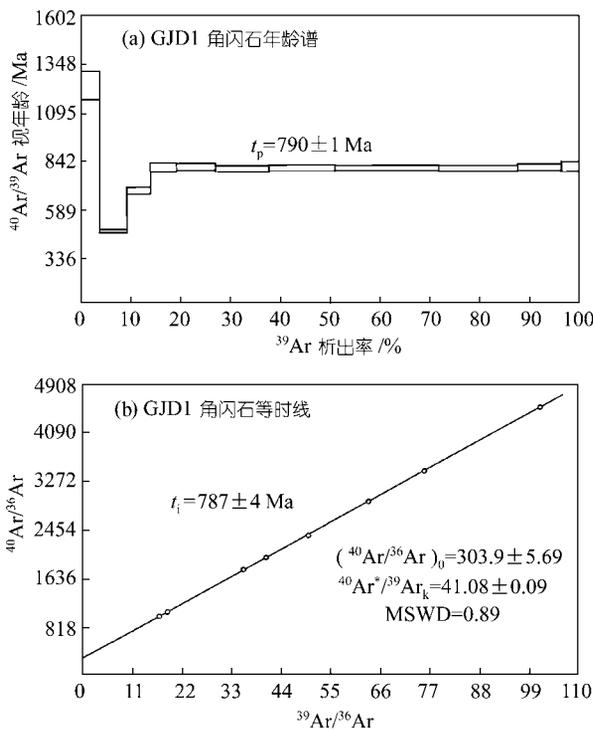


图 3 高家村镁铁-超镁铁杂岩体样品 GJD1 角闪石的 ^{40}Ar - ^{39}Ar 坪年龄和等时线

年龄, 表明矿物内部未发生明显的 Ar 丢失, 其坪年龄 790 ± 1 Ma 可能代表该样品冷却到约 500 (角闪石的封闭温度)^[28]的时间。

前人对扬子地块西缘的新元古代酸性岩浆活动研究较多, 但对基性岩浆岩较少涉及^[19,29]。康定-丹巴地区花岗质杂岩的锆石 SHRIMP 年龄为 864~726 Ma^[4,30], 高家村岩体北部的关刀山岩体的锆石 SHRIMP U-Pb 年龄为 857 ± 13 Ma^[19], 石棉冷碛辉长岩的锆石 SHRIMP 年龄为 808 ± 12 Ma^[29], 泸定桥头基性杂岩体的单颗粒锆石年龄为 853 ± 42 Ma^[31], 显示扬子地块西缘新元古代有大规模的酸性岩浆活动而基性岩浆岩分布较少。高家村杂岩体是扬子地块西缘最大的镁铁-超镁铁质杂岩体, 本研究有助于证实扬子地块西缘新元古代的基性岩浆活动。而且扬子地块北缘的镁铁-超镁铁质大杂岩体—望江山岩体和毕机沟岩体的锆石 SHRIMP 年龄分别为 808~819 和 782 Ma^[32]。这表明扬子地块西缘和北缘在新元古代时期均存在较大规模的基性岩浆活动。

4.2 岩石成因及构造意义

前人提出“盐边蛇绿岩”的认识^[6], 但根据本文资

料和近年来的研究成果, 盐边蛇绿岩的存在是值得质疑的, 主要的依据有: (1) 高家村杂岩体与围岩(中元古代盐边群变质火山岩和片岩)呈明显的侵入接触关系, 而且高家村杂岩体是个结晶分异明显的似层状侵入体; (2) 在区域上盐边高家村深成岩与盐边群火山岩之间缺少典型的“席状岩墙群”, 同时岩体的深部也未见变质橄榄岩, 而且在岩体北部仅 10 多公里处的辉绿岩岩墙明显侵入于盐边群枕状玄武岩中; (3) 高家村杂岩体主体岩相的角闪辉长岩侵位年龄为 840 ± 5 Ma, 表明其与中元古代盐边群火山岩并无成因联系。同时, 盐边群火山岩的稀土和微量元素的研究显示, 这些火山岩具有 LREE 富集的特征, 明显不同于蛇绿岩中 LREE 亏损型的 N-MORB^[25]。

高家村杂岩体的 ϵ_{Nd} 值为 +1.43~+4.18, 在 $\epsilon_{\text{Nd}}-1/\text{Nd}$ ^[33], $\epsilon_{\text{Nd}}-\text{La}/\text{Nb}$ ^[34] 的关系图(图略)上, 大多数样品具有较好的相关关系, 反映岩浆曾受到地壳物质的明显混染, 其混染作用发生在岩浆上升就位后的分异阶段, 而非岩浆房或地幔源区。我们也注意到高 CaO 的样品具有高的 CO_2 , 这可能是由于碳酸盐物质的加入。可见, 地壳混染作用是造成该岩体的岩石具有 Nb-Ta 亏损的重要原因。值得注意的是该岩体的 Th 含量非常低 (Th 负异常), 这与岛弧拉斑玄武质岩浆完全不同, 表明加入的很可能是下地壳物质, 而不是上地壳物质。高家村杂岩体是镁铁质-超镁铁质堆晶岩, 其 Zr 相对于 Sm 亏损很可能是由于辉石堆晶造成的。因此, 高家村杂岩体的元素和同位素地球化学特征不支持岩体形成于岛弧环境。

许多地质现象表明高家村杂岩体是在板内拉张环境下形成的, 包括该岩体的产出特征及其上部的 Cu-Ni 硫化物矿化、岩体东北侧冷水箐岩浆型 Cu-Ni 硫化物矿床的特征以及岩体北部近东西-北东向辉绿岩岩墙群的广泛出现。现有的区域上地质和玄武质岩石的元素和同位素地球化学资料也不支持扬子西缘存在更年轻的(860~750 Ma)的岛弧^[19,29]。

Li 等人^[1]根据桂北基性岩脉/岩席的锆石 SHRIMP 年龄(828 ± 7 Ma)与澳大利亚地幔柱成因的 Gairdner 岩墙群年龄(827 ± 6 Ma)完全一致、同期花岗岩($819 \sim 824$ Ma)侵入、大规模地壳抬升和去顶, 提出约 825 Ma 前有一地幔柱位于华南, 该地幔柱引起了华南新元古代大陆裂谷和岩浆活动。李献华等人^[2,35]最近的研究表明, 川西早震旦世苏雄组双峰式火山岩中碱

表3 高家村杂岩体的主量元素(%)和微量元素($\mu\text{g/g}$)分析结果^{a)}

样号	GJZ5	GJZ22	GJZ30	GJZ24	GJZ15	GJZ7	GJZ38	GJZ41	GJZ42	GJZ44	GJD1	GJD7
岩性	DUN	CPD	CPD	OGN	OGN	TRO	PHP	PHP	HGA	HGA	HGA	HGA
SiO ₂	34.96	35.30	36.15	43.82	35.47	41.02	36.92	37.67	34.63	40.78	42.05	49.33
TiO ₂	0.12	0.21	0.01	0.18	0.09	0.01	0.27	0.40	1.26	0.86	1.48	1.08
Al ₂ O ₃	7.66	5.60	0.85	12.90	10.16	26.78	10.23	2.43	16.80	20.67	20.00	21.16
Fe ₂ O ₃	4.41	5.30	6.66	2.48	5.00	1.10	5.77	6.91	6.71	2.53	3.46	3.94
FeO	5.90	6.85	6.35	4.70	6.10	2.90	6.10	6.24	11.00	5.90	6.55	4.90
MnO	0.15	0.22	0.19	0.12	0.14	0.05	0.20	0.16	0.19	0.20	0.21	0.28
MgO	28.64	27.36	30.94	13.96	26.05	8.21	25.70	29.63	7.65	11.93	8.17	3.90
CaO	2.61	3.07	2.36	13.20	6.01	11.57	2.36	3.39	11.40	9.06	11.42	9.03
Na ₂ O	0.45	0.45	0.27	1.04	0.61	1.75	0.83	0.73	2.52	2.69	2.94	4.13
K ₂ O	0.06	0.08	0.05	0.08	0.09	0.14	0.11	0.09	0.25	0.51	0.29	0.21
P ₂ O ₅	0.01	0.01	0.01	0.01	0.02	0.01	0.01	0.01	1.50	0.22	0.15	0.42
LOI	14.37	15.30	15.50	4.90	10.13	3.87	10.82	11.97	5.09	4.30	2.10	1.03
CO ₂				2.10		2.40			0.30		0.63	
总和	99.34	99.75	99.34	99.49	99.87	99.81	99.32	99.63	99.30	99.65	99.45	99.41
Mg#	83.8	80.8	81.7	78.2	81.4	79.0	80.2	80.9	44.5	72.2	60.1	45.1
Cr	3515	3016	3532	1205	1209	26.6	2138	2073	7.62	452	135	48.3
Ni	749	590	687	228	336	109	677	810	12.4	179	95.5	8.98
Rb	0.604	0.500	0.581	0.298	0.446	1.03	0.985	0.372	1.33	7.16	1.24	1.04
Sr	21.9	48.2	16.3	426	200	968	115	125	643	698	717	909
Y	0.404	1.44	0.908	3.97	2.25	0.644	2.82	2.14	23.4	12.1	17.2	21.0
Zr	0.702	3.66	2.94	5.44	4.33	1.56	10.2	7.62	24.5	33.7	26.3	46.5
Nb	0.026	0.060	0.055	0.060	0.043	0.050	0.429	0.393	1.71	2.19	1.94	9.19
Cs	0.069	0.035	0.026	0.041	0.083	0.089	0.056	0.039	0.219	0.453	0.066	0.067
Ba	4.19	6.17	7.34	22.6	15.6	56.6	43.1	32.6	150	231	173	386
La	0.172	0.334	0.288	0.636	0.391	0.413	1.10	1.03	9.18	5.77	3.01	18.5
Ce	0.394	0.960	0.785	1.76	1.24	0.791	3.06	2.77	28.3	16.8	9.75	43.6
Pr	0.051	0.136	0.114	0.310	0.210	0.096	0.518	0.411	4.67	2.55	1.84	5.55
Nd	0.244	0.863	0.580	1.86	1.30	0.450	2.62	1.86	25.4	13.6	9.75	26.7
Sm	0.080	0.260	0.185	0.629	0.348	0.077	0.607	0.451	6.32	3.18	3.67	5.65
Eu	0.063	0.126	0.075	0.313	0.210	0.185	0.299	0.219	2.51	1.25	1.57	2.70
Gd	0.070	0.322	0.180	0.666	0.419	0.055	0.691	0.458	6.22	2.79	3.98	5.61
Tb	0.009	0.040	0.029	0.114	0.080	0.009	0.100	0.065	0.983	0.404	0.630	0.820
Dy	0.055	0.243	0.150	0.612	0.409	0.035	0.520	0.372	4.84	2.56	3.64	4.12
Ho	0.013	0.054	0.031	0.111	0.084	0.010	0.112	0.076	0.973	0.453	0.732	0.798
Er	0.042	0.162	0.086	0.310	0.213	0.025	0.271	0.218	2.24	1.17	1.64	1.91
Tm	0.007	0.019	0.009	0.038	0.030	0.004	0.039	0.023	0.267	0.161	0.213	0.287
Yb	0.034	0.134	0.080	0.228	0.167	0.021	0.223	0.199	1.71	1.01	1.33	1.68
Lu	0.006	0.020	0.011	0.033	0.021	0.004	0.036	0.031	0.226	0.156	0.184	0.246
Hf	0.020	0.118	0.072	0.211	0.176	0.031	0.320	0.197	1.127	1.22	1.09	3.13
Ta	0.009	0.007	0.013	0.007	0.009	0.005	0.026	0.024	0.065	0.072	0.087	0.446
Th	0.006	0.036	0.020	0.018	0.019	0.013	0.084	0.041	0.092	0.054	0.087	0.224
U	0.004	0.015	0.012	0.032	0.011	0.012	0.026	0.027	0.047	0.024	0.032	0.098

a) $\text{Mg\#} = 100 \times \text{Mg}^{2+} / (\text{Mg}^{2+} + \text{Fe}^{2+})$; LOI 为烧失量. DUN: 纯橄榄岩; CPD: 单辉橄榄岩; OGN: 橄榄辉长苏长岩; TRO: 橄长岩; PHP: 二辉角闪岩; HGA: 角闪辉长岩

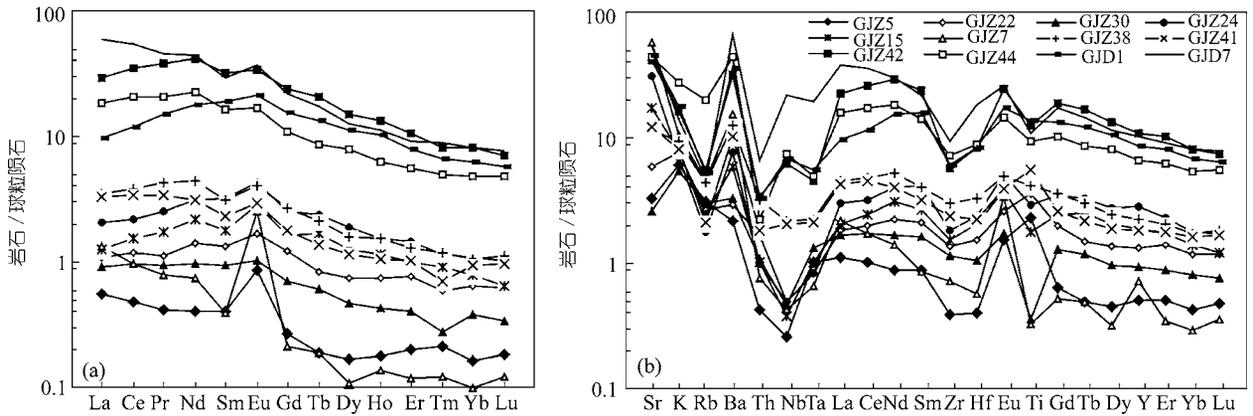


图 4 高家村镁铁-超镁铁杂岩体的稀土分布形式(a)和微量元素“蛛网图”(b)

表 4 高家村杂岩体的 Sm-Nd 同位素组成^{a)}

序号	样号	岩性	Sm/ $\mu\text{g} \cdot \text{g}^{-1}$	Nd/ $\mu\text{g} \cdot \text{g}^{-1}$	$^{147}\text{Sm}/^{144}\text{Nd}$	$^{143}\text{Nd}/^{144}\text{Nd}(2\sigma)$	$\epsilon_{\text{Nd}}(840 \text{ Ma})$
1	GJZ-15	OGA	0.347	1.30	0.1621	0.512661 (11)	4.18
2	GJZ-7	TRO	0.077	0.450	0.1039	0.512200 (11)	1.43
3	GJZ-38	PHP	0.607	2.62	0.1401	0.512449 (10)	2.40
4	GJZ-41	PHP	0.451	1.86	0.1466	0.512439 (8)	1.50
5	GJD-1	HGA	3.00	9.17	0.1981	0.512720 (9)	1.45
6	GJD-7	HGA	5.71	25.6	0.1348	0.512394 (7)	1.90

a) 亏损地幔钕模式年龄(t_{DM})为相对于亏损地幔库($^{147}\text{Sm}/^{144}\text{Nd} = 0.222$ 和 $^{143}\text{Nd}/^{144}\text{Nd} = 0.513114$)用单阶段模式进行计算

性玄武岩的地球化学和同位素特征与现代洋岛玄武岩和大陆溢流玄武岩中的碱性玄武岩非常相似,支持约 825 Ma 华南地幔柱模式。

根据以上讨论,我们认为高家村杂岩体的形成很可能与 Rodinia 超级大陆下的一个超级地幔柱活动有关,是由受地壳混染的板内玄武质母岩浆堆晶形成的。

5 结论

本文对高家村杂岩体主体岩带中角闪辉长岩进行了系统的单颗粒锆石 U-Pb 年龄、单矿物角闪石 $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$ 年龄以及该岩体岩石的元素地球化学和 Nd 同位素研究。(1) 高家村杂岩体主体岩带中角闪辉长岩的形成年龄应为 $840 \pm 5 \text{ Ma}$, 表明它是新元古代岩浆活动的产物。该岩体是扬子地块西缘最大的镁铁-超镁铁质杂岩体,表明扬子地块西缘在新元古代时期存在较大规模的基性岩浆活动。(2) 本文对“盐边蛇绿岩”的提法提出了质疑,并认为高家村杂岩体形成很可能与 Rodinia 超级大陆下的一个超级地幔柱活动有关。

致谢 本研究是在涂光炽院士的指导下完成的。在成文过程中得到了李献华研究员、钟宏研究员和张兴春副研究员的指导。国土资源部天津地质矿产研究所李惠民完成了颗粒锆石的 U-Pb 定年;中国科学院地质与地球物理研究所桑海清完成角闪石的 $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$ 定年。两位审稿人提出了建设性的意见。在此谨致谢忱。本工作受中国科学院知识创新工程项目 (KZCX2-101)、中国和南非含铂族元素 (PGE)层状岩体合作研究项目(01-506J)及国家重点基础研究发展规划项目(G1999043205)资助。

参 考 文 献

- Li Z X, Li X H, Kinny P D, et al. The breakup of Rodinia: Did it start with a mantle plume beneath South China? *Earth Planet Sci Lett*, 1999, 173: 171-181[DOI]
- Li X H, Li Z X, Zhou H, et al. U-Pb zircon geochronology, geochemistry and Nd isotopic study of Neoproterozoic bimodal volcanic rocks in the Kangding Rift of South China: implications for the initial rifting of Rodinia. *Precamb Res*, 2002, 113: 135-155[DOI]
- Li X H, Li Z X, Ge W, et al. Neoproterozoic granitoids in South China: Crustal melting above a mantle plume at ca. 825 Ma? *Precamb Res*, 2003, 122: 45-83[DOI]
- 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. *Precamb Res*, 2003, 122: 85~109[DOI]
- 5 Ling W, Gao S, Zhang B, et al. Neoproterozoic tectonic evolution of the northwestern Yangtze craton, South China: Implications for amalgamation and break-up of the Rodinia Supercontinent. *Precamb Res*, 2003, 122: 111~140[DOI]
- 6 四川地矿局 106 地质队四分队. 康滇地轴中段前震旦纪地质特征及其板块构造的关系. *地质科学*, 1975(2): 107~113
- 7 李继亮, 张凤秋, 王守信. 四川盐边元古代蛇绿岩的稀土元素分配的特点. 见: *岩石学研究(第三辑)*, 北京: 地质出版社, 1983. 37~44
- 8 李继亮. 川西盐边群的优地槽岩石组合. *中国地质科学院院报*, 1984, 第9号: 21~34
- 9 潘杏南, 赵济湘, 张选阳, 等. 康滇构造与裂谷作用. 重庆: 重庆出版社, 1987
- 10 骆耀南. 康滇构造带的古板块历史演化. *地球科学*, 1983(3): 93~102
- 11 骆耀南. 中国攀枝花-西昌裂谷带. 见: *中国攀西裂谷文集(1)*. 北京: 地质出版社, 1985
- 12 朱宗祥. 四川前寒武纪盐边群火山岩系的特征及构造环境. *矿物岩石*, 1983, 3(3): 42~51
- 13 沈上越, 张保民, 袁曼明. 四川盐边基性-超基性杂岩体的岩石学研究. *地球科学*, 1986, 11(6): 561~569
- 14 沈上越, 张保民, 潘兆槽. 一个典型环状分带基性-超基性杂岩体. *科学通报*, 1989, 34(1): 47~50
- 15 从柏林. 攀西古裂谷的形成与演化. 北京: 科学出版社, 1988
- 16 刘朝基, 曾绪纬, 金久堂. 康滇地区基性-超基性岩. 重庆: 重庆出版社, 1988
- 17 张旗, 周国庆. 中国蛇绿岩. 北京: 科学出版社, 2001
- 18 沈渭洲, 高剑锋, 徐士进, 等. 四川盐边冷水箐岩体的形成时代和地球化学特征. *岩石学报*, 2003, 19(1): 27~37
- 19 李献华, 李正祥, 周汉文, 等. 川西关刀山岩体的 SHRIMP 锆石 U-Pb 年龄、元素和 Nd 同位素地球化学——岩石成因与构造意义. *中国科学, D 辑*, 2002, 32(增刊): 60~68
- 20 Krogh T E. A low-contamination method for hydrothermal decomposition of zircon and extraction of U and Pb for isotopic age determinations. *Geochim Cosmochim Acta*, 1973, 48: 505~511
- 21 Krough T E. Vapour transfer for these dissolution of zircons in a multi-sample capsule at high-pressure. In: Zartman R E, ed. *Short Papers of the Fourth International Conference on Geochronology, Cosmochronology and Isotope Geology*. USGS Open-File Rep, 1978, 78-701: 233~234
- 22 王松山, 桑海清, 胡世玲, 等. 应用 49-2 反应堆进行 ^{40}Ar - ^{39}Ar 定年及迁安曹庄群斜长角闪岩年龄谱的地质意义. *岩石学报*, 1985, 1(3): 35~44
- 23 桑海清, 王松山, 裘冀. 冀东太平寨麻粒岩中辉石、角闪石、斜长石的氩亚年龄及其地质意义. *岩石学报*, 1996, 12(3): 390~400
- 24 Qi L, Hu J, Gregoire D C. Determination of trace elements in granites by inductively coupled plasma mass spectrometry. *Talanta*, 2000, 51: 507~513[DOI]
- 25 Sinclair J A. A re-examination of the "Yanbian Ophiolite Suite": Evidence for western extension of the Mesoproterozoic Sibao Orogen in South China. *Geol Soc Aust Abst*, 2001, 65: 99~100
- 26 张宗清. 同位素年代学方法的应用和限制. 见: 张炳熹, 洪大卫, 吴宣志编. *岩石圈研究的现代方法*. 北京: 原子能出版社, 1997. 186~200
- 27 Faure G. Isotope geochronology and its applications to geology. *地质前缘*, 1998, 5(1-2): 17~39
- 28 McDougall I, Harrison T M. *Geochronology and Thermochronology by the $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$ Method*. New York: Oxford University Press, 1999
- 29 李献华, 李正祥, 周汉文, 等. 川西新元古代玄武质岩浆岩的锆石 U-Pb 年代学、元素和 Nd 同位素研究: 岩石成因与地球动力学意义. *地质前缘*, 2002, 9(4): 329~338
- 30 Zhou M F, Yan D P, 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. *Earth Planet Sci Lett*, 2002, 196: 51~67[DOI]
- 31 沈渭洲, 高剑锋, 徐士进, 等. 扬子板块西缘泸定桥头基性杂岩体的地球化学特征和成因. *高校地质学报*, 2002, 8(4): 380~389
- 32 Zhou M F, Kennedy A K, Sun M, et al. Neoproterozoic arc-related mafic intrusions along the Northern margin of South China: Implications for the accretion of Rodinia. *J Geol*, 2002, 110: 611~618[DOI]
- 33 Faure G. *Principles of Isotope Geology(second edition)*. New York: John Wiley and Sons, 1986
- 34 葛文春, 李献华, 梁细荣, 等. 桂北元宝山宝坛地区约 825Ma 镁铁-超镁铁岩的地球化学及其地质意义. *地球化学*, 2001, 30(2): 123~129
- 35 李献华, 周汉文, 李正祥, 等. 扬子块体西缘新元古代双峰式火山岩的锆石 U-Pb 年龄和岩石化学特征. *地球化学*, 2001, 30: 315~322

(2004-01-13 收稿, 2004-03-03 收修改稿)