

云南景谷半坡铂钯多金属矿床辉长岩 锆石 U-Pb 同位素定年及其意义

张 海 金灿海 范文玉 沈战武 张 琦 高建华

(成都地质矿产研究所, 四川 成都 610081)

摘要:景谷半坡铂钯多金属矿床位于澜沧江南段兰坪—思茅陆块, 成矿主要与半坡杂岩体有关。半坡杂岩体由橄榄岩、辉石岩、辉长岩、辉长闪长岩和闪长岩等镁铁—超镁铁质岩组成。通过 LA-ICP-MS 锆石 U-Pb 同位素年代学方法获得半坡杂岩体中辉长岩结晶年龄为(302.6±2.0)Ma, 说明半坡杂岩体形成时代为晚石炭世。岩体中辉长岩属高铝质基性岩类, 轻稀土元素相对于重稀土元素弱富集, 富集大离子亲石元素(Rb, Sr, K, Ba)、亏损高场强元素(Nb, Ta, Zr, Hf), 具有岛弧岩浆岩性质, 表明半坡杂岩体形成与板块俯冲有关的岛弧环境, 南澜沧江构造带在晚石炭世至早二叠世为大洋岛弧俯冲带。

关键词:辉长岩; 锆石; LA-ICP-MS U-Pb 定年; 景谷半坡

中图分类号: P618.53; P597+.3 **文献标志码:** A **文章编号:** 1000-3657(2013)05-1433-10

西南“三江”(怒江、澜沧江、金沙江)地区是古特提斯构造域东段的重要组成部分, 也是古特提斯及喜马拉雅巨型成矿域的重要组成部分和中国重要的多金属富集区^[1-5]。澜沧江构造带位于三江中部, 该带出露一系列南北向带状展布的弧火山岩—侵入岩组合, 特别是出露一些镁铁—超镁铁质岩体, 成为研究古特提斯洋发展和消亡的关键地区之一。该段地质构造演化复杂, 古特提斯演化过程和陆内造山过程均伴随大规模的成矿作用, 典型矿床有大平掌铜矿^[6]、官房铜矿^[7]、文玉铜矿^[8]、民乐铜矿^[9]等矿床。对于该地区的研究主要集中在岩石学、构造背景和年代学^[9-13]等方面, 而对于与镁铁—超镁铁质岩体有关的铂钯矿床研究较少。基性和超基性岩是地壳中主要的富铂族元素岩石^[14], 对与半坡铂钯多金属矿床成因有密切联系的半坡杂岩体岩石学、年代学的研究, 有助于探讨该矿床的形成时代、成矿地质背景。

1 地质背景

1.1 地质概况

半坡铂钯多金属矿床位于景谷县西南距源县城约 40 km, 处于澜沧江南段兰坪—思茅陆块, 成矿主要与半坡杂岩体有关。半坡杂岩体是出露于澜沧江带南段的镁铁—超镁铁质岩体, 大地构造位置属澜沧江南段云县—景洪晚古生代末—早中生代火山岛弧带, 沿澜沧江断裂带分布的岩体还有小维西、吉岔、云县、栗树、景洪等镁铁—超镁铁质岩体。半坡杂岩体南北长约 11 km, 东西宽约 3.5 km(图 1)^[15], 岩体侵位于古生界浅变质岩中(图 2-a), 被侏罗系地层角度不整合超覆。半坡杂岩体和上古生界(泥盆系—石炭系)浅变质岩又被后期石英钠长斑岩穿插。

半坡铂钯多金属矿床是典型的岩浆型矿床, 在矿区岩石普遍蚀变较强, 特别是蛇纹岩化非常强烈,

收稿日期: 2012-12-21; 改回日期: 2013-05-26

基金项目: 中国地质调查局地质调查项目(12120113037000, 1212011120608)资助。

作者简介: 张海, 男, 1980 年生, 博士, 矿物学、岩石学、矿床学专业, 从事矿物学、矿床学研究; E-mail: zhanghai1980@sina.com。

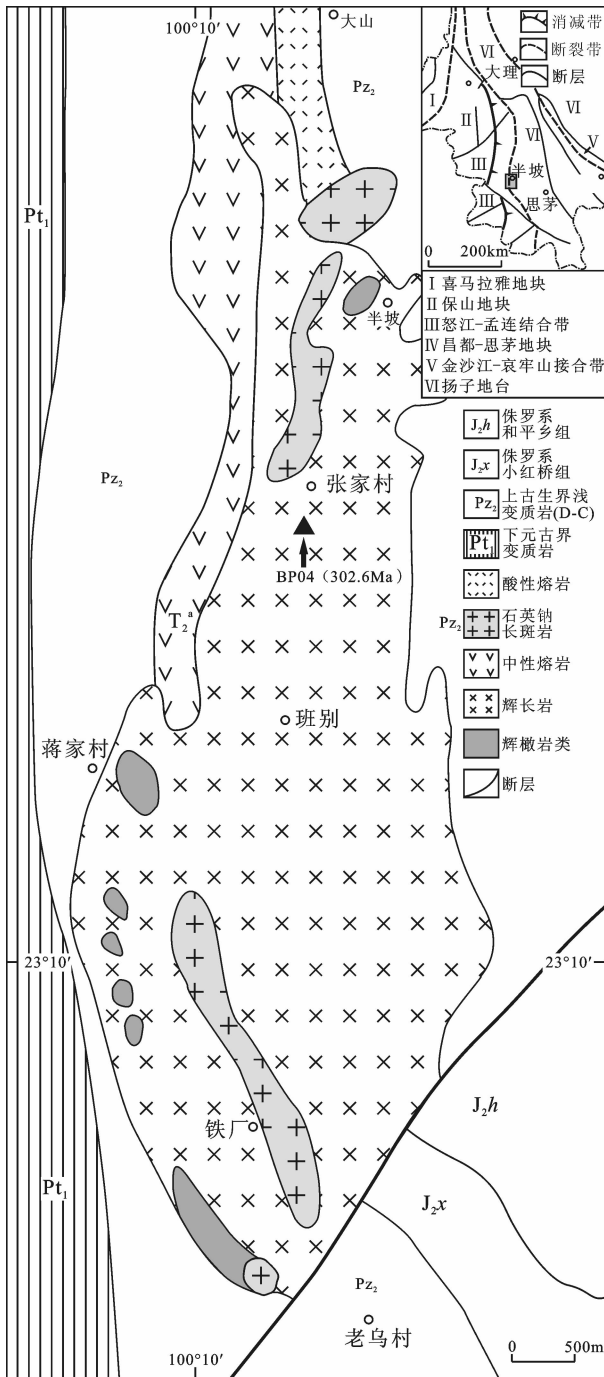


图1 矿区半坡杂岩体地质图(据文献[15]修改)

Fig.1 Geological map of Banpo complex in the Banpo Pt-Pd-polymetallic deposit (modified after Reference[15])

具有硫化物铜镍铂钨矿化,辉长岩具磁铁矿化。沿裂隙发育矿化脉体,脉体中的褐铁矿为原岩中磁铁矿氧化蚀变而形成,脉体有较高的铂族元素含量。

1.2 岩石学特征

半坡镁铁超镁铁质杂岩体东西断面上为一漏

斗、南北断面上为近似碗状、上升侵入通道为一树枝状形态的岩体(图3)。岩体由主要纯橄岩、橄橄岩、辉石岩、橄长岩、辉长岩、辉长闪长岩和闪长岩组成,基性岩与超基性岩呈明显的过度关系,该特点与阿拉斯加侵入岩相似,不同于蛇绿岩。典型岩石特征如下:

纯橄橄岩为黑绿色,块状构造,中细粒结构,遭受强烈热液交代蚀变作用,主要由橄橄石(60%~90%)、蛇纹石(5%~15%)、方镁石(5%~10%)、铁质(1%~5%)组成,橄橄石已经全部蚀变成为滑石及蛇纹石,橄橄石假像尚存,大部分还可见残留有橄橄石龟裂纹,粒径0.5~2mm,其中以滑石蚀变为主,围绕橄橄石假像见鳞蛇纹石生成并析出大量方镁石,粒径≤0.1mm,沿后期裂隙见有铁质(5%)贯入,可见铂钨矿化(图2-b)。

橄橄岩主要为异剥橄橄岩,黑绿色,中细粒结构,块状构造,遭受强烈热液交代蚀变作用,主要由橄橄石(53%~62%)、单斜辉石(10%~30%)、蛇纹石(5%~15%)、铁质(1~3%)组成。橄橄石,粒径0.5~2mm,全部蚀变为蛇纹石及滑石。单斜辉石,粒径≤3mm,蚀变成为透闪石,辉石假像尚存,镶于橄橄石假像颗粒中或边缘生成于橄橄石之后。岩石后期发生碎裂岩化作用,沿裂隙见有后期叶蛇纹石充填,粒径≤2mm。后期裂隙见有铁质贯入,粒径≤0.5mm,铂钨矿化一般存于该铁质中(图2-c)。

单斜辉石岩,黑绿色,中细粒结构,块状构造,主要由单斜辉石(90%~100%)、橄橄石(0~10%)、金属矿物(<1%)组成,后期遭受热液交代蚀变作用。单斜辉石部分蚀变成为透闪石,粒径1.5~5mm,局部见透闪石镶于普通辉石颗粒边缘呈反应边结构。透闪石以纤维状集合体为主,次为柱状。单斜辉石、橄橄石发生蚀变后有金属矿物析出(图2-d)。

辉长岩绿灰色,细粒结构,块状构造,透闪石化辉长岩,岩石矿物成分以斜长石(54%~60%)较多,次为单斜辉石(40%~45%),两者自形程度相近,相互呈镶嵌状构成辉长结构,部分斜长石包于单斜辉石中呈包晶含长结构。斜长石,粒径0.5~2mm,半自形-自形板状,具聚片双晶纹,表面发生钠黝帘石化。单斜辉石,粒径0.5~5mm,不同程度发生透闪石化。在单斜辉石中可见星点状磁铁矿微粒,粒度≤0.1mm,含量1%(图2-e)。

金属矿物主要有磁铁矿、磁黄铁、矿镍黄铁矿、黄铁矿,在各岩石中均可见。金属矿物以后期贯入为

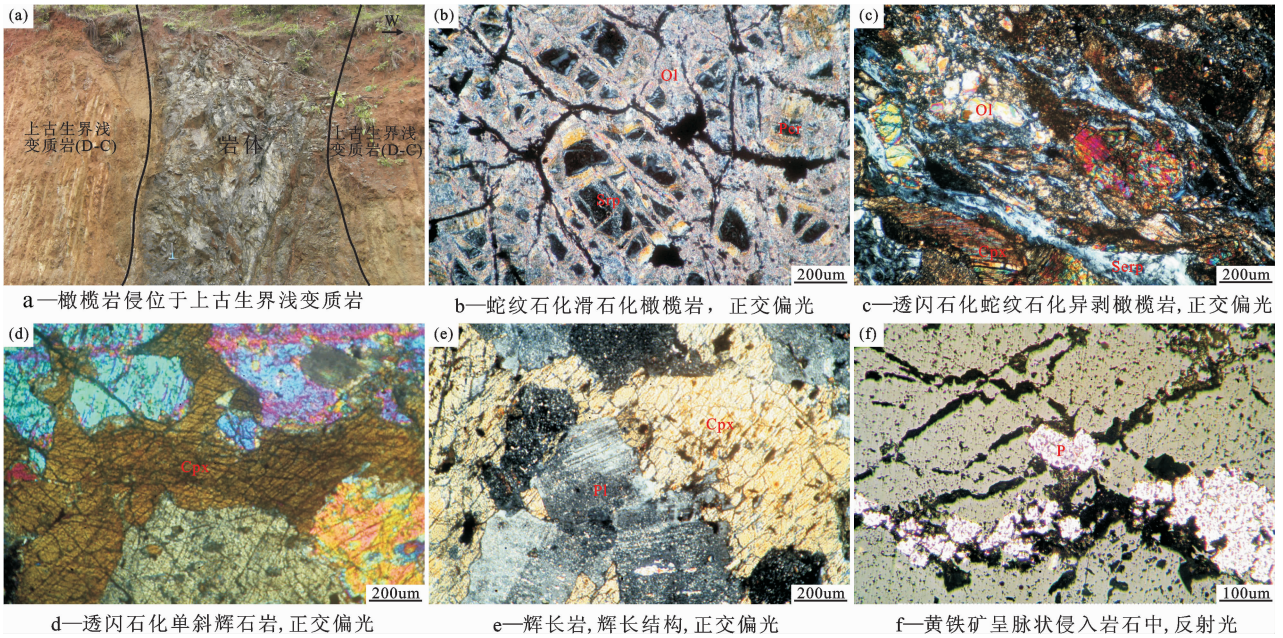


图 2 半坡杂岩体岩石学特征
 Pl—斜长石;Srp—蛇纹石;Per—方镁石;P—黄铁矿
 Fig.2 Petrographic characteristics of Banpo complex
 Pl—Plagioclase;Srp—Serpentine;Per—Periclase;P—Pyrite

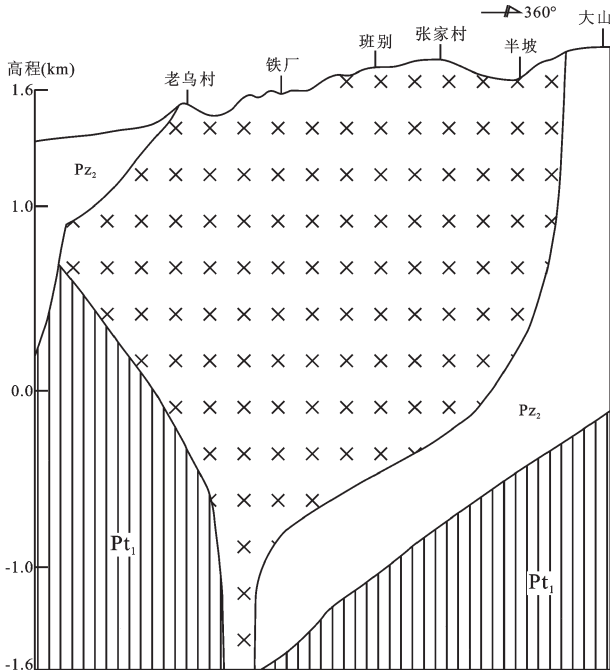


图 3 半坡杂岩体剖面图(据文献[16]修改,图例同图 1)
 Fig.3 Geological section of Banpo complex
 (modified after reference[16])

主,少量为原生矿物。后期金属矿物为磁黄铁矿、黄铁矿混杂少量镍黄铁矿,呈脉状、浸染状沿后期裂隙贯入岩石中(图 2-f)。原生金属矿物为磁铁矿,磁铁

矿呈自形粒状,其为橄榄石蚀变成蛇纹石时所形成,晶粒较小。

2 样品采集与分析方法

本次选取半坡杂岩体的辉长岩、橄榄岩进行 U-Pb 同位素定年、岩石化学分析。采样点为景谷半坡铂钨多金属矿区,采样地理坐标为 N23°11'53", E100°11'0.5"。

锆石单矿物分离在河北省区域地质调查研究所(廊坊)完成。将质量约 5 kg 的样品破碎到 60~80 目,经常规浮选和磁选方法分选。然后在双目镜下挑选出透明干净、自形程度好、无裂痕的锆石颗粒,将其制备成测定用的样品靶。锆石 CL(阴极发光)和 LA-ICP-MS(激光剥蚀等离子体质谱)锆石 U-Pb 同位素年龄测定在中国地质大学(武汉)地质过程与矿产资源国家重点实验室完成。锆石微量元素含量利用 USGS 参考玻璃(NIST SRM 610BCR-2G, BIR-1G)作为多外标,²⁹Si 作为内标元素进行定量计算,U-Pb 同位素定年采用锆石标准 91500 作外标进行同位素分馏校正。对分析数据的离线处理采用软件 ICPMSDataCal 完成,详细的仪器操作条件和数据处理方法同文献[17-19]。锆石样品的 U-Pb 年龄谱和图绘制和计算均采用 Isoplot/Ex_ver3^[20]完成。

主量元素由国土资源部西南矿产资源监督检测中心用 XRF 方法测定,主要仪器设备:BS-124S 分析天平-1,Z-5000 原子吸收分光光度计-2, iCAP6300 全谱直读等离子光谱仪,AFS-230E 双道原子荧光光度计,AXIOS AXIOS-X-荧光光谱仪,检测精度优于 5%。微量元素由国家地质实验测试中心用 ICP-MS 方法测定,检测仪器为等离子质谱仪(X-series),检测精度优于 5%。

3 分析结果

3.2 锆石 U-Pb 年代学

辉长岩(BP04)锆石粒径为 0.05~0.30 mm,透明至半透明,多为短柱至长柱状,结构简单不具有核边结构、不含包体,反映结晶环境比较稳定(图 4)。大部分锆石具有振荡环带,为岩浆锆石,其结晶年龄可代表辉长岩的成岩年龄。测试中选取颗粒较大,具有较明显岩浆振荡环带的 12 颗锆石进行激光剥蚀测试,获得了 12 个测试点的数据(表 1)。12 个测点中 U 含量变化范围为 $75.1 \times 10^{-6} \sim 154.9 \times 10^{-6}$, Th 含量变化范围为 $31.4 \times 10^{-6} \sim 117.4 \times 10^{-6}$, Th/U 值变化范围为 0.42~0.73,呈现出岩浆成因锆石的特征^[21-22]。在 U-Pb 谐和图上,测试点都分布于谐和线上或其附近(图 5)。测点的 $^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$ 年龄介于 $(295.5 \pm 3.3)\text{Ma} \sim (307.9 \pm 4.5)\text{Ma}$, 加权平均年龄为 $(302.6 \pm 2.2)\text{Ma}$

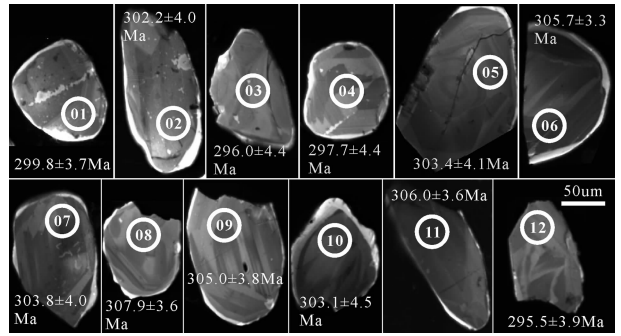


图 4 辉长岩锆石阴极发光图

Fig.4 CL images of zircon grains for gabbro in Banpo complex

(MSWD=1.09)。因此, $(302.6 \pm 2.2)\text{Ma}$ 可以作为辉长岩的结晶年龄,也就是半坡杂岩体的形成年龄。

3.3 岩石地球化学

3.2.1 主量元素

岩石化学样品共有 10 件,岩石类型主要为辉长岩、橄榄岩。样品经历了较大程度的蚀变作用,烧失量(LOI)在 0.98%~11.50%之间,尤其辉橄岩的烧失量较高。为了便于对比,在以下讨论中,主量元素的含量均为扣除挥发组分后的归一化值。

辉长岩 SiO_2 含量为 52.73%~55.07%, Al_2O_3 含量(16.85%~19.26%)与高铝玄武岩含量相当,高铝玄武岩又是消减带典型的岩石类型^[23]。 MgO 含量 5.08%~

表 1 辉长岩(BP04)LA-ICP-MS 锆石 U-Pb 同位素分析结果

Table 1 LA-ICP-MS U-Pb analytical results of zircons for gabbro (sample BP04) in Banpo complex

点号	Th / 10^{-6}	U / 10^{-6}	Th/U	$^{207}\text{Pb}/^{235}\text{U}$		$^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$		$^{207}\text{Pb}/^{235}\text{U}$		$^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$		谐和度
				比值	1 σ	比值	1 σ	年龄/Ma	1 σ	年龄/Ma	1 σ	
01	63	110	0.57	0.3515	0.0190	0.0476	0.0006	305.8	14.3	299.8	3.7	98%
02	61	89	0.69	0.3411	0.0162	0.0480	0.0007	298.0	12.3	302.2	4.0	98%
03	42	75	0.56	0.3394	0.0201	0.0470	0.0007	296.7	15.3	296.0	4.4	99%
04	56	84	0.67	0.3379	0.0163	0.0473	0.0007	295.6	12.3	297.7	4.4	99%
05	53	87	0.61	0.3484	0.0165	0.0482	0.0007	303.5	12.4	303.4	4.1	99%
06	118	155	0.76	0.3341	0.0134	0.0486	0.0005	292.7	10.2	305.7	3.3	95%
07	102	131	0.78	0.3638	0.0180	0.0483	0.0007	315.1	13.4	303.8	4.0	96%
08	83	124	0.67	0.3561	0.0193	0.0489	0.0006	309.3	14.5	307.9	3.6	99%
09	75	102	0.74	0.3575	0.0176	0.0485	0.0006	310.3	13.2	305.0	3.8	98%
10	32	75	0.42	0.3917	0.0219	0.0481	0.0007	335.6	16.0	303.1	4.5	89%
11	93	123	0.76	0.3633	0.0198	0.0486	0.0006	314.7	14.8	306.0	3.6	97%
12	75	116	0.65	0.3414	0.0179	0.0469	0.0006	298.2	13.5	295.5	3.9	99%

注:谐和度=1-abs[($^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$)Age-($^{207}\text{Pb}/^{235}\text{U}$)Age]/($^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$)Age。

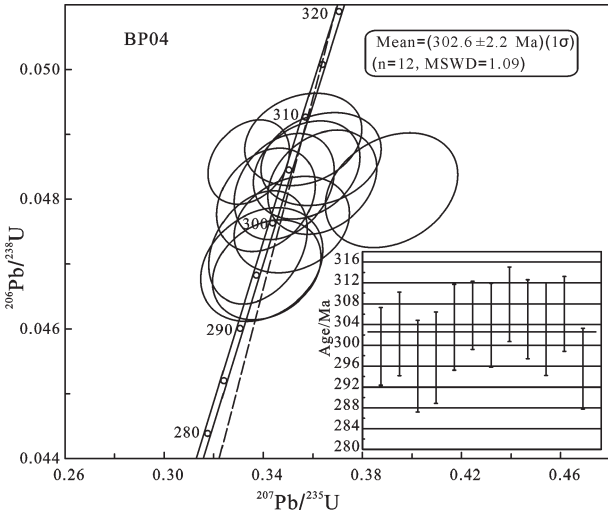


图 5 辉长岩(BP04)锆石的 U-Pb 谐和图和加权年龄平均值
Fig.5 U-Pb concordia diagram and average weighted age of zircons for gabbro in Banpo complex (sample BP04)

5.87%, 辉长岩 $Mg^\#$ 为 55.6~58.6, 明显低于原生岩浆范围 $Mg^\#$ (68~75)^[24], 表明辉长岩经过了较高级别的结晶分异演化。Fe₂O₃ 含量 3.12%~4.85%, FeO 含量 4.31%~5.66%, 含量变化不大。碱含量(K₂O+Na₂O)为 5.30%~7.46%, 富钠低钾 (Na₂O/K₂O=4.49~5.56)。TiO₂ 含量为 0.76%~0.84%, 与岛弧玄武岩低 Ti 含量 (TiO₂<0.85%) 的特征相符。TiO₂/Al₂O₃ 比值 (0.04~0.05) 极低, 具岛弧或弧后盆地基性岩的特点。辉长岩属高铝质基性岩类 (SiO₂ ≤ 54%, MgO ≤ 7%, Al₂O₃ ≥ 16%), 其形成与板块俯冲有关^[25-26]。辉长岩经过了后期蚀变作用, 利用不活动元素 Zr/TiO₂-Nb/Y 图解 (图 6-a) 判别, 样品属于亚碱性玄武岩或玄武安山岩类。在 AFM 图解中, 样品落在钙碱性玄武岩系列中 (图 6-b)。

橄榄岩 SiO₂ 含量为 41.31%~43.09%, MgO 含量较高 (36.29%~38.72%), 强烈亏损易熔元素 Al₂O₃ (0.40%~6.34%)、CaO (0.13%~1.42%)、Na₂O (0.12%~0.18%) 和 TiO₂ (0.02%~0.09%), 含量均明显低于原始地幔的平均值^[28], $Mg^\#$ 值为 80.8~86.8 (表 2), 平均 84.0, 低于蛇绿岩 (87), 与阿拉斯加型橄榄岩 (84) 相当。

3.2.2 微量元素

辉长岩稀土总量为 34.36×10⁻⁶~42.13×10⁻⁶, 轻稀土相对于重稀土弱富集 (图 7-a), (La/Yb)_N=1.48~1.76, Eu 异常不明显 (0.89~1.16), 无 Ce 异常 (0.99~1.01), 与陆源弧后盆地 Okinawa 玄武岩 (OTB)^[31] 相

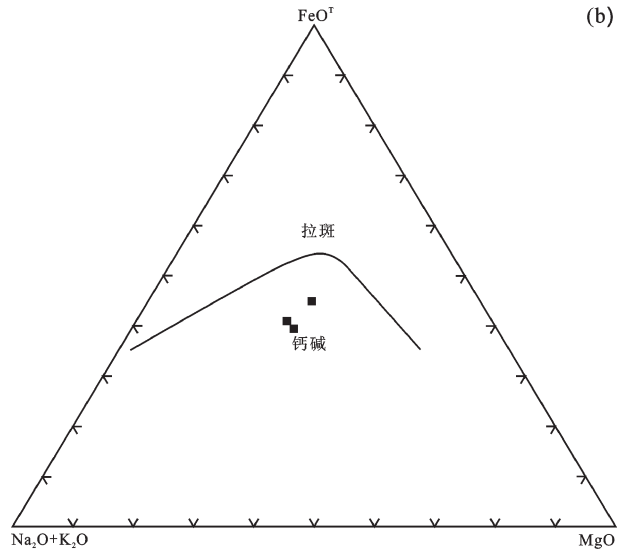
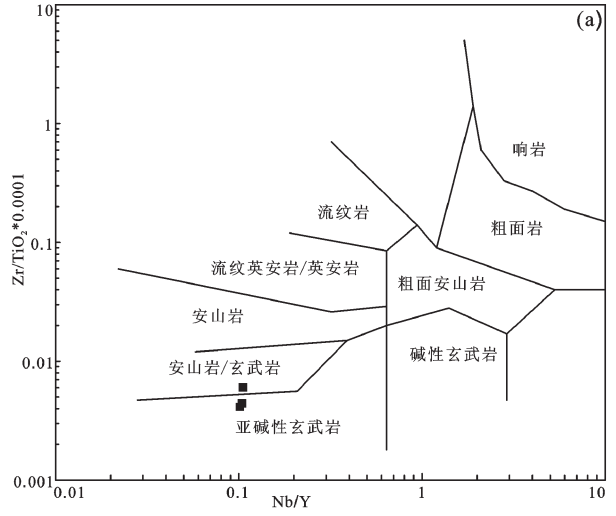


图 6 辉长岩 Zr/TiO₂-Nb/Y 图解 (a 据文献[27]) 和 AFM 图解 (b)

Fig.6 Plots of Zr/TiO₂-Nb/Y and AFM for gabbroes of Banpo complex

似。辉长岩 (Zr/Y (1.77~2.34), Ta/Yb (0.07~0.08), Zr/Nb (17.03~21.93)) 具有典型的大洋岛弧玄武岩 (Zr/Y < 3, Ta/Yb < 0.1, 70 > Zr/Nb > 25)^[32-33] 的特征, 在微量元素原始地幔标准化图解上 (图 7-b), 富集大离子亲石元素 (LILE) (K, Rb, Sr, Ba), 亏损高场强元素 (Nb, Ta, Tu, U)。

橄榄岩稀土总量很低 (0.69×10⁻⁶~2.97×10⁻⁶), 富含亲铁元素 Cr, Ni, Co, V, Ni (1113×10⁻⁶~2396×10⁻⁶) 和 Cr (3223×10⁻⁶~9010×10⁻⁶) 含量高于原始岩浆 (Ni = (400~500)×10⁻⁶, Cr > 1000×10⁻⁶) 的含量^[34]。

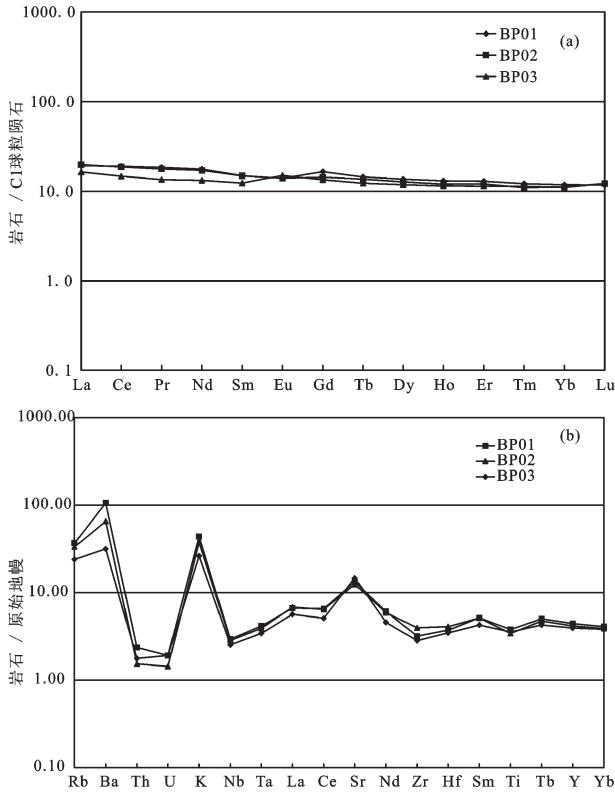


图7 辉长岩稀土元素配分曲线(a)和微量元素蛛网图(b)(C1球粒陨石数据引自文献[29];原始地幔数据引自文献[30])
 Fig.7 Chondrite-normalized REE (a) and primitive mantle-normalized multi-element (b) patterns of gabbros in Banpo complex

4 讨论

以往对半坡杂岩体大地构造背景的认识存在较大分歧,认为半坡杂岩体的岩浆活动应发生在二叠纪^[9]或三叠纪^[35],形成环境有弧后拉张盆地^[36]、俯冲带陆缘弧^[10]、大洋岛弧等多种观点。

半坡杂岩体辉长岩的高铝基性岩性质 ($Al_2O_3 \geq 16\%$) 及在微量元素蛛网图上富集大离子亲石元素 (Rb、Sr、K、Ba)、亏损高场强元素 (Nb、Ta、Zr、Hf),揭示了其岛弧岩浆岩性质及其形成与俯冲作用有关^[37-38]。辉长岩在 $Zr-Zr/Y$ 图解(图 8-a)上,落在了岛弧玄武岩与大洋中脊玄武岩中,在 $Y/15-La/10-Nb/8$ 图解(图 8-b)上,落在岛弧玄武岩上, Zr/Y 比值分布于 1.77~2.34,平均 1.96,位于 Pearce(1983)^[41]划分的大洋岛弧玄武岩区。半坡杂岩体具有典型的弧火山岩的特征,形成于与板块俯冲有关的岛弧环境,该特征与昌宁—孟连构造带中的 N-MORB 型、OIB 型蛇绿混杂岩明显不同^[42],表明其并不是蛇绿岩的组成部分。

辉长岩 $^{206}Pb/^{238}U$ 年龄为 $(302.6 \pm 2.2)Ma$,表明半坡杂岩体形成时代为晚石炭世,该年龄与李钢柱等取得的半坡杂岩体辉长闪长岩锆石年龄(294 Ma)^[15]、Jian 等报道的半坡杂岩体辉长岩的锆石年龄(285.6 Ma)相近^[9]。铜镍铂族元素矿床的成矿时代与其侵入岩体时代往往较为接近^[43-44],半坡杂岩体的形成年龄

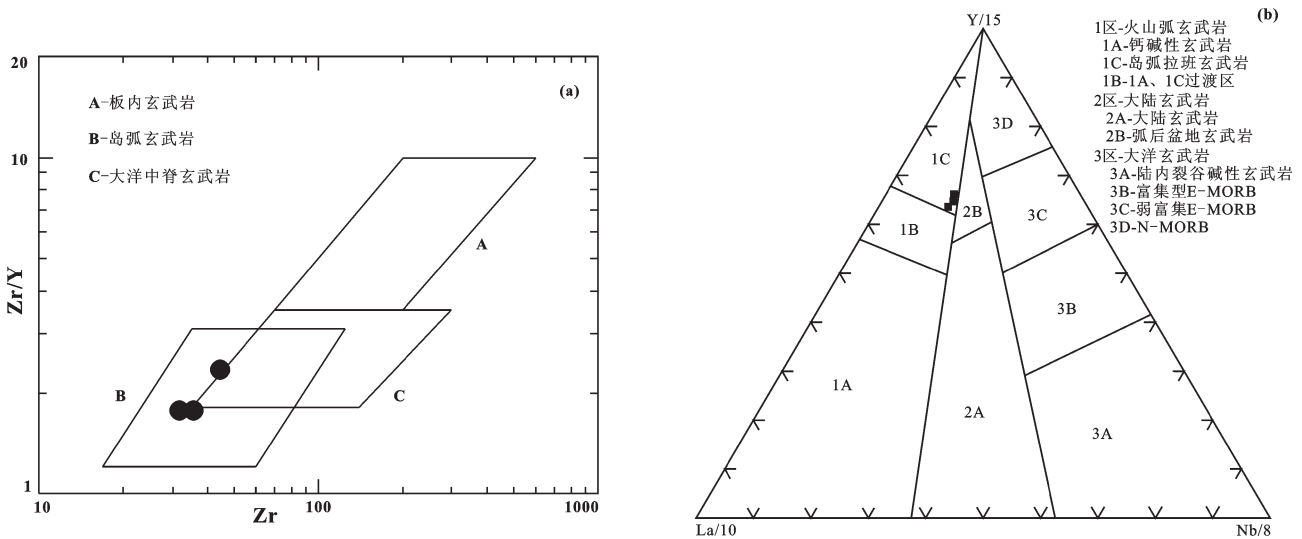


图8 辉长岩 $Zr/Y-Zr$ (a)、 $Y/15-La/10-Nb/8$ (b)图解 (a 据文献[39],b 据文献[40])
 Fig.8 $Zr/Y-Zr$ (a), $Y/15-La/10-Nb/8$ (b) diagrams for gabbros in Banpo complex

表 2 辉长岩、橄辉岩的主量元素(%)和微量元素(10^{-6}) 组成

Table 2 Major elements (%) and trace elements (10^{-6}) data for gabbros and peridotites in Banpo complex

样品	BP01	BP02	BP03	BP05	BP06	BP07	BP08	BP09	BP10	BP11
岩性	辉长岩			橄辉岩						
SiO ₂	53.34	53.42	51.51	37.99	38.02	38.45	37.98	40.35	37.69	37.81
TiO ₂	0.82	0.74	0.77	0.02	0.04	0.02	0.08	0.08	0.07	0.06
Al ₂ O ₃	16.36	16.47	18.81	0.44	0.42	0.36	3.40	6.19	3.78	3.62
Fe ₂ O ₃	4.71	3.89	3.05	14.75	15.09	14.16	8.55	9.31	9.36	7.96
FeO	4.18	4.66	5.53	2.95	2.42	3.19	2.99	3.60	2.95	4.05
MnO	0.30	0.30	0.33	0.08	0.08	0.07	0.13	0.16	0.14	0.15
MgO	5.70	4.94	4.96	32.21	32.29	32.72	33.73	36.42	33.05	34.39
CaO	4.28	5.61	7.46	0.15	0.14	0.12	1.22	1.39	1.24	0.60
Na ₂ O	5.92	5.69	4.39	0.14	0.14	0.11	0.14	0.15	0.16	0.15
K ₂ O	1.32	1.13	0.79	-	-	-	-	-	-	-
P ₂ O ₅	0.16	0.16	0.08	0.02	0.03	0.02	0.03	0.03	0.03	0.03
LOI	2.26	2.49	1.77	10.63	10.40	10.56	11.23	0.98	11.03	11.50
Total	99.35	99.50	99.45	99.39	99.06	99.79	99.47	98.66	99.49	100.32
Mg#	58.6	55.8	55.6	80.5	80.8	81.0	86.8	86.4	85.8	86.5
Rb	23.40	21.20	15.20	0.40	0.28	0.36	1.19	1.97	1.79	1.72
Sr	279.00	261.00	310.00	5.94	3.32	3.28	4.40	4.55	4.64	4.41
Ba	739.00	456.00	221.00	13.30	8.87	9.98	1.13	1.13	1.08	1.18
Ga	16.00	16.50	19.80	2.20	1.93	1.84	3.69	5.63	3.81	3.82
Nb	2.09	2.02	1.80	0.08	0.05	0.05	0.16	0.07	0.07	0.09
Ta	0.17	0.16	0.14	0.06	-	-	0.05	0.05	-	-
Zr	35.60	44.30	31.60	0.71	0.36	0.32	2.56	1.15	1.39	1.70
Hf	1.15	1.26	1.07	-	-	-	0.07	-	0.05	-
Th	0.20	0.13	0.15	0.06	0.07	0.05	0.05	0.05	-	0.10
V	306.00	271.00	296.00	45.20	37.70	38.70	49.70	77.20	42.90	55.40
Cr	66.60	51.00	54.00	5232.00	4705.00	4827.00	3847.00	9010.00	3952.00	3223.00
Co	28.40	27.50	29.60	151.00	137.00	139.00	122.00	146.00	132.00	130.00
Ni	18.70	15.70	21.00	1630.00	1455.00	1420.00	1234.00	2396.00	1113.00	1186.00
Sc	36.90	32.90	38.70	6.50	5.22	5.46	14.90	14.30	11.70	11.50
U	0.04	0.03	0.04	-	-	-	-	-	-	0.07
La	4.57	4.68	3.88	0.28	0.22	0.14	0.27	0.21	0.25	0.47
Ce	11.60	11.40	9.01	0.29	0.33	0.18	0.62	0.48	0.56	0.94
Pr	1.75	1.68	1.28	0.09	0.05	-	0.09	0.06	0.08	0.12
Nd	8.23	7.98	6.18	0.29	0.17	0.08	0.44	0.30	0.30	0.51
Sm	2.28	2.27	1.89	0.05	-	-	0.10	-	-	0.08
Eu	0.81	0.81	0.87	0.05	-	-	0.07	0.06	0.07	0.07
Gd	3.39	2.95	2.76	0.11	0.05	0.05	0.23	0.17	0.19	0.18
Tb	0.54	0.51	0.46	-	-	-	-	-	-	-
Dy	3.46	3.23	3.01	0.08	0.05	0.08	0.27	0.19	0.16	0.23
Ho	0.74	0.68	0.65	-	-	-	0.05	0.05	-	0.06
Er	2.14	2.00	1.89	0.06	-	0.07	0.15	0.12	0.11	0.15
Tm	0.31	0.28	0.29	-	-	-	-	-	-	-
Yb	2.01	1.91	1.88	0.07	-	0.09	0.15	0.11	0.11	0.16
Lu	0.30	0.31	0.31	-	-	-	-	-	-	-
Y	20.10	18.90	17.90	0.88	0.34	0.62	1.50	1.20	1.03	1.33
Σ REE	42.13	40.69	34.36	1.37	0.87	0.69	2.44	1.75	1.83	2.97
δ Eu	0.89	0.96	1.16	-	-	-	-	-	-	-
δ Ce	1.01	1.00	0.99	-	-	-	-	-	-	-
(La/Yb) _N	1.63	1.76	1.48	-	-	-	-	-	-	-

注: Mg[#]=100×(Mg²⁺)/(Mg²⁺+T Fe²⁺); TFeO=FeO+0.9Fe₂O₃; 下标 N 代表球粒陨石标准化值, 球粒陨石值据文献[29]。

(302.6 Ma)可近似作为矿床的成矿年龄,该年龄早于云南金宝山(259 Ma)^[43]、白马寨(259 Ma)^[44]等与峨眉山玄武岩及其相应镁铁-超镁铁侵入体具有时空联系的铜镍铂族元素矿床年龄。半坡杂岩体辉长岩(302.6 Ma)与南林山基性岩(298 Ma)^[45]说明了在晚石炭世—早二叠世南澜沧江构造带为大洋岛弧俯冲带。石炭纪—二叠纪是南澜沧江洋盆发育的全盛期,

在晚石炭世—早二叠世,板块扩张速度减慢,南澜沧江洋在扩张的同时向东俯冲于思茅地块之下,岛弧玄武岩浆经过结晶分异、上升侵位到上地壳形成半坡杂岩体,大约 285 Ma 以后半坡杂岩体所在的大洋岛弧已经拼贴到思茅地块西缘演化为陆缘弧^[15]。半坡杂岩体的年龄与吉岔蛇纹岩(>297 Ma)和俄咱辉长岩(303 Ma)^[46]年龄一致,且与金沙江蛇绿岩(294~300

Ma)的形成时间一致,从另一方面证实了澜沧江造山带的沟-弧-盆系统总体上与金沙江造山带类似^[4]的观点。

5 结 论

(1)半坡铂钨多金属矿床中与成矿关系密切的辉长岩的 LA-ICP-MS 锆石 U-Pb 同位素年龄为 (302.6±2.0)Ma,代表半坡杂岩体的形成年龄,其形成时代为晚石炭世末期。

(2)辉长岩的高铝基性岩性质及富集大离子亲石元素、亏损高场强元素(Nb、Ta、Zr、Hf),揭示了其岛弧的岩浆岩性质,表明半坡杂岩体形成于与板块俯冲有关的大洋岛弧环境。

(3)半坡杂岩体与南林山基性岩体(298 Ma)说明了在晚石炭世至早二叠世南澜沧江构造带为大洋岛弧俯冲带,该构造带有助于形成与铜镍铂钨矿化密切相关的镁铁-超镁铁质岩体。

参考文献(References):

[1] 邓军, 杨立强, 王长明, 等. 三江特提斯复合造山与成矿作用研究进展[J]. 岩石学报, 2011, 27(9):2501-2509.
Deng Jun, Yang Liqing, Wang Changming, et al. Research advances of superimposed orogenesis and metallogenesis in the Sanjiang Tethys [J]. Acta Petrologica Sinica, 2011, 27 (9):2501-2509 (in Chinese with English abstract).

[2] 邓军, 王长明, 李龚健. 三江特提斯叠加成矿作用样式及过程[J]. 岩石学报, 2012, 12(5):1349-1361.
Deng Jun, Wang Changming, Li Gongjian. Style and process of the superimposed mineralization in the Sanjiang Tethys [J]. Acta Petrologica Sinica, 2012, 28 (5):1349-1361 (in Chinese with English abstract).

[3] 莫宣学, 路凤香, 沈上越, 等. 三江特提斯火山作用与成矿[M]. 北京: 地质出版社, 1993:1-267.
Mo Xuanxue, Lu Fengxiang, Shen Shangyue, et al. Volcanism and Metallogenesis of Sanjiang Tethys[M]. Beijing: Geological Publishing House, 1993:1-267(in Chinese with English abstract).

[4] 潘桂棠, 徐强, 侯增谦, 等. 西南“三江”多岛弧造山过程成矿系统与资源评价[M]. 北京: 地质出版社, 2003:106-112.
Pan Guitang, Xu Qiang, Hou Zengqian, et al. Arcipelagic orogenesis metallogenic systems and assessment of the Mineral Resources along the Nujiang-Lanchangjiang-Jinshajiang Area in Southwestern China [M]. Beijing: Geological Publishing House, 2003:278-420 (in Chinese with English abstract).

[5] 莫宣学, 沈上越, 朱勤文, 等. 三江中南段火山岩蛇绿岩与成矿[M]. 北京: 地质出版社, 1998:1-128.
Mo Xuanxue, Shen Shangyue, Zhu Qinwen, et al. Volcanics -

Ophiolite and Mineralization of the Middle to South Parts of the Sanjiang Area in southwestern China [M]. Beijing: Geological Publishing House, 1998:1-128(in Chinese with English abstract).

[6] 钟宏, 胡瑞忠, 叶造军, 等. 云南大平掌细碧-角斑岩建造的同位素年代学及其地质意义 [J]. 中国科学 (D 辑), 1999, 29 (5):407-412.
Zhong Hong, Hu Ruizhong, Ye Zaojun, et al. Isotopic chronology of the spilite-ceratophyre formation in Dapingzhang, Yunnan Province and its geologic significance[J]. Science in China(Series D), 1999, 29(5):407-412(in Chinese).

[7] 张彩华, 刘继顺, 刘德利. 滇西南澜沧江带官房地区三叠纪火山岩地质地球化学特征及其构造环境 [J]. 岩石矿物学杂志, 2006, 25(5):377-386.
Zhang Caihua, Liu Jishun, Liu Deli. geological and geochemical characteristics and tectonic setting of triassic volcanic suite in guanfang area along south lancangjiang belt [J]. Acta Petrologica et Mineralogica, 2006, 25 (5):377-386 (in Chinese with English abstract).

[8] 朱维光, 钟宏, 王立全, 等. 云南民乐铜矿床中玄武岩和流纹斑岩的成因: 年代学和地球化学制约[J]. 岩石学报, 2011, 27(9):2694-2708
Zhu Weiguang, Zhong Hong, Wang Liquan, et al. Petrogenesis of the basalts and rhyolite porphyries of the Minle copper deposit, Yunnan: Geochronological and geochemical constraints [J]. Acta Petrologica Sinica, 2011, 27 (9):2694-2708 (in Chinese with English abstract).

[9] Jian P, Liu D Y, Kroner A, et al. Devonian to Permian plate tectonic cycle of the Paleo-Tethys Orogen in southwest China (I): Insights from zircon ages of ophiolites, arc/ back-arc assemblages and within-plate igneous rocks and generation of the Emeishan CFB province[J]. Lithos, 2009, 13(3/4):748-766.

[10] Jian P, Liu D Y, Kroner A, et al. Devonian to Permian plate tectonic cycle of the Paleo-Tethys Orogen in southwest China (II): Insights from zircon ages of ophiolites, arc/ back-arc assemblages and within-plate igneous rocks and generation of the Emeishan CFB province[J]. Lithos, 2009, 13(3/4):767-784.

[11] Zhai Y S, Deng J. Outline of the mineral resources of China and their tectonic setting [J]. Australian Journal of Earth Sciences, 1996, 43:673-685.

[12] 王秉璋, 罗照华, 曾小平, 等. 青海三江北段治多地区印支期花岗岩的成因及锆石 U-Pb 定年[J]. 中国地质, 2008, 35(2):196-205.
Wang Bingzhang, Luo Zhaohua, Zeng Xiaoping, et al. Indosinian granitoids in the Zhidui area in the northern segment of the Sanjiang belt, Qinghai: Their petrogenesis and zircon U-Pb dating [J]. Geology in China, 2008, 35 (2):196-205 (in Chinese with English abstract).

[13] 戴塔根, 吴湘滨, 胡斌, 等. 澜沧江断裂中段雪山河变质岩群的岩相特征及地质意义[J]. 中国地质, 2002, 30(3):297-300.
Dai Tagen, Wu Xiangbin, Hu Bin, et al. Petrology and geological

- significance of the Xueshanhe Group -complex in the central segment of the Lancangjiang fault [J]. *Geology in China*, 2002, 30 (3):297-300(in Chinese with English abstract).
- [14] Naldrett A J, Duke J M. Platinum metals in magmatic ores [J]. *Science*, 1980, 208:1417-1424.
- [15] 李钢柱, 苏尚国, 段向东. 三江地区澜沧江带南段半坡杂岩体锆石 U-Pb 年龄、岩石地球化学特征及板块构造环境 [J]. *地学前缘*, 2012, 19(4):96-109.
Li Gangzhu, Su Shangguo, Duan Xiangdong. Precise ID-TIMS zircon U-Pb age, whole-rock geochemistry and plate tectonic setting of the Banpo Complex in the southern Lancangjiang arc terrane, Sanjiang area, SW China [J]. *Earth Science Frontiers*, 2012, 19(4):96-109(in Chinese with English abstract).
- [16] 谢岩锐, 陈平. 磁测成果圈定半坡镁铁岩体及推断深部形态 [J]. *云南地质*, 2012, 31(1):69-72.
Xie Kuirui, Chen Ping. The application of magnetic exploration to outlining of Banpo Mg-Fe rock body & deduction of deep form [J]. *Yunnan Geology*, 2012, 31(1):69-72(in Chinese with English abstract).
- [17] Liu Y, Gao S, Hu Z, et al. Continental and oceanic crust recycling-induced melt-peridotite interactions in the Trans-North China Orogen: U-Pb dating, Hf isotopes and trace elements in zircons of mantle xenoliths [J]. *Journal of Petrology*, 2010, 51:537-571.
- [18] Liu Y, Hu Z, Zong K, et al. Reappraisal and refinement of zircon U-Pb isotope and trace element analyses by LA-ICP-MS [J]. *Chinese Science Bulletin*, 2010, 55(15):1535-1546.
- [19] Liu Y S, Hu Z C, Gao S, et al. In situ analysis of major and trace elements of anhydrous minerals by LA-ICP-MS without applying an internal standard [J]. *Chemical Geology*, 2008, 257:34-43.
- [20] Ludwig K R. 3.0. A Geochronological Toolkit for Micro-soft Excel [M]. Berkeley Geochronology Center, Special Publication, 2003, (4):1-70.
- [21] Hoskin P W O, Black L P. Metamorphic zircon formation by solid-state recrystallization of protolith igneous zircon [J]. *Journal of Metamorphic Geology*, 2000, 18:423-439.
- [22] 吴元保, 郑永飞. 锆石成因矿物学研究及其对 U-Pb 年龄解释的制约 [J]. *科学通报*, 2004, 49(16):1589-1604.
Wu Yuanbao, Zheng Yongfei. Genesis of zircon and its constraints on the interpretation of U-Pb age [J]. *Chinese Science Bulletin*, 2004, 49(15):1554-1569.
- [23] 张旗, 周国庆. 中国蛇绿岩 [M]. 北京: 科学出版社, 2001:1-182
Zhang Qi, Zhou Guoqing. *Ophiolite of China* [M]. Beijing: Science Press, 2001:1-182(in Chinese with English abstract).
- [24] Wilson M. *Igneous Petrogenesis* [M]. London: Unwin Hyman, 1989:1-464.
- [25] Crawford A J, Falloon T J, Eggins S. The origin of island arc high-alumina basalts [J]. *Contributions to Mineralogy and Petrology*, 1987, 97:417-430.
- [26] Kersting A B, Arculus R J. Klyuchevskoy volcano, Kamchatka, Russia: The role of high-flux recharged, tapped, and fractionated magma chamber (s) in the genesis of high-Al₂O₃ from high-MgO basalt [J]. *Journal of Petrology*, 1994, 35:1-41.
- [27] Winchester J A, Floyd P A. Geochemical magma type discrimination: Application to altered and metamorphosed basic igneous rocks [J]. *Earth and Planetary Science Letters*, 1976, 28:459-469.
- [28] McDonough W F, Sun S S. The composition of the Earth [J]. *Chemical Geology*, 1995, 12:223-254.
- [29] Taylor S R, McLennan S M. *The Continental crust: Its composition and evolution* [M]. New York: Wiley-Heyden, 1985.
- [30] Sun S S, McDonough W F. Chemical and isotopic systematics of oceanic basalts: Implications for mantle composition and processes [J]. *Geological Society*, 1989, 42:313-345.
- [31] Shinjo R, Chung S L, Kato Y, et al. Geochemical and Sr-Nd isotopic characteristics of volcanic rocks from the Okinawa Trough and Ryukyu Arc: Implications for the evolution of a young, intracontinental back arc basin [J]. *Journal of Geophysical Research*, 1999, 104:10591-10608.
- [32] Condie K C. Geochemical change in basalts and andesites across the Archean-Proterozoic boundary: Identification and significance [J]. *Lithos*, 1989, 23:1-18.
- [33] McCulloch E M, Gamble J A. Geochemical and Geodynamic constraints on subduction magmatism [J]. *Earth and Planetary Science Letters*, 1991, 102:358-374.
- [34] Wilson M. *Igneous Petrogenesis* [M]. London: Unwin Hyman, 1989:1-466.
- [35] 张旗, 张魁武, 李达周. 横断山区镁铁-超镁铁岩 [M]. 北京: 科学出版社, 1992:1-216.
Zhang Qi, Zhang Kuiwu, Li Dazhou. *Mafic-Ultramafic Rocks in Hengduan Mountains Region* [M]. Beijing: Science Press, 1992:1-216 (in Chinese with English abstract).
- [36] 李文昌, 潘桂棠, 侯增谦, 等. 西南“三江”多岛弧-盆碰撞造山成矿理论与勘查技术 [M]. 北京: 地质出版社, 2010:92-104.
Li Wenchang, Pan Guitang, Hou Zengqian, et al. *Arc-Basin Collision Orogenic of Southwest “Sanjiang” Metallogenic Theory and Exploration Technology* [M]. Beijing: Geological Publishing House, 2010:92-104 (in Chinese with English abstract).
- [37] Barbarin B. A review of the relationships between granitoid types, their origin and their geodynamic environments [J]. *Lithos*, 1999, 46: 605-626.
- [38] Zhu D C, Mo X X, Zhao Z D et al. Presence of Permian extension and arc-type magmatism in southern Tibet. Paleogeographic implicit [J]. *GSA Bulletin*, 2010, 122:979-993.
- [39] Pearce J A, Norry M J. Petrogenetic Implications of Ti, Zr, Y, and Nb Variations in Volcanic Rocks [J]. *Contributions to Mineralogy and Petrology*, 1979, 69:33-47.
- [40] Cabanis B, Lecomte M. Le diagramme La/10-Y/15-Nb/8: Un outillage la discrimination des series volcaniques et la mise en

- evidencedes oprocess de melange et/ou de contamination crustal [J]. C. R. A-cad. Sci. Ser., 1980, 309:2023-2029.
- [41] Pearce J A. Role of the sub-continental lithosphere in magma genesis at active continental margins [C] // Hawkesworth C J, Norry M J (ed.). Continental Basalts and Mantle Xenoliths. Nantwich:Shiva, 1983:230-249.
- [42] 赖绍聪, 秦江锋, 李学军, 等. 昌宁-孟连缝合带干龙塘-弄巴蛇绿岩地球化学及 Sr-Nd-Pb 同位素组成研究 [J]. 岩石学报, 2010, 26(11): 3195-3205.
- Lai Shaocong, Qin Jiangfeng, Li Xuejun, et al. Geochemistry and Sr-Nd-Pb isotopic features of the Ganlongtang-Nongba ophiolite from the Changning-Menglian suture zone [J]. Acta Petrologica Sinica, 2010, 26(11): 3195-3205(in Chinese with English abstract).
- [43] Zhou M F, Malpas J, Song X Y, et al. A temporal link between the Emeishan large igneous province (SW China) and the end-Guadalupian mass extinction [J]. Earth and Planet. Sci. Lett., 2002, 196:113-122.
- [44] 石贵勇, 孙晓明, 王生伟, 等. 云南白马寨铜镍硫化物矿床 Re-Os 同位素定年及其地质意义 [J]. 岩石学报, 2006, 22(10):2451-2456.
- Shi Guiyong, Sun Xiaoming, Wang Shengwei, et al. Re-Os isotopic dating and its geological implication of Baimazhai Cu-Ni sulphide deposit, Yunnan Province, China [J]. Acta Petrologica Sinica, 2006, 22(10):2451-2456 (in Chinese with English abstract).
- [45] 李钢柱, 苏尚国, 雷玮琰, 等. 三江地区澜沧江带南段南林山基性岩体锆石 U-Pb 年龄及岩石地球化学特征 [J]. 地学前缘, 2011, 18(5):206-212.
- Li Gangzhu, Su Shangguo, Lei Weiyan, et al. Precise ID-TIMS zircon U-Pb age and whole-rock geochemistry of the Nanlinshan mafic intrusion in the southern Lancangjiang arc terrane, Sanjiang area, SW China [J]. Earth Science Frontiers, 2011, 18(5):206-212 (in Chinese with English abstract).
- [46] 魏君奇, 王晓地, 庄晓, 等. 澜沧江缝合带吉岔蛇纹岩中闪长岩和俄咱辉长岩中锆石 SHRIMP U-Pb 定年及其地质意义 [J]. 岩石学报, 24 (6):1297-1301.
- Wei Junqi, Wang Xiaodi, Zhuang Xiao, et al. Zircon SHRIMP U-Pb dating of diorite among Jicha serpentine and Eza gabbro from Lancangjiang belt, Yunnan Province and its geological significance [J]. Acta Petrologica Sinica, 2008, 24(6):1297-1301 (in Chinese with English abstract).

Zircon LA-ICP-MS U-Pb dating of gabbro of the Banpo Pt-Pd-polymetallic deposit in Jinggu, Yunnan Province, and its geological significance

ZHANG Hai, JIN Can-hai, FAN Wen-yu, SHEN Zhan-wu, ZHANG Yu, GAO Jian-hua

(Chengdu Institute of Geology and Mineral Resources, Chengdu 610081, Sichuan, China)

Abstract: The Banpo Pt-Pd Complex Deposit of Jinggu is located in Lanping-Simao landmass along the southern part of the Lancang River. Its mineralization is related to Banpo complex. This complex mainly consists of mafic-ultramafic rocks such as peridotite, pyroxenite, gabbro, gabbro diorite and diorite. U-Pb age of zircons from the gabbro determined by LA-ICP-MS is 302.6 ± 2.0 Ma, indicating that Banpo Complex was formed in Late Carboniferous. The gabbro belongs to high aluminum basite. The rock samples are all characterized by slight enrichment of light rare earth elements relative to heavy rare earth elements, the enrichment of ion lithophile elements (Rb, Sr, K, Ba) and the depletion of high field strength elements (Nb, Ta, Zr and Hf). These characteristics are typical of island arc magmas and indicate that Banpo complex was formed in an island-arc environment related to plate subduction. Therefore, southern Lancang River is considered to have been an oceanic island arc subduction belt between the late period of Late Carboniferous and the early period of Early Permian.

Key words: gabbro; zircon; LA-ICP-MS U-Pb dating; Banpo of Jinggu

About the first author: ZHANG Hai, male, born in 1980, doctor, engages in the study of mineralogy and mineral deposit geology; E-mail: zhanghai1980@sina.com.