www.
geojournals.cn/georev

# 扬子陆块西缘东川地区新元古代基性岩浆事件的厘定及其对Rodinia超大陆裂解的指示

王天元[1)],闫娜[2)],李敏[2)],马成龙[2,3)],吕勃烨[4)],刘军平[3,5)]

1)自然资源部油气资源战略研究中心,北京,100860;
2)辽河油田公司,辽宁盘锦,124010;
3)中国地质大学地球科学与资源学院,北京,100083;
4)云南省国土资源规划设计研究院,昆明,650216; 5)云南省地质调查院,昆明,650216

**内容提要**:扬子陆块西缘东川铜矿区外围广泛出露辉绿—辉长基性岩墙群,其成因、时代及含矿性未形成统一的认识。通过对东川铜矿区外围小以西基性岩体辉绿—辉长岩的岩石学、岩石地球化学及同素位研究,结果获得800.4±7.0 Ma($MSWD$=0.0085,$n$=20)锆石LA-ICP-MS U-Pb年龄,表明东川铜矿外围广泛出露的基性侵入岩岩体群侵位时代为新元古代中期,说明东川铜矿区存在新元古代中期的岩浆事件,为区内多期岩浆成矿事件提供重要的证据。基性侵入岩岩体群岩石地球化学表现出高MgO(5.11%~7.77%,平均值为6.23%)、高$TiO_2$(2.04%~2.95%,平均值为2.60%)、富碱(2.30%~3.39%,平均值为2.97%),具有偏碱性的钾质高钛玄武岩的岩石化学特征,富集K、Rb、Ba等大离子半径元素,Ta、Nb、Zr、Hf等高场强元素没有明显亏损,微量、稀土元素的配分模式与典型的洋岛玄武岩(OIB)较为一致,形成于伸展构造背景。锆石原位Lu—Hf同位素、$(La/Sm)_N$—$(Tb/Yb)_N$及轻微Ta负异常表明,小以西基性岩体是中元古代中期下地幔石榴子石橄榄岩≤5%的低程度部分熔融作用的产物,后期可能有少量壳源物质混入。小以西基性岩体的形成可能与新元古代中期引起Rodinia超大陆裂解的地幔柱活动有关,是南华裂谷重要的岩石学及岩浆记录。

**关键词**:东川地区;新元古代中期;锆石U-Pb年龄;地球化学;Rodinia超大陆

云南省东川因民地区位于康滇古陆的北部,是重要的铜、铁成矿区,区内有著名的因民铜矿、落雪铜矿、汤丹铜矿、青龙山铜矿、包子铺铁矿等,赋存层位为早前寒武纪地层,也是研究早前寒武纪地层格架、时代、含矿性最为理想的场所。前人对东川铜矿区的基性岩墙群作了大量工作,获得较多的精确的同位素年龄,但锆石U-Pb年龄集中在1.60~1.75 Ga,与E-MORB和OIB的特征较相似,形成的伸展构造背景,是全球性的Columbia超级大陆裂解的产物,为区内铜、铁成矿提供了重要的物质来源(朱华平等,2011;Zhao Xinfu et al., 2010;Lu Guimei et al., 2019;Liu Junping et al., 2021,2022,2023,2024)。然而矿区外围青龙山、小以西、油房沟等地发育大量辉长岩、辉绿岩、煌斑岩等岩浆岩,目前对上述岩浆岩研究程度较低,特别是形成时代、构造演化以及岩浆活动与大规模铜、铁成矿的关系未达成统一的认识。导致研究区内是否存在多期次岩浆活动?是否存在多期岩浆作用成矿事件?是否存在与Rodinia超大陆构造演化岩浆记录?尚不清楚。

笔者等在详细1∶5万野外地质调查及剖面测制的基础上,以云南东川因民铜矿区外围基性侵入岩为研究对象,利用LA-ICP-MS技术测得了锆石U-Pb同位素,结合岩石地球化学及Lu—Hf同位素特征,对基性侵入岩时代、岩石成因、构造演化、与成矿

注:本文为自然资源部基金项目(编号:2024KCZYCLGL)、云南省科学技术厅项目(编号:202305AD160031,202401AT070012)、云南省自然资源厅基金项目(编号:D201905、D202207)的成果。

收稿日期:2024-05-27;改回日期:2024-09-18;网络首发:2024-10-20;责任编辑:章雨旭。Doi: 10.16509/j.georeview.2024.10.045

作者简介:王天元,男,1991年生,助理研究员,从事资源勘查及地质调查工作;Email: wangty@sinooilgas.org.cn。通讯作者:吕勃烨,男,1986年生,工程师,主要从事国土空间规划、区域地质调查、耕地保护等相关研究工作;Email: 121499669@qq.com。

关系进行探讨,为滇中东川地区存在约 0.80 Ga 的全球 Rodinia 超大陆裂解事件提供重要证据,也为区内存在多期岩浆成矿事件提供资料。

# 1 区域地质背景

研究区构造位置位于扬子陆块西缘,地处云南东川因民地区,位于扬子陆块区之上扬子古陆块的康滇裂谷,地层分区属华南地层大区的上扬子地层区之昆明地层小区(图 1)。滇中地块属于扬子陆块重要组成部分,主要由太古宙—古元古代结晶基底岩系、中元古代褶皱基底岩系、古生代—新生代盖层,以及元古代花岗岩类、基性岩类等,少量时代不明的超基性岩等组成(陈建书等,2020;刘军平等,2023a,2023b)。

研究区出露地层为中元古界东川群(图 1b),沉积时代 1.75 ~ 1.40 Ga;自下而上包括因民组($Pt_2y$)、落雪组($Pt_2l$)、黑山组($Pt_2h$)及青龙山组($Pt_2q$)。因民组($Pt_2y$)为一套碎屑岩夹碳酸盐岩、火山岩建造;落雪组($Pt_2l$)为一套含铜碳酸盐岩建造,为区内主要含铜层位;黑山组($Pt_2h$)为一套碎屑岩夹碳酸盐岩、火山岩建造;青龙山组($Pt_2q$)为一套碳酸盐岩建造(高林志等,2018;刘军平等,2020a,2020b,2022);在青龙山断裂一带发育中型青龙山铜矿,成因可能为岩浆热液改造型;断层主要发育北东向、近东西向;岩浆岩主要为基性侵入岩,时代不明。

# 2 样品采集及实验条件

## 2.1 样品采集

基性侵入岩体群分布于因民小以西、青龙山、下新山、油房沟等地,呈岩枝、岩脉状(图 1b),本次选择基性侵入岩体群中小以西岩体为研究对象。基性侵入岩体群主要侵入于中元古界黑山组、因民组板岩中,围岩普遍发育热斑点,可见热烘烤现象,发生角岩化。岩体岩性较为单一,由灰绿色辉绿岩、灰绿色辉长岩组成,边部向中部呈现由细→中→粗粒变化。本次选择露头新鲜的小以西岩体进行采样(图 2a),采集了 1 件锆石 U-Pb 定年及 Lu—Hf 同位素样(D2110-3-5)、6 件岩石地球化学样(D2110-3-1、2110-3-2、D2110-3-3、D2110-3-4、D2110-3-5、D2110-3-6)。

灰绿色辉绿岩:岩石呈灰绿色(图 2b),风化后多呈褐黄色、灰黄色;岩石具辉绿结构,块状构造,自形较好的板条状斜长石杂乱分布搭成格架,其间隙中充填单粒他形粒状、柱状普通辉石,构成辉绿结构。岩石由斜长石(66% ~ 70%)、普通辉石(40% ~ 45%)、钛铁矿(4% ~ 6%)等组成,其中斜长石已轻

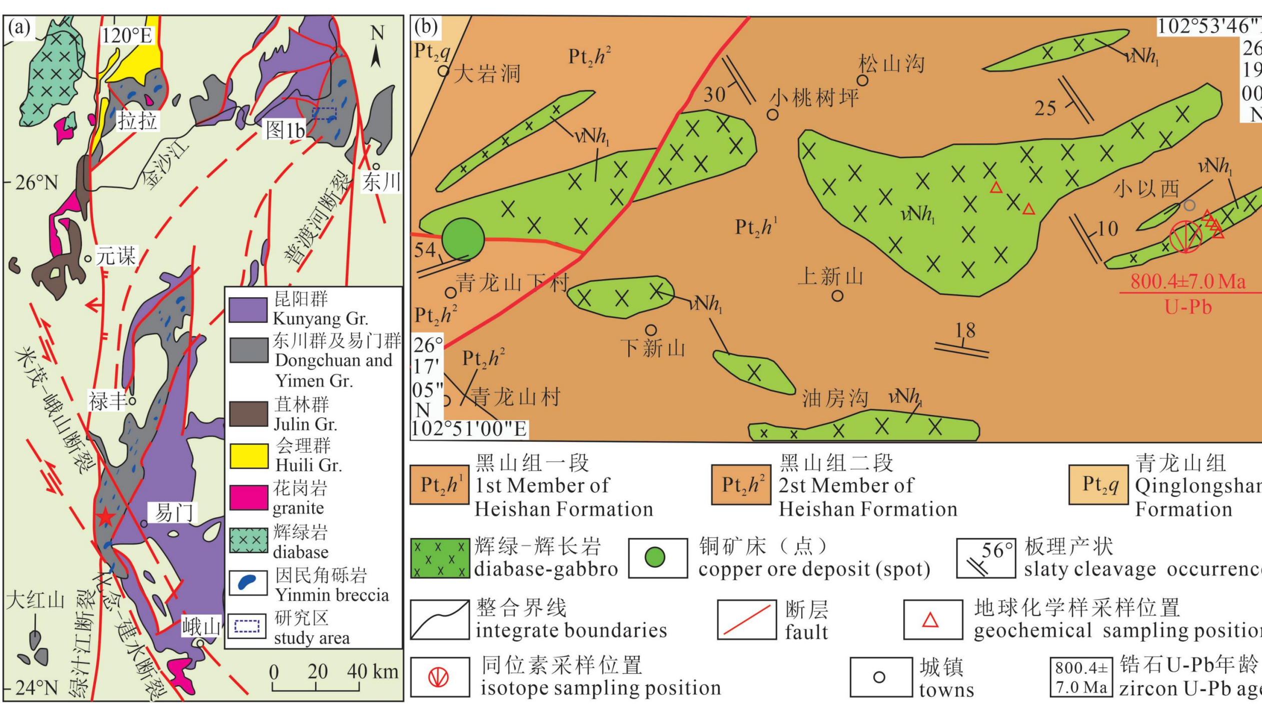


图 1 云南省东川因民地区的大地构造位置图(a)(据 Zhao Xinfu et al., 2010)、地质简图及采样点(b)❶

Fig. 1 Geotectonic location map(a)(modified after Zhao Xinfu et al.,2010) and simplified geological map(b) of Dongchuan area of Yunnan Province❶

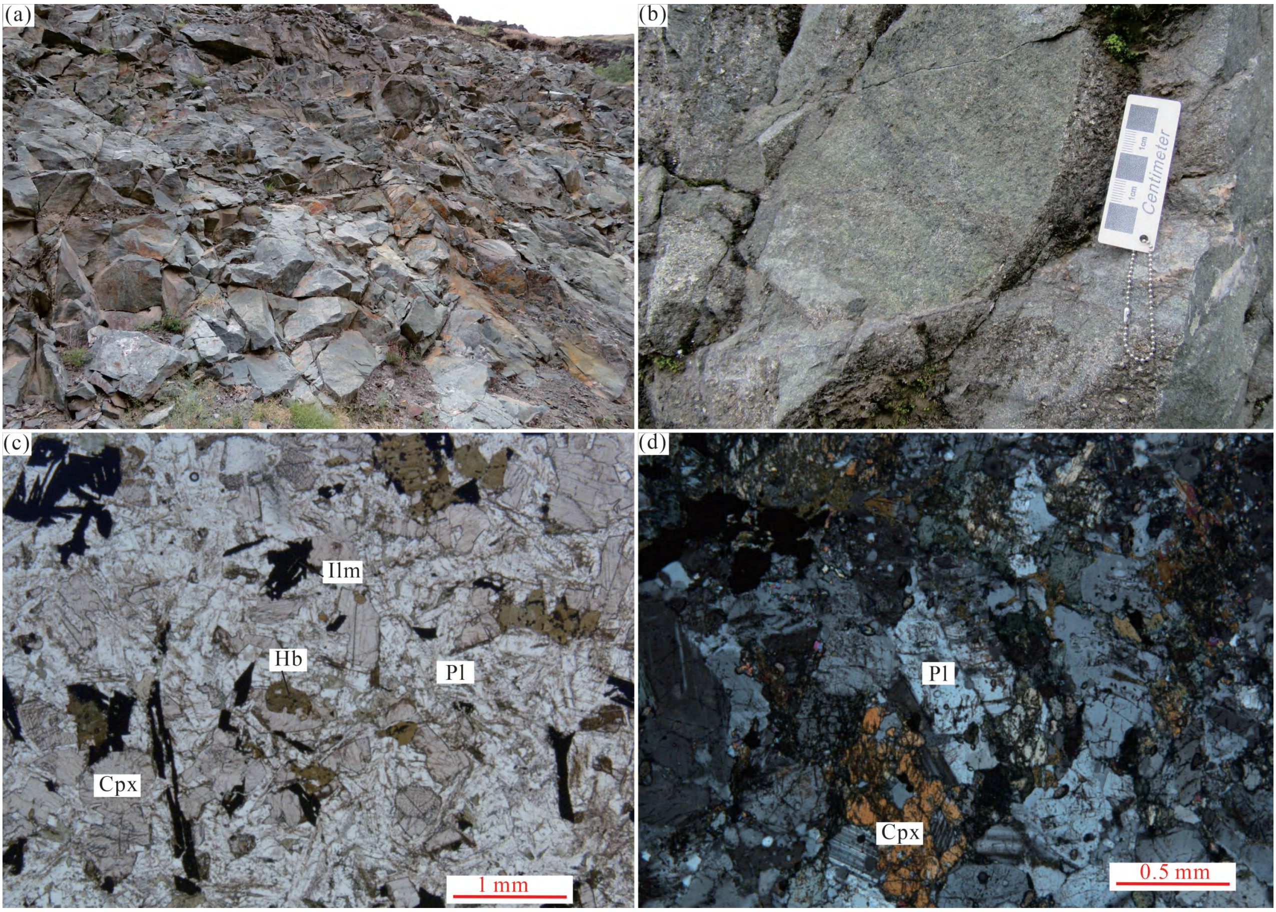


图 2 云南省东川因民地区小以西基性岩体野外及镜下特征

Fig. 2 Field and microscopic characteristics of the Xiaoyixi diabase in Dongchuan area of Yunnan Province

(a) 野外特征;(b) 辉绿岩露头;(c) 辉绿岩镜下特征(单偏光);(d) 辉长岩镜下特征(正交偏光)

(a) Field characteristics; (b) diabase outcrop; (c) microscopic characteristics of diabase (-); (d) microscopic characteristics of gabbro (+)

微钠黝帘石化,辉石不同程度地皂石化。镜下特征见图 2c。

灰绿色辉长岩:岩石呈灰绿色,风化后多呈褐黄、灰黄色,具变余辉长结构,块状构造。岩石由斜长石(54%~60%)、次生角闪石(29%~35%)、次生黑云母(11%~15%)及不明矿物(3%~5%)等组成,斜长石已强烈钠黝帘石化,仅保留其假象和少量残余;次生角闪石呈短柱状辉石假象产出,蚀变斜长石与残余辉石假象粒径大小及自形程度均相当,构成岩石的变余辉长结构(图 2d)。

### 2.2　实验条件

锆石分选在廊坊岩拓地质服务有限公司完成,将辉绿岩样品粉碎、淘选、重选,然后磁选分离出锆石颗粒,通过镜下挑选出晶形较好的锆石 120 余粒,锆石呈无色透明的粒状、短柱状,长度变化在 50~90 μm 之间,制作成环氧树脂样品靶,打磨样品靶,使锆石的中心部位暴露出来,对锆石进行反射光、透射光显微照相和阴极发光(CL)图像分析,根据反射光、透射光及锆石 CL 图像,选择代表性的锆石颗粒和区域进行 U-Pb 测年和 Lu—Hf 同位素测定。

U-Pb 同位素测定在湖北省地质实验室测定中心使用 LA-ICP-MS 原位分析完成。GeolasPro 激光剥蚀系统由 COMPexPro 102 ArF193nm 准分子激光器和 MicroLas 光学系统组成,ICP-MS 型号为 Agilent 7900。激光剥蚀过程中采用氦气作载气、氩气为补偿气以调节灵敏度,二者在进入 ICP 之前通过一个 T 型接头混合,激光剥蚀系统配置有信号平滑装置。本次分析的激光束斑和频率分别为 32 μm 和 10 Hz。U-Pb 同位素定年和微量元素含量处理中采用锆石标准 91500 和玻璃标准物质 NIST610 作外标分别进行同位素和微量元素分馏校正。每个时间分辨分析数据包括大约 20~30 s 空白信号和 50 s 样品信

号。对分析数据的离线处理，采用软件 ICPMSDataCal 完成。锆石样品的 U-Pb 年龄谐和图绘制和年龄加权平均计算采用 Isoplot/Ex_ver3 完成(王海然等,2013)。采用年龄为 $^{206}Pb/^{238}U$ 年龄,其加权平均值的误差为 2σ, $^{206}Pb/^{238}U$(和 $^{207}Pb/^{206}Pb$)平均年龄误差为 95%置信度(Ludwing, 2003)。

主量、微量元素和锆石 Lu—Hf 同位素分析在武汉上谱分析科技有限责任公司完成。选择 6 件岩石样品分别进行主量元素和微量元素分析(表 1、表 2、表 3)。主量元素采用 XRF 法、微量元素用 ICP-MS 测定。微量元素样品在高压溶样弹中用 $HNO_3$ 和 HF 混合酸溶解两天后用 VG Plasma-Quad Excell ICP-MS 方法测试完成。锆石原位 Lu—Hf 同位素测定由激光剥蚀多接收器电感耦合等离子体质谱仪完成,激光进样系统为 NWR213nm 固体激光器,分析系统为多接收等离子体质谱仪(NEPTUNE plus),激光剥蚀的斑束直径一般为 40 μm,能量密度为 7~8 J/cm$^2$,频率为 10 Hz, $^{176}Lu$ 和 $^{176}Yb$ 对 $^{176}Hf$ 的同质异位素干扰通过监测 $^{175}Lu$ 和 $^{172}Yb$ 信号强度,采用 $n(^{175}Lu)/n(^{176}Lu)) = 0.02655$ 和 $n(^{176}Yb)/n(^{172}Yb)= 0.5886$ 进行校正,以标准锆石 91500、GJ-1 与样品锆石交叉分析对仪器漂移进行外部监控。分析结果所获得标准样品 91500 和 GJ-1 的 $n(^{176}Hf)/n(^{177}Hf)$ 值分别为 0.282283±0.000041($n$=4,2σ)和 0.282019±0.000029($n$=4,2σ),在误差范围内与参考值吻合。计算 $\varepsilon_{Hf}(t)$ 时,球粒陨石的 $n(^{176}Hf)/n(^{177}Hf)$ 值为 0.282772, $n(^{176}Lu)/n(^{177}Hf)$ 值为 0.0332,单阶段 Hf 模式年龄($T_{DM1}$)计算时,亏损地幔的值采用 $n(^{176}Hf)/n(^{177}Hf$ = 0.28325), $n(^{176}Lu)/n(^{177}Hf)$ = 0.0384,两阶段 Hf 模式年龄($T_{DM2}$)计算时,平均地壳的 $n(^{176}Lu)/n(^{177}Hf)$ 值为 0.015(Vermeesch, 2018)。

## 3 岩石地球化学特征

### 3.1 主量元素

小以西岩体 6 个样品的岩石化学成分分析结果见表 1。从表 1 中可看出,小以西岩体岩石 $SiO_2$ 含量介于 47.49%~49.47%,平均值为 48.52%,为基

**表 1 云南省东川地区小以西基性岩体的全岩主量(%)、微量和稀土(×10$^{-6}$)元素分析数据**

**Table 1 Whole-rock major(%) and trace(×10$^{-6}$) element analyses of rhyolitic tuff from the Xiaoyixi basic intrusives in Dongchuan area of Yunnan Province**

| 样品编号 | D2110-3-1 | D2110-3-2 | D2110-3-3 | D2110-3-4 | D2110-3-5 | D2110-3-6 | 样品编号 | D2110-3-1 | D2110-3-2 | D2110-3-3 | D2110-3-4 | D2110-3-5 | D2110-3-6 |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| 岩性 | 辉长岩 | 辉长岩 | 辉长岩 | 辉长岩 | 辉绿岩 | 辉绿岩 | 岩性 | 辉长岩 | 辉长岩 | 辉长岩 | 辉长岩 | 辉绿岩 | 辉绿岩 |
| $SiO_2$ | 49.47 | 49.23 | 47.49 | 48.63 | 49.48 | 49.30 | Hf | 13.7 | 13.3 | 12.6 | 13.2 | 15.3 | 15.5 |
| $TiO_2$ | 2.68 | 2.75 | 2.04 | 2.32 | 2.95 | 2.95 | Ta | 2.74 | 2.81 | 2.75 | 2.81 | 2.12 | 2.11 |
| $Al_2O_3$ | 19.49 | 18.79 | 19.01 | 19.25 | 19.70 | 20.17 | Pb | 5.64 | 4.97 | 5.87 | 5.76 | 6.62 | 5.28 |
| $Fe_2O_3$ | 2.64 | 2.88 | 2.66 | 2.77 | 2.45 | 2.26 | La | 52.8 | 45.0 | 49.7 | 41.0 | 48.1 | 45.3 |
| FeO | 13.04 | 13.83 | 14.42 | 13.55 | 13.29 | 13.20 | Ce | 115.0 | 96.0 | 93.1 | 100.6 | 102.6 | 110.5 |
| MnO | 1.07 | 1.08 | 1.10 | 1.12 | 1.06 | 1.03 | Pr | 15.3 | 12.6 | 13.3 | 13.5 | 14.6 | 16.6 |
| MgO | 6.08 | 5.98 | 7.77 | 7.44 | 5.33 | 5.11 | Nd | 71.2 | 57.5 | 67.5 | 68.3 | 69.1 | 66.6 |
| CaO | 2.16 | 2.19 | 2.26 | 2.28 | 2.28 | 2.25 | Sm | 16.4 | 13.2 | 15.6 | 16.4 | 14.4 | 15.9 |
| $Na_2O$ | 0.13 | 0.15 | 0.09 | 0.26 | 0.13 | 0.11 | Eu | 3.74 | 3.06 | 3.96 | 3.03 | 3.03 | 3.28 |
| $K_2O$ | 2.95 | 2.83 | 2.92 | 2.10 | 3.04 | 3.28 | Gd | 13.8 | 12.1 | 11.77 | 12.4 | 12.6 | 13.1 |
| $P_2O_5$ | 0.29 | 0.28 | 0.25 | 0.30 | 0.29 | 0.33 | Tb | 2.44 | 2.30 | 2.45 | 2.31 | 1.86 | 2.07 |
| 烧失量 | 1.09 | 1.62 | 1.03 | 1.65 | 0.97 | 1.02 | Dy | 13.7 | 13.9 | 12.3 | 13.6 | 13.5 | 12.9 |
| 总量 | 101.0 | 101.1 | 100.9 | 99.5 | 98.9 | 100.9 | Ho | 2.44 | 2.50 | 2.48 | 2.36 | 2.09 | 2.40 |
| $Na_2O+K_2O$ | 3.08 | 2.97 | 3.01 | 2.30 | 3.11 | 3.39 | Er | 6.52 | 6.95 | 6.04 | 5.97 | 6.36 | 6.30 |
| $Mg^{\#}$ | 46 | 44 | 49 | 50 | 42 | 41 | Tm | 0.87 | 0.93 | 0.79 | 0.63 | 0.67 | 0.71 |
| Zr | 463 | 442 | 406 | 411 | 498 | 401 | Yb | 4.85 | 5.07 | 5.08 | 4.82 | 4.24 | 4.03 |
| Th | 3.11 | 3.87 | 3.13 | 3.98 | 3.49 | 3.89 | Lu | 0.66 | 0.72 | 0.52 | 0.63 | 0.58 | 0.71 |
| Sc | 45.9 | 48.2 | 41.6 | 43.0 | 39.2 | 42.7 | Y | 44.9 | 44.4 | 37.2 | 40.2 | 45.2 | 42.6 |
| Sr | 312 | 279 | 309 | 312 | 329.3 | 333.8 | ΣREE | 364.3 | 316.3 | 321.9 | 325.7 | 338.9 | 342.8 |
| Rb | 23.0 | 24.2 | 25.9 | 26.0 | 30.6 | 22.3 | ΣCe | 274.1 | 227.4 | 243.2 | 242.9 | 251.8 | 258.1 |
| Nb | 57.3 | 59.0 | 59.9 | 58.7 | 52.6 | 52.5 | ΣCe/ΣY | 3.04 | 2.56 | 3.09 | 2.93 | 2.89 | 3.05 |
| Cr | 179 | 180 | 190 | 178 | 188 | 197 | La/Sm | 3.22 | 3.42 | 3.18 | 2.50 | 3.33 | 2.86 |
| Ba | 219 | 231 | 236 | 258 | 237 | 218 | | | | | | | |

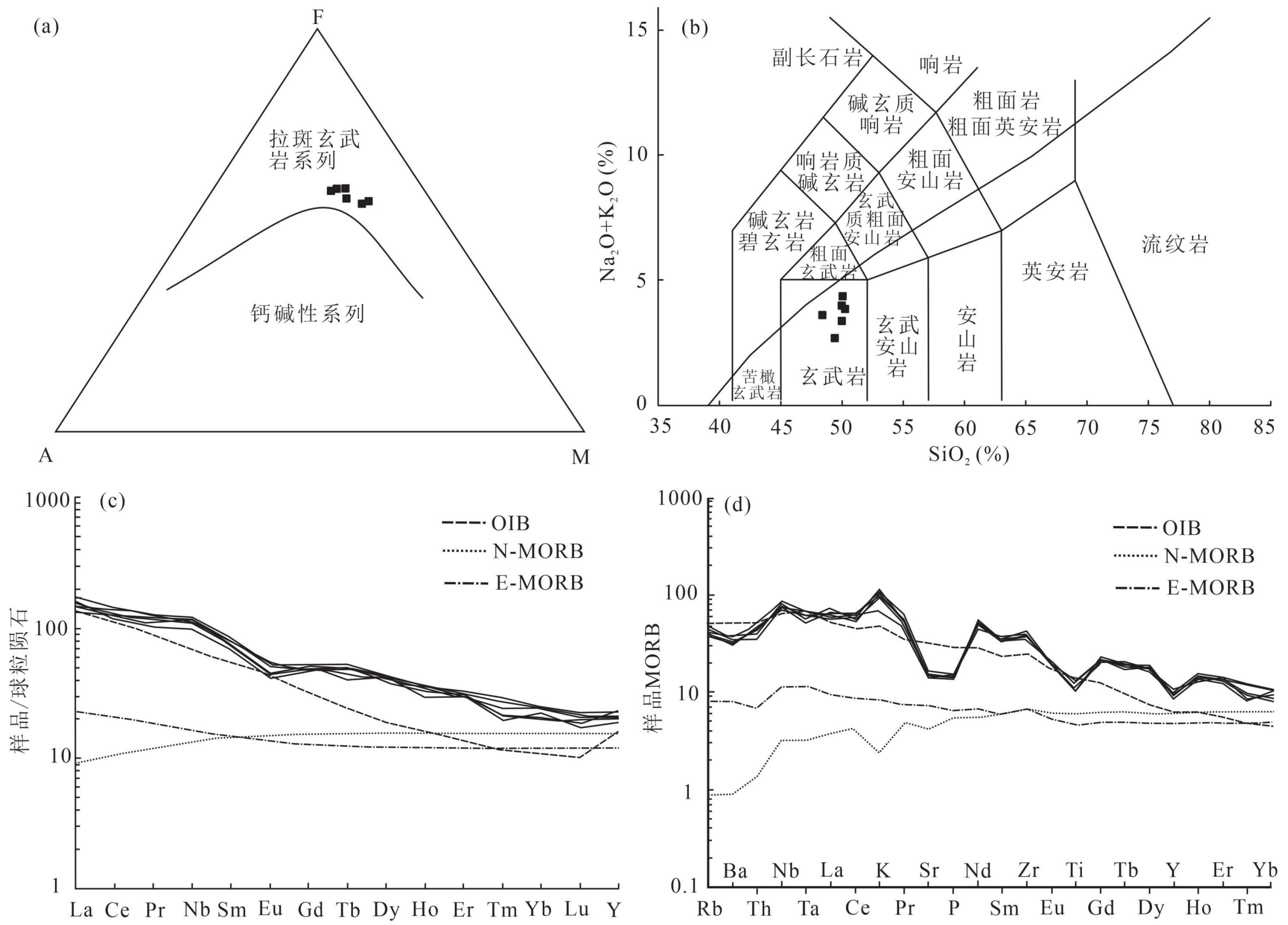


图 3 云南省东川地区小以西基性岩体 Nb/Yb—Th/Yb 图解(a)(据 Middlemost et al., 1994)、TAS 分类图(b)(据 Rickwood, 1989)、稀土配分曲线模式图(c)及微量元素比值蛛网图(d)(c、d 据 Sun and McDonough, 1989)

Fig. 3 Nb/Yb Th/Yb diagram (a) (after Middlemost et al., 1994), TAS classification diagram (b) (after Rickwood, 1989), rare earth distribution curve pattern diagram (c), and trace element ratio spider web diagram (d) of the Xiaoyixi basic rock mass in Dongchuan area of Yunnan Province (c, d after Sun and McDonough, 1989)

性侵入岩;$TiO_2$ 含量 2.04%~2.95%,平均值为 2.60%,属高钛型岩石(张招崇,2009);$P_2O_5$ 含量低,为 0.25%~0.33%;$Al_2O_3$ 含量高,为 8.79%~20.17%;MgO 含量较高,为 5.11%~7.77%,平均值 6.23%;$Mg^{\#}$为 41~50,平均值为 45;具高钛、高铝拉斑玄武岩特征(图 3a)。在 TAS 分类图(图 3b)中,岩石样品全部落入了玄武岩区。Alk = 11.93%~15.61%;$K_2O/Na_2O$ =8.2~34.35,大于 1,岩石属钾质基性岩。

### 3.2　微量、稀土元素

从表 1 中可见,小以西岩体样品 ΣREE=316.25~342.84 μg/g,显示较高的稀土总量,LREE/HREE=5.12~6.12,及$(La/Yb)_N$=5.74~7.65,显示了轻稀土富集的特征;稀土元素的球粒陨石标准化配分模式为平缓右倾的曲线,与典型的 OIB 较为相似(图 3c),而不同于 N-MORB 的水平或平缓左倾的配分模式(Sun et al., 1989;邓晋福等,2015)。岩石样品 δEu=0.62~0.86,平均 0.72,小于 1,表现出负 Eu 异常,岩浆形成后可能经历斜长石等分离结晶作用。岩石样品 δCe=0.86~1.02,平均 0.95,呈现出轻微负异常特征,岩石在形成过程中具有较低的氧逸度。在岩石稀土元素配分曲线图(图 3c)中,所有岩石样品均具有较为一致的配分模式特征,暗示岩石均来自同一源区。

在微量元素比值蛛网图(图 3d)中,岩石样品富集 Rb、Ba、Sr、Th 等大离子亲石元素,相对亏损 P、Ti 等高场强元素,表现出大隆起地球化学特征,与洋岛玄武岩(OIB)地球化学特征较为相似(Sun et al., 1989;Amelin et al., 1999);岩石样品中 Ta 表现出较微负异常特征,暗示本区基性岩演化过程中可能

有少量壳源物质混染；与基性侵入岩体群 Nb/Yb—Th/Yb 图解（图 9e），样品投影点大部分沿地幔阵列分布结果较为一致（其中 1 个样品在地幔阵列演化线上）。小以西岩体微量元素配分模式明显区别于强烈亏损 Nb、Ta、Zr、Hf 等高场强元素的岛弧环境基性岩的配分模式，更类似于洋岛玄武岩（OIB）。

## 4 年代学特征

### 4.1 锆石 U-Pb 年龄

本次研究的辉绿岩（D2110-3-5）锆石阴极发光（CL）图像（图 4a）显示锆石粒度大小在 50~90 μm，锆石多呈柱状自形晶，长宽比大多 2∶1~3∶1，Th/U＝0.5~1.2，大部分锆石具有明显的环带较宽的振荡环带，少量锆石为弱振荡环带，无变质增生边，属典型的基性岩岩浆结晶锆石（Hu Zhaochu，2008）。少数锆石在核部、幔部发育 CL 环带的继承性锆石。

选择 24 颗晶形较好的锆石进行

表 2 云南省东川地区小以西基性岩体辉绿岩的锆石 LA－ICP－MS U-Pb 同位素数据表

Table 2 LA-ICP-MS zircon U-Pb data of diabase from Xiaoyixi intrusives in Dongchuan area of Yunnan Province

| 测点号 | 元素含量（$\times10^{-6}$） | | | Th/U | 同位素比值 | | | | | | 同位素年龄（Ma） | | | | | | 谐和度（%） |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| | Pb | Th | U | | $n(^{207}Pb)/n(^{206}Pb)$ | | $n(^{207}Pb)/n(^{235}U)$ | | $n(^{206}Pb)/n(^{238}U)$ | | $n(^{207}Pb)/n(^{206}Pb)$ | | $n(^{207}Pb)/n(^{235}U)$ | | $n(^{206}Pb)/n(^{238}U)$ | | |
| | | | | | 测值 | 1σ | 测值 | 1σ | 测值 | 1σ | 测值 | 1σ | 测值 | 1σ | 测值 | 1σ | |
| 01 | 121 | 178 | 269 | 0.66 | 0.06206 | 0.0029 | 1.140 | 0.0644 | 0.1326 | 0.0048 | 675.9 | 100.0 | 772.6 | 30.5 | 802.7 | 27.1 | 96 |
| 02 | 119 | 165 | 347 | 0.48 | 0.06637 | 0.0027 | 1.211 | 0.0552 | 0.1324 | 0.0037 | 818.2 | 84.1 | 805.6 | 25.4 | 801.6 | 21.3 | 99 |
| 03 | 223 | 208 | 274 | 0.76 | 0.08990 | 0.0030 | 2.680 | 0.1022 | 0.2150 | 0.0047 | 1433.3 | 64.4 | 1322 | 28.2 | 1255 | 25.0 | 94 |
| 04 | 137 | 203 | 309 | 0.66 | 0.06860 | 0.0025 | 1.251 | 0.0463 | 0.1321 | 0.0027 | 887.0 | 75.9 | 823.7 | 20.9 | 799.8 | 15.2 | 97 |
| 05 | 125 | 137 | 264 | 0.52 | 0.07860 | 0.0021 | 2.187 | 0.0668 | 0.2015 | 0.0042 | 1162.0 | 52.6 | 1177 | 21.3 | 1183 | 22.6 | 99 |
| 06 | 96 | 161 | 277 | 0.58 | 0.06799 | 0.0018 | 1.239 | 0.0392 | 0.1319 | 0.0026 | 877.8 | 56.6 | 818.7 | 17.8 | 798.8 | 15.1 | 97 |
| 07 | 269 | 120 | 330 | 0.36 | 0.1510 | 0.0029 | 8.369 | 0.2043 | 0.4016 | 0.0080 | 2357.7 | 33.2 | 2271 | 22.2 | 2176 | 36.8 | 95 |
| 08 | 75 | 124 | 203 | 0.61 | 0.06528 | 0.0020 | 1.186 | 0.0435 | 0.1320 | 0.0032 | 783.3 | 67.6 | 793.9 | 20.2 | 799.4 | 18.4 | 99 |
| 09 | 83 | 177 | 159 | 1.11 | 0.06535 | 0.0025 | 1.140 | 0.0448 | 0.1317 | 0.0066 | 787.0 | 81.5 | 772.4 | 21.3 | 797.7 | 37.8 | 96 |
| 10 | 92 | 162 | 184 | 0.88 | 0.07068 | 0.0020 | 1.286 | 0.0395 | 0.1324 | 0.0024 | 950.0 | 58.8 | 839.4 | 17.5 | 801.7 | 13.8 | 95 |
| 11 | 64 | 112 | 149 | 0.75 | 0.06531 | 0.0023 | 1.193 | 0.0519 | 0.1317 | 0.0032 | 783.3 | 74.1 | 797.5 | 24.0 | 797.8 | 18.5 | 99 |
| 12 | 86 | 147 | 213 | 0.69 | 0.06807 | 0.0020 | 1.235 | 0.0420 | 0.1324 | 0.0034 | 872.2 | 61.1 | 816.4 | 19.1 | 801.5 | 19.5 | 98 |
| 13 | 105 | 162 | 384 | 0.42 | 0.06754 | 0.0013 | 1.236 | 0.0302 | 0.1324 | 0.0021 | 853.7 | 40.7 | 817.2 | 13.7 | 801.6 | 12.0 | 98 |
| 14 | 80 | 126 | 231 | 0.55 | 0.06703 | 0.0017 | 1.222 | 0.0328 | 0.1322 | 0.0023 | 838.9 | 56.5 | 810.6 | 15.0 | 800.6 | 13.1 | 98 |
| 15 | 107 | 191 | 190 | 1.01 | 0.06334 | 0.0018 | 1.153 | 0.0347 | 0.1324 | 0.0027 | 720.4 | 65.0 | 778.5 | 16.4 | 801.5 | 15.3 | 97 |
| 16 | 130 | 196 | 349 | 0.56 | 0.06562 | 0.0016 | 1.160 | 0.0424 | 0.1308 | 0.0059 | 794.4 | 56.5 | 782.1 | 20.0 | 792.5 | 33.6 | 98 |
| 17 | 61 | 160 | 140 | 1.14 | 0.07479 | 0.0018 | 1.349 | 0.0327 | 0.1323 | 0.0029 | 1064.8 | 46.3 | 867.1 | 14.2 | 800.9 | 16.5 | 92 |
| 18 | 58 | 136 | 192 | 0.71 | 0.06913 | 0.0012 | 1.254 | 0.0276 | 0.1322 | 0.0026 | 901.9 | 36.3 | 825.0 | 12.5 | 800.6 | 15.0 | 96 |
| 19 | 103 | 302 | 245 | 1.23 | 0.06567 | 0.0012 | 1.196 | 0.0281 | 0.1321 | 0.0023 | 794.4 | 34.3 | 798.8 | 13.0 | 800.0 | 13.3 | 99 |
| 20 | 303 | 193 | 363 | 0.53 | 0.1468 | 0.0019 | 8.334 | 0.1442 | 0.4120 | 0.0063 | 2309.3 | 22.2 | 2268 | 15.8 | 2224 | 28.8 | 98 |
| 21 | 51 | 131 | 130 | 1.01 | 0.07350 | 0.0017 | 1.337 | 0.0364 | 0.1322 | 0.0024 | 1027.8 | 43.5 | 862.0 | 15.8 | 800.2 | 13.6 | 92 |
| 22 | 58 | 136 | 192 | 0.71 | 0.06776 | 0.0014 | 1.236 | 0.0303 | 0.1320 | 0.0021 | 861.1 | 44.4 | 817.0 | 13.8 | 799.0 | 11.9 | 97 |
| 23 | 32 | 79 | 95 | 0.83 | 0.06758 | 0.0018 | 1.225 | 0.0337 | 0.1324 | 0.0028 | 857.4 | 54.8 | 812.2 | 15.4 | 801.3 | 15.8 | 98 |
| 24 | 71 | 196 | 200 | 0.98 | 0.07410 | 0.0048 | 1.286 | 0.0321 | 0.1325 | 0.0030 | 1044.1 | 133.3 | 839.6 | 14.3 | 802.1 | 17.3 | 95 |

表 3 云南省东川地区小以西岩体辉绿岩锆石的稀土元素和微量元素($\times 10^{-6}$)分析值

Table 3 REE and Trace element analysis values of zircons from diabase of Xiaoyixi rock mass in Dongchuan area of Yunnan Province

| 元素 | 测点号 | | | | | | | | | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 | 7 | 8 | 9 | 10 | 11 | 12 |
| La | 2.85 | 0.001 | 182 | 11.7 | 13.8 | 3.89 | 0.001 | 0.990 | 9.39 | 0.033 | 0.001 | 0.001 |
| Ce | 63.8 | 4.41 | 1991 | 137 | 178 | 68.1 | 9.89 | 16.1 | 128 | 5.54 | 8.93 | 2.38 |
| Pr | 2.76 | 0.043 | 169 | 9.71 | 14.2 | 5.43 | 0.032 | 1.24 | 7.44 | 0.128 | 0.025 | 0.112 |
| Nd | 13.7 | 3.46 | 1015 | 71.3 | 84.1 | 41.6 | 1.11 | 13.2 | 44.0 | 2.75 | 2.56 | 2.19 |
| Sm | 17.0 | 6.10 | 397 | 33.1 | 40.8 | 19.6 | 4.12 | 19.4 | 12.0 | 8.15 | 10.2 | 13.3 |
| Eu | 0.279 | 0.141 | 4.74 | 0.671 | 0.611 | 0.766 | 0.158 | 1.35 | 3.22 | 1.62 | 1.30 | 0.624 |
| Gd | 39.6 | 34.4 | 396.6 | 50.0 | 77.3 | 56.8 | 21.5 | 60.2 | 33.9 | 31.6 | 33.3 | 51.6 |
| Tb | 15.2 | 8.66 | 62.1 | 12.6 | 17.8 | 13.0 | 5.44 | 15.2 | 7.62 | 10.5 | 11.2 | 14.6 |
| Dy | 142 | 104 | 457 | 142 | 196 | 136 | 79.0 | 189 | 94 | 118 | 130 | 171 |
| Ho | 45.8 | 35.5 | 113.8 | 52.0 | 69.1 | 49.6 | 27.2 | 65.2 | 34.3 | 44.7 | 48.3 | 62.9 |
| Er | 202 | 143 | 371 | 223 | 254 | 192 | 114 | 260 | 176 | 184 | 218 | 257 |
| Tm | 45.9 | 29.2 | 71.8 | 48.2 | 47.4 | 40.6 | 27.2 | 54.5 | 42.0 | 40.8 | 48.7 | 54.2 |
| Yb | 379 | 267 | 509 | 436 | 413 | 374 | 243 | 501 | 429 | 384 | 435 | 470 |
| Lu | 67.8 | 47.3 | 77.2 | 83.9 | 66.4 | 63.4 | 41.5 | 89.3 | 81.4 | 68.4 | 84.4 | 81.2 |

| 元素 | 测点号 | | | | | | | | | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| | 13 | 14 | 15 | 16 | 17 | 18 | 19 | 20 | 21 | 22 | 23 | 24 |
| La | 0.001 | 0.017 | 0.192 | 0.044 | 0.010 | 0.051 | 0.001 | 1.75 | 0.001 | 0.134 | 0.001 | 0.001 |
| Ce | 4.80 | 1.72 | 34.1 | 2.86 | 19.4 | 13.2 | 31.8 | 27.4 | 87.2 | 20.6 | 11.9 | 5.47 |
| Pr | 0.001 | 0.129 | 0.274 | 0.210 | 0.189 | 0.260 | 0.173 | 0.744 | 6.93 | 0.155 | 0.116 | 0.591 |
| Nd | 1.73 | 2.04 | 6.28 | 4.81 | 3.49 | 7.54 | 3.29 | 5.74 | 37.2 | 3.34 | 1.30 | 6.15 |
| Sm | 5.13 | 8.25 | 19.2 | 16.9 | 4.36 | 7.96 | 6.10 | 3.33 | 11.7 | 4.21 | 3.07 | 14.2 |
| Eu | 0.246 | 0.90 | 3.16 | 2.33 | 1.13 | 0.918 | 1.92 | 0.307 | 2.03 | 0.419 | 0.953 | 1.02 |
| Gd | 26.7 | 44.9 | 67.3 | 111.2 | 22.8 | 36.0 | 32.7 | 17.4 | 34.6 | 37.2 | 20.9 | 72.1 |
| Tb | 6.60 | 14.7 | 19.8 | 42.9 | 6.86 | 11.7 | 12.9 | 5.71 | 12.5 | 13.3 | 7.04 | 22.9 |
| Dy | 80 | 154 | 253 | 587 | 83 | 141 | 166 | 69 | 148 | 170 | 86 | 252 |
| Ho | 28.6 | 60.2 | 96.9 | 219.1 | 32.6 | 57.1 | 64.9 | 26.4 | 62.2 | 67.6 | 35.0 | 94.2 |
| Er | 126 | 255 | 415 | 839 | 146 | 240 | 306 | 121 | 281 | 297 | 149 | 379 |
| Tm | 28.9 | 57.3 | 93.6 | 156.3 | 33.5 | 51.2 | 69.8 | 27.9 | 65.0 | 63.7 | 33.2 | 77.2 |
| Yb | 262 | 515 | 849 | 1293 | 351 | 470 | 745 | 270 | 644 | 580 | 308 | 667 |
| Lu | 45.3 | 92.7 | 150.4 | 205 | 64.3 | 88.1 | 151 | 48.7 | 120 | 107 | 62.0 | 120 |

了锆石 U-Pb 定年分析(表 2),所有的分析点都位于谐和线上或其附近(图 4b),有效的分析点谐和度均≥90%,获得的年龄数据可信度较高。锆石 3、5、7、20 号测点$^{207}Pb/^{206}Pb$ 年龄分别为 1162 Ma、1433 Ma、2309 Ma、2358 Ma,其 CL 图具核—幔—边结构,无明显环带结构,应为捕获围岩锆石或继承性锆石。其余 20 颗锆石年龄数据较为集中(图 4c),锆石的 Th/U 值较大(0.4~1.2)(图 5a),具有典型的板状环带,为基性岩浆成因。锆石稀土元素球粒陨石标准配分图(图 5b)显示,20 个测点的$^{206}Pb/^{208}U$:793~803 Ma 的锆石稀土元素配分模式均为“左”倾,表现出重稀土富集轻稀土亏损的特征,具有明显 Ce 正异常,Eu 负异常,稀土总量较高,且 20 个测点样品的 Nb 含量在岩浆锆石范围内($Nb \leqslant 62\times 10^{-6}$)(表 3),具有典型岩浆锆石的稀土配分模式特点(Hoskin and Schaltegger, 2003)。20 个测点获得了较为一致的$^{206}Pb/^{208}U$ 年龄加权平均值为 800.4±7.0 Ma($MSWD=0.0085$,$n=20$),说明辉绿岩形成年龄为新元古代中期,也代表了小以西基性岩体侵位时代。

4 个锆石$^{206}Pb/^{207}Pb$ 年龄(1162Ma、1433Ma、2309Ma、2358Ma)打在锆石继承核上,振荡环带结构不清,次棱角状,且具核—边结构,且数据明显大于锆石结晶年龄 800.4 Ma,在锆石的稀土元素球粒陨石标准配分图(图 5b)与其他结晶锆石有明显差别,Ce 正异常不明显,表现出捕获锆石或继承性锆石特征。

### 4.2 Lu—Hf 同位素特征

本次选择基性侵入岩体群的小以西岩体辉绿岩(D2110-3-5)进行 Lu—Hf 同位素研究,在锆石 U-Pb 测年的基础上,对样品进行了锆石原位 Lu—Hf 同位素分析。本次共完成 10 个点的 Lu—Hf 同位素测试(表 4),测试样品的 $n(^{176}Yb)/n(^{177}Hf)$ 范围为 0.025405 ~ 0.081169,平均为 0.0492658;$n(^{176}Lu)/n(^{177}Hf)$范围为 0.000687~0.002141,平均为 0.0012819,$n(^{176}Hf)/n(^{177}Hf)$ 范围为 0.282103~0.282378,平均为 0.2822564。样品 $\varepsilon_{Hf}(t)$ 值范围为−4.92~2.92(7 个点为负、3 个为正,均值为−1.24)(图 6),一阶段 Hf 的模式年龄 $T_{DM1}$ 为 1253~1605 Ma,平均值为 1414 Ma,说明小以西岩体物质来源于中元古代中期亏损地幔,后期可能有少量地壳物质混入,总体与扬子陆块西南缘~0.8Ga 基性侵入岩源区较为一致(Amelin et al., 1999;杜利林等,2006;吴福元等,2007)。

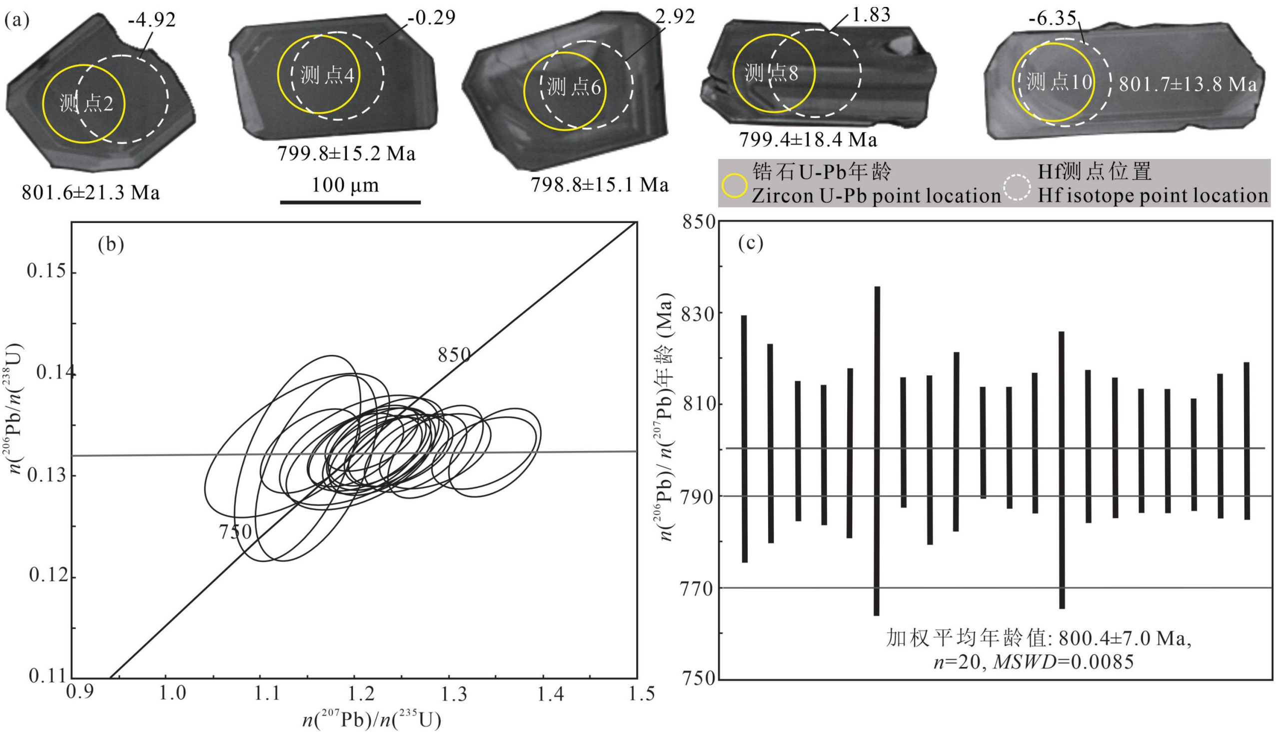


图 4 云南省东川地区小以西基性岩体辉绿岩锆石 CL 图(a)及 U-Pb 年龄谐和图(b、c)

Fig. 4 CL diagram (a) and zircon U-Pb age concordia diagram (b, c) of diabase from Xiaoyixi basic intrusives in Dongchuan area of Yunnan Province

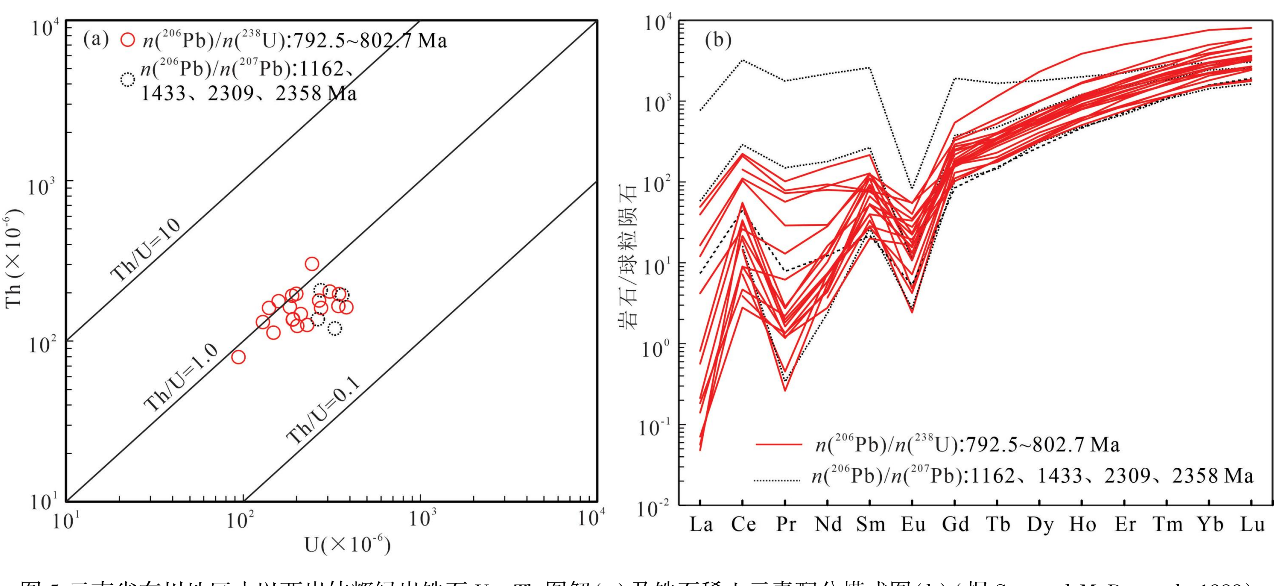


图 5 云南省东川地区小以西岩体辉绿岩锆石 U—Th 图解(a)及锆石稀土元素配分模式图(b)(据 Sun and McDonough,1989)

Fig. 5 Diagrams of U—Th (a) and chondrite normalized rare earth element patterns for the zircons (b) (chondrite data from Sun and McDonough,1989) of diabase from Xiaoyixi intrusives

# 5 讨论

## 5.1 小以西岩体岩浆成因、构造背景及源区

小以西基性岩体样品高 $TiO_2$(2.04%~2.95%,平均 2.60%),高 MgO(5.11%~7.77%,平均值为 6.23%),低 $P_2O_5$(0.25%~0.33%,平均 0.29%),富碱质(2.30%~3.39%,平均值为 2.97%),同时富集 LREE 和 HFSE 元素,高 Nb、Ta 含量,与洋岛玄武岩

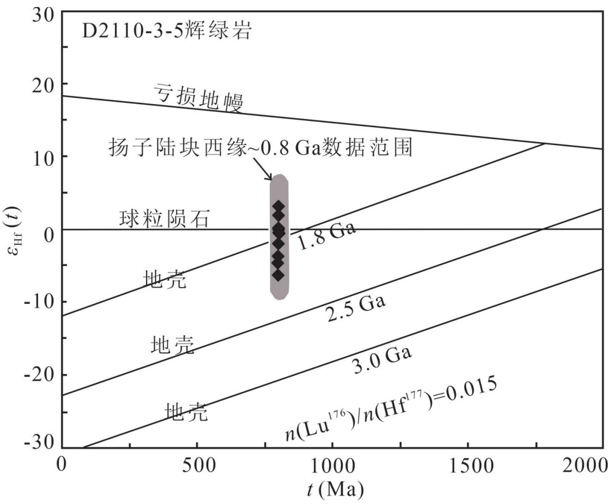


图 6 云南省东川地区小以西基性岩体辉绿岩 Hf 同位素 $t$(Ma)和 $\varepsilon_{Hf}(t)$图

Fig. 6 Hf isotope $t$(Ma) and $\varepsilon_{Hf}(t)$ diagram of diabase from Xiaoyixi intrusives in Dongchuan area of Yunnan Province

地球化学较为一致(Li ZhengXiang and Zhong Shijie, 2009; 张招崇等,2009;刘树文等,2009;程佳孝等,2014;邓晋福等,2015)。在 Ti—Zr 图解(图 7a),样品全部落入板内玄武岩区,在 Cr—Y 图解(图 7b),样品大部分落入板内玄武岩区,均指示小以西岩体形成于伸展构造背景。在 Th/Hf—Ta/Hf 图解中(图 7c),岩石样品大部分落入洋岛—海山玄武岩,少量落入陆内裂谷碱性玄武岩交汇区,在 TFeO/MgO—$TiO_2$ 图解中(图 7d),样品均落入大洋岛玄武岩区,可能为地幔部分熔融的产物,指示成因与地幔柱有关。

在 Nb/Yb—Th/Yb 图解中(图 7e),样品的投影点大多沿地幔阵列分布于洋岛(OIB)周围,少量部分在地幔阵列演化线上,说明岩浆主要来源于地幔;地壳中富集 Zr 和 Hf 元素,地壳混染导致 Zr 和 Hf 元素含量显著增高,但样品中 Zr 和 Hf 元素无明显异常(图 3d),其较低的含量指示壳源物质的混染程度较低。在典型地幔铝相(如尖晶石和石榴子石)中,稀土元素是分析地幔熔融条件的重要佐证(张招崇等,2009;刘树文等,2009;徐楠等,2023),在地幔源区中常用 La/Sm 比和 Tb/Yb 比来鉴别石榴子石的存在,在$(La/Sm)_N$—$(Tb/Yb)_N$ 图解(图 7f)显示,所有样品均位于落入下地幔石榴子石橄榄岩区(>80 km),暗示了小以西岩体主要来源于下地幔石榴子石橄榄岩的部分熔融,与样品较高的 ΣREE(316.25~342.84 μg/g)较为一致,因岩石圈厚度变化大,地幔减压熔融被阻止于较深位置,局限于石榴子石橄榄岩稳定区域,部分熔融程度较低,从而导致分异较高的 ΣREE 分布模式。小以西岩体由于具有较高的 Zr 含量($401\times10^{-6}\sim498\times10^{-6}$)(标准值:$220\times10^{-6}$)(张招崇等,2009;汪相,2023),指示了≤5%的部分熔融程度;结合 Lu—Hf 同位素、Nb/Yb—Th/Yb 图解及轻微 Ta 负异常现象,认为小以西岩体源区来自中元古代中期下地幔石榴子石橄榄岩≤5%的低程度部分熔融,后期可能有少量壳源物质混入。由此说明滇中地块和攀西地块之间在南华纪发生了陆内裂谷拉张事件,初始形成南华裂谷盆地,持续的拉张活动导致岩石圈不断变薄,导致了大规模的地幔物质上涌,形成了小以西岩体为代表的基性侵入岩墙群及澄江组高温玄武岩(图 8)。

### 5.2　与 Rodinia 超级大陆裂解关系

扬子陆块被认为参与了全球 Rodinia 超大陆构造演化旋回,是其重要组成部分(李献华等,2001,2008;朱维光等,2004;赵凤清等,2006;谢士稳等,2009;裴先治等,2009;王梦玺等,2012;夏林圻等,2016;鄢圣武等,2017;刘军平等,2020a;余明刚等,2022;王香增等,2023)。新元古代构造—岩浆活动对 Rodinia 超大陆的恢复重建至关重要,而扬子陆块西缘岩浆活动主要以中酸性侵入岩、凝灰岩为主,基性侵入岩相对较少报道,特别在云南滇中地区表现较为明显,由此对新元古代基性侵入岩的调查研究尤为重要。

目前扬子陆块西缘与 Rodinia 超大陆演化相关的构造—岩浆活动记录主要有:刘军平等(2019)在澄江组底部凝灰岩夹层中获得 815 Ma 锆石 U-Pb 年龄;崔晓庄等(2013,2015)在澄江组底部玄武岩和苏雄组火山岩中获得 725~810 Ma 锆石 U-Pb 年龄,认为为一套双峰式火山岩,形成于大陆裂谷环境,与 Rodinia 超大陆演化有关;刘军平等(2020a)在云南安宁地区石虎山花岗岩获得年 839~616 Ma 锆石 U-Pb 年龄,认为是 Rodinia 超大陆在扬子陆块西缘开始裂解与最终裂解时限;云南东川下田坝 A 型黑云母二长花岗岩获得 769 Ma 锆石 U-Pb 年龄,认为形成于板内伸展环境(程佳孝等,2014);云南宾川响水花岗质岩体获得 761.9 Ma 锆石 U-Pb 年龄,认为与全球 Rodinia 超大陆裂解时期形成的花岗岩年龄峰值较为一致(颜丹平等,2002);汪正江等(2011)在川西南峨边县牛郎坝 A 型花岗岩获得 826 Ma 锆石 U-Pb 年龄,认为是 Rodinia 超大陆裂解的产物;徐丽娟等(2021)在云南峨山板内型花花岗闪长岩

**表 4 云南省东川地区小以西基性岩体辉绿岩 Lu—Hf 同位素分析值**

**Table 4 Lu—Hf isotope analysis value of diabase from Xiaoyixi rock mass in Dongchuan area of Yunnan Province**

| 点号 | 年龄(Ma) | $\frac{n(^{176}Hf)}{n(^{177}Hf)}$ 测值 | 1σ | $\frac{n(^{176}Lu)}{n(^{177}Hf)}$ 测值 | 1σ | $\frac{n(^{176}Yb)}{n(^{177}Hf)}$ 测值 | 1σ | $\varepsilon_{Hf}(t)$ | $\left[\frac{n(^{176}Hf)}{n(^{177}Hf)}\right]_i$ | $T_{DM1}$ (Ma) | $T_{DM2}$ (Ma) | $f_{Lu/Hf}$ |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| 2 | 800.4 | 0.282145 | 0.000023 | 0.000771 | 0.000006 | 0.030469 | 0.000251 | −4.92 | 0.2821 | 1550 | 2001 | −0.98 |
| 4 | 800.4 | 0.282290 | 0.000024 | 0.001698 | 0.000015 | 0.065863 | 0.000656 | −0.29 | 0.2823 | 1384 | 1712 | −0.95 |
| 6 | 800.4 | 0.282378 | 0.000020 | 0.001579 | 0.000030 | 0.065045 | 0.000925 | 2.92 | 0.2824 | 1253 | 1511 | −0.95 |
| 8 | 800.4 | 0.282345 | 0.000027 | 0.001427 | 0.000046 | 0.053008 | 0.001617 | 1.83 | 0.2823 | 1295 | 1580 | −0.96 |
| 10 | 800.4 | 0.282103 | 0.000021 | 0.000687 | 0.000003 | 0.025405 | 0.000144 | −6.35 | 0.2821 | 1605 | 2090 | −0.98 |
| 11 | 800.4 | 0.282263 | 0.000022 | 0.001095 | 0.000017 | 0.040050 | 0.000577 | −0.92 | 0.2822 | 1399 | 1752 | −0.97 |
| 12 | 800.4 | 0.282178 | 0.000019 | 0.001161 | 0.000023 | 0.045174 | 0.000981 | −3.95 | 0.2822 | 1520 | 1941 | −0.97 |
| 13 | 800.4 | 0.282342 | 0.000020 | 0.001244 | 0.000043 | 0.047516 | 0.001660 | 1.81 | 0.2823 | 1293 | 1581 | −0.96 |
| 14 | 800.4 | 0.282220 | 0.000021 | 0.001016 | 0.000059 | 0.038959 | 0.002385 | −2.38 | 0.2822 | 1455 | 1843 | −0.97 |
| 15 | 800.4 | 0.282300 | 0.000021 | 0.002141 | 0.000044 | 0.081169 | 0.001846 | −0.16 | 0.2823 | 1385 | 1704 | −0.94 |

注:计算公式如下:

$$\varepsilon_{Hf}(t)=10000\cdot\left\{\frac{\left[\frac{n(^{176}Hf)}{n(^{177}Hf)}\right]_S-\left[\frac{n(^{176}Lu)}{n(^{177}Hf)}\right]_S\cdot(e^{\lambda t}-1)}{\left[\frac{n(^{176}Hf)}{n(^{177}Hf)}\right]_{CHUR,0}-\left[\frac{n(^{176}Lu)}{n(^{177}Hf)}\right]_{CHUR}\cdot(e^{\lambda t}-1)}-1\right\};\quad T_{DM1}=\frac{1}{\lambda}\cdot\ln\left\{1+\frac{\left[\frac{n(^{176}Hf)}{n(^{177}Hf)}\right]_S-\left[\frac{n(^{176}Hf)}{n(^{177}Hf)}\right]_{DM}}{\left[\frac{n(^{176}Lu)}{n(^{177}Hf)}\right]_S-\left[\frac{n(^{176}Lu)}{n(^{177}Hf)}\right]_{DM}}\right\}$$

$$T_{DM\,2CC}=T_{DM1}-(T_{DM1}-t)\cdot\frac{f_{CC}-f_S}{f_{CC}-f_{DM}};\ f_{Lu/Hf}=\frac{\left[\frac{n(^{176}Lu)}{n(^{177}Hf)}\right]_S}{\left[\frac{n(^{176}Lu)}{n(^{177}Hf)}\right]_{CHUR}}-1$$

其中:$\lambda(^{176}Lu)=1.865\times10^{-11}/a$ (Schere et al., 2001); $\left[\frac{n(^{176}Lu)}{n(^{177}Hf)}\right]_S$ 和 $\left[\frac{n(^{176}Hf)}{n(^{177}Hf)}\right]_S$ 为样品测量值; $\left[\frac{n(^{176}Lu)}{n(^{177}Hf)}\right]_{CHUR}=0.0332$, $\left[\frac{n(^{176}Hf)}{n(^{177}Hf)}\right]_{CHUR,0}=0.282772$ (Blichert-Toft et al., 1997); $\left[\frac{n(^{176}Lu)}{n(^{177}Hf)}\right]_{DM}=0.0384$, $\left[\frac{n(^{176}Hf)}{n(^{177}Hf)}\right]_{DM}=0.28325$ (Griffin et al., 2000); $\left[\frac{n(^{176}Lu)}{n(^{177}Hf)}\right]_{平均地壳}=0.015$; $f_{CC}=\frac{\left[\frac{n(^{176}Lu)}{n(^{177}Hf)}\right]_{平均地壳}}{\left[\frac{n(^{176}Lu)}{n(^{177}Hf)}\right]_{CHUR}}-1$; $f_S=f_{Lu/Hf}$; $f_{DM}=\frac{\left[\frac{n(^{176}Lu)}{n(^{177}Hf)}\right]_{DM}}{\left[\frac{n(^{176}Lu)}{n(^{177}Hf)}\right]_{CHUR}}-1$; $t$ 为锆石结晶年龄。

中获得 818.3±28.0 Ma 锆石 U-Pb 年龄;李阳(2020)在扬子地块西缘峨眉山张沟岩浆岩体获得 818±30 Ma 和 817±34 Ma 锆石 U-Pb 年龄,认为是新元古代 Rodinia 超大陆的裂解的产物;云南陆良地区陆良组凝灰岩获得 819±9 Ma 锆石 U-Pb 年龄,认为是南华裂谷作用的开始时间(Zhuo Jiewen et al., 2013)。以上年龄数据均指示与 Rodinia 超大陆裂解有关。

本次在小以西基性岩体中获得 800.4±7.0 Ma 锆石 LA-ICP-MS U-Pb 年龄,地球化学显示形成于伸展构造背景,成因与地幔柱有关,是南华裂谷重要岩石学及岩浆记录,应为同期全球性 Rodinia 超级大陆裂解的响应,结合南华系澄江组(底界在~820 Ma)石英质砾岩不整合覆盖于中元古界之上,称之“澄江运动”(李献华等,2008;Li Zhengxiang and Zhong Shijie,2009;Zhuo Jiewen et al., 2013;Liu Junping et al., 2024),笔者等认为 Rodinia 超级大陆在约 820 Ma 开始初始裂解,而滇中地区的澄江组、小以西基性岩体均是初始裂解的产物,随之南华裂谷盆地开始形成,进一步说明滇中地块参与了 Rodinia 超级大陆裂解过程,是其重要组成部分。综合前人资料,认为华南陆块存在较为丰富的与罗迪尼亚超大陆汇聚和裂解过程相关的地质记录,可合理的认为 1000~850 Ma 是超大陆的聚合时间;而 820~616 Ma 是超大陆的裂解时间。

### 5.3 与区内铜、铁成矿富集的关系

滇中因民地区是铜、铁矿床富集区,前人资料表明,铜、铁主成矿期与古元古代晚期大规模的岩浆活

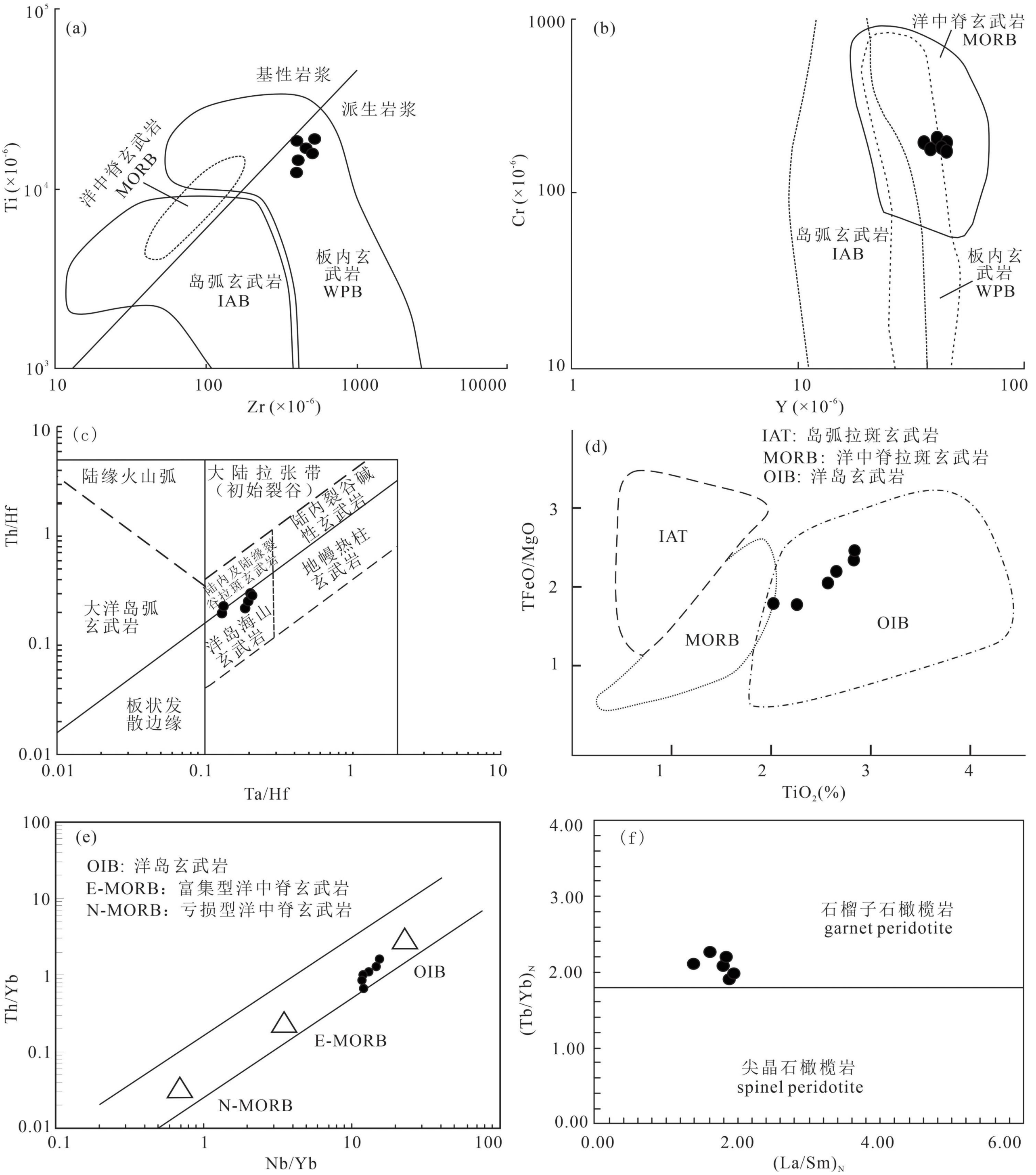


图 7 云南省东川地区小以西基性岩体形成环境地球化学图解:(a) Zr—Ti;(b) Y—Cr;(c) Ta/Hf—Th/Hf;(d) $TiO_2$—TFeO/MgO;(e) Nb/Yb—Th/Yb;(f) $(La/Sm)_N$—$(Tb/Yb)_N$

Fig. 7 Geochemistry diagram of the Xiaoyixi intrusives in Dongchuan area of Yunnan Province: (a) Zr—Ti; (b) Y—Cr; (c) Ta/Hf—Th/Hf; (d) $TiO_2$—TFeO/MgO ; (e) Nb/Yb—Th/Yb; (f) $(La/Sm)_N$—$(Tb/Yb)_N$

(a) (b) (c) 据 Pearce et al. , 1982;(d) (e) 据 Sun and McDonough, 1989;(f) 据 Pearce et al. , 1973

(a) (b) (c) after Pearce et al. , 1982; (d) (e) after Sun and McDonough, 1989; (f) after Pearce et al. , 1973

动有关,时代集中在 1.7~1.8 Ga(朱华平等,2011; Zhao Xinfu et al. , 2010; Lu Guimei et al. , 2019; Liu Junping et al. , 2021,2022,2023,2024),并未有其他时代岩浆报道,是否存在多期次岩浆成矿作用善不

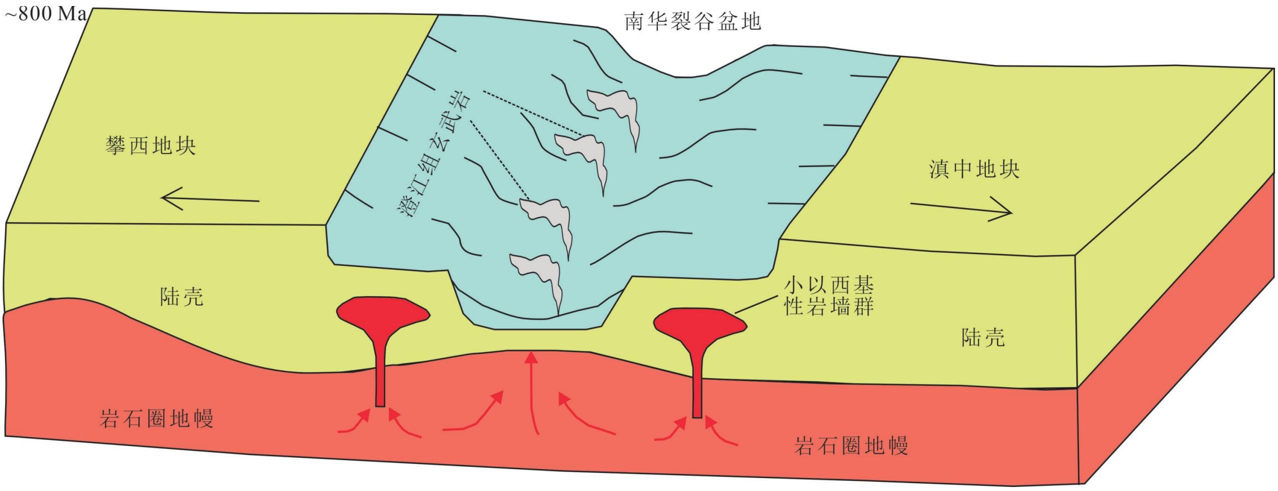


图 8 扬子陆块西缘~800 Ma 地球动力学演化模型图(据李献华等,2008 修改)

Fig. 8 Geodynamic evolution model of the western margin of the Yangtze block at 800 Ma (modified from Li Xianhua et al., 2008&)

清楚;笔者等在东川铜矿区外围辉绿岩中获得 800.4 Ma U-Pb 年龄,说明东川铜矿区存在新元古代中期岩浆事件,而距小以西岩体向西 3 km 左右青龙山地区发育中型青龙山铜矿,说明新元古代岩浆作用可能对铜进一步富集提供了重要的矿物质来源,结合青龙山铜矿区野外铜矿脉顺后期节理贯入特征,区内铜矿床存在多期岩浆改造,对完善滇中地区铜、铁成矿地质背景提供了重要的岩浆证据,为外围找矿提供重要标志,值得矿业界重视。

## 6 结论

(1)东川铜矿区外围小以西岩体获得 800.4±7.0 Ma($MSWD$=0.0085,$n$=20)锆石 U-Pb 年龄,表明东川铜矿区外围广泛出露的基性侵入岩体群侵位时代为新元古代中期,说明东川铜矿区存在新元古代中期岩浆事件,区内铜矿床存在多期岩浆改造。

(2)基性侵入岩体群岩石地球化学表现出高 MgO、高 $TiO_2$、富碱的特征,富集 K、Rb、Ba 等大离子半径元素;原始岩浆形成于中元古代中期下地幔石榴子石橄榄岩的低程度(≤5%)部分熔融,后期可能有少量壳源物质混入。

(3)东川铜矿区外围基性侵入岩体群记录了扬子陆块在新元古代中期的一次伸展过程,滇中地区发生了陆内裂谷拉张事件,导致了大规模的地幔物质上涌,形成东川铜矿区外围基性侵入岩体群,应为同期全球性 Rodinia 超级大陆裂解的响应,可合理的认为 1000~850 Ma 是超大陆的聚合时间;而 820~616 Ma 是超大陆的裂解时间。

**致谢**:锆石 LA-ICP-MS 分析和阴极发光照片得到了南京宏创地质勘查技术服务有限公司袁秋云的帮助。审稿专家提出了宝贵的修改意见。在此一并表示衷心感谢。

### 注 释 / Note

❶ 云南省地质调查院. 2023. 云南省 1∶5 万撒马基幅等 4 幅区域地质调查报告.

### 参 考 文 献 / References

(The literature whose publishing year followed by a "&" is in Chinese with English abstract; The literature whose publishing year followed by a "#" is in Chinese without English abstract)

陈建书, 代雅然, 唐烽, 彭成龙, 张嘉玮, 朱和书, 陈兴, 王文明, 龚桂源. 2020. 扬子地块周缘中元古代末—新元古代主要构造运动梳理与探讨. 地质论评, 66(3): 533~554.

程佳孝, 罗金海, 武昱东, 韩奎, 王师迪. 2014. 滇东北下田坝花岗岩年代学、地球化学及其构造意义. 地质学报, 88(3): 337~346.

崔晓庄, 江新胜, 王剑, 卓皆文, 江卓斐, 伍皓, 邓奇, 魏亚楠. 2015. 扬子西缘澄江组底部玄武岩形成时代新证据及其地质意义. 岩石矿物学杂志, 33(1): 1~13.

崔晓庄, 江新胜, 王剑, 卓皆文, 熊国庆, 陆俊泽, 邓奇, 伍皓, 刘建辉. 2013. 滇中新元古代澄江组层型剖面锆石 U-Pb 年代学及其地质意义. 现代地质, 27(3): 547~556.

邓晋福, 刘翠, 冯艳芳, 肖庆辉, 狄永军, 苏尚国, 赵国春, 段培新, 戴蒙. 2015. 关于火成岩常用图解的正确使用:讨论与建议. 地质论评, 61(4): 717~734.

杜利林, 耿元生, 杨崇辉, 王新社, 任留东, 周喜文, 王彦斌, 杨铸生. 2006. 扬子地台西缘新元古代 TTG 的厘定及其意义. 岩石矿物学杂志, 25(4): 273~281.

高林志, 张恒, 张传恒, 丁孝忠, 尹崇玉, 武振杰, 宋彪. 2018. 滇东昆阳群地层序列的厘定及其在中国地层表的位置. 地质论评, 64(2): 283~298.

江新胜, 王剑, 崔晓庄, 卓皆文, 熊国庆, 陆俊泽, 刘建辉. 2012. 滇中新元古代澄江组锆石 SHRIMP U-Pb 年代学研究及其地质意义. 中国科学:地球科学, 42(10): 1496~1507.

解楠, 宋嘉琦, 白栋, 邹鑫洁. 2023. 川中蓬莱地区震旦系灯影组流体包裹体特征及成藏期次. 非常规油气, 10(03): 55~63.

黎彤, 袁怀雨, 吴胜昔. 1998. 中国花岗岩类和世界花岗岩类平均化学成分的对比研究. 大地构造与成矿学, 22(1): 29~34.

李献华, 王选策, 李武显, 李正祥 2008. 华南新元古代玄武质岩石成因与构造意义: 从造山运动到陆内裂谷. 地球化学, 37(4): 382~398.

李献华, 周汉文, 李正祥, 刘颖, P. Kinny. 2001. 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, 30(4): 315~322.

李阳. 2022. 扬子地块西缘峨眉山新元古代岩浆事件及其对 Rodinia 超大陆裂解的启示. 导师:丁枫、任廷聪. 成都:成都理工大学硕士研究生学位论文: 1~106.

凌文黎, 高山, 程建萍, 江麟生, 袁洪林, 胡兆初. 2006. 扬子陆核与陆缘新元古代岩浆事件对比及其构造意义——来自黄陵和汉南侵入杂岩 ELA-ICPMS 锆石 U-Pb 同位素年代学的约束. 岩石学报, 22(2): 387~396.

刘军平, 李静, 王根厚, 孙柏东, 胡绍斌, 俞赛赢, 王小虎, 宋冬虎. 2020b. 扬子板块西南缘基性侵入岩锆石年龄及地球化学特征——Columbia 超级大陆裂解的响应. 地质论评, 66(2): 350~364.

刘军平, 刘卫东, 李维科, 李健, 何世军, 莫雄, 关奇. 2023a. 扬子西缘中元古界黑山组 MISS 构造的发现及其古环境意义. 地质论评, 69(2): 461~468,

刘军平, 宛胜, 田素梅, 王伟, 包佳凤. 2022. 滇西云县地区中二叠世火山岩的发现及其对昌宁—孟连古特提斯洋俯冲作用的约束. 地质学报, 96(3): 942~953.

刘军平, 夏彩香, 孙柏东, 胡绍斌, 王晓峰, 王伟, 关学卿, 宋冬虎, 吕勃烨. 2019. 滇中易门地区新元古代澄江组凝灰岩锆石 U-Pb 年龄及其地质意义. 沉积与特提斯地质, 39(1): 14~21.

刘军平, 杨爱平, 王小虎, 罗光明, 田素梅, 朱勋早, 殷伟, 张坤. 2023b. 滇西凤庆地区小湾花岗岩年代学、地球化学特征及其弧—陆俯冲向碰撞汇聚作用. 中国地质, 50(4): 1188~1202.

刘军平, 孙柏东, 崔晓庄, 熊波, 宋冬虎, 白春东, 张坤, 杨仕潘. 2020a. 云南安宁地区石虎山花岗岩年代学、地球化学特征和锆石 Hf 同位素组成及其成因. 中国地质, 47(3): 693~708.

刘树文, 闫全人, 李秋根, 王宗起. 2009. 扬子克拉通西缘康定杂岩中花岗质岩石的成因及其构造意义. 岩石学报, 25(8): 1883~1896.

裴先治, 李佐臣, 丁仨平, 李瑞保, 冯建赟, 孙雨, 张亚峰, 刘战庆. 2009. 扬子地块西北缘轿子顶新元古代过铝质花岗岩锆石 SHRIMP U-Pb 年龄和岩石地球化学及其构造意义. 地学前缘, 16(3): 231~249.

汪相. 2023. 暗色微粒包体是壳幔岩浆混合作用的证据吗? 地质论评, 69(1): 76~87.

汪正江, 王剑, 杨平. 2011. 上扬子克拉通内新元古代 A 型花岗岩的发现及其地质意义. 沉积与特提斯地质, 31(2): 1~11.

王海然, 赵红格, 乔建新. 2013. 锆石 U-Pb 同位素测年原理及应用. 地质与资源, 22(3): 229~242.

王梦玺, 王焰, 赵红军. 2012. 扬子板块北缘周庵超镁铁质岩体锆石 U-Pb 年龄和 Hf—O 同位素特征: 对源区性质和 Rodinia 超大陆裂解时限的约束. 科学通报, 57(34): 3283~3294.

王香增, 张建锋, 郝世彦. 2023. 延安地区陆相页岩气勘探开发关键技术. 非常规油气, 10(1): 1~10.

王志强, 李娟, 王丽娟, 李猛兴. 2023. 兴安地块南段哈达地区中晚侏罗世侵入岩成因及对蒙古—鄂霍茨克洋演化的制约. 华东地质, 44(04): 386~401.

吴福元, 李献华, 郑永飞, 高山. 2007. Lu—Hf 同位素体系及其岩石学应用. 岩石学报, 23(2): 185~220.

谢士稳, 高山, 柳小明, 高日胜. 2009. 扬子克拉通南华纪碎屑锆石 U-Pb 年龄、Hf 同位素对华南新元古代岩浆事件的指示. 地球科学—中国地质大学学报, 34(1): 117~126.

徐丽娟, 李萍, 刘铮, 王国昌. 2021. 扬子地块西缘峨山新元古代 $A_2$ 型花岗闪长岩的成因及构造意义. 岩石矿物学杂志, 40(2): 383~394.

徐楠, 吴才来, 赵苗苗, 刘畅. 2023. 茫崖闪长岩的成因及对造山带构造演化的指示意义. 地质论评, 69(6): 2085~2111.

鄢圣武, 白宪洲, 伍文湘, 朱兵, 詹琼窑, 文龙, 杨辉, 王玉婷. 2017. 扬子地块西缘新元古代泸沽 A 型花岗岩成因与变泥质岩熔融. 中国地质, 44(1): 136~150.

颜丹平, 周美夫, 宋鸿林, John MA LPAS. 2002. 华南在 Rodinia 古陆中位置的讨论—扬子地块西缘变质—岩浆杂岩证据及其与 Seychelles 地块的对比. 地学前缘, 9(4): 249~256.

余明刚, 洪文涛, 刘凯, 段政, 褚平利, 陈荣. 2022. 江西德兴银山中侏罗世火山岩年代学、岩石成因及构造背景. 华东地质, 43(4): 428~447.

张翔, 段政, 董颖, 陈荣, 余明刚, 宋庆伟, 曹晓娟, 钱迈平. 2022. 中国东部中生代火山岩区地质文化村建设实践与思考——以福建杞溪为例. 华东地质, 43(4): 474~489.

张招崇. 2009. 关于峨眉山大火成岩省一些重要问题的讨论. 中国地质, 36(3): 634~646.

赵风清, 赵文平, 左义成, 李宗会, 薛克勤. 2006. 陕南汉中地区新元古代岩浆岩 U-Pb 年代学. 地质通报, 25(3): 383~389.

朱华平,范文玉,周邦国,王生伟,罗茂金,廖震文,郭阳. 2011. 论东川地区前震旦系地层层序: 来自锆石 SHRIMP 及 LA-ICP-MS 测年的证据. 高校地质学报, 17(3): 452~461.

朱维光, 刘秉光, 邓海琳, 钟宏, 李朝阳, 皮道会, 李志德, 覃喻. 2004. 扬子地块西缘新元古代镁铁—超镁铁质岩研究进展. 矿物岩石地球化学通报, 23(3): 255~264.

Amelin Y, Lee D C, Halliday A N, Pidgeon R T. 1999. Nature of the Earth's earliest crust from hafnium isotopes in single detrital zircons. Nature 399 (6733), 252~255.

Chen Jianshu, Dai Yaran, Tang Feng, Peng Chenglong, Zhang Jiawei, Zhu Heshu, Chen Xing, Wang Wenming, Gong Guiyuan. 2020&. Discussion on the Mesoproterozoic and Neoproterozoic major tectonic events in marginal area of the Yangtze Block. Geological Review, 66(3): 533~554.

Cheng Jiaxiao, Luo Jinhai, Wu Yudong, Han Kui, Wang Shidi 2014&. Geochronology, geochemistry and tectonic signi ficance of the Xiatianba granite in northeastern Yunnan. Acta Geologica Sinica, 88(3): 337~346.

Cui Xiaozhuang, Jiang Xinsheng, Wang Jian, Zhuo Wenwen, Jiang Zhuofei, Wu Yi, Deng Qi, Wei Yanan. 2015&. New evidence for the formation age of basalts from the lowermost Chengjiang Formation in the western Yangtze Block and its geological implications. Acta petrologica Mineralogica, 33(1): 1~13.

Cui Xiaozhuang, Jiang Xinsheng, Wang Jian, Zhuo Wenwen, Xiong Guoqing, Lu Junze, Deng Qi, Wu Wei, Liu Jianhui. 2013&. Zircon U-Pb geochronology for the stratotype section of the Neoproterozoic Chengjiang Formation in central Yunnan and its Geological Significance. Geoscience, 27(3): 547~556.

Deng Jinfu, Liu Cui, Feng Yanfang, Xiao Qinghui, Di Yongjun, Su Shangguo, Zhao Guochun, DUAN Peixin, DAI Meng. 2015&. On the Correct Application in the Common Igneous Petrological Diagrams: Discussion and Suggestion. Geological Review, 61(4): 717~734.

Du Lilin, Geng Yuanshen, Yang Chonghui, Wang Xinshe, Ren Liudong, Zhou Xiwen, Wang Yanbin, Yang Zhushen. 2006&. The stipulation of Neoproterozoic TTG in western Yangtze block andits significance. ActaPetrologica et Mineralogica, 25(4): 273~281.

Gao Linzhi, Zhang Heng, Zhang Chuanheng, Ding Xiaozhong, Yin Chongyu, Wu Zhengjie, Song Biao. 2018&. Collate and Stipulate the Sequences of the Mesoproterozoic Kunyang Group in Eastern Yunnan and its position in Stratigraphic Column of China. Geological Review, 64(2): 283~298.

Hoskin P W O and Schaltegger U. 2003. Thecomposition of zircon and igneous and metamorphic petrogenesis. Reviews in Mineralogy and Geochemistry, 53: 27~62.

Hu Zhaochu. 2008. Signal enhancement in laser ablation ICP-MS by addition of nitrogen in the central channel gas. Journal of Analytical Atomic Spectrometry, 23(8): 1093~1101.

Jiang Xinsheng, Wang Jian, Cui Xiaozhuang, Zhuo Wenwen, Xiong Guoqing, Lu Junze, Liu Jianhui. 2012&. Zircon SHRIMP U-Pb geochronology of the Neoproterozoic Chengjiang Formation in central Yunnan Province (SW China) and its geological significance. Sci China Earth Sci, 42(10): 1496~1507.

Li Tong, Yuan Huayu, Wu Shengxi. 1998&. On the average chemical composition of granitoids in china and the world. Geotectonicaet Metallogenia, 22(1): 29~34.

Li Xianhua, Wang Xuance, Li Wuxian, Li Zhengxiang. 2008&. Petrogenesis and tectonic significance of Neoproterozoic basaltic rocks in South China: from orogenesis to intracontinental rifting. Geochimica, 37(4): 382~398.

Li Xianhua, Zhou Hanwen, Li Zhengxiang, Liu Ying, P. Kinny. 2001&. Zircon U-Pb age and petrochemical characteristics the Neoproterozoic bimodal volcanicsfrom western Yangtze block. Geochimica, 30(4): 315~322.

Li Yang. 2020#. The Neoproterozoic magmatic event at mount emei on the western margin of the Yangtze block and its implications for the disintegration of the Rodinia supercontinent. Advisor: Ding Feng, Ren Tingcong. Chengdu: Master′s graduate thesis of Chengdu University of Technology: 1~106.

Li Zhengxiang, Zhong Shijie. 2009. Supercontinent—superplume coupling, true polar wander and plume mobility: plate dominance in whole-mantle tectonics. Phys. Earth Planet. In. 176(3~4), 143~156.

Ling Wenli, Gao Shan, Cheng Jianping, Jiang Linsheng, Yuan Honglin, Hu Zhaochu. 2006&. Neoproterozoic magmatic events within the Yangtze continental interior and along its northern margin and their tectonic implication: constraint from the ELA-ICPMS U-Pbgeochronology of zircons from Huangling and Hannan complexes. Acta Petrologica Sinica, 22(2): 387~396.

Liu Junping, Gao Zhiyu, Zhou Jiaxi, Sun Zaibo, He Shijun, Zhao Jiangtai, Wu Xiatao. 2024. Diagenetic and metallogenic responses to the late Paleoproterozoic breakup of the Columbia supercontinent on the western margin of the Yangtze Block, SW China. Ore Geology Reviews, 166, 105907.

Liu Junping, Li Jing, Wang Genhou, Sun Baidong, Hu Shaobin, Yu Saiying, Wang Xiaohu, Song Donghu. 2020b&. Geochemical characteritics and U-Pb age of the zircons from maficintrusion in the southwestern margin of the Yangtze plate: Response to break-up of the Columbia supercontinent. Geological Review, 66 (02): 350~364.

Liu Junping, Liu Weidong, Li Weike, Li Jian, He Shijun, Mo Xiong, Guan Qi. 2023a&. Discovery and Paleoenvironment significance of the MISS from the Mesoproterozoic Heishan Formation in the western margin of the Yangtze. Geological Review, 69(2): 461~468.

Liu Junping, Song Sicun, Wang Wei, Tang Feng, Li Jing, Duan, Xiangdong, Wang Xiaohu, Sun Baidong, Yu Saiying, Hu Shaobin, Duan Wenting. 2020. Protoconodont fossils for refining the Cambrian bottom and the contribution to shale gas formation along the southwest margin of Yangtze Block, China Geology, 3: 558~566.

Liu Junping, Sun Baidong, Cui Xiaozhuang, Xiong Bo, Song Donghu, Bai Chundong, Zhang Kun, Yang Shipan. 2020a&. Geochronology, geochemistry, zircon Hf isotopic composition and genesis of Shihushan granite in Anning, Yunnan Province. Geology in China, 47(3): 693~708.

Liu Junping, Tian Sumei, Zhu Xunzao, Ma Jinhua, Li Jing, HuShaobin, Yu Saiying, Zhang Hu, She Zhongming, Li Xugui. 2021. Discovery of rhyolitic tuffaceous slate in the southwestern margin of Yangtze Craton: Zircon U-Pb ages (2491 Ma) and tectonic—thermal events, China Geology, 4: 616~629.

Liu Junping, Wan Sheng, Tian Sumei, Wang Wei, Bao Jiafeng. 2022&. Discovery of the Middle Permian volcanic rocks in the Yunxian area, western Yunnan and constraints on subduction of the Changning— Menglian Paleo- Tethys Ocean. Acta Geologica Sinica, 96(3): 942~953

Liu Junping, Xia Caixiang, Sun Baidong, Hu Shaobin, Wang Xiaofeng, Wang Wei, Guan Xueqing, Song Donghu, Lv Boye. 2019&. Tuffs from the Neoproterozic Chengjiang Formation in the Yimen region, central Yunnan: Zircon U-Pb dating and its geological implications. Sedimentary Geology and Tethyan Geology, 39(1): 14~21.

Liu Junping, Yang Aiping, Wang Xiaohu, Luo Guangming, Tian Sumei, Zhu Xunzao, Yin Wei, Zhang Kun. 2023b&. Zircon geochronolgy, geochemistry characteristics and arc—continent subduction to collision of the Xiaowan granite in Fengqing area, western Yunnan Province. Geology in China, 50(4): 1188~1202.

Liu Junping, Yin Wei, Yang Shipan, Zhao Jiangtai, Zeng Wentao, Tang Feng, He Shijun, Li Weike. 2023. Response to the Lomagundi—Jatuli Event at the southwestern margin of the Yangtze Block: evidence from the carbon and oxygen isotopes of the Paleoproterozoic Yongjingshao Formation, China Geology. 6: 50~60.

Liu Shuwen, Yan Quanren, Li Qiugen, Wang Zongqi. 2009&. Petrogenesis of granitoid rocks in the Kangding Complex, western margin of the Yangtze Craton and its tectonic significance. Acta Petrologica Sinica, 25(8): 1883~1896.

Lu Guimei, Wang Wei, Ernst R E, Söderlund U, Lan Zufan, Huang Sifang, Xue Erkun. 2019. Petrogenesis of Paleo-Mesoproterozoic mafic rocks in the southwestern Yangtze Block of South China: implications for tectonic evolution and paleogeographic reconstruction. Precambrian Research. 322, 66~84.

Ludwing K R. 2003. Isoplot 3. 00: A Geochronological Toolkit for Microsoft Excel. Berkelery: Ber keley Geochronology Center, California 39.

Middlemost E A K. 1994. Naming materials in the magma/igneous rock system. Earth Sci. Rev., 37: 215~224.

Pearce J A, Cann J R. 1973. Tectonic setting of basic volcanic rocks determined using trace element analyses. Earth and Planetary

Science Letters, 19(2): 290~300.

Pearce J A. 1982. Trace Element Characteristics of Lavas from Destructive Plate Boundaries. Andesites: Orogenic Andesites and Related Rocks, 525~548.

Pei Xianzhi, Li Zuochen, Ding Saping, Li Ruibao, Feng Jianyun, Sun Yu, Zhang Yafeng, LiuZhanqing. 2009. Neoproterozoic Jiaoziding peraluminous granite in the northwest margin of Yangtze Block: Zircon SHRIMP U-Pb age and geochemistry, and their tectonic significance. Earth Science Frontiers, 6(3): 232~249.

Rickwood P C. 1989. Boundary lines within petrologic diagrams which use oxides of major and minor elements. Lithos, 22(4): 247~263.

Sun S S, McDonough W F. 1989. Chemical and Isotopic Systematics of Oceanic Basalts: implications for Mantle Composition and Process. In: Saunders A D, Norry M J. eds. Magmatism in the Ocean Basins. Spec. Publ. Geol. Soc. Lond., 42: 313~345.

Vermeesch P. 2018. IsoplotR: A free and open toolbox for geochronology. Geoscience Frontiers, 5, 1479~1493.

Wang Hairan, Zhao Hongge, Qiao Jianxin, Gao Shaohua. 2013&. Theory and application of zircon U-Pb isotope dating technique. Geology and Resources, 22(3): 229~242.

Wang Mengyu, Wang Yan, Zhao Hongjun. 2012&. Zircon U/Pb dating and Hf—O isotopes of the Zhouan ultramafic intrusion in the northern margin of the Yangtze Block, SW China: Constraints on the nature of mantle source and timing of the supercontinent Rodinia breakup. Chin Sci Bull, 57(34): 3283~3294.

Wang Xiang. 2023&. Dark-colored microgranular enclaves are not the evidence for magma mixing under crust—mantle interaction. Geological Review, 69(1): 76~87.

Wang Xiangzeng, Zhang Jianfeng, Hao Shiyan. 2023&. Key technologies of continental shale gas exploration and development in Yan´an Area. Unconventional Oil & Gas, 10(1): 1~10.

Wang Zhengjiang, Wang Jian, Yang Ping, Xie Shangke, Zhuo Wenwen, He Jianglin. 2011&. The discovery and geological implications of the Neoproterozoic A-type granites in the upper Yangtze craton. Sedimentary Geology and Tethyan Geology, 31(2): 1~11.

Wang Zhiqiang, Li Juan, Wang Lijuan, Li Mengxing. 2023&. Petrogenesis of the Middle to Late Jurassic diorite and granite from Hada area in the southern Xing'an Block and its restriction on the evolution of the Mongol—Okhotsk Ocean. East China Geology, 44(04): 386~401.

Wu Fuyuan, Li Xianhua, Zheng Yongfei, Gao Shan. 2007&. Lu—Hf isotopic systematics and their applications in petrology. Acta Petrologica Sinica, 23(2): 185~220.

Xie Nan, Song Jiaqi, Bai Dong, Zou Xinjie. 2023&. Characteristics of fluid inclusions and accumulation stages of Sinian Dengying Formation in Penglai Area, central Sichuan. Unconventional Oil & Gas, 10(3): 55~63.

Xie Shiwen, Gao Shan, Liu Xiaoming, Gao Rishen. 2009&. U-Pb Ages and Hf Isotopes of Detrital Zircons of Nanhua sedimentary rocks from the Yangtze Gorges: Implications for Genesis of Neoproterozoic Magmatism in South China. Earth Science——Journal of China University of Geosciences, 34 (1): 117~126.

Xu Lijuan, Li Ping, Liu Zheng, Wang Guochang. 2021. Petrogenesis and tectonicimplications of the Neoproterozoic Eshan $A_2$-type granodiorite western Yangtze Block. Acta Petrrologica et Mineralogica, 40(2): 383~394.

Xu Nan, Wu Cailai, Zhao Miaomiao, Liu Chang. 2023. Petrogenesis of Mangya diorites and its implication to tectonic evolution. Geological Review, 69(6): 2085~2111.

Yan Danping, Zhou Meifu, Song Honglin, John M. 2002&. Where wassouth china located in the reconstruction of Rodinia. Earth Science Frontiers, 9(4): 249~256.

Yan Shengwu, Bai Xianzhou, Wu Wenxiang, Zhu Bing, Zhan Qiongyao, Wen Long, Yang Hui, Wang Yuting. 2017&. Genesis and geological implications of the Neoproterozoic A-type granite fromthe Lugu area, western Yangtze block. Geology in China, 44(1): 136~150.

Yu Minggang, Hong Wentao, Liu Kai, Duan Zheng, Chu Pingli, Chen Rong. 2022&. Geochronology, petrogenesis and tectonic setting of Middle Jurassic volcanic rocks from Yinshan deposit in Dexing, Jiangxi Province. East China Geology, 43(04): 428~447.

Zhang Xiang, Duan Zheng, Dong Ying, Chen Rong, Yu Minggang, Song Qingwei, Cao Xiaojuan, Qian Maiping. 2022&. Practice and reflection on the establishment of geo-cultural village in Mesozoic volcanic areas of Eastern China: a case study of Qixi Village in Fujian Province. East China Geology, 43(04): 474~489.

Zhang Zhaochong. 2009&. A discussion on some important problemsconcerning the Emeishan large igneous province. Geology in China, 36(3): 634~646.

Zhao Fengqing, Zhao Wen ping, Zuo Yicheng, Li Zonghui, Xue Keqin. 2006&. U-Pb geochronology of NeoProterozoic magmatic rocks in Hanzhong, southern Shananxi, China. Geological Bulletin of china, 25(3): 383~389.

Zhao Xinfu, Zhou Meifu, Li Jianwei, Sun Min, Gao JianFeng, Sun WeiHua, Yang JinHui. 2010. Late Paleoproterozoic to early Mesoproterozoic Dongchuan Group in Yunnan, SW China: implications for tectonic evolution of the Yangtze Block. Precambrian Research, 182: 57~69.

Zhu Huaping, Fan Wenyu, Zhou Bangguo, Wang Shengwei, Luo Maojin, Liao Zhenwen, Guo Yang. 2011&. On the Pre-Sinian stratigraphic sequence in Dongchuan area: evidence from zircon SHRIMP and LA-ICP-MS dating. College of Geology, 17(3): 452~461.

Zhu Weiguang, Liu Bingguang, Deng Hailin, Zhong Hong, Li Chaoyang, Pi Daohui, Li Zhide, Qin Yu. 2004&. Advance in the Study of Neoproterozoic Mafic—Ultramafic Rocks in the Western Margin of the Yangtze Craton. Bulletin of Mineralogy, Petrology and Geochemistry, 23(3): 255~264.

Zhuo Jiewen, Jiang Xinsheng, Wang Jian, Cui Xiaozhuang, Xiong Guoqing, Lu Junze, Liu Jianhui, Ma Mingzhu. 2013. Opening time and filling pattern of the Neoproterozoic Kangdian rift Basin, western Yangtze Continent, South China. Sci. China: Earth Sci. 56, 1664~1676.

# Determination of Neoproterozoic basic magmatic events in Dongchuan area, western margin of the Yangtze block and its indication to the disintegration of Rodinia supercontinent

WANG Tianyuan[1)], YAN Na[2)], LI Min[2)], MA Chenglong[2, 3)], LÜ Boye[4)], LIU Junping [3, 5)]

1) *Strategic Research Center of Oil and Gas Resources*, *Ministry of Natural Resources*, *Beijing*, 100860;

2) *Liaohe Oilfield Company*, *Panjin*, *Liaoning*, 124010;

3) *School of Earth Science and Resources*, *China University of Geosciences*, *Beijing*, 100083;

4) *Yunnan Planning and Design Institute of Land Resourees*, *Kunming*, 650216;

5) *Yunnan Institute of Geological Survey*, *Kunming*, 650015

**Objectives**: There is a widespread exposure of diabase—gabbro basic intrusive rock groups in the peripheral area of the Dongchuan copper deposit on thewestern margin of the Yangtze block. However, there is no unified understanding of their genesis, age, and ore bearing potential.

**Results**: This article presents a study on the petrology, petrogeochemistry, and isotopes of diabase—gabbro rocks in the peripheral area of the Dongchuan Copper Mine. The results obtained a zircon LA-ICP-MS U-Pb age of 800. 4±7. 0 Ma ($MSWD$ = 0. 0085, $n$ = 20), indicating that the widely exposed basic intrusive rock group around the Dongchuan Copper Mine was emplaced in the middle Neoproterozoic period, indicating the existence of magmatic events in the middle Neoproterozoic period in the Dongchuan Copper Mine area. The basic intrusive rock group exhibits high MgO (5. 11%~7. 77%, average 6. 23%), high $TiO_2$ (2. 04%~2. 95%, average 2. 60%), and rich alkali (2. 30%~3. 39%, average 2. 97%) geochemical characteristics, exhibiting slightly alkaline potassium rich titanium basalt. The basic intrusive rock group is enriched with large ion radius elements such as K, Rb, and Ba, while high field strength elements such as Ta, Nb, Zr, and Hf are not significantly depleted. The distribution patterns of trace and rare earth elements are consistent with typical oceanic island basalt (OIB) and formed in an extensional tectonic background. Zircon Lu—Hf isotopes and $(La/Sm)_N$—$(Tb/Yb)_N$ studies indicate that the Xiaoyixi basic rock mass is a product of low degree partial melting of ≤5% lower mantle garnet peridotite in the Middle Mesoproterozoic era, and there may be a small amount of crustal material mixed in later stages.

**Conclusions**: The formation of the Xiaoyixi basic rock mass may be related to the mantle plume activity that caused the rupture of the Rodinia supercontinent in the middle Neoproterozoic, and is an important petrological and magmatic record of the Nanhua rift.

**Keywords**: Dongchuan area; middle Neoproterozoic; zircon U-Pb age; geochemistry; Rodinia supercontinent

**Acknowledgements**: This paper is supported by Ministry of Natural Resources Fund project (No. 2024KCZYCLGL), Yunnan Provincial Department of Science and Technology Project (Nos. 202305AD160031, 202401AT070012), Yunnan's 1∶50000 Regional Geological Survey of Samargi, Yinmin, Guicheng, and Shugu (Nos. D201905, D202207)

**First author**: WANG Tianyuan, male, born in 1991, assistant researcher, is mainly engaged in mineral resource exploration and geological survey; Email: wangty@ sinooilgas. org. cn

**Corresponding author**: LÜ Boye, male, born in 1986. bachelor degree, engineer, is mainly engaged in research on national spatial planning, regional geology, mineral exploration, and farmland protection; Email: 121499669@ qq. com

**Manuscript** received on: 2024-05-27; Accepted on: 2024-09-18; Published online on: 2024-10-20

**Doi**: 10. 16509/j. georeview. 2024. 10. 045 **Edited by**: ZHANG Yuxu