

# 扬子陆块西缘新元古界澄江组 沉积时限的厘定

——来自凝灰岩年代学及地球化学的约束

吕勃焯<sup>1)</sup>, 宛胜<sup>2)</sup>, 刘军平<sup>3,4)</sup>, 何世军<sup>5)</sup>, 马成龙<sup>6)</sup>

- 1) 云南省国土资源规划设计研究院, 昆明, 650216;
- 2) 江西省地质调查勘查院基础地质调查所, 南昌, 330030;
- 3) 中国地质大学地球科学与资源学院, 北京, 100083;
- 4) 云南省地质调查院, 昆明, 650216;
- 5) 中国冶金地质总局第二地质勘查院, 福州, 350108;
- 6) 辽河油田公司, 辽宁盘锦, 124010



Pre-pub. online: www.  
geojournals.cn/georev

**内容提要:** 扬子陆块西缘广泛出露的澄江组是一套与 Rodinia 超大陆演化密切相关的沉积岩系, 其形成时限、构造背景对华南地区新元古代盆地演化, 以及古大陆重建具有重要的指示意义。通过野外调查, 在云南禄劝地区澄江组顶部发现 2 层的火山岩夹层, 岩性为灰白色流纹质晶屑凝灰岩, 对凝灰岩进行 LA-ICP-MS 锆石 U-Pb 定年研究, 获得  $735.6 \pm 5.2$  Ma ( $n=24$ ,  $MSWD=0.14$ ) 加权平均年龄, 说明凝灰岩喷发年龄为南华纪早期, 从而限定了澄江组的沉积时限为 812~735.6 Ma。岩石地球化学及 Lu-Hf 同位素研究表明, 晶屑凝灰岩明显富集 Rb、Th、K 等大离子不相容元素 (LILE), 亏损 Ba、Sr、P、Ti、Nb、Ta 等高场强元素 (HFSE), 稀土元素分布曲线呈“燕式”型, 与低 Sr 高 Yb 的南岭型花岗岩特征较为一致; 凝灰岩形成于中元古代早期 ( $T_{DM2}$ : 1932~1265 Ma, 平均值为 1704.3 Ma) 下地壳泥质岩石经 5%~10% 部分熔融, 并有少量地幔物质参与, 形成于伸展构造背景, 与华南陆块 Rodinia 超大陆裂解有关, 是南华裂谷重要的岩石学及岩浆记录。

**关键词:** 新元古界; 澄江组; 凝灰岩; 南岭型; 锆石 U-Pb 年龄; 新元古代; 扬子陆块西缘

澄江组主要分布于云南建水、峨山、易门、昆明、东川至四川会理一带, 命名剖面位于云南澄江县城北凤凰山一带, 为一套以灰紫色为主的陆相碎屑岩地层。澄江组作为一个重要的岩石地层单元, 顶部被南沱组冰碛砾岩或观音崖组不整合或平行不整合覆盖, 下部角度不整合于昆阳群或天宝山组等基底岩层之上, 其位置的特殊性, 不仅在地层学研究上具有重要地位, 而且对于研究 Rodinia 超大陆解体后的地质演化具有重要意义。

随着同位素年代学研究不断发展, 学者在澄江组中获得较多可靠的年龄数据, 如江新胜等 (2012) 在滇中地区澄江组底部凝灰岩获得  $797.8 \pm 8.2$  Ma 和  $803.1 \pm 8.7$  Ma (江新胜等, 2012); 陆俊泽等

(2013) 在滇东北巧家地区澄江组中下部凝灰岩获得锆石 U-Pb 年龄为  $785 \pm 12$  Ma; 崔晓庄等 (2015) 在云南武定罗茨地区澄江组底部玄武岩获得  $804 \pm 6$  Ma (崔晓庄等, 2015); 高永娟等 (2021) 对东川地区澄江组底部碎屑锆石研究, 获得为  $801 \pm 5$  Ma 最年轻数据年龄; 刘军平等 (2019) 在易门地区澄江组底部凝灰岩获得  $812.1 \pm 5.5$  Ma; 刘兵等 (2018) 在云南牟定安益地区澄江组底部玄武岩获得  $781.3 \pm 1.9$  Ma; 以上年龄数据均报道了澄江组底部年龄, 认为澄江组底界年龄为 812 Ma 左右, 但其顶界年龄还缺高精度年代学约束; 崔晓庄等 (2013) 在澄江地区澄江组层型剖面顶部凝灰岩获得 819 Ma、781 Ma 及 725 Ma 3 组年龄数据, 把 725 Ma (仅 4 颗锆石) 作为

注: 本文为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: 2024-07-08; 改回日期: 2024-11-12; 网络首发: 2025-01-20; 责任编辑: 李明、章雨旭。Doi: 10.16509/j.georeview.2025.01.042

作者简介: 吕勃焯, 男, 1986 年生, 工程师, 主要从事国土空间规划、区域地质调查、耕地保护等方面研究工作; Email: 121499669@qq.com。

通讯作者: 刘军平, 男, 1983 年生, 在读博士生、正高级工程师, 主要从事区域地质与构造地质调查及相关研究工作; Email: 271090834@qq.com。

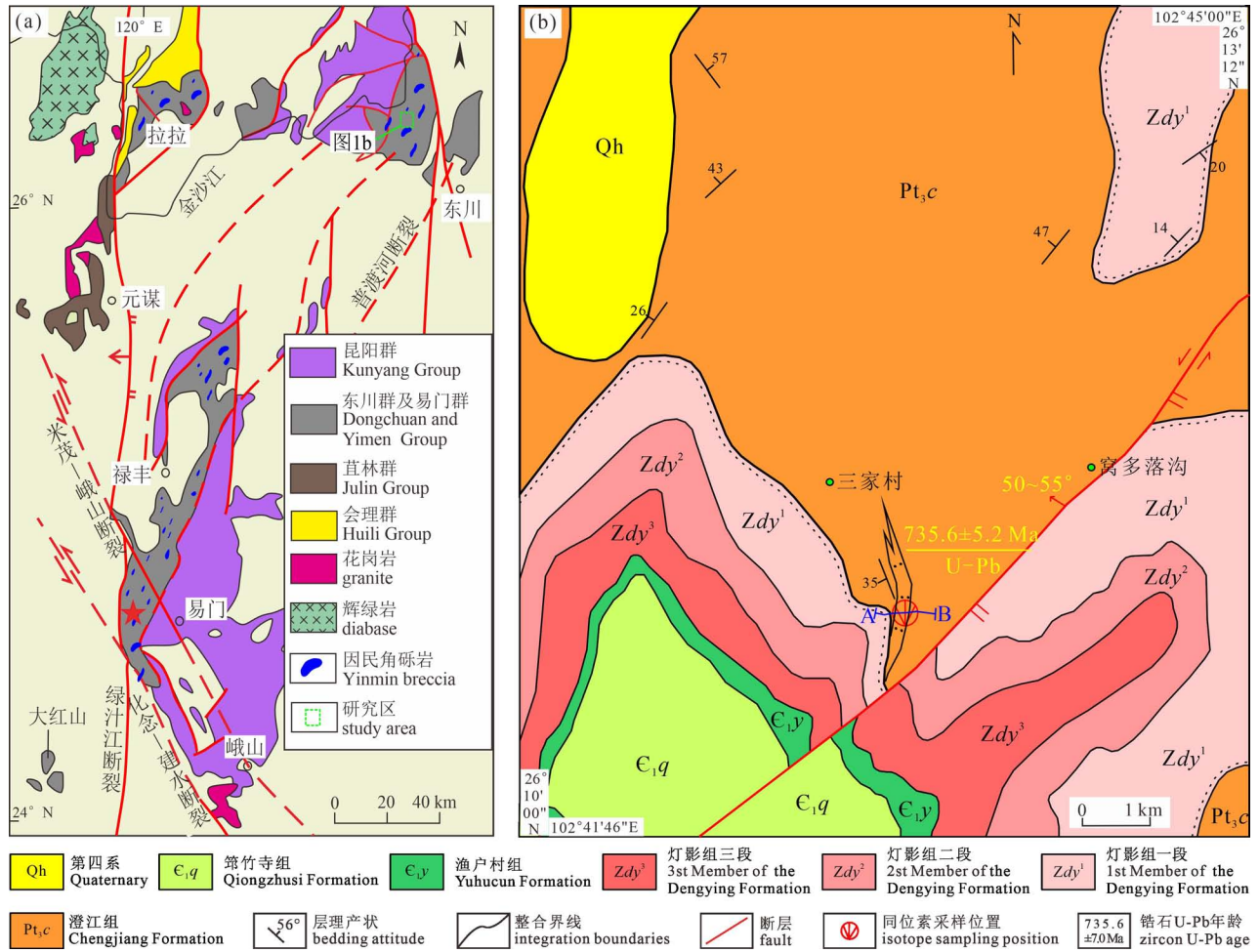


图1 滇中地区大地构造位置图(a) (据 Zhao Xinfu et al., 2010)、地质简图及采样点(b) (云南省地质调查院, 2023<sup>①</sup>)

Fig. 1 Geotectonic location map (a) (modified after Zhao Xinfu et al., 2010) and simplified geological map (b) in Central Yunnan Province<sup>①</sup>

澄江组顶部年龄,还缺乏高精度年代学及岩石地球化学方面数据支撑。

本文在详细1:5万野外地质调查及剖面测制的基础上,以云南禄劝地区澄江组顶部新发现的流纹质晶屑凝灰岩为研究对象,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,对流纹质晶屑凝灰岩时代、岩石成因、构造演化进行了探讨;本文新获得的数据不仅为澄江组的沉积时限提供了年代学约束,还为我们理解华南新元古代裂谷盆地的开启时间以及罗迪尼亚超大陆裂解过程提供了重要参考。

## 1 区域地质背景

研究区位置位于扬子陆块西缘(图1a),该地区的地质构造复杂,沉积地层丰富,经历了多次的板块

碰撞、俯冲、隆升和剥蚀等过程,是研究板块构造、沉积学、古气候和古环境等领域的重要区域(刘军平等,2023a,2023b)。本区出露地层为新元古界澄江组(Pt<sub>3</sub>c)、震旦系灯影组(Zdy),低洼处发育第四系(Qh)(图1b)。

新元古界澄江组(Pt<sub>3</sub>c)为一套以灰紫红色为主的陆相碎屑岩建造,岩石未发生变质;下部为灰白色中厚层长石岩屑砂岩,夹玄武岩、凝灰岩。中部为灰紫色、紫红色中厚至厚层中粒长石砂岩,夹同色岩屑石英砂岩、细砂岩。上部为紫色、灰紫色中厚至厚层含砾岩屑砂岩,偶夹流纹晶屑凝灰岩。

震旦系灯影组(Zdy)为一套台地相碳酸盐岩建造;下部岩性主要为灰白、浅灰色厚层—块状白云岩为主,夹含藻白云岩、硅质白云岩;中部岩性主要为灰白、浅灰色具葡萄状、花边状构造的含藻白云岩、

栉壳状白云岩、含藻纹层白云岩夹少量结晶白云岩;上部岩性主要为浅灰色条纹状粉晶白云岩、砂屑白云岩、硅质白云岩及玄武岩夹层。断层主要发育北东向。

## 2 样品采集及实验测试

### 2.1 样品采集

本文研究剖面位于云南禄劝三家村附近(图1b,图2)。剖面控制地层为新元古界澄江组,顶部被灯影组白云岩不整合覆盖,与下伏地层中元古界黑山组粉砂质泥质板岩呈角度不整合接触(图3b)。研究区内澄江组岩性主要为灰紫色长石岩屑砂岩、长石石英砂岩、长石砂岩、含砾岩屑砂岩(图3a),偶夹流纹质晶屑凝灰岩、细砂岩;根据区域岩性组合对比,本文研究剖面与澄江地区澄江组建组剖面的上部岩石组合、沉积特征较为一致,由此,笔者等认为本文采集的凝灰岩夹层属澄江组上部层位。本文选择露头新鲜的流纹质晶屑凝灰岩进行采样(图3c),采集了1件锆石 U-Pb 定年及 Lu-Hf 同位素样(D001-1-1)、5件岩石地球化学样(D001-1-1、D001-1-2、D001-1-3、D001-1-4、D001-1-5),具体采样位置如图2。

流纹质晶屑凝灰岩:岩石呈灰白色,岩石较微变质,具变余凝灰结构—板状构造。主要由连续定向排列的绢云母(60%~70%)、变余玻屑(20%~30%)和变余晶屑(5%~10%),粒径在  $d < 2$  mm 凝灰范围内。其中变余塑性玻屑压扁、拉长,呈透镜状、蚯蚓

状、肠状,已强烈绢云母化;变余晶屑不规则状、变余板状、尖棱角状,现多被石英集合体所取代,从假象看成分主要为石英、长石(图3d)。

### 2.2 实验测试

锆石分选由南京宏创地质勘查技术服务有限公司完成,将样品粉碎、淘选、重选,然后磁选分离出锆石颗粒,镜下挑选出锆石 500 余粒,锆石呈无色透明的粒状、短柱状,长度变化在 120~150  $\mu\text{m}$  之间,制成环氧树脂样品靶,打磨样品靶,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,尽量避开锆石内部的包裹体、裂隙,选择代表性的锆石颗粒和区域进行 U-Pb 测年,同步进行 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利用激光剥蚀(LA)电感耦合等离子体质谱(ICP-MS)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。激光剥蚀孔径为 32  $\mu\text{m}$ ,采用氦气作为载气、氩气作为补偿气以调节灵敏度。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 年龄谱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)。本文采用

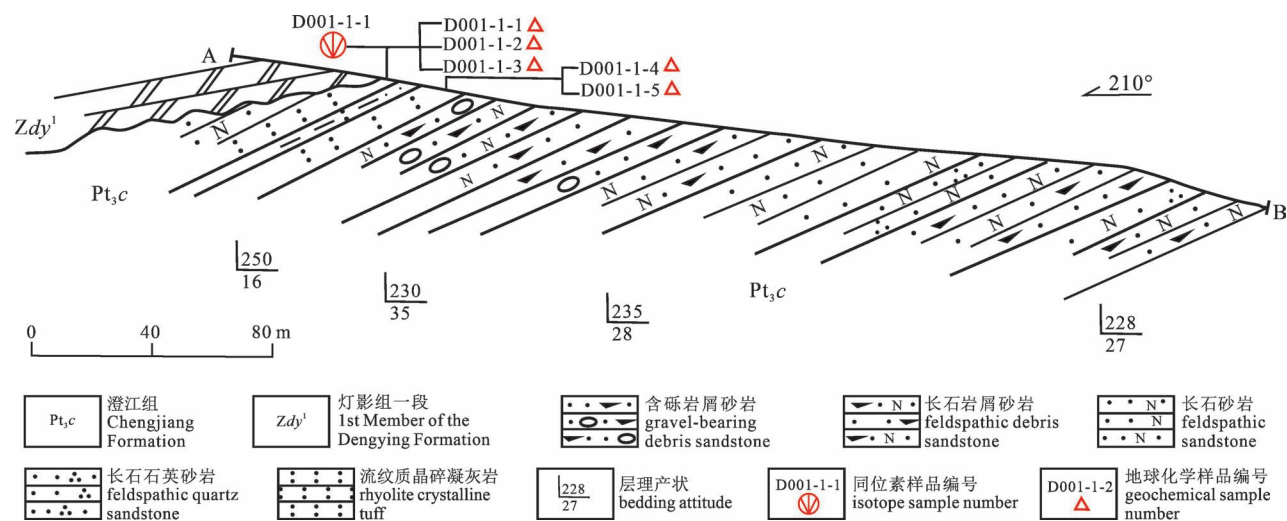


图2 云南禄劝地区新元古界澄江组实测剖面

Fig. 2 Section of the Chengjiang Formation (Cryogenian System) in Luquan area, Yunnan

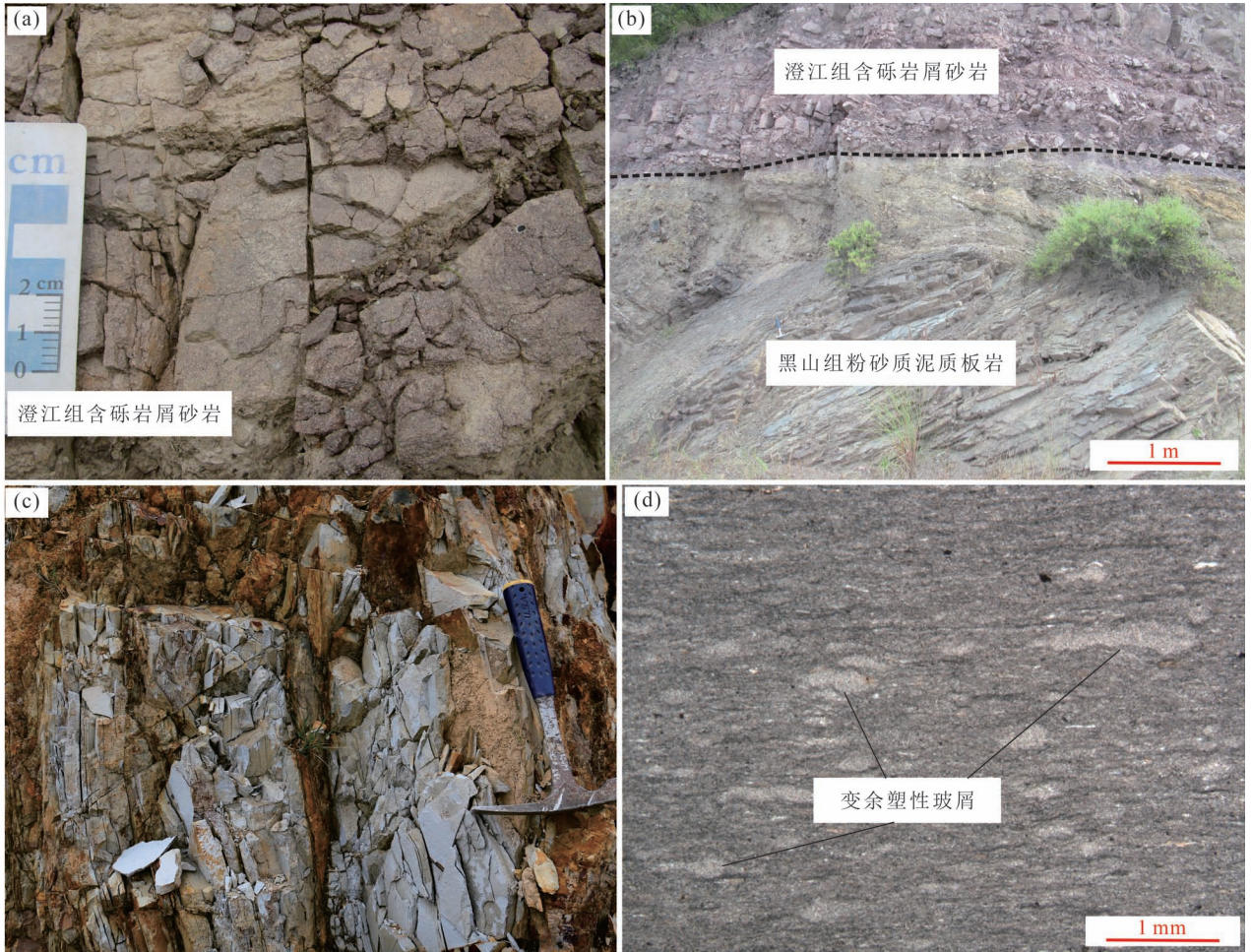


图3 云南禄劝地区新元古界澄江组流纹质晶屑凝灰岩野外及镜下特征: (a) 含砂岩屑砂岩; (b) 澄江组—黑山组角度不整合面; (c) 流纹质晶屑凝灰岩; (d) 流纹质晶屑凝灰岩显微照片

Fig. 3 Field and microscopic characteristics of rhyolitic crystalline tuff from the Chengjiang Formation in Luquan area, Yunnan: (a) Gravel-bearing debris sandstone; (b) angular unconformity between the Chengjiang Formation and Heishan Formation; (c) rhyolitic crystal debris tuff; (d) microscopic photos of rhyolitic crystalline tuff

年龄为 $^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$ 年龄 ( $<1000\text{ Ma}$ ), 其加权平均值的误差为 $2\sigma$  (Ludwing, 2003)。

锆石 Lu—Hf 同位素分析及主量、微量元素在武汉上谱分析科技有限责任公司完成。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 NWR213 nm 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  $40\ \mu\text{m}$ , 能量密度为  $7\sim 8\ \text{J}/\text{cm}^2$ , 频率为  $10\ \text{Hz}$ ,  $^{176}\text{Lu}$  和  $^{176}\text{Yb}$  对  $^{176}\text{Hf}$  的同质异位素干扰通过监测  $^{175}\text{Lu}$  和  $^{172}\text{Yb}$  信号强度, 采用  $n(^{175}\text{Lu})/n(^{176}\text{Lu}) = 0.02655$  和  $n(^{176}\text{Yb})/n(^{172}\text{Yb}) = 0.5886$  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  $n(^{176}\text{Hf})/n(^{177}\text{Hf})$  值分别为  $0.282283 \pm 0.000041$  ( $n = 4, 2\sigma$ ) 和  $0.282019 \pm 0.000029$  ( $n = 4, 2\sigma$ ), 在误差范围内与参考值吻合。计算  $\varepsilon_{\text{Hf}}(t)$  时, 球粒陨石的  $n(^{176}\text{Hf})/n(^{177}\text{Hf})$  值为  $0.282772$ ,  $n(^{176}\text{Lu})/n(^{177}\text{Hf})$  值为  $0.0332$ , 一阶段 Hf 模式年龄 ( $T_{\text{DM1}}$ ) 计算时, 亏损地幔的值采用  $n(^{176}\text{Hf})/n(^{177}\text{Hf}) = 0.28325$ ,  $n(^{176}\text{Lu})/n(^{177}\text{Hf}) = 0.0384$ , 两阶段 Hf 模式年龄 ( $T_{\text{DM2}}$ ) 计算时, 平均地壳的  $n(^{176}\text{Lu})/n(^{177}\text{Hf})$  值为  $0.015$  (Vermeesch, 2018)。

选择 5 件岩石样品分别进行主量元素和微量元素分析 (表 1)。主量元素分析使用 PW4400/40X 射线荧光光谱仪进行测试, FeO 由氢氟酸、硫酸溶样,

采用重铬酸钾滴定容量法进行测试, 分析相对误差小于 2%。微量元素使用 X Series II 型电感耦合等离子体质谱仪进行测试, 分析相对误差小于 5%。

### 3 岩石地球化学特征

#### 3.1 主量元素

流纹质晶屑凝灰岩 5 件样品的岩石化学成分分析结果见表 1。从表 1 中可看出, 流纹质晶屑凝灰岩  $\text{SiO}_2$  含量介于 76.50% ~ 77.27%, 平均值为 76.92%, 为高硅酸性火山岩, 低铝 (11.65% ~ 12.29%, 平均值为 12.02%), 低 Ti (0.62% ~ 0.70%, 平均值为 0.67%), 贫 P (0.03% ~ 0.04%), 低 Mg (0.92% ~ 0.95%), 弱碱性 ( $\text{K}_2\text{O} + \text{Na}_2\text{O} = 4.77\% \sim 4.94\%$ ), 富钾贫钠 ( $\text{K}_2\text{O}/\text{Na}_2\text{O} = 3.55 \sim 3.75$ ),  $\text{Mg}^\#$  为 50 ~ 51; 岩石地球化学特征和下地壳岩石及其部分熔融体特征较为相似。在 TAS 分类图 (图 3a) 中, 岩石样品全部落入了流纹岩区, 在 AFM 图解 (图 3b) 中, 岩石落入钙碱系列, 具有高钾钙碱性特征。

#### 3.2 微量、稀土元素

从表 1 中可见, 流纹质晶屑凝灰岩样品  $\Sigma\text{REE} = 160.38 \sim 180.80 \mu\text{g}/\text{g}$ , 显示较低的稀土总量,  $\text{LREE}/\text{HREE} = 6.27 \sim 6.84$ , 及  $(\text{La}/\text{Yb})_N = 0.98 \sim 1.06$ , 说明轻、重稀土在岩浆作用过程中具有一定的分馏作用但不明显, 轻稀土相对富集; 岩石样品  $\delta\text{Eu} = 0.61 \sim 0.66$ , 平均 0.64, 小于 1, 表现出负 Eu 异常, 岩浆形成后经历斜长石等分离结晶作用, 岩石样品  $\delta\text{Ce} = 0.89 \sim 0.90$ , 呈现出轻微负异常特征, 说明岩浆演化过程中处于弱氧化环境下形成。稀土元素的球粒陨石标准化配分模式为平缓右倾的曲线, 具有一定程度“燕式”特征 (图 3c) (Sun and McDonough, 1989)。所有样品具有较为一致的配分模式特征, 暗示岩石均来自同一源区。

流纹质晶屑凝灰岩微量元素原始地幔标准化的蛛网图上 (图 3d), 明显富集 Rb、Th、K 等大离子不相容元素 (LILE), 亏损 Ba、Sr、P、Ti、Nb、Ta 等高场强元素 (HFSE), 暗示岩浆演化过程中存在强烈的分离结晶作用; 极低 Sr 含量, 以及高 Yb 含量, 指示与南岭型花岗岩特征较为一致 (Wood et al, 1979; Amelin et al., 1999; 邓晋福等, 2015; 王香增等, 2023), 极低 Sr 含量, 以及  $\text{Ba}/\text{Sr} = 46.10 \sim 27.35$ 、 $\text{Rb}/\text{Sr} = 21.88 \sim 61.28$  均大于 0.5 等特征, 指示其成因与大陆地壳物质的部分熔融有关, 形成于地壳减薄的伸展构造背景。

表 1 云南禄劝地区澄江组流纹质晶屑凝灰岩的全岩主量元素 (%)、微量元素 ( $\times 10^{-6}$ ) 分析数据

Table 1 Whole rock major elements (%) and trace elements ( $\times 10^{-6}$ ) analyses of rhyolitic crystalline tuff from the Chengjiang Formation in Luquan area, Yunnan

样品编号	D001-1-1	D001-1-2	D001-1-3	D001-1-4	D001-1-5
$\text{SiO}_2$	76.89	76.72	76.50	77.27	77.23
$\text{TiO}_2$	0.67	0.70	0.69	0.62	0.67
$\text{Al}_2\text{O}_3$	12.08	12.15	12.29	11.65	11.95
$\text{Fe}_2\text{O}_3$	1.36	1.34	1.36	1.38	1.32
FeO	1.30	1.40	1.32	1.31	1.30
MnO	0.02	0.01	0.01	0.02	0.01
MgO	0.92	0.94	0.95	0.92	0.92
CaO	0.53	0.53	0.52	0.52	0.52
$\text{Na}_2\text{O}$	1.03	1.04	1.04	1.05	1.03
$\text{K}_2\text{O}$	3.81	3.85	3.90	3.72	3.78
$\text{P}_2\text{O}_5$	0.04	0.04	0.04	0.03	0.03
烧失量	1.08	1.15	1.10	1.15	1.03
总量	94.86	94.95	94.75	94.84	94.95
$\text{Mg}^\#$	50	50	51	50	50
La	27.4	29.5	29.1	26.8	26.1
Ce	52.0	55.6	54.6	50.3	49.4
Pr	7.03	7.54	7.23	6.57	6.59
Nd	25.4	27.8	26.3	24.6	24.0
Sm	4.49	5.48	4.89	4.58	4.33
Eu	0.88	1.07	0.94	0.88	0.92
Gd	4.01	4.30	4.33	3.68	3.99
Tb	0.76	0.72	0.73	0.66	0.72
Dy	5.22	5.05	5.01	4.47	4.73
Ho	1.08	1.11	1.08	0.98	1.03
Er	3.38	3.38	3.38	2.97	3.13
Tm	0.48	0.48	0.51	0.45	0.45
Yb	3.29	3.39	3.23	2.95	3.15
Lu	0.49	0.50	0.52	0.48	0.48
Y	34.2	35.0	34.8	30.0	32.4
Zr	104	111	110	93.7	101
Th	7.48	8.35	8.36	6.77	7.06
Sc	5.21	5.61	4.61	4.08	4.53
Sr	5.21	5.61	4.61	4.08	4.53
Rb	119	123	123	112	117
Nb	8.59	9.08	8.84	7.26	8.31
Cr	61.4	64.9	62.4	57.2	58.1
Ba	261	259	266	250	250
Hf	2.77	3.16	3.00	2.68	2.83
Ta	0.58	0.60	0.59	0.52	0.57
Pb	3.67	5.22	3.71	2.53	3.22
$\Sigma\text{REE}$	170.18	180.80	176.58	160.38	161.33
$\Sigma\text{Ce}$	117.26	126.92	123.04	113.73	111.21
$\Sigma\text{Ce}/\Sigma\text{Y}$	2.22	2.36	2.30	2.44	2.22
La/Sm	6.11	5.37	5.95	5.84	6.02
$\delta\text{Eu}$	0.62	0.65	0.61	0.64	0.66
$\delta\text{Ce}$	0.90	0.89	0.90	0.90	0.90
$(\text{La}/\text{Yb})_N$	1.06	0.98	1.04	1.03	1.05

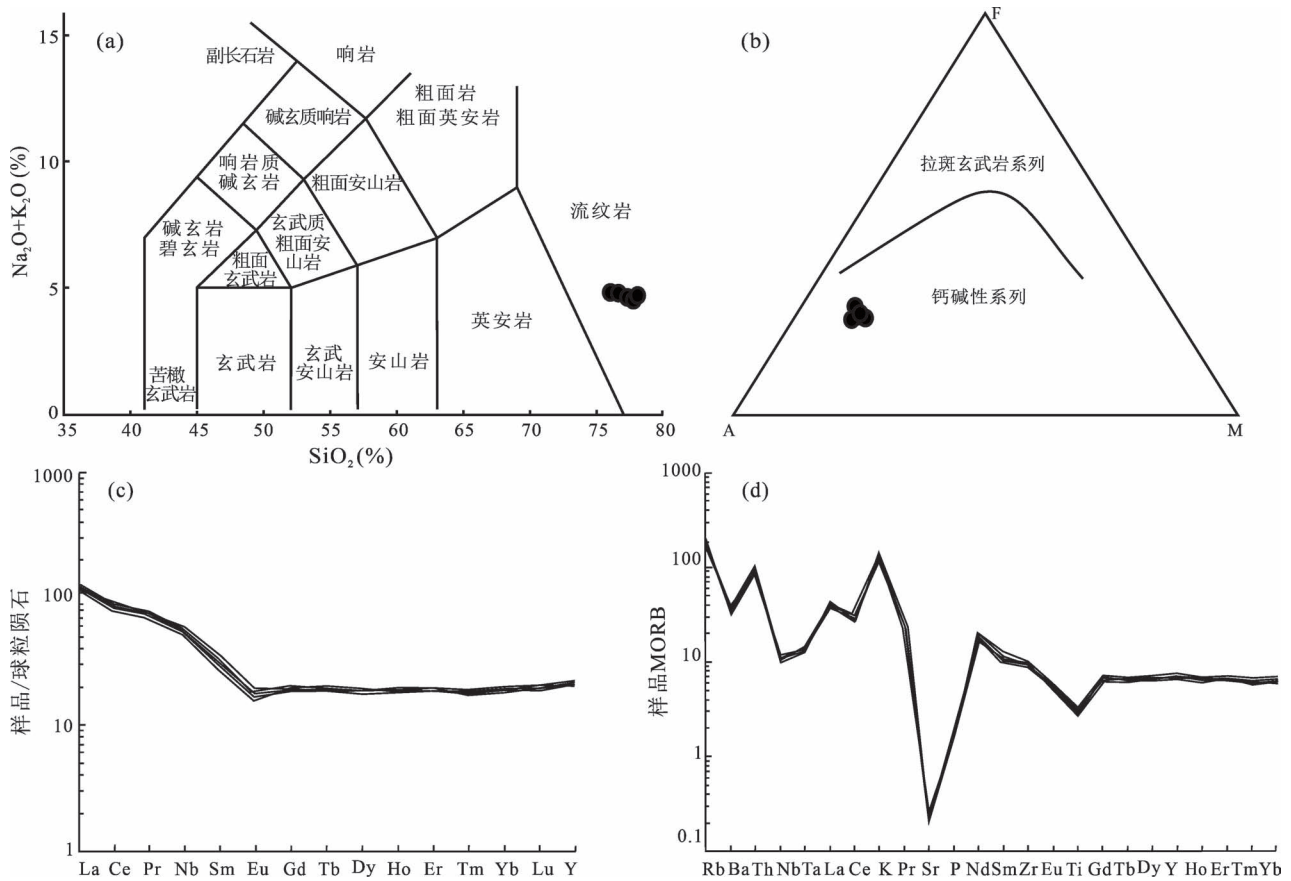


图4 云南禄劝地区新元古界澄江组流纹质晶屑凝灰岩  $\text{SiO}_2$ — $(\text{Na}_2\text{O}+\text{K}_2\text{O})$  图解 (a) (据 Middlemost, 1994)、AFM 分类图 (b) (据 Rickwood, 1989)、稀土配分曲线模式图 (c) (据 Sun and McDonough, 1989) 及微量元素比值蛛网图 (d) (据 Wood et al., 1979)

Fig. 4  $\text{SiO}_2$ — $(\text{Na}_2\text{O}+\text{K}_2\text{O})$  diagram (a) (after Middlemost et al., 1994), AFM classification diagram (b) (after Rickwood, 1989), rare earth distribution curve pattern diagram (c) (after Sun and McDonough, 1989), and trace element ratio spider diagram (d) of rhyolitic crystalline tuff from the Chengjiang Formation in Luquan area, Yunnan (d after Wood et al., 1979)

## 4 年代学特征

### 4.1 锆石 U-Pb 年龄

本文研究的流纹质晶屑凝灰岩(D001-1-1)锆石阴极发光(CL)图像(图5a)显示锆石粒度较大(120~150  $\mu\text{m}$ ), 锆石呈板柱状, 长宽比大多3:1~4:1, Th含量为118~554  $\mu\text{g/g}$ , U含量为107~720  $\mu\text{g/g}$ , Th/U=0.5~1.2, 均大于0.1, 锆石具有明显的环带较密的振荡环带, 无变质增生边, 表现出典型的酸性岩岩浆结晶锆石特征(Hu Zhaochu, 2008)。少数锆石发育继承核, 表现出继承性锆石特征。

本文选择29颗锆石进行U-Pb定年分析(表2), 所有的测点数据都位于谐和线上(图5b), 谐和度均 $\geq 90\%$ , 说明年龄数据可信度较高。锆石3、27号测点打在锆石继承核上,  $^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$  年龄分别为

828.1 Ma、879.1 Ma, 应为继承性锆石年龄, 测点12、20、24打在锆石继承核与新生岩浆锆石交汇处,  $^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$  年龄分别为778.4 Ma、771.2 Ma、757.3 Ma, 应为二者的混合年龄(图5a)。其余24颗锆石年龄数据较为集中(图4c), 锆石的Th/U比值均大于0.1(图6a), 具有典型的振荡环带, 为酸性岩浆成因; 在锆石稀土元素球粒陨石标准配分图(图6b)上, 24个测点的 $^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$  年龄: 740.8~720.9 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(表3), 具有典型岩浆锆石的稀土配分模式特点(Hoskin and Schaltegger, 2003)。24个测点获得了较为一致的 $^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$  年龄加权平

表 2 云南禄劝地区新元古界澄江组流纹质晶屑凝灰岩的锆石 LA-ICP-MS U-Pb 同位素数据表  
Table 2 LA-ICP-MS zircon U-Pb data of rhyolitic crystalline tuff from the Chengjiang Formation  
in Luquan area, Yunnan

测点号	元素含量 ( $10^{-6}$ )			Th/U	同位素比值						同位素年龄 (Ma)						和度 (%)
	Pb	Th	U		$n(^{207}\text{Pb})/n(^{206}\text{Pb})$		$n(^{207}\text{Pb})/n(^{235}\text{U})$		$n(^{206}\text{Pb})/n(^{238}\text{U})$		$n(^{207}\text{Pb})/n(^{206}\text{Pb})$		$n(^{207}\text{Pb})/n(^{235}\text{U})$		$n(^{206}\text{Pb})/n(^{238}\text{U})$		
					测值	1 $\sigma$	测值	1 $\sigma$	测值	1 $\sigma$	测值	1 $\sigma$	测值	1 $\sigma$	测值	1 $\sigma$	
01	181	360	341	1.1	0.06565	0.0021	1.098	0.0418	0.1206	0.0032	794.4	66.7	752.4	20.2	734.0	18.2	97
02	91	177	252	0.7	0.06424	0.0019	1.068	0.0301	0.1208	0.0023	750.0	61.1	737.9	14.8	735.3	13.0	99
03	160	261	368	0.7	0.07585	0.0029	1.436	0.0700	0.1371	0.0033	1100	75.9	903.9	29.2	828.1	18.8	91
04	152	292	404	0.7	0.06579	0.0016	1.098	0.0272	0.1207	0.0021	799.7	51.8	752.6	13.2	734.6	12.0	97
05	166	322	422	0.8	0.06525	0.0020	1.097	0.0373	0.1216	0.0029	783.3	69.4	752.1	18.0	739.8	16.7	98
06	184	333	632	0.5	0.06595	0.0018	1.109	0.0341	0.1207	0.0025	805.6	57.4	757.8	16.4	734.5	14.2	96
07	82	141	229	0.6	0.06796	0.0022	1.133	0.0400	0.1207	0.0026	877.8	100.9	769.0	19.1	734.7	15.1	95
08	108	228	221	1.0	0.06126	0.0019	1.024	0.0367	0.1210	0.0031	650.0	69.4	715.8	18.4	736.1	17.5	97
09	107	212	281	0.8	0.06607	0.0020	1.112	0.0425	0.1214	0.0033	809.3	64.8	758.9	20.4	738.8	18.7	97
10	157	353	202	1.7	0.06604	0.0022	1.093	0.0371	0.1212	0.0028	809.3	65.7	749.8	18.0	737.3	16.3	98
11	274	543	574	0.9	0.06598	0.0016	1.103	0.0314	0.1214	0.0024	805.6	51.8	754.7	15.2	738.5	13.9	97
12	162	287	258	1.1	0.06832	0.0022	1.195	0.0374	0.1283	0.0030	879.6	67.1	798.4	17.3	778.4	17.4	97
13	205	400	404	1.0	0.06483	0.0018	1.078	0.0293	0.1209	0.0026	768.5	61.3	742.5	14.4	735.6	15.1	99
14	86	252	286	0.9	0.06655	0.0014	1.082	0.0291	0.1183	0.0027	833.3	38.7	744.5	14.2	720.9	15.3	96
15	55	122	216	0.6	0.06508	0.0011	1.080	0.0241	0.1208	0.0022	775.9	35.2	743.9	11.8	735.0	12.8	98
16	164	482	552	0.9	0.06614	0.0010	1.098	0.0241	0.1205	0.0022	810.8	26.9	752.3	11.7	733.7	12.9	97
17	109	290	393	0.7	0.06497	0.0016	1.086	0.0286	0.1218	0.0027	772.2	56.5	746.7	13.9	740.8	15.8	99
18	77	206	258	0.8	0.06929	0.0018	1.156	0.0303	0.1218	0.0028	907.1	53.7	780.1	14.3	741.1	16.0	94
19	45	145	108	1.3	0.06788	0.0019	1.141	0.0323	0.1223	0.0023	864.8	57.4	773.1	15.3	743.9	13.3	96
20	40	118	107	1.1	0.06390	0.0015	1.117	0.0301	0.1271	0.0023	738.9	50.8	761.7	14.4	771.2	13.4	98
21	102	294	360	0.8	0.06562	0.0009	1.096	0.0201	0.1210	0.0017	794.4	34.3	751.3	9.7	736.4	9.8	98
22	112	319	364	0.9	0.06716	0.0010	1.120	0.0220	0.1209	0.0018	842.6	31.5	762.9	10.6	735.5	10.4	96
23	168	515	525	1.0	0.06522	0.0010	1.072	0.0204	0.1192	0.0019	781.2	31.5	739.5	10.0	725.7	10.7	98
24	73	192	232	0.8	0.06445	0.0013	1.098	0.0228	0.1247	0.0023	766.7	38.0	752.6	11.0	757.3	12.9	99
25	198	468	720	0.6	0.06876	0.0014	1.138	0.0262	0.1206	0.0024	900.0	40.7	771.7	12.5	734.3	13.6	95
26	159	554	394	1.4	0.06425	0.0012	1.070	0.0236	0.1206	0.0017	750.0	38.9	738.7	11.6	733.9	9.7	99
27	90	162	335	0.5	0.06583	0.0009	1.327	0.0235	0.1461	0.0020	1200	29.6	857.8	10.3	879.1	11.5	97
28	107	294	320	0.9	0.06732	0.0019	1.138	0.0360	0.1222	0.0017	847.8	59.3	771.6	17.1	743.3	9.6	96
29	100	312	282	1.1	0.06756	0.0011	1.124	0.0205	0.1206	0.0018	855.2	32.6	765.1	9.8	734.2	10.1	95

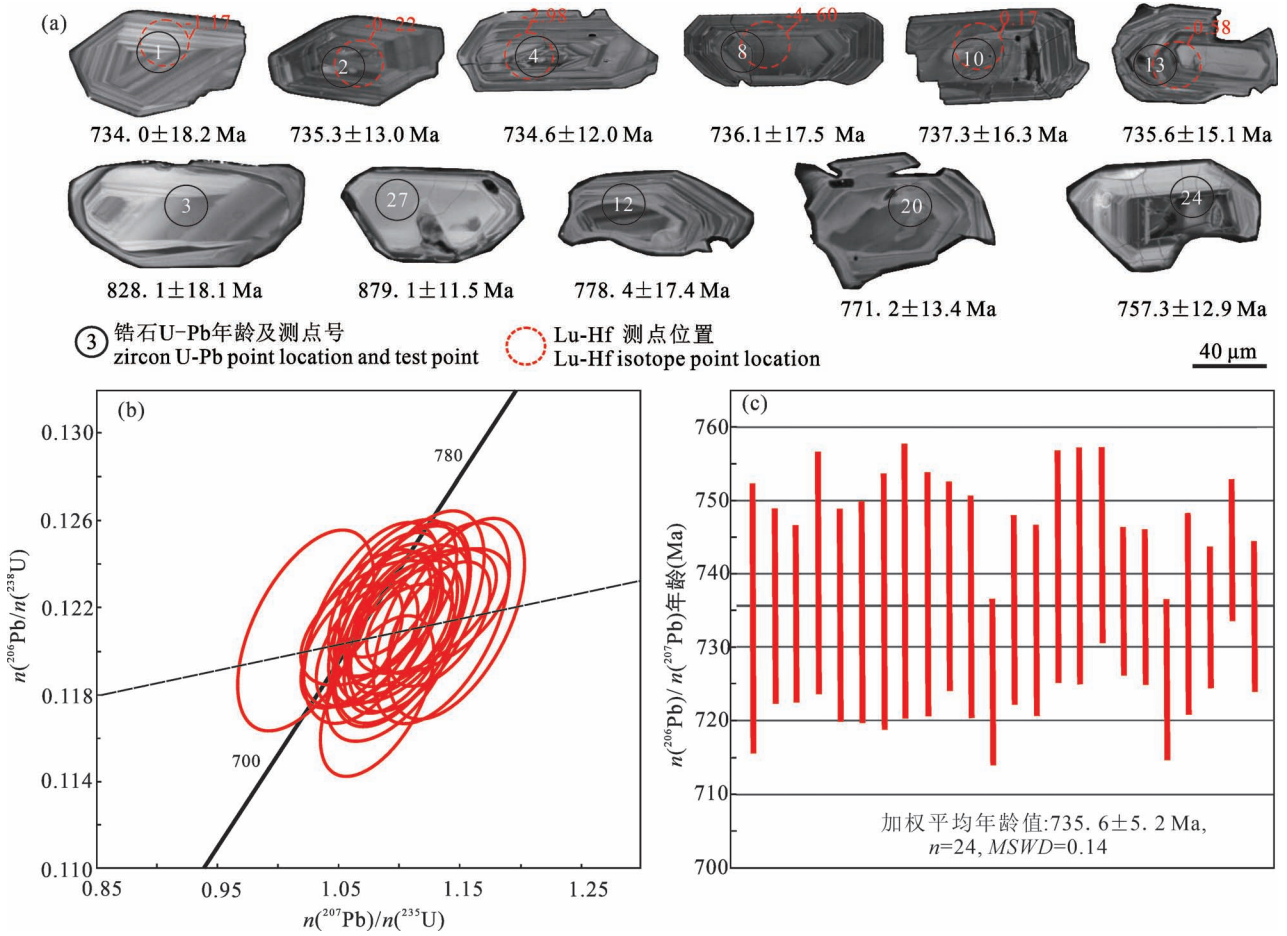


图5 云南禄劝地区新元古界澄江组流纹质晶屑凝灰岩锆石 CL 图(a) 及 U-Pb 年龄谐和图(b)

Fig. 5 CL diagram (a) and U-Pb dating concordia diagram (b) of the zircons from the rhyolitic crystalline tuff in the Chengjiang Formation in Luquan area, Yunnan

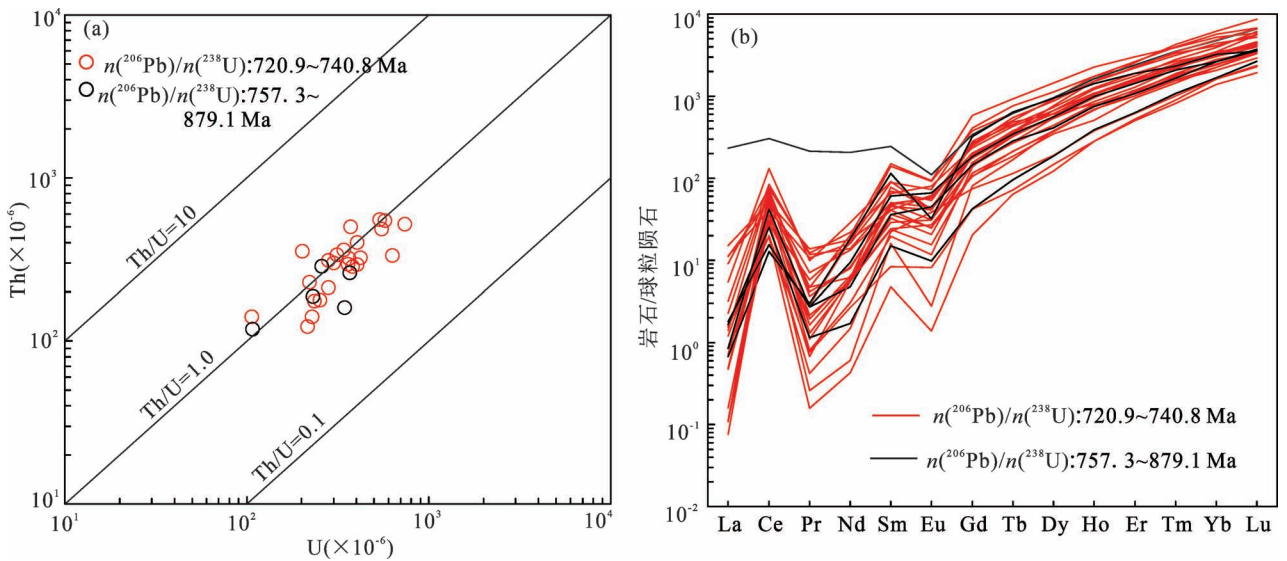


图6 云南禄劝地区新元古界澄江组流纹质晶屑凝灰岩锆石 U—Th 图解(a) 及 锆石稀土元素配分模式图(b) (据 Sun et al. , 1989)

Fig. 6 Diagrams of U—Th (a) and chondrite normalized rare earth element patterns (b) for the zircons from the rhyolitic crystalline tuff in the Chengjiang Formation in Luquan area, Yunnan (after Sun et al. , 1989)



表3 云南禄劝地区澄江组流纹质晶屑凝灰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 ( $\times 10^{-6}$ ) analysis values of zircons of rhyolitic crystalline tuff from the Chengjiang Formation in Luquan area, Yunnan

测点号	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14
La	0.12	0.37	0.16	0.02	0.17	0.03	0.001	0.001	0.001	0.76	0.12	0.20	0.03	2.66
Ce	31.2	12.0	7.76	26.2	19.3	18.9	11.7	30.5	12.3	51.6	39.2	25.5	36.8	24.7
Pr	0.45	0.07	0.28	0.16	0.55	0.02	0.02	0.10	0.04	1.11	0.44	0.26	0.20	1.01
Nd	2.88	1.24	8.57	2.77	7.56	0.28	0.20	2.80	0.69	6.49	9.40	2.22	2.63	7.49
Sm	5.53	1.28	17.5	7.35	21.5	2.46	0.73	11.9	3.41	7.74	22.9	5.50	7.23	10.6
Eu	1.46	0.47	1.85	1.81	5.31	0.16	0.08	2.39	2.22	2.58	5.43	2.60	3.50	3.09
Gd	21.9	8.58	66.2	29.0	78.1	16.6	4.15	57.6	15.3	39.1	119	29.7	41.6	50.9
Tb	6.89	2.69	23.9	10.4	23.2	6.27	2.40	18.9	4.28	13.0	34.5	10.6	13.6	18.1
Dy	88.2	37.4	239	138	239	96.3	30.9	235	48.1	136	369	105	136	155
Ho	28.7	16.0	80.6	54.2	85.7	38.4	16.0	98.7	21.4	58.8	128	42.3	48.5	45.5
Er	157	86.8	314	253	366	188	83.5	436	102	261	499	178	213	177
Tm	36.9	22.9	59.5	61.2	80.6	48.2	20.7	102	25.7	57.2	100	42.4	55.0	40.4
Yb	382	275	548	588	750	475	237	970	280	553	886	449	562	381
Lu	87.6	57.9	90.4	107	133	87.9	48.8	173	60.2	106	150	91.1	117	83.9
测点号	15	16	17	18	19	20	22	23	24	25	26	27	28	29
La	0.001	2.16	0.04	0.11	0.03	54.96	2.64	3.58	0.39	0.03	0.54	0.43	1.29	0.33
Ce	25.6	46.8	28.9	21.9	28.2	186	32.9	31.0	15.4	17.5	44.5	9.46	80.2	43.3
Pr	0.08	1.16	0.12	0.18	0.13	20.23	0.67	1.30	0.11	0.06	0.35	0.26	0.94	0.39
Nd	1.43	10.2	2.63	2.99	2.76	96.1	6.22	8.28	0.80	2.58	3.87	4.38	13.4	3.71
Sm	2.99	9.95	4.97	4.40	3.69	37.5	6.24	6.29	2.28	3.64	6.92	9.25	13.9	7.50
Eu	0.68	4.66	1.19	1.80	1.57	6.40	1.43	3.59	0.57	0.90	2.38	3.81	2.40	3.31
Gd	28.0	48.2	31.9	38.2	21.5	70.0	30.3	36.2	8.65	23.7	39.3	37.8	54.6	52.7
Tb	13.8	16.0	12.0	14.1	7.95	23.2	10.1	12.4	3.59	7.94	13.6	12.9	17.0	20.5
Dy	194	169	144	156	94.2	243	112	139	47.3	95.9	169	142	186	222
Ho	86.5	61.4	61.1	60.4	39.1	92.1	44.6	55.2	22.0	39.3	68.7	56.11	71.9	86.0
Er	426	244	270	253	178	398	196	245	104	167	290	237	314	373
Tm	109	57.4	64.0	58.7	44.4	89.6	46.3	62.7	27.5	39.6	71.0	53.3	68.1	89.1
Yb	1052	520	574	533	409	809	418	593	283	351	668	450	564	821
Lu	219	101	112	111	90.1	168	87.5	141	67.5	74.4	156	94.7	116	170

均值为  $735.6 \pm 5.2$  Ma ( $n=24$ ,  $MSWD=0.14$ ), 说明流纹质晶屑凝灰岩形成年龄为新元古代中期, 也代表了澄江组的顶界年龄。

5个锆石 $^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$ 年龄(828.1 Ma、778.4 Ma、771.2 Ma、757.3 Ma、879.1 Ma)打在锆石继承核上, 振荡环带结构不明显, 具明显的核一边结构, 且数据明显大于锆石结晶年龄 735.6 Ma, 在锆石的稀土元素球粒陨石标准配分图(图 6b)与其它岩浆结晶锆石有明显差别, Ce 正异常不明显(如 20 号测点, 重稀土明显富集), 表现出捕获锆石或继承性锆石特征。

#### 4.2 Lu—Hf 同位素年龄

本文选择澄江组的流纹质晶屑凝灰岩(D001-1-1)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 同位素测试分析。本文共完成 10 个点的 Lu—Hf 同位素测试(表

4), 测试样品的  $n(^{176}\text{Yb})/n(^{177}\text{Hf})$  范围为 0.023669 ~ 0.080020, 平均为 0.0524354;  $n(^{176}\text{Lu})/n(^{177}\text{Hf})$  范围为 0.000745 ~ 0.002248, 平均为 0.0013741,  $n(^{176}\text{Hf})/n(^{177}\text{Hf})$  范围为 0.282214 ~ 0.282513, 平均为 0.2540752。样品  $\epsilon_{\text{Hf}}(t)$  值范围为 -3.99 ~ 6.03 (8 个点为负、2 个为正, 均值为 -0.96) (图 7), 一阶段 Hf 的模式年龄  $T_{\text{DM1}}$  为 1078 ~ 1513 Ma, 平均值为 1353.2 Ma, 二阶段 Hf 的模式年龄  $T_{\text{DM2}}$  为 1265 ~ 1932 Ma, 平均值为 1704.3 Ma, 其形成来源于中元古代早期下地壳泥质岩石经 5% ~ 10% 部分熔融, 并有少量地幔物质参与, 总体与扬子陆块西缘 7.3 ~ 0.8 Ga 酸性火山岩源区较为一致 (Amelin et al., 1999; 吴福元等, 2007)。

## 5 讨论

### 5.1 流纹质晶屑凝灰岩岩石成因、构造环境及源区

南岭型花岗岩岩石地球化学特征表现为高 Si、

表4 云南禄劝地区新元古界澄江组流纹质晶屑凝灰岩 Lu—Hf 同位素分析值

Table 4 Lu—Hf isotope analysis value of rhyolitic crystalline tuff from the Chengjiang Formation in Luquan area, Yunnan

点号	年龄 (Ma)	$n(^{176}\text{Hf})/n(^{177}\text{Hf})$		$n(^{176}\text{Lu})/n(^{177}\text{Hf})$		$n(^{176}\text{Yb})/n(^{177}\text{Hf})$		$\varepsilon_{\text{Hf}}(t)$	$\left[\frac{n(^{176}\text{Hf})}{n(^{177}\text{Hf})}\right]_i$	$T_{\text{DM1}}$ (Ma)	$T_{\text{DM2}}$ (Ma)	$f_{\text{Lu/Hf}}$
		测值	1 $\sigma$	测值	1 $\sigma$	测值	1 $\sigma$					
1	735.6	0.282302	0.000021	0.001605	0.000058	0.050322	0.002088	-1.17	0.282280	1363	1718	-0.95
2	735.6	0.282323	0.000020	0.001163	0.000040	0.034776	0.001204	-0.22	0.282307	1317	1658	-0.96
4	735.6	0.282255	0.000021	0.001914	0.000030	0.066701	0.001039	-2.98	0.282229	1441	1831	-0.94
5	735.6	0.282214	0.000023	0.002248	0.000034	0.080020	0.001133	-4.60	0.282183	1513	1932	-0.93
6	735.6	0.282218	0.000022	0.001265	0.000022	0.042180	0.000821	-3.99	0.282200	1468	1894	-0.96
7	735.6	0.282294	0.000017	0.000745	0.000005	0.023669	0.000156	-1.05	0.282283	1343	1710	-0.98
8	735.6	0.282513	0.000020	0.002159	0.000043	0.074136	0.001623	6.03	0.282483	1078	1265	-0.93
9	735.6	0.282291	0.000019	0.000884	0.000026	0.026769	0.000858	-1.21	0.282279	1352	1720	-0.97
10	735.6	0.282342	0.000023	0.001758	0.000074	0.059382	0.002748	0.17	0.282318	1311	1634	-0.95
13	735.6	0.282325	0.000020	0.002036	0.000084	0.066399	0.003096	-0.58	0.282296	1346	1681	-0.94

低 Al、富 K、贫 Na、高 Yb 和低 Sr, 明显富集大离子不相容元素, 亏损高场强元素。稀土元素分布曲线呈明显的“燕式”型, 形成可能来源于下地壳底部部分熔融与地壳物质混合形成的产物, 源区深度较浅, 压力较低, 水含量低和氧逸度低, 处于还原状态下的伸展构造背景 (Jahn et al., 1999; 李献华等, 2001, 2008; 张旗等, 2006; 邓晋福等, 2015)。

流纹质晶屑凝灰岩 5 件样品表现出高 SiO<sub>2</sub> (76.50%~77.27%), 低铝 (11.65%~12.29%), 富钾贫钠 (K<sub>2</sub>O/Na<sub>2</sub>O=3.55~3.75) 的特征, 且明显富集 Rb、Th、K 等大离子不相容元素 (LILE), 亏损 Ba、

Sr、P、Ti、Nb、Ta 等高场强元素 (HFSE), 稀土元素分布曲线与前人研究的“燕式”型 (李献华等, 2001; 张旗等, 2006) 稀土元素分布曲线较为一致。样品的 Yb 含量与 Sr 含量呈负相关, 与负 Eu 异常呈正相关的特征, 与前人研究的低 Sr 高 Yb 的南岭型花岗岩 (张旗等, 2006) 特征较为一致; 5 件样品在 Yb—Sr 图解 (图 8a) 中, 均落入南岭型花岗岩 (V) 区, 暗示岩体形成深度较浅, 且压力较低 (张旗等, 2006; 邓晋福等, 2015); 在 (Yb+Ta)—Rb 图解中 (图 9a) 及 (Y+Nb)—Rb 图解中 (图 9b), 样品均落入后碰撞花岗岩区, 指示形成于地壳减薄还原状态下的伸展构造背景。

Sm/Nd 值在研究岩石和矿床的物质来源方面具有重要价值。不同的地幔源区或者地壳源区具有不同的 Sm/Nd 同位素组成特征。通过分析岩石的值, 可以追溯岩石是来自地幔还是地壳, 或者判断是否有地幔—地壳物质的混合。由于 Sm/Nd 不受晶体分选的显著影响, 因此该比值通常能反映了源区成分, 球粒陨石 Sm/Nd 值为 0.33, 典型大陆地壳 Sm/Nd 值为 0.20 (汪相, 2023)。

本文采获的 5 件样品 Sm/Nd=0.18~0.20, 平均 0.19, 远远低于球粒陨石 0.33, 与大陆地壳平均值 0.20 相当, 说明流纹质晶屑凝灰岩的源区来自地壳; 在 Nb/Y—Rb/Y 图解中 (图 8b), 5 件样品均落入下地壳分布区, 指示源区来源下地壳; 在 CaO/(MgO+FeO<sup>T</sup>)—Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>/(MgO+FeO<sup>T</sup>) 图解中 (图 9c), 样品均落入泥质岩岩区; 在 Rb/Sr—Rb/Ba 图解中 (图 9d), 指示样品源区由泥质岩石经 5%~10% 部分熔融形成; 样品  $\varepsilon_{\text{Hf}}(t)$  值范围为 -3.99~6.03 (8 个点为负, 2 个为正, 均值为 -0.96), 二阶段

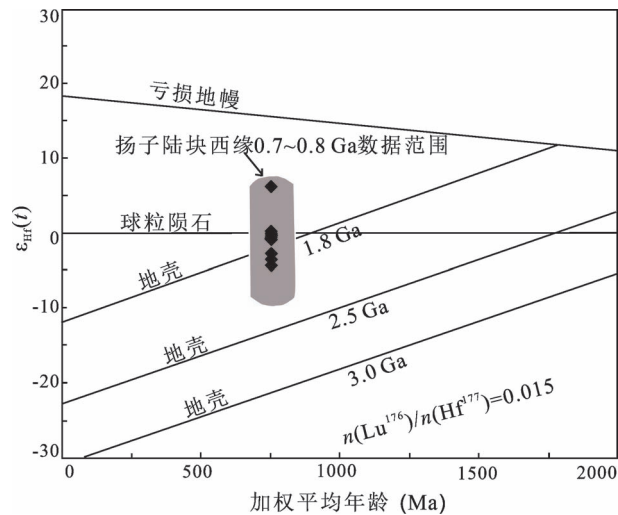


图7 云南禄劝地区新元古界澄江组流纹质晶屑凝灰岩锆石 Hf 同位素  $t(\text{Ma})$ — $\varepsilon_{\text{Hf}}(t)$  图

Fig. 7  $t(\text{Ma})$  vs.  $\varepsilon_{\text{Hf}}(t)$  diagram of Hf isotope of zircons from the rhyolitic crystalline tuff in the Chengjiang Formation in Luquan area, Yunnan

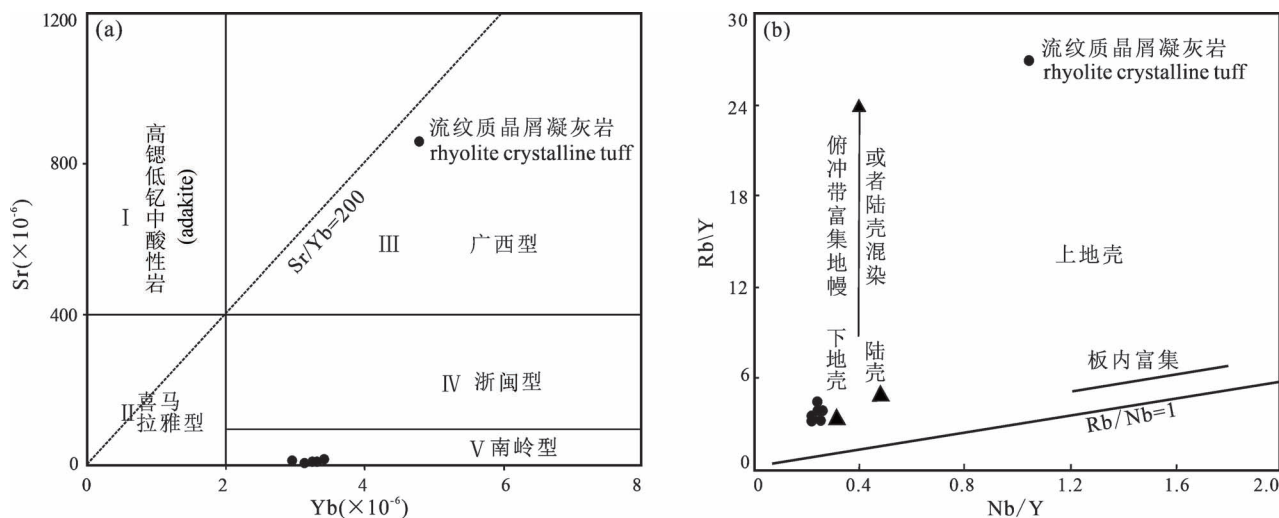


图8 云南禄劝地区新元古界澄江组流纹质晶屑凝灰岩 Yb—Sr(a) (据张旗等, 2006) 及 Nb/Y—Rb/Y(b) (据 Jahn et al., 1999) 图解

Fig. 8 Yb—Sr (a) (after Zhang Qi et al., 2006) and Nb/Y—Rb/Y (b) (after Jahn et al., 1999) diagrams of the rhyolitic crystalline tuff in the Chengjiang Formation in Luquan area, Yunnan

Hf 的模式年龄  $T_{DM2}$  为 1932 ~ 1265 Ma, 平均值为 1704.3 Ma; 综合以上数据及图解, 笔者等认为流纹质晶屑凝灰岩来源于中元古代早期下地壳泥质岩石经 5% ~ 10% 部分熔融, 并有少量地幔物质参与。

## 5.2 对澄江组沉积时限的约束

澄江组主要出露于扬子陆块西缘, 主体为一套灰紫红色的碎屑岩沉积, 是扬子陆块新元古代盆地

重要的地层组成, 其沉积时限对整个华南地层划分对比、构造演化至关重要。近年来, 澄江组的年代学研究取得了不少进展 (表 5), 年龄数据主要在云南澄江 (819 ~ 725 Ma) (崔晓庄等, 2013, 2015)、易门 (~812.1 Ma) (刘军平等, 2019)、元谋 (~781.3 Ma) (刘兵等, 2018)、巧家 (803.1 ~ 785 Ma) (江新胜等, 2012; 陆俊泽等, 2013)、东川 (~801 Ma) (高永

表 5 滇中地区澄江组锆石 U-Pb 年龄数据 (据刘兵等, 2018 修改)

Table 5 Zircon U-Pb ages of the Chengjiang Formation in central Yunnan (revised according to Liu Bing et al., 2018&)

研究地区	采位位置	岩性	测试方法	年龄/Ma	文献资料
云南牟定安益	玄武岩位于澄江组/路古模岩组界面上 2 m	玄武岩	LA-ICP-MS 锆石 U-Pb	781.3 ± 1.9	刘兵等, 2018
云南武定罗茨	南沱组/澄江组界面之下玄武岩底界	玄武岩	LA-ICP-MS 锆石 U-Pb	804 ± 6	崔晓庄等, 2015
云南巧家新店乡	澄江组/黄草岭组界面上 462 m, 灯影组/澄江组界面之下 173.5 m	凝灰岩	LA-ICP-MS 锆石 U-Pb	785 ± 12, 828 ± 8.3	陆俊泽等, 2013
云南谓姑村	底界之上厚度不清, 南沱组/澄江组界面之下 20 m	凝灰岩	LA-ICP-MS 锆石 U-Pb	819 ± 14, 781 ± 11, 725 ± 11	崔晓庄等, 2013
云南澄江地区	底界之上厚度不清, 陡山沱组/澄江组界面之下 1132 m	凝灰岩	LA-ICP-MS 锆石 U-Pb	803.1 ± 8.7	江新胜等, 2012
云南东川中河	澄江组/黄草岭组界面上 189 m, 南沱组/澄江组界面之下 296 m	凝灰岩	LA-ICP-MS 锆石 U-Pb	797.8 ± 8.2	江新胜等, 2012
云南易门六街	澄江组/黑山组界面上 30 m, 顶界以下厚度不清	凝灰岩	LA-ICP-MS 锆石 U-Pb	812.1 ± 5.5	刘军平等, 2019
云南东川地区	澄江组底部, 下部层厚不清	砂岩	LA-ICP-MS 锆石 U-Pb	801 ± 5	高永娟等, 2021
云南禄劝三家村	澄江组顶部, 距盖层灯影组 15 m	流纹质晶屑凝灰岩	LA-ICP-MS 锆石 U-Pb	735.6 ± 5.2	本文

娟等,2021;解楠等,2023;何梅朋,2023)等地区,且多集中在澄江组的下部,高质量的年龄数据较好的限制了澄江组底界年龄(812~781 Ma),数据表明不同地区的澄江组底界跨度较大,可能与所处的大地构造位置及区域构造活动密切相关,具穿时性。不少学者对澄江组沉积环境、物源等也做了不研究,认为澄江组具有以火山喷发堆积开始,河湖相沉积超覆结束的构造-沉积旋回,与扬子西缘同期异相的开建桥组和苏雄组沉积特征相似(江新胜等,2012),其沉积物源主要为扬子地块西缘新元古代的岩浆岩,其次为东川群(高永娟等,2021);因澄江组顶部火山岩或火山灰夹层发育较少,顶界年龄或

沉积上限尚未获可靠年代学数据的约束。

崔晓庄等(2012)对滇中澄江地区的澄江组顶部凝灰岩(南沱组与澄江组界面之下约20 m)的进行年代学研究,其中仅有4颗锆石加权平均年龄为 $725\pm 11$  Ma,并将其作为澄江组顶界的时代,还有待商榷;马国干等(1984)在澄江组之上莲沱组凝灰岩中获得 $748\pm 12$  Ma 锆石 U-Pb 年龄,间接说明澄江组的顶界沉积时代可能在740 Ma左右,但还有待进一步证实。本文在云南禄劝地区澄江组顶部发现2层的火山岩夹层,薄片鉴定及岩石地球化学指示岩性为灰白色流纹质晶屑凝灰岩,对凝灰岩进行 LA-ICP-MS 锆石 U-Pb 定年研究,获得 $735.6\pm 5.2$  Ma

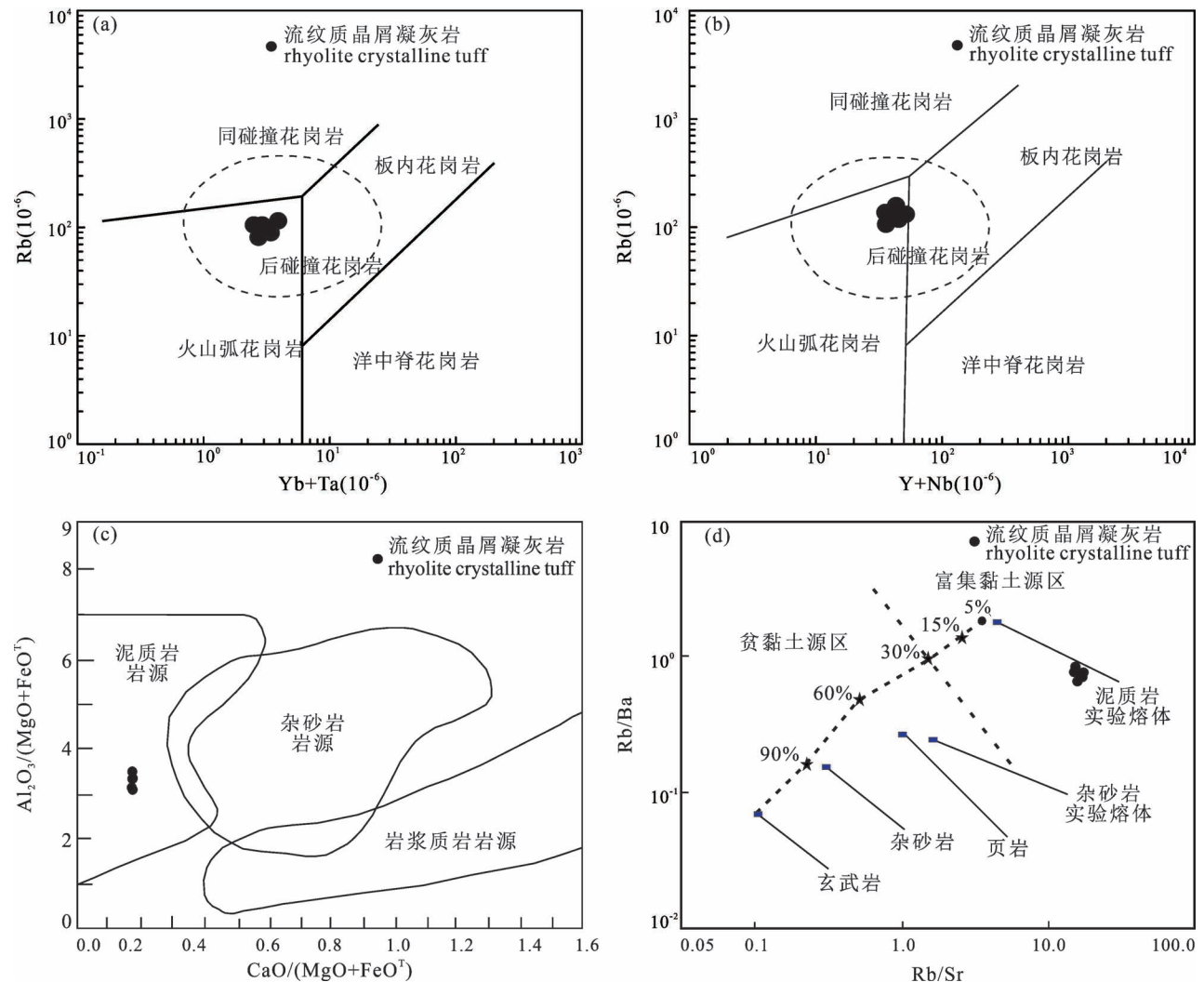


图9 云南禄劝地区澄江组流纹质晶屑凝灰岩构造背景及源区判别图解:(a)  $(Yb+Ta)$ —Rb, (b)  $(Y+Nb)$ —Rb (据 Pearce et al., 1984); (c)  $CaO/(MgO+FeO^T)$ — $Al_2O_3/(MgO+FeO^T)$ , (d) Rb/Sr—Rb/Ba (据 Sylvester, 1998)

Fig. 9 Structural background and source area discrimination diagram of rhyolitic crystalline tuff from the Chengjiang Formation in Luquanarea, Yunnan: (a)  $(Yb+Ta)$ —Rb, (b)  $(Y+Nb)$ —Rb (after Pearce et al., 1984); (c)  $CaO/(MgO+FeO^T)$ — $Al_2O_3/(MgO+FeO^T)$ , (d) Rb/Sr—Rb/Ba (after Sylvester, 1998)

( $n=24, MSWD=0.14$ )

加权平均年龄,首次在云南获得澄江组的顶界年龄为约 735.6 Ma,与马国干等(1984)的认识在误差范围内较为一致,进而限定了澄江组的沉积时限为 812 ~ 735.6 Ma。

### 5.3 与 Rodinia 超级大陆裂解关系

Rodinia 超大陆的聚合和裂解是重要的全球性地质事件,对新元古代的古海洋、大气圈、生命演化等一系列地球系统的变化具有极其重要的影响,该研究对于理解地球早期的构造演化和地质历史具有重要意义(李献华等, 2001; 邓奇等, 2013, 2019; Lan Zhongwu et al., 2014; 高林志等, 2015; 崔晓庄等, 2016)。已有研究表明,扬子陆块西缘存在 850 ~ 720 Ma 新元古代中期火山岩浆活动,这些岩浆活动显示明显的多幕次特征(李献华等, 2001; 李阳, 2022; Liu Junping et al., 2024),被认为是扬子陆块对新元古代地幔柱作用的响应,其中 830 ~ 795 Ma 和 780 ~ 720 Ma 分别对应了 Rodinia 超大陆开始张裂和最终裂解 2 个演化阶段(汪正江等, 2010; 刘军平等, 2020b)。有学者进一步研究指出(Li Zhengxiang et al., 2008; 陈建书等, 2016), 850 ~ 720 Ma 期

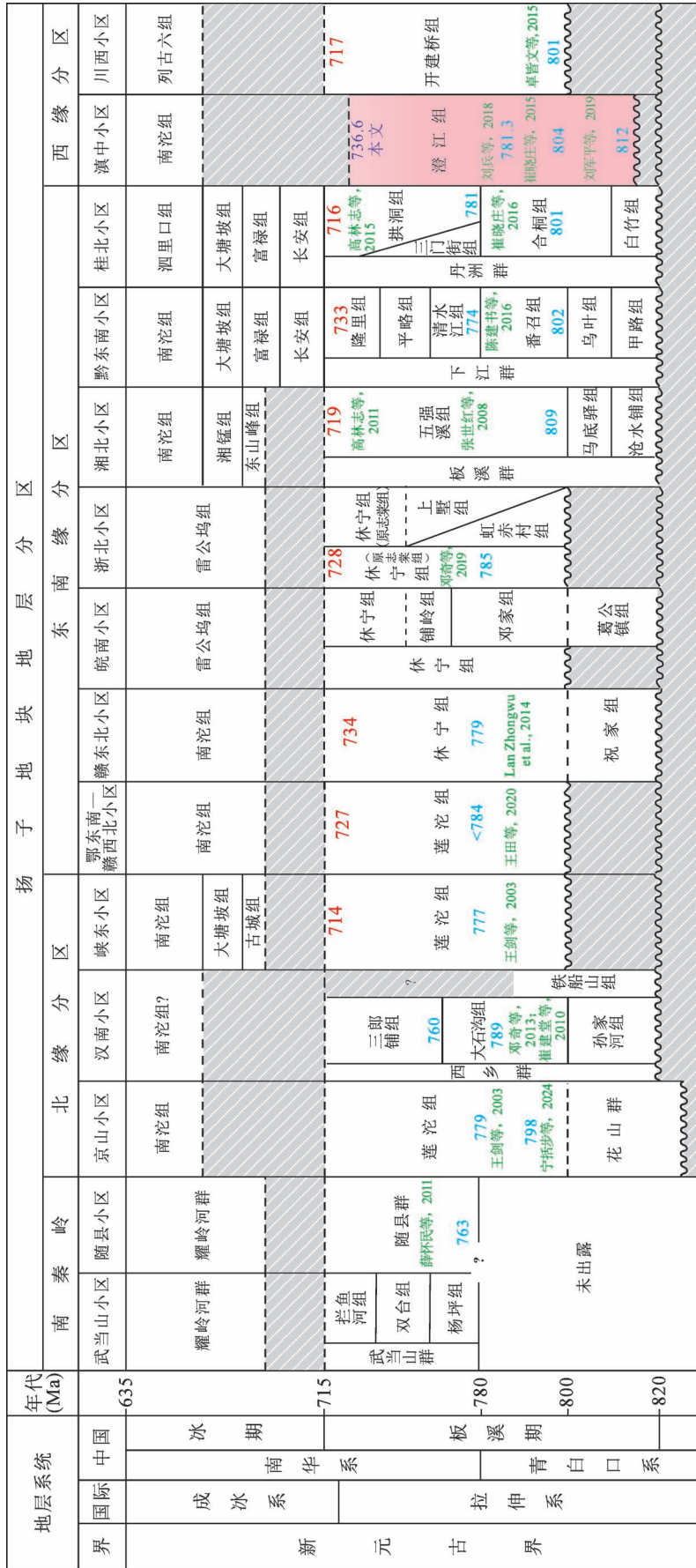


图10 扬子陆块周缘新元古代地层火山岩年龄对比简图 (据邓奇等, 2019; 宁括步等, 2024 修改)  
Fig. 10 Correlation of the age of Neoproterozoic volcanic rocks along the periphery margins of Yangtze block (Revised according to Deng Qi et al., 2019&; Ning Kuabu et al., 2024&)

间主要存在3幕较为典型的裂谷火山岩浆活动,时限为~825 Ma,~780 Ma和~740 Ma,这些岩浆事件均与Rodinia超大陆裂解有关。

笔者等在扬子陆块内部获得的云南禄劝三家村澄江组流纹质晶屑凝灰岩~735.6 Ma的LA-ICP-MS锆石U-Pb年龄,应属于其中的第三幕火山岩浆事件,与扬子东南缘建德地区休宁组火山岩(800~728 Ma)(邓奇等,2013,2019)、丹洲群火山岩(819~716 Ma)(Lan Zhongwu et al., 2014;高林志等,2015;崔晓庄等,2016)、板溪群火山岩(814~719 Ma)(张世红等,2008;高林志等,2011),扬子北缘的莲沱组火山岩(800~714 Ma)(王剑等,2003;王田等,2020;宁括步等,2024)、西乡群火山岩(815~789 Ma)(崔建堂等,2010;邓奇等,2013)及扬子西缘的苏雄组火山岩(810~725 Ma)(崔晓庄等,2015)、云南小以西基性岩群(800~730 Ma)(王天元等,2024)、峨眉山地区基性岩群(814~760 Ma)(李阳,2022)共同组成一套双峰式火山岩浆系列(图10),形成于大陆裂谷环境,是Rodinia超大陆裂解的岩石学及岩浆记录,进一步证实了华南中元古代晚期至新元古代中期从造山运动到陆内裂谷的地球动力学演化模型(李献华等,2008;张翔等,2022),而滇中地区的澄江组代表了华南新元古代裂谷盆地开启的最完整的一套裂谷充填序列,其时限为约812 Ma至约735.6 Ma。

## 6 结论

(1) 云南禄劝三家村澄江组流纹质晶屑凝灰岩获得 $735.6 \pm 5.2$  Ma ( $n = 24$ ,  $MSWD = 0.14$ ) 锆石U-Pb年龄,首次在云南获得澄江组的顶界年龄为~735.6 Ma,进而限定了澄江组的沉积时限为812~735.6 Ma。

(2) 流纹质晶屑凝灰岩明显富集Rb、Th、K等大离子不相容元素(LILE),亏损Ba、Sr、P、Ti、Nb、Ta等高场强元素(HFSE),稀土元素分布曲线呈“燕式”型,与低Sr高Yb的南岭型花岗岩特征较为一致;其形成来源于中元古代早期( $T_{DM2}$ : 1932~1265 Ma,平均值为1704.3 Ma)下地壳泥质岩石经5%~10%部分熔融,并有少量地幔物质参与。

(3) 云南禄劝三家村澄江组流纹质晶屑凝灰岩,区域上与休宁组、板溪群、莲沱组、苏雄组、莲沱组及滇中小以西基性岩体等共同组成一套双峰式火山岩浆系列,形成于大陆裂谷环境,是Rodinia超大陆裂解的岩石学及岩浆记录。

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

① 云南省地质调查院. 2023. 云南省1:5万撒马基幅等4幅区域地质调查撒马基幅地质图.

## 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, 戴传固, 彭成龙, 卢定彪, 王雪华, 王敏, 包立新, 张德明, 骆珊. 2016. 湘黔桂地区新元古代“下江群”地层划分对比研究——重新启用下江系的探讨. 地质论评, 62(5): 1093~1114.
- 崔建堂, 韩芳林, 张拴厚, 王根宝, 王北颖, 王学平, 彭海练, 王金安, 郭岐明, 彭俊英, 崔海曼. 2010. 南秦岭西乡群锆石SHRIMP U-Pb年龄及其构造地质意义. 陕西地质, 28(2): 53~58.
- 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.
- 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, 邓奇, 王剑, 卓皆文, 任光明, 蔡娟娟, 伍皓, 江卓斐. 2016. 桂北地区丹洲群锆石U-Pb年代学及对华南新元古代裂谷作用期次的启示. 大地构造与成矿学, 40(5): 1049~1063.
- 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.
- 邓奇, 王剑, 汪正江, 江新胜, 杜秋定, 伍皓, 杨菲, 崔晓庄. 2013. 扬子北缘西乡群大石沟组和三郎铺组凝灰岩锆石U-Pb年龄及其地质意义. 吉林大学学报(地球科学版), 43(3): 797~819.
- 邓奇, 汪正江, 杨菲, 崔晓庄, 王剑, 任光明, 周效华, 熊小辉, 蔡娟娟. 2019. 浙西北建德地区休宁组沉积时限的厘定: 来自凝灰岩锆石U-Pb年代学的制约. 地质学报, 93(2): 414~427.
- 高林志, 丁孝忠, 张传恒, 王自强, 陈俊, 刘耀荣. 2011. 湘东北岳阳地区冷家溪群及板溪群凝灰岩SHRIMP锆石U-Pb年龄—对武陵运动的制约. 地质通报, 30(7): 1001~1008.
- 高林志, 尹崇玉, 丁孝忠, 王泽九, 张恒. 2015. 华南地区新元古代年代地层标定及地层对比. 地球学报, 36(5): 533~545.
- 何梅朋. 2023. 武隆地区五峰组—龙马溪组优质浅层常压页岩储层发育特征及含气性影响因素. 非常规油气, 10(3): 64~73.
- 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(3): 55~63.
- 李献华, 周汉文, 李正祥, 刘颖, Kinny P. 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.
- 刘兵, 李静, 邓仁宏, 熊波, 关奇, 李小军, 刘军平, 陈光艳, 胡绍斌, 张虎, 李维科, 曾文涛. 2018. 扬子陆块西缘安益南华纪火山岩的厘定及其地质意义. 地质通报, 37(11): 1980~1990.
- 刘军平, 夏彩香, 孙柏东, 胡绍斌, 王晓峰, 王伟, 关学卿, 宋冬虎, 吕勃焯. 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, 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, 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, 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, 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.
- 马国干, 李华芹, 张自超. 1984. 华南地区震旦纪时限范围的研究. 宜昌地质矿产研究所所刊, (8): 1~29.
- 宁括步, 邓奇, 崔晓庄, 汪正江, 任光明, 杨青雄. 2024. 扬子陆块北缘大洪山地区莲沱组底部凝灰岩锆石 U-Pb 定年及其地层学意义. 地质通报, 43(2~3): 363~375.
- 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, 段太忠, 谢渊, 卓皆文, 杨平. 2010. 扬子克拉通内新元古代中期酸性火山岩的年代学及其地质意义. 中国科学: 地球科学, 40(11): 1543~1551.
- 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.
- 王剑, 李献华, 刘敦一, 宋彪, 李忠雄, 高永华. 2003. 沧水铺火山岩锆石 SHRIMP U-Pb 年龄及“南华系”底界新证据. 科学通报, 48(16): 1726~1731.
- 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.
- 王天元, 闫娜, 李敏, 马成龙, 吕勃焯, 刘军平. 2024. 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. 地质论评, 70(5): 2024050032.
- 王田, 汪正江, 肖渊甫, 杨菲, 杜秋定. 2020. 扬子陆块新元古代首次冰期前的区域沉降及其沉积响应研究. 地质论评, 66(4): 1060~1080.
- 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(4): 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. 中国地质大学学报(地球科学), 34(1): 117~126.
- 徐丽娟, 李萍, 刘铮, 王国昌. 2021. 扬子地块西缘峨眉山新元古代 A<sub>2</sub> 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.
- 薛怀民, 马芳, 宋永勤. 2011. 扬子克拉通北缘随(州)—枣(阳)地区新元古代变质岩浆岩的地球化学和 SHRIMP 锆石 U-Pb 年代学研究. 岩石学报, 27(4): 1116~1130.
- 郇圣武, 白宪洲, 伍文湘, 朱兵, 詹琼莹, 文龙, 杨辉, 王玉婷. 2017. 扬子地块西缘新元古代涪洁 A 型花岗岩成因与变泥质岩熔融. 中国地质, 44(1): 136~150.
- 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.
- 张旗, 王焰, 李承东, 王元龙, 金惟俊, 贾秀勤. 2006. 花岗岩的 Sr—Yb 分类及其地质意义. 岩石学报, 22(9): 2249~2269.
- 张世红, 蒋干清, 董进, 韩以贵, 吴怀春. 2008. 华南板溪群五强溪组 SHRIMP 锆石 U-Pb 年代学新结果及其构造地层学意义. 中国科学, 38(12): 1496~1503.
- 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——以福建柘溪为例. 华东地质, 43(4): 474~489.
- 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.
- 卓皆文, 江新胜, 王剑, 崔晓庄, 伍皓, 熊国庆, 陆俊泽, 江卓斐. 2015. 川西新元古代苏雄组层型剖面底部豆状熔结凝灰岩 LA-ICP-MS 锆石 U-Pb 年龄及其地质意义. 沉积与特提斯地质, 35(4): 85~91.
- 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 Chuangu, Peng Chenglong, Lu Dingbiao, Wang Xuehua, Wang Min, Bao Lixin, Zhang Deming, Luo Shan. 2016. Study on stratigraphical division and correlation of the Neoproterozoic "Xiajiang Group" in Hunan, Guizhou and Guangxi Province: Discuss on the reboot of Xiajiang System. Geological Review, 62(5): 1093~1114.
- Cheng Jiaxiao, Luo Jinhai, Wu Yudong, Han Kui, Wang Shidi. 2014. Geochronology, Geochemistry and Tectonic Significance of the Xiantianba Granite in Northeastern Yunnan. Acta Geologica Sinica, 88(3): 337~346.
- 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.
- 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, Dengi, Wang Jian, /nuOJiewen, Ren Guangming, Cai Juanjuan, Wu Hao, Jiang Zhuofei. 2016. Zircon

- U-Pb Geochronological Results of theDanzhou Group in Northern Guangxi and Their Implications forthe Neoproterozoic Rifting Stages in South China. *Geotectonicaet Metallogenia*, 40(5) : 1049~1063.
- 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.
- Deng Qi, Wang Jian, Wang Zhengjiang, Jiang Xinsheng, DuQiuding, Wu Hao, Yang Fei, Cui Xiangzhuang. 2013&. Zircon U-Pb ages for tuffs from the Dashigou and Sanlangpu Formations of the Xixiang Group in the Northern margin of Yangtze Block and their geological significance. *Journal of JilinUniversity (Earth Science Edition)*, 43(3) : 797~819.
- Deng Qi, Wang Zhengjiang, Yang Fei, Cui Xiaozhuang, Wang Jian, Ren Guangming, Zhou Xiaohua, Xiong Xiaohui, Cai Juanjuan. 2019&. Depositional age of the Xiuning Formation in the Jiande Area, northwestern Zhejiang Province; constraints from U- Pb zircon tuff geochronology. *Acta Geologica Sinica*, 93(2) : 414~427.
- Gao Linzhi, Ding Xiaozhong, Zhang Chuanheng, Wang Ziqiang, Chen Jun, Liu Yaorong. 2011&. Zircon SHRIMP U-Pb dating of tuff bed of the Lengjiaxi and Banxi Groups—Constraints on the Wuling Movement. *Geological Bulletin of China, Geological Bulletin of China*, 29(7) : 1001~1008.
- Gao Linzhi, Yin Chongyu, Ding Xiaozhong, Wang Zejiu, Zhang Heng. 2015&. Rating Data of the Neoproterozoic Chronostratigraphy and Stratigraphic Correlation in South China. *Acta Geoscientica Sinica*, 36(5) : 533~545.
- He Meipeng. 2023&. Development characteristics and gas-bearing factors of high-quality shallow ordinary-pressure shale reservoirs in Wufeng—Longmaxi Formation in Wulong Area. *Unconventional Oil & Gas*, 10(3) : 64~73.
- Hoskin P W O , 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.
- Jahn B M, Wu F Y, Lo C H, Tsai C H . 1999. Crust—mantle interaction induced by deep subduction of the continental crust; Geochemical and Sr—Nd isotopic evidence from post-collisional mafic—ultramafic intrusions of the northern Dabie complex, central China. *Chemical Geology*, 157(1~2) : 119~146.
- 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. *Science in China Earth Sciences*, 42(10) : 1496~1507.
- Lan Zhongwu, Li Xianhua, Zhu Maoyan, Chen Zhongqiang, Zhang Qirui, Li Qiuli, Lu Dingbiao, Liu Yu, Tang Guoqiang. 2014. A rapid and synchronous initiation of the wide spread cryogenian glaciations. *Precambrian Research*, 255: 401~411.
- 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 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 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, Bogdanova S V, Collins A S, Davidson A, De Waele B, Ernst R E, Fitzsimons I C W, Fuck R A, Gladkochub D P, Jacobs J, Karlstromk K E, Lu S, Natapov L M, Pease V, Pisarevsky S A, Thrane K, Vernikovsky V. 2008. Assembly, configuration, and break-up history of rodinia; A synthesis. *Precambrian Research*, 160(1~2) : 179~210.
- Liu Bing, Li Jing, Deng Renhong, Xiong Bo, Guan Qi, Li Xiaojun, Liu Junping, Chen Guangyan, Hu Shaobin, Zhang Hu, Li Weike, Zeng Wentao. 2018&. Determination of the Nanhua System volcanic rocks in Anyi on the western margin of the Yangtze Block. *Geological Bulletin of China*, 37(11) : 1980~1990.
- Liu Junping, Xia Caixiang, Sun Baidong, Hu Shaobin, Wang Xiaofeng, Wang Wei, Guan Xueqing, Song Donghu, Lv Boye. 2019&. Tuffs from the Neoproterozoic 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, Sun Baidong, Cui Xiaozhuang, Xiong Bo, Song Donghu, Bai Chungdong, 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, 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(2) : 350~364.
- 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, Tian Sumei, Zhu Xunzao, Ma Jinhua, Li Jing, Hu Shaobin, 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, 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, Yang Aiping, Wang Xiaohu, Luo Guangming, Tian Sumei, Zhu Xunzao, Yin Wei, Zhang Kun. 2023b&. Zircon geochronology, 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, TangFeng, 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 Junping, Gao Zhiyu, Zhou Jiayi, 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.
- Ludwig K R. 2003. *Isoplot 3.00: A Geochronological Toolkit for Microsoft Excel*. Berkeley: Berkeley Geochronology Center, California 39.
- Ma Guogan, Li Huaqin, Zhang Zichao. 1984. An investigation of the age limits of the sinian in South China. *Journal of the Yichang Institute of Geology and Mineral Resources*, (8): 1~29.
- Middlemost E A K. 1994. Naming materials in the magma/igneous rock system. *Earth-science Reviews*, 37: 215~224.
- Ning Kuobu, Deng Qi, Cui Xiaozhuang, Wang Zhengjiang, Ren Guangming, Yang Qingxiang. 2024. Zircon U-Pb age and stratigraphic significance of the tuff from the lowermost Liantuo Formation in the Dahongshan area of the northern Yangtze Block. *Geological Bulletin of China*, 43(2~3): 363~375.
- Pearce J A, Harris N B, Tindle A G. 1984. Trace element discrimination diagrams for the tectonic interpretation of granitic rocks. *Journal of Petrology*, 25(4): 956~983.
- 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*. London: Special Publications of the Geological Society, 42: 313~345.
- Sylvester P J. 1998. Post-collisional strongly peraluminous granites. *Lithos*, 45(1): 29~44.
- 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 Jian, Li Xianhua, Liu Dunyi, Song Biao, Li Zhongxiang, GaoYonghua. 2003b. SHRIMP zircon U-Pb ages for the Cangshuipu volcanic rocks and the new evidence for the bottomboundary of the Nanhuan System. *Chinese Science Bulletin*, 48(16): 1726~1731.
- 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. *Chinese Science Bulletin*, 57(34): 3283~3294.
- Wang Tian, Wang Zhengjiang, Xiao Yuanfu, Yang Fei, Du Qiuding. 2020. Study on the regional subsidence and its sedimentary response before the first Neoproterozoic glaciation in Yangtze Block. *Geological Review*, 66(4): 1060~1080.
- Wang Tianyuan, Yan Na, Li Min, Ma Chenglong, Lv Boye, Liu Junping. 2024. Determination of Neoproterozoic basic magmatic events in Dongchuan area, western margin of the Yangtze block and its indication to the disintegration of Rodinia supercontinent. *Geological Review*, 70(5): 2024050032.
- 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, Duan Taizhong, Xie Yuan, Zhuo Jiewen, Yang Ping. 2010. Geochronology of middle Neoproterozoic volcanic deposits in Yangtze Craton interior of South China and its implications to tectonic settings. *Science China Earth Sciences*, 40(11): 1543~1551.
- 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(4): 386~401.
- Wood D A, Joron J L, Treuil M, Norry M, Tarney J. 1979. Elemental and Sr isotope variations in basic lavas from Iceland and the surrounding sea floor. *Contributions to Mineralogy and Petrology*, 70(3): 319~339.
- 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 tectonic implications of the Neoproterozoic Eshan A<sub>2</sub>-type granodiorite western Yangtze Block. *Acta Petrologica 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.
- Xue HuaiMin, Ma Fang, Song YongQin. 2011. Geochemistry and SHRIMP zircon U-Pb data of Neoproterozoic meta-magmatic rocks in the Suizhou—Zaoyang area, northern margin of the Yangtze Craton, Central China. *Acta Petrologica Sinica*, 27(4): 1116~1130.
- 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 from the 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(4): 428~447.
- Zhang Qi, Wang Yan, Li Chengdong, Wang Yuanlong, Jin Weijun, Jia

- Xiuqin. 2006&. Granite classification on the basis of Sr and Yb contents and its implications. *Acta Petrologica Sinica*, 22(9): 2249~2269.
- Zhang Shihong, Jiang Ganqing, Dong Jin, Han Yigui, Wuhuaichun. 2008&. New SHRIMP U-Pb age from the Wuqiangxi Formation of Banxi Group; implications for rifting and stratigraphic erosion associated with the early Cryogenian (Sturtian) glaciation in South China. *Science in China Series D—Earth Sciences*, 51(11): 1537~1544.
- 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(4): 474~489.
- 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 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, Wu Hao, Xiong Guoqing, Lu Junze, Jiang Zhuofei. 2015. LA-ICP-MS zircon U-Pb ages for pisolitic welded tuff from the bottom of the Neoproterozoic Suxiong Formation in western Sichuan and their geological significance. *Sedimentary Geology and Tethyan Geology*, 35(4): 85~91.
- 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. *Science China Earth Sciences*, 56, 1664~1676.

## Depositional age of the Neoproterozoic Chengjiang Formation in the western margin of the Yangtze Block

### —Constraints from tuff Geochronology and Geochemistry

LÜ Boye<sup>1)</sup>, WAN Sheng<sup>2)</sup>, LIU Junping<sup>3,4)</sup>, HE Shijun<sup>5)</sup>, MA Chenglong<sup>6)</sup>

1) *Yunnan Planning and Design Institute of Land Resources, Kunming*, 650216;

2) *Institute of Basic Geological Survey, Jiangxi Geological Survey and Exploration Institute, Nanchang*, 330030;

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

4) *Yunnan Institute of Geological Survey, Kunming*, 650015;

5) *The Second Geological Institute of China Metallurgical Geology Bureau, Fuzhou*, 350108;

6) *Liaohu Oilfield Company, Panjin, Liaoning*, 124010

**Objectives:** The widely exposed Neoproterozoic Chengjiang Formation on the western margin of the Yangtze Block represents a sedimentary rock series closely related to the evolution of the Rodinia supercontinent. Its formation time limit and tectonic background have significant implications for the Neoproterozoic basin evolution in South China and the reconstruction of ancient continents.

**Results:** Through field investigations, two layers of volcanic interbeds were discovered at the top of the Chengjiang Formation in the Luquan area of Yunnan Province. The lithology is gray-white rhyolitic crystal tuff. LA-ICP-MS zircon U-Pb dating of the tuff yielded a weighted average age of  $735.6 \pm 5.2$  Ma ( $n=24$ ,  $MSWD=0.14$ ), it indicates that the eruption age of tuff is in the early Nanhuan Period. Thus constraining the depositional time limit of the Chengjiang Formation to  $812 \sim 735.6$  Ma. Rock geochemical and Lu—Hf isotopic studies reveal that the crystal tuff is significantly enriched in large ion lithophile elements (LILE) such as Rb, Th, and K, and depleted in high field strength elements (HFSE) such as Ba, Sr, P, Ti, Nb, and Ta. The rare earth element distribution curve exhibits a "swallowtail" pattern, consistent with the characteristics of the low-Sr, high-Yb Nanling-type granite. Its formation originated from 5%~10% partial melting of Mesoproterozoic early ( $T_{DM2}$ : 1932~1265 Ma, with an average value of 1704.3 Ma) lower crustal argillaceous rocks, with minor mantle material involvement.

**Conclusions:** It formed in an extensional tectonic setting, related to the breakup of the Rodinia supercontinent in the South China block, and represents significant petrological and magmatic records of the Nanhua rift.

**Keywords:** Chengjiang Formation; tuff; Nanling type; zircon U-Pb age; Neoproterozoic; western margin of the Yangtze block

**Acknowledgements:** This paper is supported by Yunnan Provincial Department of Science and Technology Project (Nos. 202305AD160031, 202401AT070012), and the Fund project of Department of Natural Resources of Yunnan Province (Nos. D201905, D202207).

**First author:** LÜ Boye, male, born in 1986. Engineer, doctoral graduate students. Engaged in research on national spatial planning, regional geological and farmland protection. Email: 121499669@qq.com.

**Corresponding author:** LIU Junping, male, born in 1983, senior engineer, doctoral graduate students, is engaged in regional geological and structural geological investigation and research. Email: 271090834@qq.com.

**Manuscript** received on: 2024-07-08; Accepted on: 2024-11-12; Network published on: 2025-01-20

**Doi:** 10.16509/j.georeview.2025.01.042

**Edited by:** LI Ming, ZHANG Yuxu

