

云南中甸刺来斑岩体地球化学特征及成岩构造环境

段雯洁^{1,2}, 冷成彪^{1,2*}, 莫雷^{1,2}, 李凯旋^{1,2}, 赵严^{1,2}

1. 东华理工大学铀资源探采与核遥感全国重点实验室, 江西 南昌 330013;

2. 东华理工大学地球科学学院, 江西 南昌 330013



摘要:滇西北中甸地区位于三江特提斯成矿域, 该区新发现的刺来复式斑岩体具有重要成矿意义。刺来岩体石英闪长玢岩具有高硅 [$w(\text{SiO}_2)=64.94\% \sim 67.31\%$]、富碱 [$w(\text{K}_2\text{O}+\text{Na}_2\text{O})=7.27\% \sim 8.84\%$] 特征, 属于高钾钙碱性系列岩石。地球化学组分揭示其富集轻稀土 [$(\text{La}/\text{Yb})_N=33.11 \sim 39.41$] 和大离子亲石元素 (Rb、Ba、Th、U), 显著亏损高场强元素 (P、Ti、Zr), 呈现高 Sr ($692 \times 10^{-6} \sim 1\,180 \times 10^{-6}$)、低 Y ($11.7 \times 10^{-6} \sim 13.1 \times 10^{-6}$)、高 Sr/Y 比值 (56.7~100) 和 La/Yb 比值 (48.7~58.0), 符合埃达克 (质) 岩的地球化学特征。刺来岩体整体 Th/U 比值偏高 (0.56~1.24), MgO (1.11%~2.69%)、Cr ($12.2 \times 10^{-6} \sim 18.6 \times 10^{-6}$) 和 Ni ($4.3 \times 10^{-6} \sim 5.8 \times 10^{-6}$) 含量较低, Th/La 比值 (0.15~0.20) 和 Nb/Ta 比值 (13.6~15.2) 介于地幔与地壳端元间, 揭示其岩浆源区存在俯冲洋壳熔体与地幔熔体的混合作用。MgO-Fe₂O₃-Al₂O₃ 图解及构造判别图解显示, 该岩体形成于岛弧环境; 锆石 U-Pb 定年显示其结晶年龄为 (217.0±1.8)~(216.9±1.4) Ma, 属晚三叠世岩浆活动的产物。刺来岩体与中甸斑岩成矿带内春都、雪鸡坪等大型斑岩矿床同属晚三叠世甘孜—理塘洋壳西向俯冲背景下的产物。

关键词: 斑岩铜矿; 地球化学; 埃达克 (质) 岩; 锆石 U-Pb 年龄; 刺来岩体; 滇西北

中图分类号: P618.41 文献标志码: A 文章编号: 1005-2518(2025)04-0735-18 DOI: 10.11872/j.issn.1005-2518.2025.04.105

引用格式: 段雯洁, 冷成彪, 莫雷, 等. 云南中甸刺来斑岩体地球化学特征及成岩构造环境 [J]. 黄金科学技术, 2025, 33(4): 735-752. DUAN Wenjie, LENG Chengbiao, MO Lei, et al. Geochemical Characteristics and Diagenetic Tectonic Environment of the Cilai Porphyry in the Zhongdian Area, Yunnan Province [J]. Gold Science and Technology, 2025, 33(4): 735-752.

义敦弧作为三江特提斯造山带中最大的一个火山弧 (Hou et al, 2007), 其北部 (昌台弧) 发育 Cu-Ag-Sn 多金属成矿体系, 但暂未发现大量大型—超大型矿床; 南部 (中甸弧) 发育斑岩—矽卡岩型铜多金属成矿体系 (侯增谦等, 2001; 李文昌等, 2011; 邓军等, 2011, 2016), 广泛分布印支期普朗、雪鸡坪和春都等大型—超大型斑岩铜多金属矿床, 以及燕山期红山、铜厂沟和热林等中—大型斑岩—矽卡岩型和岩浆热液型 Cu-Mo-W 矿床, 是三江特提斯造山带内最重要的铜多金属矿集区 (Hou et al, 2009; 邓军等, 2011; 李文昌等, 2011; Li et al, 2017; Leng et al, 2018a, 2018b; 李凯旋等, 2019; Chen et al,

2021; 刘林林等, 2023)。

中甸弧因具有较好的成矿地质条件和铜资源勘探前景, 长期以来受到国内外学者的广泛关注。前人对该区的成矿岩体、构造、控矿因素、成矿模式、蚀变分带模式和岩体年龄等进行了深入研究 (侯增谦等, 2001; 李文昌等, 2013; 冷成彪等, 2015; 代友旭等, 2017)。根据成矿空间, 以红山—属都蛇绿岩带为界可将中甸弧划分为东、西 2 个斑岩成矿带 (冷成彪等, 2008; 邹国富等, 2011; 吴静等, 2011; 李文昌等, 2013; 周晓丹等, 2018; 莫雷等, 2024a)。东斑岩成矿带呈 NW 向分布于懒中—普朗—热林一带, 区域内发育多期次的侵入岩体, 产出有以普

收稿日期: 2025-03-06; 修订日期: 2025-05-12

基金项目: 第二次青藏高原综合科学考察研究方向三之专题一“青藏高原东南缘构造—沉积—岩浆作用与 Cu-Pb-Zn 成矿” (编号: 2021QZ-KK0301) 和自然科学基金项目“斑岩型矿床” (编号: 42022021) 联合资助

作者简介: 段雯洁 (2001—), 女, 青海海东人, 硕士研究生, 从事地质资源与地质工程研究工作。E-mail: 3285697637@qq.com

*通信作者: 冷成彪 (1982—), 男, 山东临沂人, 教授, 从事矿床地球化学方面的科研与教学工作。E-mail: lcb8207@163.com

© Editorial Department of Gold Science and Technology (CC BY-NC-ND)

朗、红山等为代表的大型—超大型斑岩—矽卡岩型 Cu-Au-Pb-Zn 多金属矿床,以及休瓦促、热林和卓玛等为代表的热液脉型 Cu-Mo-W 矿床和 Cu-Pb-Zn 矿床(侯增谦等,2001;曾普胜等,2004;冷成彪,2009;冷成彪等,2009,2017;Wang et al,2011;Leng et al,2018a;董涛等,2020)。近年来,该带还发现了具有成矿潜力的地苏嘎铜矿点(刘学龙等,2013;Chen et al,2021;莫雷等,2024a)。西斑岩成矿带分布于春都—雪鸡坪—烂泥塘一带,相较于东斑岩成矿带侵入岩体和矿床数量相对减少,主要发育雪鸡坪、春都和烂泥塘为代表的中—大型斑岩 Cu-(Au) 矿床(林清茶等,2006;曹殿华等,2009;Leng et al,2012;代友旭等,2017;刘学龙等,2018),近年来,该带还发现了具有成矿潜力的普上(董涛等,2021)和刺来(王帅帅等,2018)等铜(化)点。

刺来复式斑岩体位于中甸弧西斑岩成矿带,由花岗斑岩和石英闪长玢岩组成,与春都大型斑岩铜矿床毗邻。已有研究仅对岩体内的花岗斑岩开展了少量地球化学和锆石 U-Pb 定年研究(王帅帅等,2019),限制了对该岩体成因的认识。为此,本文以刺来岩体石英闪长玢岩作为研究对象,通过系统的全岩地球化学和锆石 U-Pb 定年研究,结合前人资料,进一步限定刺来复式岩体的岩石成因,探讨其构造环境,以期对西斑岩成矿带找矿勘查提供参考。

1 区域地质背景

义敦弧位于三江特提斯复合造山带的中段,大地构造位置处于拉萨地体、松潘—甘孜地块与扬子地块的交界处(侯增谦等,2004),其东西两侧分别为甘孜—理塘缝合带和金沙江缝合带[图 1(a)](李文昌,2007;Leng et al,2014;Tian et al,2019)。中甸弧位于义敦弧的南端,与义敦弧具有相似的构造演化历史,是中—晚三叠世甘孜—理塘洋壳俯冲作用的产物,该区在经历了印支期(235~210 Ma)的洋壳俯冲、燕山晚期(88~80 Ma)的陆—陆碰撞和喜山早期(53~28 Ma)的陆内汇聚等多期次构造—岩浆活动后,形成了现在的大地构造格架[图 1(b)](任涛等,2011;代友旭等,2017;莫雷等,2024a)。

中甸弧主要出露地层为上三叠统曲嘎寺组(T_3q)、图姆沟组(T_3t)和喇嘛垭组(T_3lm)[图 1(c)]

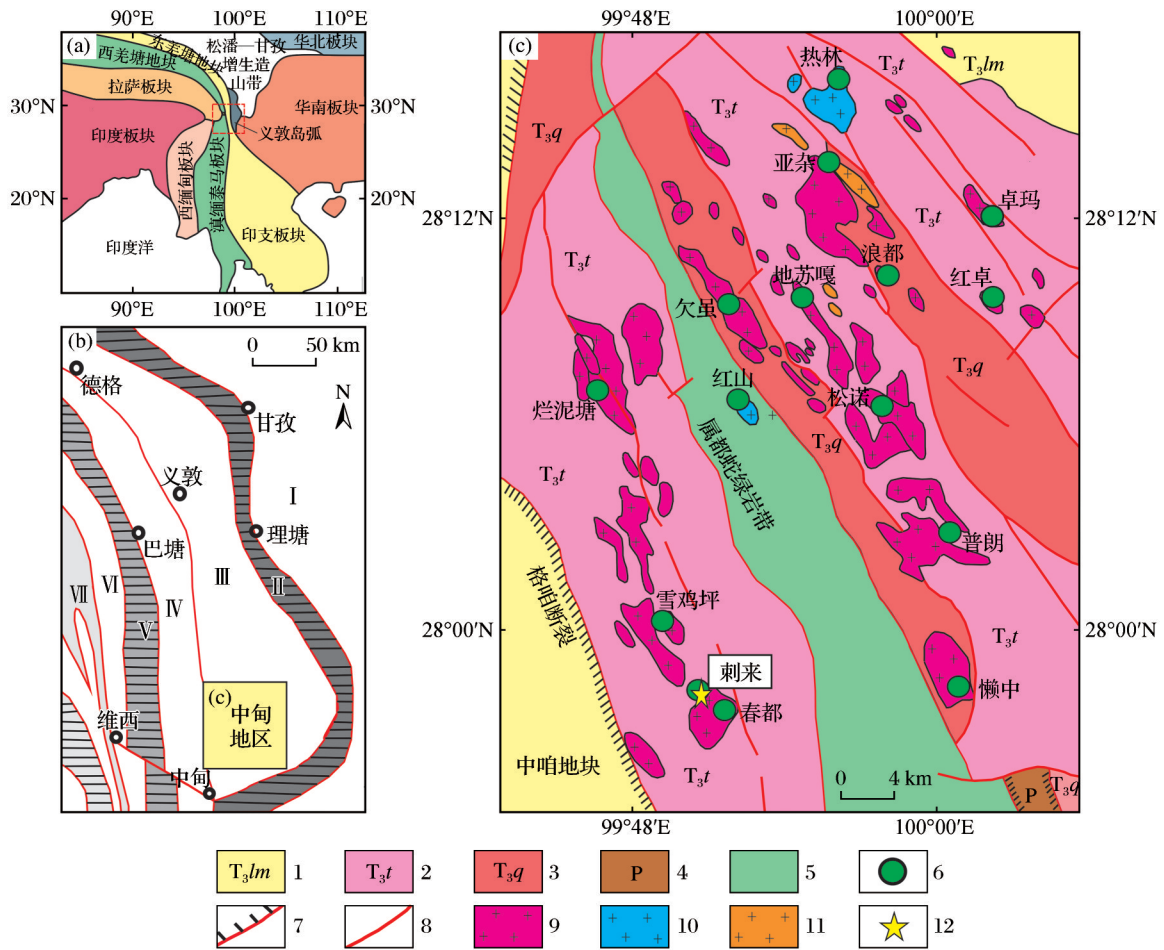
(李文昌等,2011;李华伟等,2020),缺少三叠纪之后的地层。曲嘎寺组岩性组合以区域变质板岩—变质砂岩系为主,其间夹基性玄武岩和火山碎屑岩等火山—沉积建造;图姆沟组则发育板岩—变质砂岩—中性安山岩—中酸性英安岩组合,构成典型的岛弧环境火山—沉积序列。喇嘛垭组岩性以暗色板岩和砂岩为主(侯增谦等,2004;任涛等,2011;冷成彪等,2015)。中甸弧晚三叠世以广泛分布火山碎屑岩系为显著特征(侯增谦等,2001;李建康等,2007;Leng et al,2012;秦朝建等,2021)。区域内以 NNW 向紧密线型褶皱构造及同向断裂为主。该构造系统不仅控制着印支期中酸性岩浆活动的空间分布,还制约着同源火山岩的时空分布。岩相学研究表明,中甸弧印支期侵入岩主要表现为中—酸性岩性组合特征,主要包含石英闪长玢岩、花岗闪长斑岩和二长花岗斑岩等岩石类型。其中,印支晚期岩浆活动尤为强烈,形成大规模浅成—超浅成侵入岩体群且分布广泛。

刺来岩体位于中甸弧西斑岩成矿带南部,与雪鸡坪和春都 2 个大型斑岩矿床相邻,是由花岗斑岩和石英闪长玢岩组成的复式岩体,岩体出露面积约为 0.60 km²(王帅帅等,2018)。区内出露地层为上三叠统图姆沟组,主要岩性为砂板岩和泥灰岩。刺来岩体侵位于图姆沟组二段(T_3t^2)的砂板岩中,并受区域构造控制,呈 NNW 向展布。刺来岩体蚀变较强,普遍发育黄铁矿化,围岩蚀变主要为钾化、硅化、黑云母化和绢云母化等(图 2)。

刺来岩体石英闪长玢岩呈灰白—灰绿色,具斑状结构和块状构造,斑晶占比为 35%~40%,主要由斜长石(约 45%)、黑云母(约 30%)和石英(10%~20%)组成,含少量正长石(1%~5%);基质具有细粒—微粒结构,由斜长石、石英和黑云母组成。金属矿物主要为黄铁矿和黄铜矿,含少量的斑铜矿、磁铁矿和方铅矿,镜下可观察到金属矿物沿黑云母解理分布。

2 样品及分析方法

样品均采自刺来的钻孔岩心,本次共完成 7 件样品的全岩主微量元素分析和 2 件样品的锆石 LA-ICP-MS U-Pb 年龄分析。



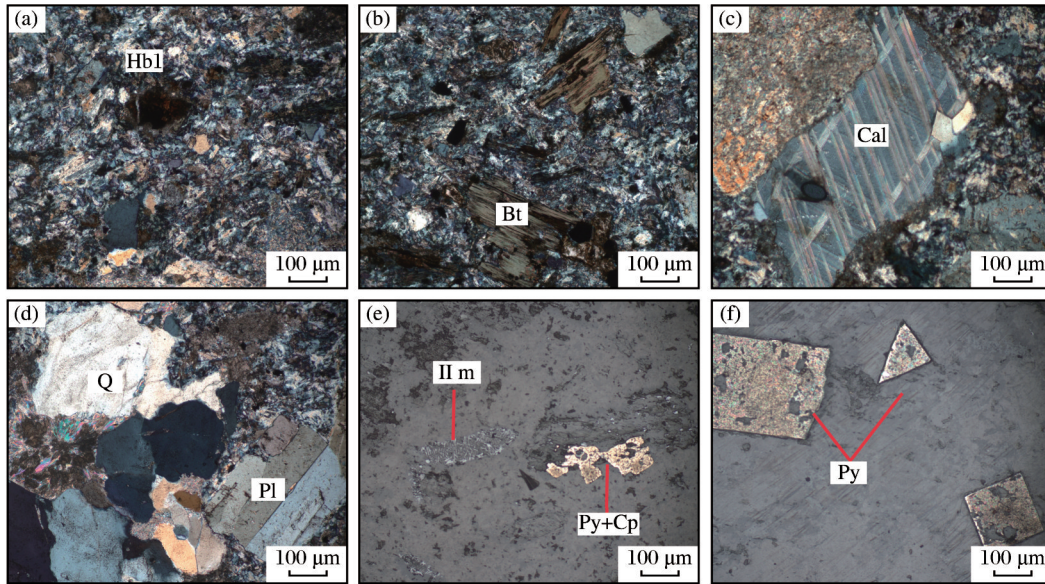
I-扬子陆块; II-甘孜—理塘缝合带; III-义敦岛弧带; IV-中甸微陆块; V-金沙江缝合带; VI-江达—维西火山弧; VII-羌塘—昌都陆块; 1. 喇嘛垭组粉砂岩、页岩和砂岩; 2. 图姆沟组安山岩、英安岩夹碎屑岩; 3. 曲嘎寺组火山岩、火山碎屑岩和碎屑岩; 4. 玄武岩、火山碎屑岩和灰岩; 5. 蛇绿岩带; 6. 矿床(点); 7. 构造单元边界线; 8. 断层; 9. 印支期侵入体; 10. 燕山期侵入体; 11. 喜山期侵入体; 12. 采样点

图1 义敦弧构造位置简图及中甸地质简图(图a修改自曾普胜等, 2004; 李文昌, 2007; 图b, c修改自莫雷等, 2024a)
Fig. 1 Simplified tectonic framework of the Yidun Arc and the geological map of the Zhongdian (Fig. a modified after Zeng et al, 2004; Li, 2007; Fig. b, c modified after Mo et al, 2024a)

主量、微量及稀土元素分析工作在广州澳实分析检测有限公司完成。试验流程如下:取2份等量样品,经105℃烘干预处理后,一份样品与四硼酸锂(Li₂B₄O₇)—偏硼酸锂(LiBO₂)混合助熔剂置于铂金坩埚中,通过高精度熔样机在1050℃熔融成均质玻璃熔片,冷却后直接进行XRF测试;另一份样品经相同干燥流程后,置于1000℃高温炉中灼烧至恒重,通过质量差计算烧失量(LOI)。微量元素分析采用酸溶—电感耦合等离子体原子发射光谱法(ICP-AES)。具体步骤如下:将样品依次用高氯酸(HClO₄)、硝酸(HNO₃)、盐酸(HCl)和氢氟酸(HF)进行梯度消解,经稀盐酸稀释定容后上机检

测。稀土元素分析采用ME-MS81方法,元素含量使用电感耦合等离子体质谱仪(ICP-MS)测定。技术要点包括:将样品与硼酸锂(LiBO₂/Li₂B₄O₇)混合助熔剂在1025℃熔融,冷却后采用硝酸—盐酸—氢氟酸体系分步溶解,定容后导入ICP-MS测定。为了检查分析的准确性,对一些样品(包括2个重复的样品)进行复核。结果表明,样品中微量元素的分析结果与复核结果及插入的标准样品较吻合,所测微量元素的分析精密度控制相对偏差(RD)小于10%,准确度控制相对误差(RE)小于10%。

LA-ICP-MS 锆石 U-Pb 测年工作在广州澳实分析检测有限公司完成。测年工作在澳大利亚塔斯马尼亚大学(University of Tasmania, Australia)



(a)石英闪长玢岩暗色矿物角闪石;(b)黑云母;(c)石英闪长玢岩透明矿物组合方解石、石英;(d)石英闪长玢岩未蚀变的透明矿物组合斜长石、石英;(e)石英闪长玢岩中黄铁矿与钛铁矿组合;(f)石英闪长玢岩中黄铁矿和黄铜矿共生;Bt-黑云母;Cal-方解石;Cp-黄铜矿;Hbl-角闪石;Ilm-钛铁矿;Pl-斜长石;Py-黄铁矿;Q-石英

图2 刺来岩体石英闪长玢岩镜下矿物照片

Fig. 2 Microscopic mineral photos of Cilai quartz diorite porphyrite

使用 Agilent 7500cs ICP-MS 电感耦合等离子体质谱和 193 nm ArF 准分子激光系统完成。束斑直径为 32 μm , 剥离频率为 5 Hz, 能量密度(样品表面测量)为 2 J/cm^2 , 流速为 0.35 L/min 的氦气作为载气将激光烧蚀后的粒子带出腔室, 与氩气混合后送入 ICP-MS 等离子体质谱仪。每个测点的背景值为 30 s, 然后再进行 30 s 的信号采集分析。使用 Meffre et al(2008)和 Sack et al(2011)的方法筛选数据, 以锆石的 Zr 含量作为内标元素计算, 采用国际锆石标本 91500(Wiedenbeck et al, 1995)作为校正同位素分馏的外部标准, 加权平均年龄误差的置信度为 95%。 $^{207}\text{Pb}/^{206}\text{Pb}$ 比值的校正因子使用 NIST610 为标准计算, 并使用 Baker et al(2004)标准值对其进行校正。最后, 数据采用 ICPMSDataCal 软件(Liu et al, 2010)进行离线处理, 并使用 Isoplot/Exver4(Ludwig, 2003)进行 U-Pb 年龄谱和图的绘制和年龄加权平均值的计算。

3 分析结果

3.1 主量元素

为消除部分样品烧失量(LOI)过高造成的影

响, 通过对主量元素含量进行归一化计算能够更准确地反映元素之间的关系, 归一化后得到的数值并未出现较大波动, 从侧面反映出该批样品并未受到风化或次生矿物的严重干扰(表 1)。刺来岩体石英闪长玢岩样品中 $w(\text{SiO}_2)$ 为 64.94%~67.31%, 平均值为 65.93%, 属于中-酸性岩; $w(\text{Al}_2\text{O}_3)$ 为 14.73%~15.04%, 平均值为 14.16%, $w(\text{K}_2\text{O})$ 为 2.97%~4.73%, 平均值为 4.27%, $w(\text{Na}_2\text{O})$ 为 3.55%~4.60%, 平均值为 4.01%。 δEu 和 δCe 无明显异常, 全碱 $w(\text{K}_2\text{O}+\text{Na}_2\text{O})$ 为 7.27%~8.84%, 平均值为 8.29%, $w(\text{K}_2\text{O})/w(\text{Na}_2\text{O})$ 为 0.69~1.30, 平均值为 1.08, 里特曼指数(σ)为 2.41~3.38, 属于钙碱性-碱性岩石; 铝饱和指数(A/CNK)为 0.73~1.14, 平均值为 0.87, 属于准铝质岩石, 岩石固结指数(SI)为 8.00~17.29。部分样品具有较高的 K_2O 含量 [$w(\text{K}_2\text{O}) > 4\%$] 和 LOI 值, 可能受到蚀变的影响。因此, 在 TAS 图解[图 3(a)]和 A/CNK-A/NK 图解[图 3(b)]中采用归一化后的数据, 结果显示刺来岩体石英闪长玢岩与中甸地区的其他岩体的岩性相似, 主要落入石英闪长岩区域, 属于准铝质岩石。

3.2 稀土及微量元素

微量和稀土元素分析结果见表 2。刺来岩体石

表2 刺来岩体石英闪长玢岩微量和稀土元素含量

Table 2 Rare and trace elements content of the Cilai quartz diorite porphyrite ($\times 10^{-6}$)

样品编号	微量元素														
	V	Cr	Co	Ni	Cu	Rb	Sr	Zr	Nb	Ba	Pb	Th	U	Hf	Ta
CL12-4	110	58.9	13.0	28.3	47.8	111	1 180	173	16.2	2 510	26.9	22.5	3.90	4.45	1.01
CL12-5	109	57.0	13.1	25.4	41.8	113	952	175	16.6	4 180	34.5	23.5	5.60	4.64	1.05
CL12-8	113	52.9	12.8	26.3	53.9	99.8	1 090	182	17.2	1 980	23.8	23.3	7.08	4.54	1.06
CL02-128.2	101	66.1	18.1	26.6	21.9	74.7	799	158	15.3	1 370	31.2	22.3	5.76	4.22	0.95
CL02-159.5	110	57.0	13.3	29.7	22.1	112	692	185	16.6	1 890	22.0	23.6	5.79	4.55	1.01
CL02-173	109	59.1	12.5	25.8	19.3	116	968	189	16.1	2 610	18.0	23.2	4.43	4.80	1.00
CL02-259.5	98.6	52.5	10.6	27.0	18.6	117	759	169	16.0	1 940	11.8	22.6	6.07	4.36	0.98
样品编号	稀土元素														
	La	Ce	Pr	Nd	Sm	Eu	Gd	Tb	Dy	Ho	Er	Tm	Yb	Lu	Y
CL12-4	54.4	96.6	10.6	37.1	5.72	1.40	3.78	0.53	2.28	0.41	1.19	0.16	1.01	0.15	11.8
CL12-5	54.8	97.0	10.8	38.1	5.82	1.28	4.03	0.57	2.24	0.43	1.25	0.17	1.12	0.16	12.4
CL12-8	57.5	101	11.5	39.8	6.24	1.63	4.37	0.61	2.50	0.47	1.32	0.17	1.13	0.17	13.1
CL02-128.2	58.6	104	11.8	41.1	6.32	1.66	4.28	0.59	2.31	0.43	1.17	0.16	1.01	0.14	11.8
CL02-159.5	57.6	101	11.1	38.8	5.98	1.53	3.89	0.55	2.27	0.46	1.22	0.16	1.04	0.16	12.2
CL02-173	54.1	96.7	10.7	37.4	5.85	1.41	3.93	0.56	2.28	0.42	1.22	0.16	1.11	0.17	12.2
CL02-259.5	49.8	87.9	9.45	32.4	5.12	1.29	3.59	0.53	2.17	0.42	1.20	0.17	0.99	0.17	11.7
样品编号	特征值														
	ΣREE	$(\text{La}/\text{Yb})_N$	Yb_N	Nb/Ta	Nb/La	Zr/Hf	Rb/Sr	Ba/La	Th/Ce	Th/U	Sr/Th	La/Yb	Th/La	Sr/Y	V/Sc
CL12-4	215.33	36.59	6.27	16.0	0.30	38.9	0.09	46.1	0.23	5.77	52.4	53.9	0.41	100.0	8.15
CL12-5	217.77	33.24	6.96	15.8	0.30	37.7	0.12	76.3	0.24	4.20	40.5	48.9	0.43	76.8	8.86
CL12-8	228.41	34.57	7.02	16.2	0.30	40.1	0.09	34.4	0.23	3.29	46.8	50.9	0.41	83.2	8.19
CL02-128.2	233.57	39.41	6.27	16.1	0.26	37.4	0.09	23.4	0.21	3.87	35.8	28.0	0.38	67.7	7.48
CL02-159.5	225.76	37.62	6.46	16.4	0.29	40.7	0.16	32.8	0.23	4.08	29.3	55.4	0.41	56.7	9.17
CL02-173	216.01	33.11	6.89	16.1	0.30	39.4	0.12	48.2	0.24	5.24	41.7	48.7	0.43	79.3	8.86
CL02-259.5	195.20	34.28	6.15	16.3	0.32	38.8	0.15	39.0	0.26	3.72	33.6	50.3	0.45	64.9	8.22

注:微量元素单位为 $\times 10^{-6}$; $\Sigma\text{REE}=w(\text{La})+w(\text{Ce})+w(\text{Pr})+w(\text{Nd})+w(\text{Sm})+w(\text{Eu})+w(\text{Gd})+w(\text{Tb})+w(\text{Dy})+w(\text{Ho})+w(\text{Er})+w(\text{Tm})+w(\text{Yb})+w(\text{Lu})$; $w(\text{La}/\text{Yb})_N, w(\text{Yb})_N$ 为球粒隕石标准化后值(Sun et al, 1989)

3.3 锆石U-Pb年龄

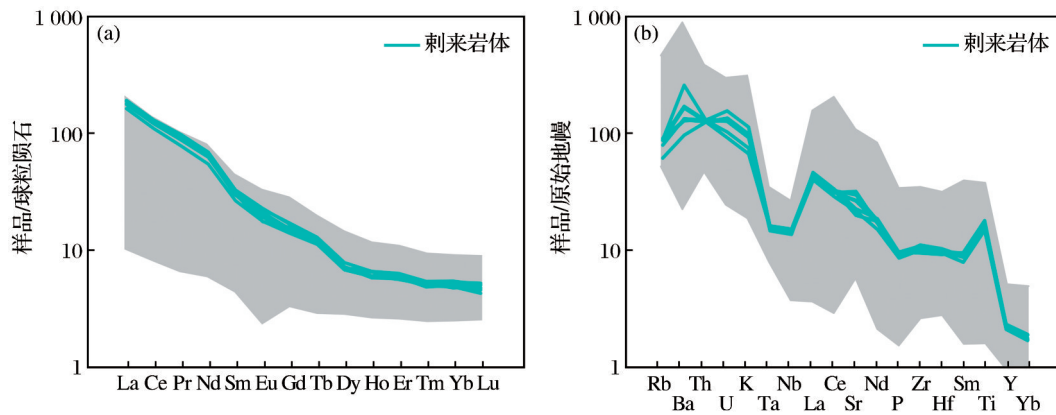
刺来岩体石英闪长玢岩锆石U-Pb测年结果见表3。由表3可知,2件样品的Th/U比值均在0.46~2.78之间,符合岩浆锆石的特征。由图5可知,样品CL12-2的15个锆石测点中有1个点谐和度较低,其余14个测点的谐和度均高于95%,分布在谐和线上及其附近[图5(a)],样品加权平均年龄为 $(216.9\pm 1.5)\text{Ma}$ ($N=14, MSWD=0.94$)[图5(b)];样品CL12-3共14个锆石测点,其中一颗锆石的 $^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$ 年龄为726 Ma,为捕获锆石,故采用另外13个测点数据计算样品的形成年龄[图5(c)],得出加权平均年龄为 $(217.0\pm 1.8)\text{Ma}$ ($N=13, MSWD=1.5$)[图5(d)]。与邹国富等(2012)研究获得的春都岩体成岩年龄

[$(217.5\pm 1.9)\sim(217.3\pm 1.8)\text{Ma}$]在误差范围内基本一致,表明二者均形成于晚三叠世。

4 讨论

4.1 成岩时代及构造环境

前人针对刺来岩体所在的中甸弧东、西2个斑岩成矿带内的大量岩体开展的年代学研究表明,这些岩体的形成年龄主要介于225~210 Ma之间(侯增谦等, 2004; Wang et al, 2011),其中春都闪长玢岩体中的锆石U-Pb年龄为212 Ma、含矿花岗闪长斑岩锆石U-Pb年龄为 $(217.5\pm 1.9)\text{Ma}$ (杨宪涛, 2012);雪鸡坪石英闪长玢岩锆石U-Pb年龄为



注:图中阴影部分为中甸地区西斑岩成矿带稀土及微量元素含量范围,数据来源杨宪涛(2012),Leng et al(2012,2014,2018a,2018b)

图4 刺来岩体石英闪长玢岩稀土元素球粒陨石标准化图(a)及微量元素蛛网图(b)(图a,b标准化数据参考自Sun et al,1989)
Fig. 4 Standardized map of rare earth element chondrites(a) and spider map of trace elements(b) of Cilai quartz diorite porphyrite (Fig. a, b, standardized data from Sun et al, 1989)

(219.9 ± 0.7)~(215.2 ± 1.9)Ma(林清茶等,2006;曹殿华等,2009);烂泥塘石英闪长玢岩锆石U-Pb年龄为225 Ma(欧剑杰,2014);普朗超大型矿床石英闪长玢岩锆石U-Pb年龄为(219.6 ± 3.5)~(212.3 ± 1.3)Ma(Leng et al, 2018a);地苏嘎、浪都和欠虽等小型矿床锆石U-Pb年龄范围均在225~210 Ma之间(图6和表4)。上述岩体的形成时代均为晚三叠世,这一时期中甸弧处于甘孜—理塘洋壳西向俯冲(李文昌等,2013),构造背景为俯冲增生造山环境。本次对刺来岩体石英闪长玢岩中锆石的U-Pb测年结果表明,刺来岩体的形成时代为(217.0 ± 1.8)~(216.9 ± 1.5)Ma,与上述岩体形成时代一致,且与甘孜—理塘洋的俯冲时限吻合(侯增谦等,2001),进一步为中甸弧晚三叠世侵入岩与俯冲相关岩浆活动密切相关提供了证据。

全球大型斑岩铜矿床多分布于岛弧和大陆边缘等俯冲环境(Richards, 2003;Cooke et al, 2005),且成矿母岩浆主要与俯冲作用密切相关(陈华勇等,2020)。

虽然俯冲带斑岩铜矿的形成环境具有一定的共性,但总体可分为岛弧和陆缘弧2种不同的形成环境(Sillitoe, 2018;陈华勇等,2020)。前人研究表明,丰度较高的大离子亲石元素Th、La相对于Nb、Ta较富集,是火成岩在俯冲环境形成的证明(徐学义等,2009;刘翠等,2011)。刺来岩体石英闪长玢岩地球化学组成表现为富集K、Rb、Sr等大离子亲

石元素和Th、U等活泼不相容元素,Nb、Ta、P、Ti等高场强元素呈现选择性亏损,Th含量为 22.3×10^{-6} ~ 23.6×10^{-6} ,La含量为 49.8×10^{-6} ~ 58.6×10^{-6} ;岩石La/Nb比值3.11~3.84(活动大陆边缘La/Nb>2)(Salters et al, 1991),此种元素分异模式与俯冲板块部分熔融的成因机制相吻合。如MgO-Fe₂O₃-Al₂O₃图解[图7(a)]所示,中甸弧东、西斑岩带矿床(点)样品(包括刺来岩体石英闪长玢岩)均落入岛弧及活动大陆边缘弧附近。在Th/Yb-Nb/Yb图解[图7(b)]中,样品点均落于火山岛弧带内且具有较强的分散性。同样地,在Nb-Y判别图[图7(c)]和Rb-(Yb+Ta)判别图[图7(d)]中,样品也在火山弧花岗岩区域。以上特征进一步表明刺来岩体具有岛弧岩浆岩的特征。综合区域构造演化和部分矿床成岩年龄分析,认为中甸弧刺来岩体是晚三叠世甘孜—理塘洋壳板片西向俯冲作用形成的,与俯冲带增生楔环境下的弧岩浆活动密切相关,是活动大陆边缘弧环境下的壳幔相互作用的产物。

4.2 岩石成因

刺来岩体石英闪长玢岩具有较高的MgO含量(1.11%~2.69%)和Mg[#]值(32.61~54.97),其中Mg[#]值大部分高于下地壳变玄武岩脱水熔融形成的熔体(Mg[#]<44)(Rapp et al, 1995)。Nb/Ta比值介于15.8~16.4之间(平均值为16.1),显著高于下地壳背景值(8.0)(Rudnick et al, 2014),更接近地幔平均值(17.5)。上述地球化学特征表明,刺来原始岩浆的

表3 刺来岩体石英闪长玢岩 LA-ICP-MS 锆石 U-Pb 定年结果
Table 3 LA-ICP-MS U-Pb dating results of zircon from the Cilai quartz diorite porphyry

测点编号	Th/($\times 10^{-6}$)	U/($\times 10^{-6}$)	Th/U	$^{207}\text{Pb}/^{206}\text{Pb}$		$^{238}\text{U}/^{206}\text{Pb}$		$^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$		$^{208}\text{Pb}/^{232}\text{Th}$		$^{207}\text{Pb}/^{206}\text{Pb}$	
				比值	1 σ	比值	1 σ	年龄	1 σ	年龄	1 σ	年龄	1 σ
CL12-2-03	954	520	1.83	0.0539	0.0009	30.1	0.36	211	3	209	3	365	37
CL12-2-04	62.9	137	0.46	0.0541	0.0018	29.70	0.51	214	4	217	5	374	76
CL12-2-13	351	273	1.28	0.0503	0.0023	29.60	0.52	214	4	220	5	209	104
CL12-2-02	163	176	0.93	0.0541	0.0018	29.44	0.46	215	3	213	4	374	77
CL12-2-12	1 580	568	2.78	0.0512	0.0009	29.50	0.29	215	2	212	3	252	39
CL12-2-06	223	234	0.95	0.0501	0.0019	29.44	0.42	215	3	225	4	197	89
CL12-2-10	437	425	1.03	0.0508	0.0011	29.39	0.30	216	2	216	3	231	50
CL12-2-08	189	170	1.11	0.0516	0.0017	29.22	0.42	217	3	219	4	266	74
CL12-2-05	169	186	0.91	0.0530	0.0016	29.13	0.40	218	3	218	4	328	67
CL12-2-11	449	352	1.27	0.0509	0.0011	29.19	0.32	217	2	214	3	236	48
CL12-2-14	278	256	1.08	0.0522	0.0014	29.09	0.35	218	3	222	3	296	62
CL12-2-09	167	169	0.99	0.0564	0.0017	28.83	0.42	220	3	229	4	469	67
CL12-2-01	292	254	1.15	0.0518	0.0015	28.88	0.34	219	3	220	4	277	64
CL12-2-15	167	197	0.85	0.0536	0.0016	28.66	0.43	221	3	228	5	354	68
CL12-2-07	189	198	0.95	0.0501	0.0016	28.28	0.37	224	3	228	4	200	76
CL12-3-04	355	262	1.36	0.0507	0.0025	30.63	0.57	207	4	202	4	229	116
CL12-3-11	494	436	1.13	0.0498	0.0024	29.73	0.51	213	4	207	4	188	110
CL12-3-05	210	219	0.96	0.0499	0.0014	29.63	0.39	214	3	214	4	192	66
CL12-3-02	278	271	1.03	0.0555	0.0020	29.41	0.44	216	3	224	4	432	79
CL12-3-12	110	117	0.94	0.0508	0.0020	29.40	0.52	216	4	217	5	234	90
CL12-3-01	737	496	1.49	0.0559	0.0015	29.09	0.38	218	3	222	4	450	60
CL12-3-10	423	373	1.13	0.0504	0.0011	29.29	0.33	216	2	216	3	213	51
CL12-3-13	218	235	0.93	0.0507	0.0029	29.23	0.52	217	4	206	5	229	130
CL12-3-14	226	253	0.89	0.0551	0.0022	28.96	0.47	219	4	231	6	415	90
CL12-3-08	140	156	0.89	0.0507	0.0018	28.73	0.42	221	3	216	4	229	81
CL12-3-07	250	265	0.94	0.0511	0.0013	28.66	0.37	221	3	225	4	245	61
CL12-3-03	156	139	1.12	0.0679	0.0034	27.96	0.55	227	4	250	8	865	104
CL12-3-15	191	205	0.93	0.0484	0.0017	28.55	0.37	222	3	219	4	118	84
CL12-3-06	192	153	1.25	0.0666	0.0010	8.93	0.09	726	8	726	10	825	32

形成与下地壳玄武岩熔融过程无关。此外,刺来斑岩体 Zr/Hf 比值介于 37.4~40.7 之间(平均值为 39.0),与幔源岩浆(平均值为 36.3)相似,显著高于壳源岩浆(平均值为 11.0)(孙志远等,2018),Rb/Sr 比值(0.09~0.16)高于地幔平均值(0.034),Ba/La 比值(23.4~76.3)高于地壳平均值(25)(Weaver, 1991)。Th/Ce 比值介于 0.21~0.26 之间(原始地幔比值为 0.11~0.12),显著高于原始地幔范围(Sun et al, 1989); Sr/Th 比值介于 29.3~52.4 之间,属于壳幔过渡范围(Sun et al, 1989; 黎彤, 1992); Th/La 比值介于 0.38~0.45 之间(平均值为 0.42),落入典型壳源岩浆 Th/

La 比值特征(0.1~1.0)区间(Saunders et al, 1988)。以上特征表明,刺来岩体岩浆为壳幔混合成因。

刺来岩体石英闪长玢岩的主量、微量元素含量与典型的埃达克(质)岩相似,即:SiO₂含量大于等于 56%(60.10%~64.90%),MgO 含量小于等于 3%(1.05%~2.60%),除 Al₂O₃含量(13.10%~14.50%)与典型的埃达克岩的含量(大于等于 15%)存在微小差异之外,其他主量元素特征均相符合。其中,埃达克(质)岩最突出的地球化学特征是 Sr/Y 比值大于等于 20,本次岩石样品具有较高的 Sr/Y 比值(56.7~100.0)(Defant et al, 1990; Castillo, 2006)。在

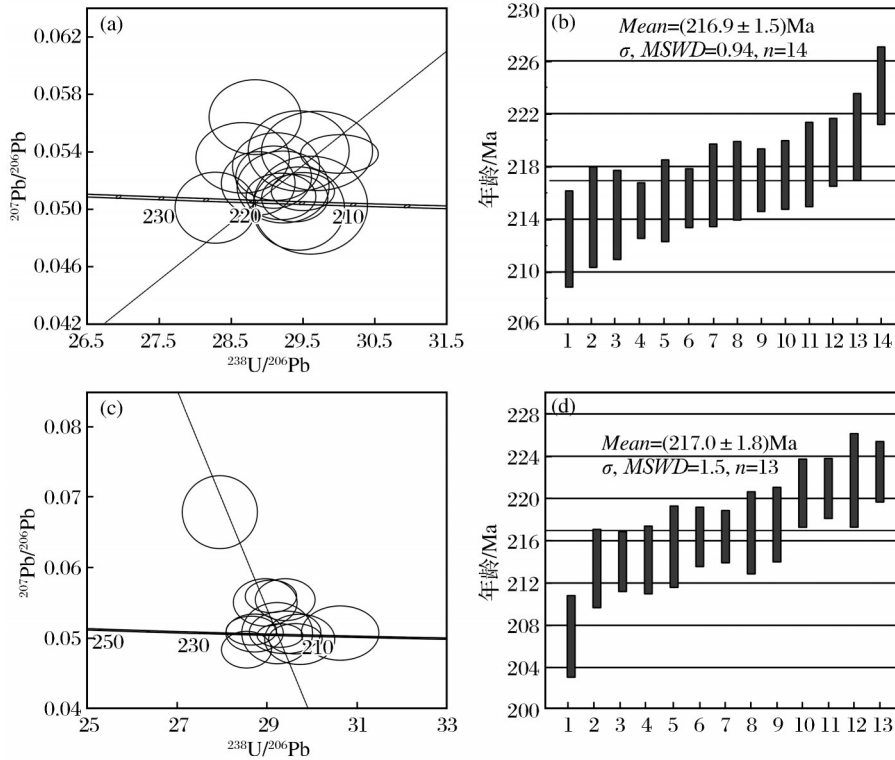


图5 刺来岩体石英闪长玢岩锆石 U-Pb 年龄谐和图

Fig. 5 Zircon U-Pb age concordance diagram of Cilai quartz diorite porphyrite

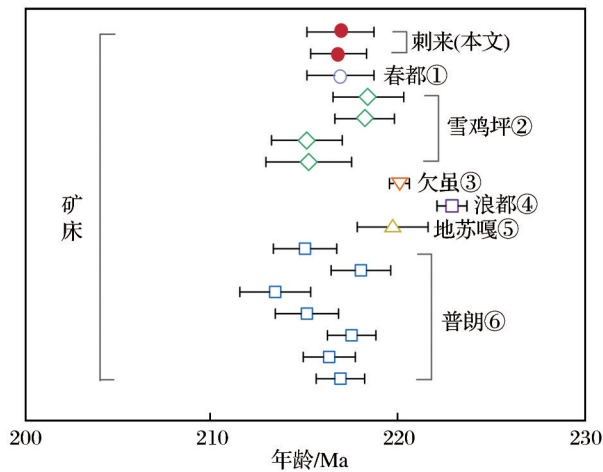


图6 中甸含矿斑岩及刺来岩体石英闪长玢岩
锆石 U-Pb 年龄

Fig. 6 Zircon U-Pb ages of the Zhongdian mineralized
porphyry and Cilai quartz diorite porphyry

注: 除刺来岩体外, 其余均为中甸含矿斑岩; 数据来源: ①杨宪涛, 2012; ②林清茶等, 2006; 曹殿华等, 2009; Leng et al, 2012;

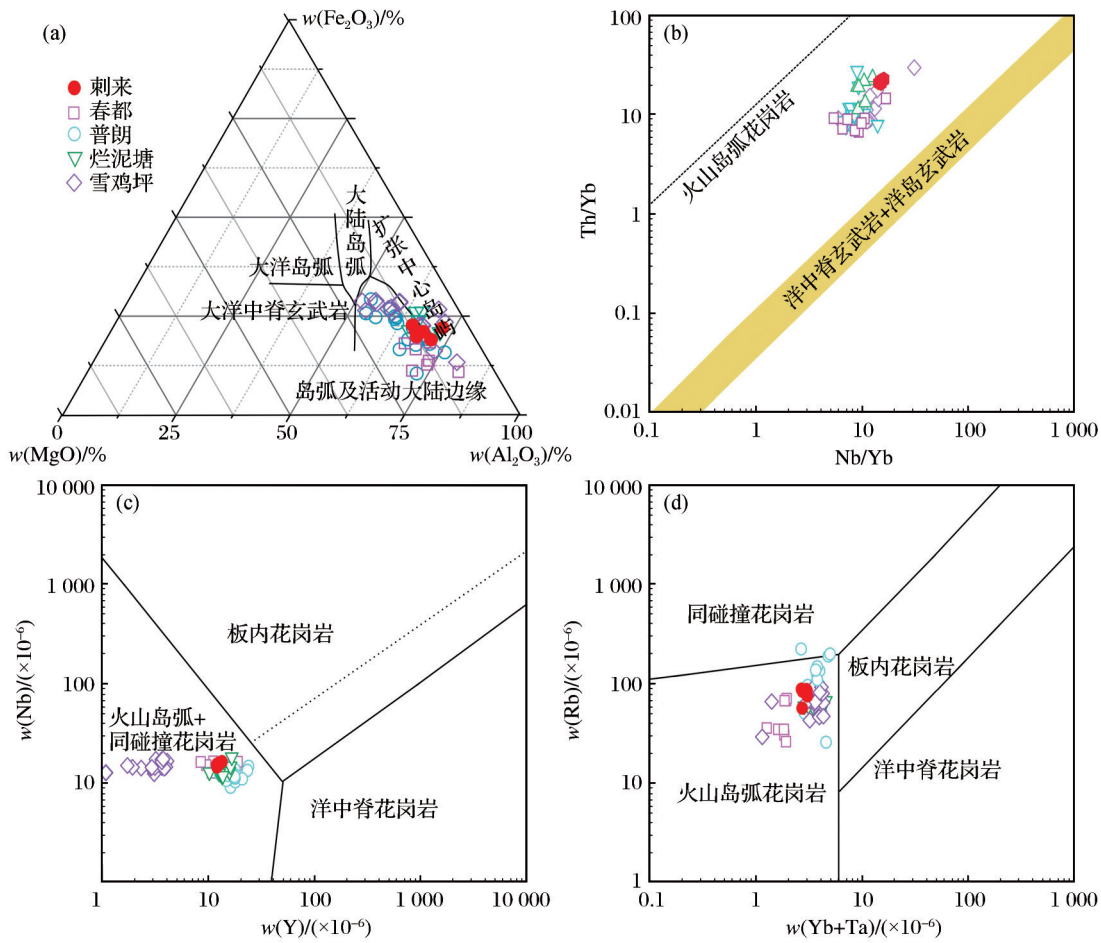
③李喆等, 2017; ④金灿海等, 2013; ⑤Leng et al, 2014;

⑥Leng et al, 2018a

表4 中甸成矿带岩体年龄统计

Table 4 Statistics of rock ages in the Zhongdian
metallogenic belt

岩体	测试方法	矿物定年 方法	年龄/Ma	参考文献
普朗	LA-ICP-MS	锆石 U-Pb	217.0±1.3	Leng et al, 2018a
普朗	LA-ICP-MS	锆石 U-Pb	216.4±1.4	Leng et al, 2018a
普朗	LA-ICP-MS	锆石 U-Pb	217.6±1.3	Leng et al, 2018a
普朗	LA-ICP-MS	锆石 U-Pb	215.2±1.7	Leng et al, 2018a
普朗	LA-ICP-MS	锆石 U-Pb	213.5±1.9	Leng et al, 2018a
普朗	LA-ICP-MS	锆石 U-Pb	218.1±1.6	Leng et al, 2018a
普朗	LA-ICP-MS	锆石 U-Pb	215.1±1.7	Leng et al, 2018a
地苏嘎	SIMS	锆石 U-Pb	219.8±1.9	Leng et al, 2014
浪都	LA-ICP-MS	锆石 U-Pb	223±1	金灿海等, 2013
欠虽	LA-ICP-MS	锆石 U-Pb	220.3±0.66	李喆等, 2017
雪鸡坪	SHRIMP	锆石 U-Pb	215.3±2.3	林清茶等, 2006
雪鸡坪	SHRIMP	锆石 U-Pb	215.2±1.9	曹殿华等, 2009
雪鸡坪	SIMS	锆石 U-Pb	218.3±1.6	Leng et al, 2012
雪鸡坪	SIMS	锆石 U-Pb	218.5±1.6	Leng et al, 2012
春都	SIMS	锆石 U-Pb	217.5±1.9	杨宪涛, 2012
刺来	LA-ICP-MS	锆石 U-Pb	217.0±1.8	本文
刺来	LA-ICP-MS	锆石 U-Pb	216.9±1.5	本文



(a) MgO-Fe₂O₃-Al₂O₃判别图(底图参考 Pearce et al, 1977); (b) Th/Yb-Nb/Yb 图解(底图参考 Pearce, 2008); (c) Y-Nb 图解(底图参考 Pearce et al, 1984); (d) (Yb+Ta)-Rb 图解(底图参考 Pearce et al, 1984)

图7 中甸斑岩构造判别图解

Fig. 7 Discrimination diagram of tectonics of Zhongdian porphyry

(La/Yb)-Yb_N 判别图解(图8)中,样品均落入埃达克岩区域内,表现出刺来岩体与典型埃达克(质)岩之间具有一定的亲性和,推测其成因可能与俯冲洋壳部分熔融有关。同时,中甸斑岩型矿床(矿点)的 $\epsilon_{Nd}(t)$ 同位素数据(图9)显示, $\epsilon_{Nd}(t)$ 值小于亏损地幔(DM)且集中于球粒陨石(CHUR)下,只有少量达到CHUR的值,说明中甸东、西斑岩带三叠纪火成岩的形成与俯冲洋壳再熔融有关。俯冲洋壳的熔体在上升时可能与地幔楔反应,导致其成分改变,再熔融进一步促进地壳物质的分异和再循环,形成埃达克(质)岩浆,这种作用可能会影响岩浆的分异过程和成矿元素的富集。

在典型的弧熔岩中,Y浓度会随SiO₂含量的增加而增加,Sr浓度也受到斜长石的控制,表示岩浆

经历了结晶分异作用(Tatsumi et al, 1986)。但刺来岩体石英闪长玢岩样品中,不同的SiO₂含量下Sr含量相对稳定,表明与正常弧岩浆岩相比,斜长石的结晶受到抑制,使得一些样品的Sr/Y比值升高,表明源区可能存在较多的石榴子石残留(Baker et al, 1994),这也是俯冲洋壳的部分熔融形成的埃达克(质)岩的显著特征之一。

4.3 地质意义

研究表明,复式岩体的多阶段演化能够为成矿提供有利的热液活动条件,其矿化主要与晚期岩相密切相关(Zhou et al, 2020)。刺来岩体是由花岗斑岩和石英闪长玢岩组成的复式岩体,花岗斑岩的年龄为(220.6±0.78)Ma(王帅帅等, 2019),本文研究得出石英闪长玢岩年龄为(217.0±1.8)Ma,为刺来

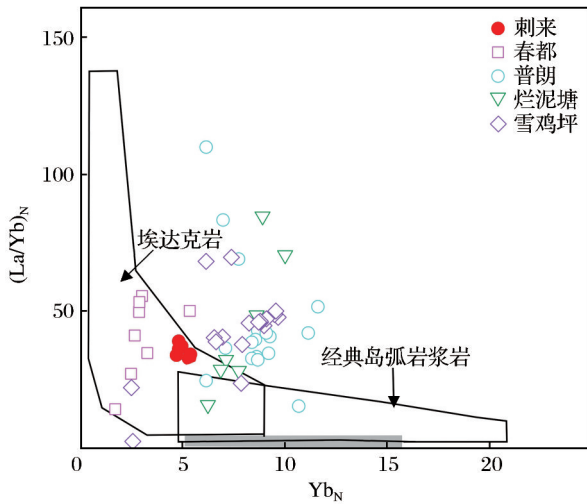


图8 埃达克岩 $(La/Yb)_N - Yb_N$ 图

(底图参考 Drummond et al, 1990)

Fig. 8 Adakite $(La/Yb)_N - Yb_N$ diagram

(base map modified after Drummond et al, 1990)

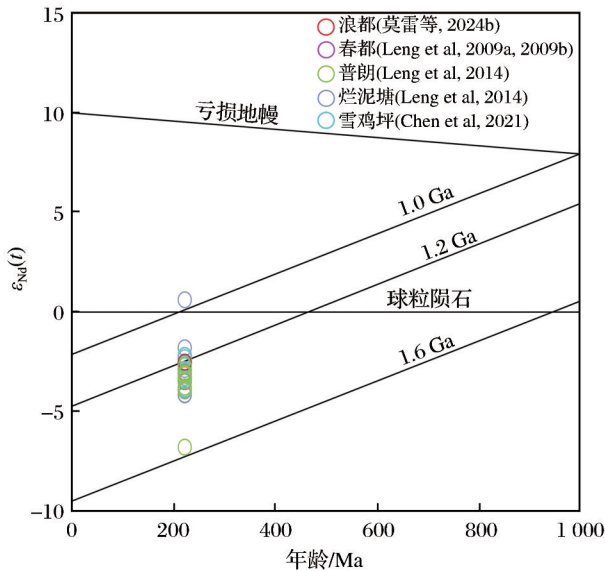


图9 中甸斑岩 $\epsilon_{Nd}(t) - \text{年龄}(\text{Ma})$ 图解

Fig. 9 $\epsilon_{Nd}(t) - \text{age}(\text{Ma})$ diagram of Zhongdian porphyry

复式岩体中的晚期岩相,更有利于成矿。此外,岩浆氧逸度和矿物的分离结晶对斑岩铜矿具有极其重要的影响,而岩浆氧逸度可以通过岩体中的变价元素(Fe)来判断(马鸿文,1991)。位于中甸斑岩矿集区的大型一超大型矿床,如春都和普朗等斑岩型铜矿,其斑岩体的 Fe_2O_3/FeO 比值为 0.74~1.17,刺来复式岩体石英闪长玢岩的 Fe_2O_3/FeO 比值为 0.89~1.09,与春都和普朗等斑岩体一致(图 10)。

除了 Fe 之外, V 和 Sc 等亲氧型元素也可指示斑岩型铜矿中的氧逸度特征(莫雷等,2024a),刺来复式岩体显示较高 V/Sc 比值(7.48~8.86),亦暗示其具有较高的氧逸度。在俯冲环境下,板片脱水并发生部分熔融,随着俯冲作用的进行,后期的岩浆比早期的岩浆更氧化(张向飞等,2017)。这种氧逸度的升高为斑岩铜矿的形成提供了有利条件。

斑岩型矿床的形成除了受氧逸度的影响,还与岩浆含水量有关(Richards, 2011)。刺来复式岩体的 Sr/Y 比值大于 50,反映岩浆含水量较高(>4%) (Richards et al, 2012; 郭峰, 2017)。此外,刺来复式岩体位于春都和雪鸡坪 2 个大型矿床之间,三者 在区域尺度上所经受的板块应力条件相似,且三者的地球化学特征均高度相似(图 3、图 4、图 7~图 9),这些特征均表明刺来复式岩体具备良好的成矿潜力。

结合区域构造演化,晚三叠世甘孜—理塘洋西向俯冲引发的板片熔融与地幔楔反应(Leng et al, 2018a),不仅为成矿提供了物质基础,同时通过壳幔混合促进了成矿元素的初步富集。岩浆结晶分异程度可以通过 Rb/ Sr 比值表示(冷成彪等, 2020),普朗、春都和烂泥塘的 Rb/Sr 比值为 0.03~0.59,刺来岩体的 Rb/Sr 比值为 0.09~0.15,表明分异程度有限(图 10),符合 Cu-Au 成矿岩体的矿石矿物与成矿专属性相互对应的规律(冷成彪等, 2020)。在 $Fe_2O_3/FeO - Rb/Sr$ 图解中,刺来岩体所有样品均落入 Cu-Au 成矿区域,同样暗示该区具备 Cu-Au 成矿潜力。

5 结论

(1) 刺来岩体石英闪长玢岩为中—酸性、钙碱性系列准铝质岩石,明显富集大离子亲石元素,相对亏损高场强元素,具埃达克(质)岩的地球化学亲和性。

(2) 刺来岩体石英闪长玢岩成岩年龄为 $(217.0 \pm 1.8) \sim (216.9 \pm 1.5)$ Ma,形成于晚三叠世甘孜—理塘洋壳的西向俯冲,构造背景为俯冲增生造山环境。

(3) 刺来复式岩体主要为俯冲洋壳熔体上升与地幔楔反应,再熔融促进形成的埃达克(质)岩浆,在岩浆上升过程中被地壳物质混染而形成的以石

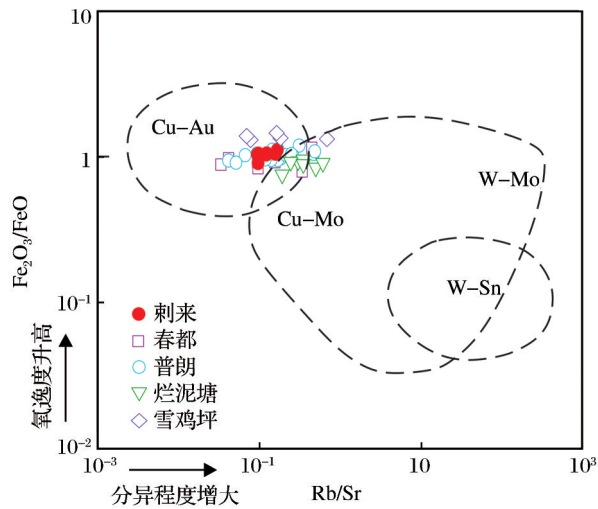


图 10 刺来岩体石英闪长玢岩岩石化学组成与金属成矿属性判别图解(底图参考冷成彪等, 2020)

Fig. 10 Discrimination diagram of rock chemical composition and metal mineralization specificity of Cilai quartz diorite porphyrite (base map modified after Leng et al, 2020)

英闪长玢岩为主的斑岩岩体。

(4) 刺来复式岩体紧邻春都和雪鸡坪等大型矿床, 且显示出高氧逸度和高含水量等成矿有利特征, 暗示该岩体具备良好的成矿潜力。

参考文献 (References):

- Baker I A, Gamble J A, Grahampages I J, 1994. The age, geology, and geochemistry of the Tapuaenuku Igneous Complex, Marlborough, New Zealand [J]. *New Zealand Journal of Geology and Geophysics*, 37(3): 249-268.
- Baker J, Peate D, Waight T, et al, 2004. Pb isotopic analysis of standards and samples using a ^{207}Pb - ^{204}Pb double spike and thallium to correct for mass bias with a double-focusing MC-ICP-MS [J]. *Chemical Geology*, 211(3/4): 275-303.
- Castillo P R, 2006. An overview of adakite petrogenesis [J]. *Chinese Science Bulletin*, 51(3): 257-268.
- Chen X L, Leng C B, Zou S H, et al, 2021. Geochemical compositions of apatites from the Xuejiping and Disuga porphyries in Zhongdian Arc: implications for porphyry Cu mineralization [J]. *Ore Geology Reviews*, 130: 103954.
- Cooke D R, Hollings P, Walshe J L, 2005. Giant porphyry deposits: characteristics, distribution, and tectonic controls [J]. *Economic Geology*, 100(5): 801-818.
- Defant M J, Drummond M S, 1990. Derivation of some modern

arc magmas by melting of young subducted lithosphere [J]. *Nature*, 347(6294): 662-665.

Drummond M S, Defant M J, 1990. A model for Trondhjemite-Tonalite-Dacite Genesis and crustal growth via slab melting: Archean to modern comparisons [J]. *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*, 95(B13): 21503-21521.

Hou Z Q, Yang Z M, Qu X M, et al, 2009. The Miocene Gangdese porphyry copper belt generated during post-collisional extension in the Tibetan Orogen [J]. *Ore Geology Reviews*, 36(1/2/3): 25-51.

Hou Z Q, Zaw K, Pan G T, et al, 2007. Sanjiang Tethyan metallogenesis in S. W. China: tectonic setting, metallogenic epochs and deposit types [J]. *Ore Geology Reviews*, 31(1/2/3/4): 48-87.

Leng C B, Cooke D R, Hou Z Q, et al, 2018a. Quantifying exhumation at the giant Pulang porphyry Cu-Au deposit using U-Pb-He dating [J]. *Economic Geology*, 113(5): 1077-1092.

Leng C B, Gao J F, Chen W T, et al, 2018b. Platinum-group elements, zircon Hf-O isotopes, and mineralogical constraints on magmatic evolution of the Pulang porphyry Cu-Au system, SW China [J]. *Gondwana Research*, 62: 163-177.

Leng C B, Huang Q Y, Zhang X C, et al, 2014. Petrogenesis of the Late Triassic volcanic rocks in the Southern Yidun Arc, SW China: constraints from the geochronology, geochemistry, and Sr-Nd-Pb-Hf isotopes [J]. *Lithos*, 190/191: 363-382.

Leng C B, Zhang X C, Hu R Z, et al, 2012. Zircon U-Pb and molybdenite Re-Os geochronology and Sr-Nd-Pb-Hf isotopic constraints on the genesis of the Xuejiping porphyry copper deposit in Zhongdian, Northwest Yunnan, China [J]. *Journal of Asian Earth Sciences*, 60: 31-48.

Li W C, Yu H J, Gao X, et al, 2017. Review of Mesozoic multiple magmatism and porphyry Cu-Mo (W) mineralization in the Yidun Arc, eastern Tibet Plateau [J]. *Ore Geology Reviews*, 90: 795-812.

Liu Y S, Gao S, Hu Z C, et al, 2010. Continental and oceanic crust recycling-induced melt-peridotite interactions in the trans-North China orogen: U-Pb dating, Hf isotopes and trace elements in zircons from mantle xenoliths [J]. *Journal of Petrology*, 51(1/2): 537-571.

Ludwig K R, 2003. ISOPLOT, Version 3.00. A geochronological toolkit for Microsoft Excel [M]. California: Berkeley Geochronology Center Special Publication.

Maniar P D, Piccoli P M, 1989. Tectonic discrimination of granitoids [J]. *Geological Society of America Bulletin*, 101(5):

- 635-643.
- Meffre S, Large R R, Scott R, et al, 2008. Age and pyrite Pb-isotopic composition of the giant Sukhoi Log sediment-hosted gold deposit, Russia [J]. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 72(9): 2377-2391.
- Middlemost E A K, 1994. Naming materials in the magma/igneous rock system [J]. *Earth-Science Reviews*, 37(3/4): 215-224.
- Pearce J A, 2008. Geochemical fingerprinting of oceanic basalts with applications to ophiolite classification and the search for Archean oceanic crust [J]. *Lithos*, 100(1/2/3/4): 14-48.
- Pearce J A, Harris N B W, Tindle A G, 1984. Trace element discrimination diagrams for the tectonic interpretation of granitic rocks [J]. *Journal of Petrology*, 25(4): 956-983.
- Pearce T H, Gorman B E, Birkett T C, 1977. The relationship between major element chemistry and tectonic environment of basic and intermediate volcanic rocks [J]. *Earth and Planetary Science Letters*, 36(1): 121-132.
- Rapp R P, Watson E B, 1995. Dehydration melting of metabasalt at 8~32 kbar: implications for continental growth and crust-mantle recycling [J]. *Journal of Petrology*, 36(4): 891-931.
- Richards J P, 2003. Tectono-magmatic precursors for porphyry Cu-(Mo-Au) deposit formation [J]. *Economic Geology*, 98(8): 1515-1533.
- Richards J P, 2011. High Sr/Y arc magmas and porphyry Cu±Mo±Au deposits: just add water [J]. *Economic Geology*, 106(7): 1075-1081.
- Richards J P, Spell T, Rameh E, et al, 2012. High Sr/Y magmas reflect arc maturity, high magmatic water content, and porphyry Cu±Mo±Au potential: examples from the Tethyan Arcs of central and Eastern Iran and western Pakistan [J]. *Economic Geology*, 107(2): 295-332.
- Rudnick R L, Gao S, 2014. Composition of the continental crust [J]. *Treatise on Geochemistry*, 3(7): 1-64.
- Sack P J, Berry R F, Meffre S, et al, 2011. In situ location and U-Pb dating of small zircon grains in igneous rocks using laser ablation-inductively coupled plasma-quadrupole mass spectrometry [J]. *Geochemistry, Geophysics, Geosystems*, 12(5): 2010GC003405.
- Salter V J M, Hart S R, 1991. The mantle sources of ocean ridges, islands and arcs: the Hf-isotope connection [J]. *Earth and Planetary Science Letters*, 104(2/3/4): 364-380.
- Saunders A D, Norry M J, Tarney J, 1988. Origin of MORB and chemically-depleted mantle reservoirs: trace element constraints [J]. *Journal of Petrology*, (1): 415-445.
- Sillitoe R H, 2018. Why no porphyry copper deposits in Japan and South Korea [J]. *Resource Geology*, 68(2): 107-125.
- Sun S S, McDonough W F, 1989. Chemical and isotopic systematics of oceanic basalts: implications for mantle composition and processes [J]. *Geological Society of London Special Publications*, 42(1): 313-345.
- Tatsumi Y, Hamilton D L, Nesbitt R W, 1986. Chemical characteristics of fluid phase released from a subducted lithosphere and origin of arc magmas: evidence from high-pressure experiments and natural rocks [J]. *Journal of Volcanology and Geothermal Research*, 29(1/2/3/4): 293-309.
- Tian Z D, Leng C B, Zhang X C, et al, 2019. Recognition of Late Triassic Cu-Mo mineralization in the northern Yidun Arc (S.E. Tibetan Plateau): implications for regional exploration [J]. *Minerals*, 9(12): 765.
- Wang B Q, Zhou M F, Li J W, et al, 2011. Late Triassic porphyritic intrusions and associated volcanic rocks from the Shangri-La region, Yidun terrane, Eastern Tibetan Plateau: adakitic magmatism and porphyry copper mineralization [J]. *Lithos*, 127(1/2): 24-38.
- Weaver B L, 1991. The origin of ocean island basalt end-member compositions: trace element and isotopic constraints [J]. *Earth and Planetary Science Letters*, 104(2/3/4): 381-397.
- Wiedenbeck M, Allé P, Corfu F, et al, 1995. Three natural zircon standards for U-Th-Pb, Lu-Hf, trace element and REE analyses [J]. *Geostandards Newsletter*, 19(1): 1-23.
- Zhou H Z, Zhang D H, Wei J H, et al, 2020. Petrogenesis of Late Triassic mafic enclaves and host granodiorite in the Eastern Kunlun Orogenic Belt, China: implications for the reworking of juvenile crust by delamination-induced asthenosphere upwelling [J]. *Gondwana Research*, 84: 52-70.
- 曹殿华, 王安建, 黄玉凤, 等, 2009. 中甸弧雪鸡斑岩铜矿含矿斑岩锆石 SHRIMP U-Pb 年代学及 Hf 同位素组成 [J]. *地质学报*, 83(10): 1430-1435. Cao Dianhua, Wang Anjian, Huang Yufeng, et al, 2009. SHRIMP geochronology and Hf isotope composition of zircons from Xuejiping porphyry copper deposit, Yunnan Province [J]. *Acta Geologica Sinica*, 83(10): 1430-1435.
- 陈华勇, 吴超, 2020. 俯冲带斑岩铜矿系统成矿机理与主要挑战 [J]. *中国科学: 地球科学*, 50(7): 865-886. Chen Huayong, Wu Chao, 2020. Metallogenesis and major challenges of porphyry copper systems above subduction zones [J]. *Scientia Sinica(Terrae)*, 50(7): 865-886.
- 代友旭, 董国臣, 景国庆, 等, 2017. 云南中甸格咱地区晚三叠世火山岩年代学、地球化学特征及其构造意义 [J]. 岩

- 石学报, 33(8): 2548-2562. Dai Youxu, Dong Guochen, Jing Guoqing, et al, 2017. Zircon U-Pb chronology, geochemical characteristics of Late-Triassic volcanic rocks from Geza of Zhongdian area, Yunnan and their tectonic significance[J]. Acta Petrologica Sinica, 33(8): 2548-2562.
- 邓军, 王庆飞, 李龚健, 2016. 复合造山和复合成矿系统: 三江特提斯例析[J]. 岩石学报, 32(8): 2225-2247. Deng Jun, Wang Qingfei, Li Gongjian, 2016. Superimposed orogeny and composite metallogenic system: case study from the Sanjiang Tethyan belt, SW China[J]. Acta Petrologica Sinica, 32(8): 2225-2247.
- 邓军, 杨立强, 王长明, 2011. 三江特提斯复合造山与成矿作用研究进展[J]. 岩石学报, 27(9): 2501-2509. Deng Jun, Yang Liqiang, Wang Changming, 2011. Research advances of superimposed orogenesis and metallogenesis in the Sanjiang Tethys [J]. Acta Petrologica Sinica, 27(9): 2501-2509.
- 董涛, 江小均, 李超, 等, 2021. 滇西北中甸地区普上含矿斑岩锆石 U-Pb 年代学和地球化学特征及其地质意义[J]. 矿物岩石地球化学通报, 40(4): 871-888. Dong Tao, Jiang Xiaojun, Li Chao, et al, 2021. Geochronological and geochemical characteristics of the Pushang ore-bearing porphyry in the Zhongdian area of the northwestern Yunnan and its geological significances [J]. Bulletin of Mineralogy, Petrology and Geochemistry, 40(4): 871-888.
- 董涛, 余海军, 段召艳, 等, 2020. 云南香格里拉盖吉夏含矿石英二长闪长玢岩年代学、地球化学、锆石 Hf 同位素特征及其地质意义[J]. 岩石学报, 36(5): 1369-1388. Dong Tao, Yu Haijun, Duan Zhaoyan, et al, 2020. Geochronology, geochemistry, and zircon Hf isotope characteristics and their geological significances of the Gaijixia ore-bearing intrusive rocks in the Shangri-La region, NW Yunnan, SW China[J]. Acta Petrologica Sinica, 36(5): 1369-1388.
- 郭峰, 2017. 冈底斯西段朱诺斑岩铜矿床岩浆氧逸度和含水量[D]. 北京: 中国地质大学(北京). Guo Feng, 2017. Oxygen fugacity and water content of intrusions in Zhunuo porphyry Cu deposit in the western segment of Gangdese belt [D]. Beijing: China University of Geosciences (Beijing).
- 侯增谦, 曲晓明, 周继荣, 等, 2001. 三江地区义敦岛弧碰撞造山过程: 花岗岩记录[J]. 地质学报, 75(4): 484-497. Hou Zengqian, Qu Xiaoming, Zhou Jirong, et al, 2001. Collision-orogenic processes of the Yidun arc in the Sanjiang region: record of granites [J]. Acta Geologica Sinica, 75(4): 484-497.
- 侯增谦, 杨岳清, 曲晓明, 等, 2004. 三江地区义敦岛弧造山带演化和成矿系统[J]. 地质学报, 78(1): 109-120. Hou Zengqian, Yang Yueqing, Qu Xiaoming, et al, 2004. Tectonic evolution and mineralization systems of the Yidun arc orogen in Sanjiang region, China [J]. Acta Geologica Sinica, 78(1): 109-120.
- 金灿海, 范文玉, 张珂, 等, 2013. 中甸浪都铜矿区二长斑岩中锆石的微量元素组成、U-Pb 年龄及地质意义[J]. 大地构造与成矿学, 37(2): 262-272. Jin Canhai, Fan Wenyu, Zhang Yu, et al, 2013. Trace element composition and U-Pb chronology of zircons in monzonite porphyry from the Langdu copper deposit in Zhongdian and their geological significance [J]. Geotectonica et Metallogenia, 37(2): 262-272.
- 冷成彪, 2009. 滇西北雪鸡坪斑岩铜矿地质背景及矿床地球化学特征研究[D]. 北京: 中国科学院大学. Leng Chengbiao, 2009. Ore deposit geochemistry and regional geological setting of the Xuejiping porphyry copper deposit, Northwest Yunnan, China [D]. Beijing: University of Chinese Academy of Sciences.
- 冷成彪, 陈喜连, 张静静, 等, 2020. 斑岩型 Cu±Mo±Au 矿床的勘查标志: 岩石化学和矿物化学指标[J]. 地质学报, 94(11): 3189-3212. Leng Chengbiao, Chen Xilian, Zhang Jingjing, et al, 2020. Lithogeochemical and mineral chemical footprints of porphyry Cu±Mo±Au deposits: a review [J]. Acta Geologica Sinica, 94(11): 3189-3212.
- 冷成彪, 张兴春, 王守旭, 等, 2008. 滇西北雪鸡坪斑岩铜矿 S, Pb 同位素组成及对成矿物质来源的示踪[J]. 矿物岩石, 28(4): 80-88. Leng Chengbiao, Zhang Xingchun, Wang Shouxu, et al, 2008. Sulfur and lead isotope compositions of the Xuejiping porphyry copper deposit in northwest Yunnan, China: tracing for the source of metals [J]. Mineralogy and Petrology, 28(4): 80-88.
- 冷成彪, 张兴春, 王守旭, 等, 2009. 岩浆—热液体系成矿流体演化及其金属元素气相迁移研究进展[J]. 地质论评, 55(1): 100-112. Leng Chengbiao, Zhang Xingchun, Wang Shouxu, et al, 2009. Advances of researches on the evolution of ore-forming fluids and the vapor transport of metals in magmatic: hydrothermal systems [J]. Geological Review, 55(1): 100-112.
- 冷成彪, 张兴春, 王新松, 等, 2015. 云南中甸地区印支期和燕山晚期斑岩成矿作用研究[J]. 矿物学报, 35(增刊1): 401. Leng Chengbiao, Zhang Xingchun, Wang Xinsong, et al, 2015. Study on porphyry mineralization of Indosinian

- and Late Yanshanian in Zhongdian, Yunnan Province [J]. *Acta Mineralogica Sinica*, 35(Suppl.1):401.
- 黎彤, 1992. 地壳元素丰度的若干统计特征[J]. *地质与勘探*, 28(10): 1-7. Li Tong, 1992. The statistical characteristics of the abundance of chemical elements in the earth's crust [J]. *Geology and Exploration*, 28(10): 1-7.
- 李华伟, 董国臣, 董朋生, 等, 2020. 滇西北中甸弧成矿岩体中楣石化学成分特征及其成岩成矿标识[J]. *地球科学*, 45(6): 1999-2010. Li Huawei, Dong Guochen, Dong Pengsheng, et al, 2020. Titanite chemical compositions and their implications for petrogenesis and mineralization in Zhongdian Arc, NW Yunnan, China [J]. *Earth Science*, 45(6): 1999-2010.
- 李建康, 李文昌, 王登红, 等, 2007. 中甸弧燕山晚期成矿事件的 Re-Os 定年及成矿规律研究 [J]. *岩石学报*, 23(10): 2415-2422. Li Jiankang, Li Wenchang, Wang Denghong, et al, 2007. Re-Os dating for ore-forming event in the late of Yanshan Epoch and research of ore-forming regularity in Zhongdian Arc [J]. *Acta Petrologica Sinica*, 23(10): 2415-2422.
- 李凯旋, 梁华英, 黄文婷, 等, 2019. 滇西北铜厂沟夕卡岩一斑岩型 Mo-Cu 矿床成矿岩体的高氧逸度特征及区内斑岩矿床成矿元素组合差异控制因素分析 [J]. *地球化学*, 48(2): 101-113. Li Kaixuan, Liang Huaying, Huang Wenting, et al, 2019. Highly oxidized characteristics of Tongchanggou porphyry associated with skarn-porphyry Mo-Cu mineralization and key factors controlling the elemental association of porphyry deposits in northwestern Yunnan Province [J]. *Geochimica*, 48(2): 101-113.
- 李文昌, 2007. 义敦岛弧构造演化与普朗超大型斑岩铜矿成矿模型 [D]. 北京: 中国地质大学(北京). Li Wenchang, 2007. The tectonic evolution of the Yidun Island Arc and the metallogenic model of the Pulang porphyry copper deposit, Yunnan, SW China [D]. Beijing: China University of Geosciences (Beijing).
- 李文昌, 刘学龙, 曾普胜, 等, 2011. 云南普朗斑岩型铜矿成矿岩体的基本特征 [J]. *中国地质*, 38(2): 403-414. Li Wenchang, Liu Xuelong, Zeng Pusheng, et al, 2011. The characteristics of metallogenic rocks in the Pulang porphyry copper deposit of Yunnan Province [J]. *Geology in China*, 38(2): 403-414.
- 李文昌, 余海军, 尹光侯, 2013. 西南“三江”格咱岛弧斑岩成矿系统 [J]. *岩石学报*, 29(4): 1129-1144. Li Wenchang, Yu Haijun, Yin Guanghou, 2013. Porphyry metallogenic system of Geza arc in the Sanjiang region, southwestern China [J]. *Acta Petrologica Sinica*, 29(4): 1129-1144.
- 李喆, 李文昌, 刘学龙, 等, 2017. 云南格咱岛弧带欠虽铜矿石英闪长玢岩年代学、岩石地球化学特征及成岩成矿的制约 [J]. *中国地质*, 44(3): 541-555. Li Zhe, Li Wenchang, Liu Xuelong, et al, 2017. Geochronological and geochemical characteristics of Qiansui quartz diorite porphyrite in the Geza Arc, Yunnan Province, and constraints on diagenesis and mineralization [J]. *Geology in China*, 44(3): 541-555.
- 林清茶, 夏斌, 张玉泉, 2006. 云南中甸地区雪鸡坪同碰撞石英闪长玢岩锆石 SHRIMP U-Pb 定年及其意义 [J]. *地质通报*, 25(增刊1): 133-137. Lin Qingcha, Xia Bin, Zhang Yuquan, 2006. Zircon SHRIMP U-Pb dating of the syn-collisional Xuejiping quartz diorite porphyrite in Zhongdian, Yunnan, China, and its geological implications [J]. *Geological Bulletin of China*, 25(Suppl.1): 133-137.
- 刘翠, 邓晋福, 刘俊来, 等, 2011. 哀牢山构造岩浆带晚二叠世一早三叠世火山岩特征及其构造环境 [J]. *岩石学报*, 27(12): 3590-3602. Liu Cui, Deng Jinfu, Liu Junlai, et al, 2011. Characteristics of volcanic rocks from Late Permian to Early Traissic in Ailaoshan tectono-magmatic belt and implications for tectonic settings [J]. *Acta Petrologica Sinica*, 27(12): 3590-3602.
- 刘林林, 陈军, 杨再风, 等, 2023. 滇黔桂地区不同成矿温度热液金矿床磷灰石矿物化学特征: 兼论卡林型金成矿流体来源特殊性 [J]. *黄金科学技术*, 31(2): 219-231. Liu Linlin, Chen Jun, Yang Zaifeng, et al, 2023. Chemical characteristics of apatite minerals in hydrothermal gold deposits with different metallogenic temperatures in the Yunnan-Guizhou-Guangxi region: a discussion on the particularity of sources of ore-forming fluids of the carlin-type gold deposits [J]. *Gold Science and Technology*, 31(2): 219-231.
- 刘学龙, 李文昌, 尹光侯, 等, 2013. 云南格咱岛弧普朗斑岩型铜矿年代学、岩石矿物学及地球化学研究 [J]. *岩石学报*, 29(9): 3049-3064. Liu Xuelong, Li Wenchang, Yin Guanghou, et al, 2013. The geochronology, mineralogy and geochemistry study of the Pulang porphyry copper deposits in Geza arc of Yunnan Province [J]. *Acta Petrologica Sinica*, 29(9): 3049-3064.
- 刘学龙, 杨富成, 张昌振, 等, 2018. 滇西北雪鸡坪斑岩型铜矿构造特征与成矿作用研究 [J]. *黄金科学技术*, 26(4): 473-480. Liu Xuelong, Yang Fucheng, Zhang Changzhen, et al, 2018. Structural characteristics and mineralization of Xuejiping porphyry copper deposit in northwest Yunnan

- [J]. *Gold Science and Technology*, 26(4): 473-480.
- 马鸿文, 1991. 硅酸盐岩浆的 Fe^{3+} - Fe^{2+} 平衡与氧逸度[J]. *地质科技情报*, 10(3): 17-23. Ma Hongwen, 1991. Ferric-ferrous equilibrium and oxygen fugacity in silicate magmas [J]. *Bulletin of Geological Science and Technology*, 10(3): 17-23.
- 莫雷, 冷成彪, 陈喜连, 等, 2024a. 云南中甸地区斑岩体锆石微量元素与 Hf-O 同位素特征及其对成岩成矿的启示[J]. *岩石学报*, 40(4): 1163-1184. Mo Lei, Leng Chengbiao, Chen Xilian, et al, 2024a. Zircon trace elements and Hf-O isotopes of porphyries in the Zhongdian area of Yunnan Province and their implications for petrogenesis and mineralization [J]. *Acta Petrologica Sinica*, 40(4): 1163-1184.
- 莫雷, 沈啟武, 陈喜连, 等, 2024b. 滇西北浪都夕卡岩矿床致矿岩体的岩石地球化学、年代学、Sr-Nd-Pb 同位素组成及其地质意义[J]. *沉积与特提斯地质*, 44(2): 421-436. Mo Lei, Shen Qiwu, Chen Xilian, et al, 2024b. Petrogeochemistry, chronology, Sr-Nd-Pb isotopic compositions, and geological significance of the ore-causative intrusion in the Langdu skarn deposit, northwest Yunnan [J]. *Sedimentary Geology and Tethyan Geology*, 44(2): 421-436.
- 欧剑杰, 2014. 云南香格里拉烂泥塘斑岩型铜矿床地质特征及找矿方向[D]. 成都: 成都理工大学. Ou Jianjie, 2014. Geological characteristics and prospecting direction of Lannitang porphyry copper deposit in Shangri-La, Yunnan [D]. Chengdu: Chengdu University of Technology.
- 秦朝建, 冷成彪, 张兴春, 等, 2021. 云南中甸红山砂卡岩铜多金属矿床包裹体特征及其地质意义[J]. *东华理工大学学报(自然科学版)*, 44(5): 401-411. Qin Chaojian, Leng Chengbiao, Zhang Xingchun, et al, 2021. Geochemical characteristics and their geological significances of ore-forming fluids at Hongshan skarn copper polymetallic deposit in the Zhongdian area, Yunnan Province [J]. *Journal of East China University of Technology (Natural Science)*, 44(5): 401-411.
- 任涛, 钟宏, 陈金法, 等, 2011. 云南中甸地区浪都高钾酸性侵入岩的地球化学特征[J]. *矿物学报*, 31(1): 43-54. Ren Tao, Zhong Hong, Chen Jinfa, et al, 2011. Geochemical characteristics of the Langdu high-K intermediate-acid intrusive rocks in the Zhongdian area, northwest Yunnan Province, P. R. China [J]. *Acta Mineralogica Sinica*, 31(1): 43-54.
- 孙志远, 龙灵利, 王玉往, 等, 2018. 东天山铜鱼梁铜矿区闪长玢岩 SHRIMP 锆石 U-Pb 年代学、岩石地球化学及其地质意义[J]. *地球科学*, 43(9): 3001-3017. Sun Zhiyuan, Long Lingli, Wang Yuwang, et al, 2018. SHRIMP zircon U-Pb geochronology and geochemistry of diorite porphyrite in Tongyuliang copper deposit, eastern Tianshan and its geological significance [J]. *Earth Science*, 43(9): 3001-3017.
- 王帅帅, 卢映祥, 刘学龙, 等, 2018. 滇西北格咱岛弧茨菜花岗斑岩地球化学特征及锆石 U-Pb 年代学研究[J]. *昆明理工大学学报(自然科学版)*, 43(6): 46-54. Wang Shuashuai, Lu Yingxiang, Liu Xuelong, et al, 2018. Geochemical characteristics and zircon U-Pb chronology of the granite porphyry of Cilai copper deposit in Geza arc of northwestern Yunnan [J]. *Journal of Kunming University of Science and Technology (Natural Science)*, 43(6): 46-54.
- 王帅帅, 卢映祥, 刘学龙, 等, 2019. 滇西北格咱岛弧茨菜花岗斑岩锆石 U-Pb 年龄报道[J]. *中国地质*, 46(4): 939-940. Wang Shuashuai, Lu Yingxiang, Liu Xuelong, et al, 2019. Zircon U-Pb age of granite porphyry in the Cilai copper deposit in Geza Arc, northwest Yunnan [J]. *Geology in China*, 46(4): 939-940.
- 吴静, 李峰, 姜永果, 等, 2011. 云南香格里拉春都斑岩体岩石地球化学特征研究[J]. *矿物学报*, 31(3): 550-559. Wu Jing, Li Feng, Jiang Yongguo, et al, 2011. A study on petrological geochemistry features of Chundu porphyry body, Xianggelila, Yunnan Province, China [J]. *Acta Mineralogica Sinica*, 31(3): 550-559.
- 徐学义, 陈隽璐, 李向民, 等, 2009. 扬子地台北缘白勉峡组和三湾组火山岩形成构造环境及岩石成因的地球化学约束[J]. *地质学报*, 83(11): 1703-1718. Xu Xueyi, Chen Junlu, Li Xiangmin, et al, 2009. Geochemical constrains on the petrogenesis and tectonic setting discrimination of volcanic rocks from the Baimianxia and the Sanwan formations [J]. *Acta Geologica Sinica*, 83(11): 1703-1718.
- 杨宪涛, 2012. 云南中甸春都斑岩铜矿床地质特征及矿床成因讨论[D]. 北京: 中国地质大学(北京). Yang Xiantao, 2012. Geological characteristics and genesis discussion of Chundu porphyry Cu deposit, Zhongdian, Yunnan Province [D]. Beijing: China University of Geosciences (Beijing).
- 曾普胜, 侯增谦, 李丽辉, 等, 2004. 滇西北普朗斑岩铜矿床成矿时代及其意义[J]. *地质通报*, 23(11): 1127-1131. Zeng Pusheng, Hou Zengqian, Li Lihui, et al, 2004. Age of the Pulang porphyry copper deposit in NW Yunnan and its geological significance [J]. *Geological Bulletin of China*, 23(11): 1127-1131.
- 张向飞, 李文昌, 尹光候, 等, 2017. 滇西北休瓦促钨钼矿区

- 复式岩体地质及其成矿特征——来自年代学、氧逸度和地球化学的约束[J]. 岩石学报, 33(7): 2018-2036.
- Zhang Xiangfei, Li Wenchang, Yin Guanghou, et al, 2017. Geological and mineralized characteristics of the composite complex in Xiuwacu W-Mo mining district, NW Yunnan, China: constraints by geochronology, oxygen fugacity and geochemistry [J]. Acta Petrologica Sinica, 33(7): 2018-2036.
- 周晓丹, 杨帆, 吴静, 等, 2018. 云南普朗斑岩型铜矿床外围斑岩体成因探讨[J]. 地质科技情报, 37(4): 39-50. Zhou Xiaodan, Yang Fan, Wu Jing, et al, 2018. Petrogenesis of porphyry body in the periphery of Pulang porphyry copper deposit, Yunnan [J]. Bulletin of Geological Science and Technology, 37(4): 39-50.
- 邹国富, 李波, 徐国端, 等, 2012. 滇西北春都斑岩铜矿床侵入岩成岩时代及地质意义[J]. 矿床地质, 31(增刊1): 643-644. Zou Guofu, Li Bo, Xu Guoduan, et al, 2012. Diagenetic age and geological significance of intrusive rocks in Chundu porphyry copper deposit, northwest Yunnan [J]. Mineral Deposits, 31(Suppl.1): 643-644.
- 邹国富, 李峰, 李波, 等, 2011. 滇西北春都斑岩铜矿床侵入岩岩石地球化学[J]. 矿产与地质, 25(5): 405-411. Zou Guofu, Li Feng, Li Bo, et al, 2011. Rock geochemistry of intrusive rocks in the Chundu porphyry copper deposit in the northwest of Yunnan Province [J]. Mineral Resources and Geology, 25(5): 405-411.

Geochemical Characteristics and Diagenetic Tectonic Environment of the Cilai Porphyry in the Zhongdian Area, Yunnan Province

DUAN Wenjie^{1,2}, LENG Chengbiao^{1,2}, MO Lei^{1,2}, LI Kaixuan^{1,2}, ZHAO Yan^{1,2}

1. National Key Laboratory of Uranium Resource Exploration-Mining and Nuclear Remote Sensing, East China University of Technology, Nanchang 330013, Jiangxi, China;

2. School of Earth Sciences, East China University of Technology, Nanchang 330013, Jiangxi, China

Abstract: The Zhongdian region is divided into eastern and western porphyry metallogenic belts. The Cilai copper deposit, located within the western belt, represents a newly identified porphyry copper system in this area. To determine the petrogenetic age, tectonic setting, and magmatic source of the Cilai porphyry body, we performed zircon U-Pb dating and comprehensive whole-rock major and trace element analyses on the Cilai quartz diorite porphyry. The zircon U-Pb dating results reveal that the formation age of the Cilai quartz diorite porphyry ranges from (217.5±1.8) Ma to (216.9±1.4) Ma, situating its origin in the Late Triassic period. This porphyry is characterized by high SiO₂ content (64.94%~67.31%) and elevated alkali levels (K₂O+Na₂O=7.27%~8.84%), classifying it as part of the high-K calc-alkaline series. The rock exhibits enrichment in light rare earth elements (LREEs), significant LREE-HREE fractionation [(La/Yb)_N = 33.11~39.41], and a weak negative Eu anomaly (δEu=0.81~0.98). It is enriched in large-ion lithophile elements (LILEs) such as Rb, Ba, Th, and U, while it is depleted in high field strength elements (HFSEs) like P, Ti and Zr. The rock exhibits elevated strontium (Sr) concentrations (692×10⁻⁶~1 180×10⁻⁶), reduced yttrium (Y) levels (11.7×10⁻⁶~13.1×10⁻⁶), and increased Sr/Y (56.7~100.0) and La/Yb (48.7~58.0) ratios, which are characteristic of adakitic magma. The Cilai quartz diorite porphyry is characterized by high thorium/uranium (Th/U) ratios and low concentrations of magnesium oxide (MgO), chromium (Cr), and nickel (Ni). The Th/La, Nb/Ta, Rb/Sr, and Ba/La ratios are intermediate between those of the upper mantle and crust, with certain values aligning more closely with average mantle values. This suggests that the melt from subducted oceanic crust ascends and interacts with the mantle wedge, producing adakitic magma, which subsequently interacts with the crust to form the current thorn rock mass. The geochemical properties and zircon U-Pb dating of the Cilai quartz diorite

porphyry, combined with the positioning of sample points on the $MgO-Fe_2O_3-Al_2O_3$ diagram and tectonic environment discrimination diagrams within island arc and active continental margin regions, suggest that the Cilai deposit, along with other significant copper deposits, such as the Chundu deposit, originated from the same magmatic event within the western porphyry metallogenic belt. These deposits are the result of the westward subduction of the Ganzi-Litang oceanic crust during the Late Indosinian period.

Key words: porphyry copper deposit; geochemistry; adakitic rocks; U-Pb age; Cilai; northwestern Yunnan

中国提铷研究方面取得新进展

据7月15日报道,中国科学院青海盐湖研究所电化学分离技术课题组在察尔汗盐湖超低品位铷资源经济性利用领域取得新进展,成功从铷含量低于0.001%的察尔汗氯化钾原料中制备出纯度99.9%的氯化铷产品。

“新工艺有可能减少进口依赖。”香港《南华早报》6月13日发文称,铷在军事、技术等领域有着广泛应用,但我国在铷资源开发方面一直面临矿石品位低、开采难度高等挑战。科学家在提铷研究方面取得的新进展,有可能帮助我国减少对铷矿石进口的依赖。

中国科学院青海盐湖研究所7月11日表示,针对我国战略性关键金属铷资源供给短缺现状,研发团队开展了从盐湖中提取铷制备高纯氯化铷的理论与技术创新攻关。

研究团队构建了含铷复盐固溶体多相平衡热力学模型,阐明了钾盐生产过程中铷元素的迁移富集规律,揭示了复盐固溶体形成是导致铷在尾卤中难以富集的关键制约因素。通过模型计算与实验验证,确定光卤石分解母液和粗氯化钾为铷元素富集的最佳工艺节点,为铷的高效分离提取提供了理论指导。研究团队建立的模型实现了微量铷在复杂卤水体系与盐类矿物间分配行为的精准预测,形成了盐湖微量元素赋存状态研究的新方法。

青海盐湖研究所表示,研究团队开发出“洗矿浸铷—蒸发富集—溶剂萃取—结晶纯化”的集成工艺路线,通过公斤级放大实验和吨级工程验证,成

功从铷含量极低($<0.001\%$)的察尔汗氯化钾原料中制备出氯化铷产品(纯度99.9%),实现了氯化物型盐湖超低品位铷资源的经济提取与高质利用。

《南华早报》称,这一过程可能也具有成本效益。青海盐湖研究所的团队在2022年进行的一项研究表明,通过类似工艺提取氯化铷的成本,仅为其市场价格的三分之一。

铷是一种具有战略意义的金属,广泛应用于电子、航空航天等领域,在军事和民用领域都极具价值。例如,铷离子可以提高钙钛矿型太阳能电池的性能,氯化铷可应用于肿瘤治疗,铷原子钟可以做到300多万年只有1秒误差。

然而,中国在铷资源开发方面一直面临矿石品位低、开采难度大、依赖进口等挑战。《中国矿业》杂志2025年2月发布的一篇文章指出,虽然中国是全球铷矿储量最大的国家之一,但其中97%的铷都位于低品位硬岩矿床中,开采难度大。其余3%则位于西藏和青海的盐湖和地热水中。

“尽管中国是全球主要的铷生产国,但相关行业严重依赖进口矿石。2021年,中国进口了19 500 t铷精矿,外部采购率达66.3%。这些矿石主要来自加拿大和津巴布韦”文章警告称,美国已在2022年将铷列入关键矿产清单,随着矿产成为竞争的焦点,“中国必须通过资源外交优先考虑供应链安全。”

《南华早报》评论称,青海盐湖研究所在提铷方面取得的新进展,未来有可能减少我国对进口的依赖,并提高在关键矿产供应链中的战略自主性。

(来源:矿业界)