

滇西北羊拉铜矿赋矿地层沉积时代和构造背景:来自变质碎屑岩碎屑组分和锆石 U-Pb 定年的约束

王琛凯¹, 李文昌^{1,2*}, 江小均^{1,2}, 常华诚¹, 朱政坤^{1,3}, 李雨健^{1,2},
张学琿⁴, 周小龙⁴

1. 昆明理工大学国土资源工程学院地球科学系, 云南 昆明 650093

2. 自然资源部三江成矿作用及资源勘查利用重点实验室, 云南昆明 650051

3. 中铝(云南)勘查股份有限公司, 云南昆明 650000

4. 云南迪庆矿业开发有限公司, 云南迪庆 674400

摘要:滇西北羊拉铜矿是否存在沉积期的初始富集或喷流沉积、热水沉积成矿作用, 长期以来一直是矿床学领域颇具争议的关键科学命题。本文在区域调查的基础上, 以矿区赋矿地层变质碎屑岩为研究对象, 开展岩石学、岩相学、碎屑锆石 U-Pb 年代学和碎屑统计分析研究。结果表明, 赋矿地层变质碎屑岩为长石石英砂岩-长石砂岩, 含少量火山碎屑, 成熟度中等; 碎屑组分统计分析指示物源区具有稳定克拉通至再旋回造山带特征, 碎屑锆石 U-Pb 年龄区间为 365-2557 Ma, 其中最年轻峰值加权平均年龄分别为 368.7 ± 5.6 Ma 和 365.1 ± 2.4 Ma, 结合前人研究, 提出赋矿地层沉积时代为晚泥盆世-早石炭世, 与古生物地层基本一致。锆石年龄谱系(古元古代 1760 Ma、2557 Ma, 中元古代 1484 Ma、1532 Ma, 中生代 430 Ma、365 Ma)与北羌塘-昌都地块吻合, 认为其为羊拉铜矿赋矿地层沉积物源区, 赋矿地层形成于金沙江古特提斯洋“裂解-扩张”演化过程中红海型陆间洋盆稳定大陆边缘浅海台地环境, 且具备热水沉积成矿的构造前提, 并且进一步证实金沙江洋盆于晚泥盆-早石炭世已打开, 两侧物源差异受洋盆隔绝。

关键词: 羊拉铜矿; 赋矿地层; 碎屑锆石 U-Pb 定年; 碎屑统计; 构造背景

中图分类号: P611.2

收稿日期: 2025-12-20

基金项目: 本文受云南省科技厅高层次科技人才及创新团队选拔专项(编号: 202305AT350004)和校企合作项目(编号: 202404YKKC007)资助。

作者简介: 王琛凯(2000—), 男, 硕士研究生, 矿床普查与勘探专业。E-mail: 845342832@qq.com。

* **通讯作者简介:** 李文昌(1962—), 男, 二级教授, 博士生导师, 长期从事找矿勘探和矿床地质研究。E-mail:

lwcyndd@163.com

Sedimentary Age and Provenance Analysis of Ore-Bearing Strata in the Yangla Cu Deposit, Northwestern Yunnan: Constraints from Clastic Compositions of Metamorphic Clastic Rocks and Zircon U-Pb Dating

Wang Chenkai¹, Li Wenchang^{1,2*}, Jiang Xiaojun^{1,2}, Chang Huacheng¹, Zhu Zhengkun^{1,3}, Li Yujian^{1,2}, Zhang Xuehui⁴, Zhou Xiaolong⁴

1. *Department of Earth Sciences, Faculty of Land Resources Engineering, Kunming University of Science and Technology, Kunming 650093, China;*

2. *Key Laboratory of Sanjiang Metallogeny and Resources Exploration and Utilization, Ministry of Natural Resources, Kunming, 650051, China;*

3. *China Aluminum (Yunnan) Exploration Co., Ltd., Kunming, 650000, China;*

4. *Yunnan Diqing Mining Development Co., Ltd., Diqing, Yunnan 674400, China*

Abstract: Whether sedimentary syn-genetic initial enrichment, exhalative-sedimentary mineralization or hydrothermal-sedimentary mineralization occurred in the Yangla Cu Deposit, northwestern Yunnan, has long been a controversial key scientific proposition in the field of mineral deposit geology. Based on regional geological surveys, this study takes the metamorphic clastic rocks of the ore-bearing strata in the deposit as the research object, and conducts systematic investigations including petrology, lithofacies analysis, detrital zircon U-Pb geochronology and detrital component statistics. The results indicate that the metamorphic clastic rocks of the ore-bearing strata are dominated by feldspathic quartz sandstone-feldspathic sandstone with minor volcanic clastics, showing medium compositional maturity. Statistical analysis of detrital components reveals that the provenance was characterized by a transition from stable craton to recycled orogenic belt. The detrital zircon U-Pb ages are 365~2557 Ma, among which the weighted mean ages of the youngest peaks are 368.7±5.6 Ma and 365.1±2.4 Ma, respectively. Combined with previous studies, it is proposed that the ore-bearing strata were deposited during the Late Devonian to Early Carboniferous, which is basically consistent with the constraints from paleontological stratigraphy. The zircon age spectrum (1760 Ma and 2557 Ma of the Paleoproterozoic, 1484 Ma and 1532 Ma of the Mesoproterozoic, 430 Ma and 365 Ma of the Middle Paleozoic) is consistent with that of the Northern Qiangtang-Changdu Block. It is thus inferred that this block served as the sediment provenance of the ore-bearing strata in the Yangla Cu Deposit. The ore-bearing strata were formed in a shallow marine platform environment on the stable continental margin of a Red Sea-type intercontinental ocean basin during the "rifting-expansion" evolution stage of the Jinshajiang Paleo-Tethys Ocean, which provides the tectonic prerequisite for hydrothermal sedimentary mineralization. Furthermore, this study confirms that the Jinshajiang Ocean Basin had already opened by the Late Devonian-Early Carboniferous, and the provenance differences between the two sides of the basin were isolated by the ocean basin itself.

Keywords: Yangla Cu Deposit; Ore-bearing strata; Detrital zircon U-Pb dating; Detrital component statistics; Tectonic setting

0 引言

滇西北羊拉铜矿是位于西南“三江”多金属成矿带——金沙江缝合带中段的大型铜

多金属矿床，是滇西北地区最为典型的矽卡岩型铜矿床之一，最早由云南地勘局十八地质队于 1965 年通过地质填图与矿产普查发现。据云南省地质调查院 2003 年 8 月提交的《云南德钦县羊拉-鲁春铜多金属矿化集中区评价地质报告》，铜金属远景资源量 130~150 万吨，铜平均品位约 1.0%，规模为大型矿床（战明国等，1998；曲晓明等，2004；李石磊等，2008；杨广全，2009）。前人主要对羊拉矿床开展了系统的成岩浆演化、构造控矿、成矿作用及找矿预测的研究工作（路远发等，2000；路远发等，2002；朱俊等，2011；朱经经等，2011；张雪峰等，2017；曾普胜等，2018；Wang et al., 2020；Li et al., 2021；Li et al., 2024）。层状-似层状矿体主要赋存于泥盆系-石炭系变质碎屑岩与碳酸盐岩的层间破碎带及岩体接触带中，主要赋矿岩性包括绿泥片岩、绢云板岩、砂质板岩、变质石英砂岩等，这些岩石层序混乱，这种现象记录了金沙江洋盆扩张-俯冲-闭合的复杂构造演化历史（何龙清，1998；王立全等，1999；路远发等，2000；朱俊等，2009）。对于羊拉铜矿是否存在沉积期初始富集或喷流沉积、热水沉积成矿作用，长期以来一直是矿床学领域颇具争议的关键科学命题，前人研究在矿床成因机制层面始终存在分歧，对羊拉铜矿的研究多聚焦于海底喷流沉积、热水沉积叠加岩浆热液改造、矽卡岩成因等观点（路远发等，1998；战明国等，1998；潘家永等，2001；朱俊，2011；朱经经等，2011）。需明确的是，喷流沉积、热水沉积成矿作用的发生高度依赖特定的构造动力学背景与沉积环境耦合条件，而前人研究尚未充分聚焦赋矿地层构造背景与成矿作用的内在关联，这也是导致成因分歧的重要原因之一。鉴于此，针对羊拉铜矿赋矿地层构造背景的深入研究，不仅能有效指示其是否具备喷流沉积、热水沉积成矿作用的形成条件，更为厘清矿床成因争议、完善成矿理论提供关键约束。

由于区域构造的影响，矿区地层以构造岩片无序叠置的非史密斯单元为特征，地层时代与单元划分长期存在争议：早期 1:20 万区域地质调查将其定为二叠纪嘎金雪山群上亚群，后续前人结合矿区的岩性组合、变质变形特征、沉积相及构造背景等将矿区地层划分为下泥盆统江边组 (D_{1j})、中-上泥盆统泥盆统里农组 (D_{2+3l}) 和下石炭统贝吾组 (C_{1b})（朱俊，2011）。最新研究表明，羊拉铜矿赋矿围岩绿泥板岩中的碎屑锆石进行 LA-MC I-CP-MS 锆石 U-Pb 定年，从中获得的石炭纪的碎屑锆石年龄集中 345 Ma，限定了矿区里农矿段赋矿围岩绿泥板岩的沉积时代为在石炭纪，与传统泥盆纪划分结论存在分歧（杨德庭和王彦斌，2015）。虽通过硫化物同位素等手段揭示成矿物质存在深源与地壳混染特征，且碎屑锆石年龄暗示物源可能与扬子陆块相关（杨德庭和王彦斌，

2015), 但研究样品单一, 对新限定的沉积时代有局限性, 针对赋矿地层的系统物源分析仍较薄弱, 物源区具体性质、物质搬运路径及与区域构造演化的耦合关系尚未明确, 物源分析缺少直接证据。这种物源信息的缺失不仅制约了地层时代和构造背景的精准厘定, 也阻碍了对矿质初始富集背景的深入认知。因此, 本文选取矿区赋矿地层变质碎屑岩为研究对象, 通过岩石学、岩相学、碎屑锆石 U-Pb 年代学和碎屑统计分析, 系统解析其物源特征, 为约束赋矿地层沉积时代、揭示区域构造背景及其演化过程提供关键依据。

1 区域地质背景

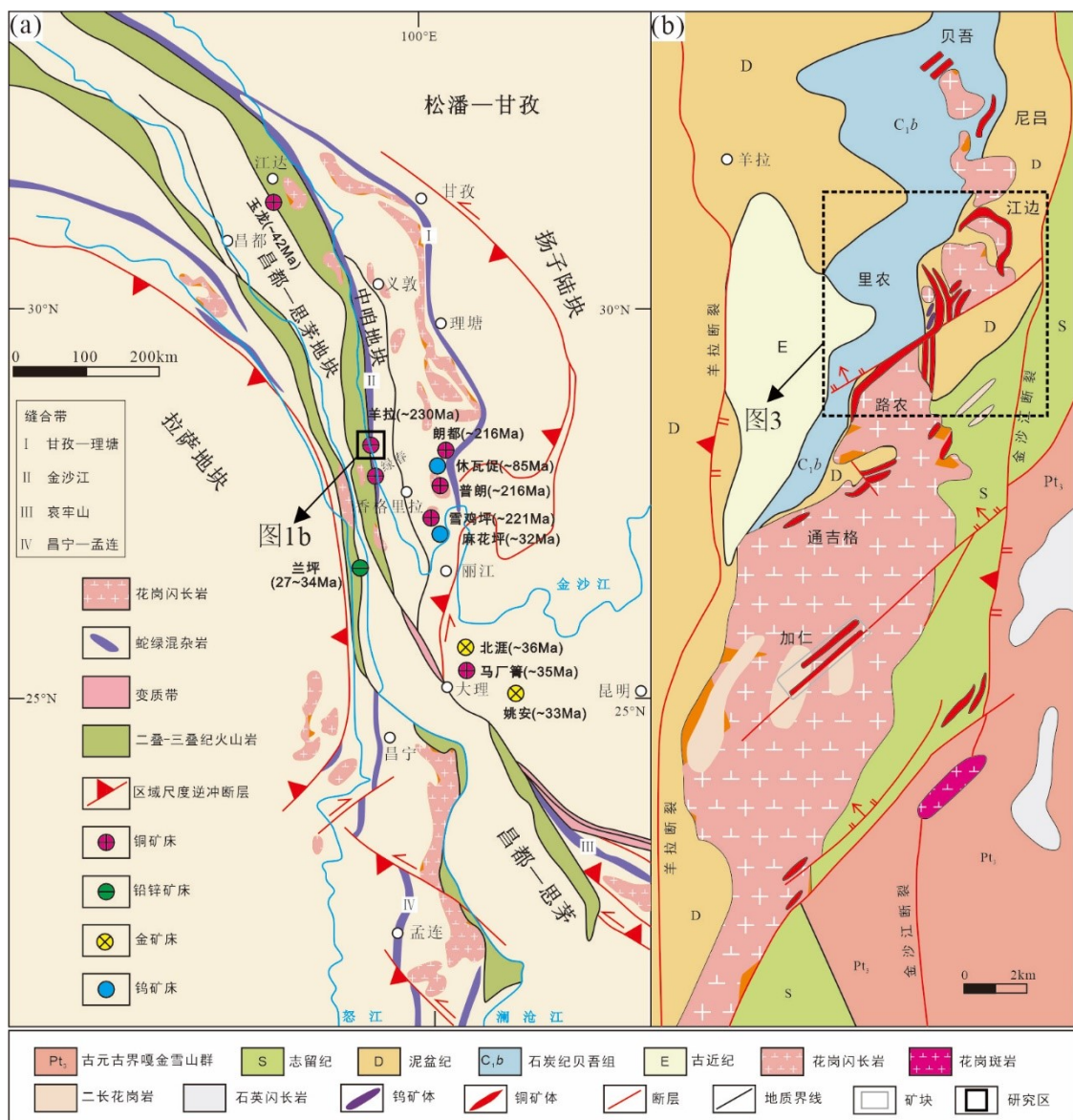


图1 西南“三江”地区大地构造 (a) 及矿床位置 (b) 地质简图 (修改自王新富等, 2023)

Fig. 1 Geological Sketch Map of Tectonics (a) and Ore Deposit Locations (b) in the “Sanjiang” Region,

“三江”特提斯成矿域是以金沙江、澜沧江、怒江为主体的“三江并流”区域，位于全球特提斯-喜马拉雅构造域东段的核心部位（王泽传等，2015；王保弟等，2021）。金沙江缝合带位于“三江”地区中部，东邻中咱-中甸地块，西邻江达-德钦-维西陆缘弧，向北在邓柯一带与甘孜-理塘带相接，向南延伸至哀牢山-绿春缝合带，主要由中咱微陆块、金沙江构造带、昌都-思茅微板块三个构造单元组成，经历了泥盆纪-石炭系地层的裂解、晚石炭世-早二叠世洋盆扩张、俯冲消减至闭合、二叠纪-三叠纪期间的碰撞造山作用对区内二叠系与三叠系地层产生了强烈改造（Zhu, 2015；杜丽娟等，2017；王保弟等，2021）。区内地层普遍经历了显著的构造变形与区域变质作用，导致原始地层层序紊乱、地层接触关系遭受破坏。金沙江构造带内，两侧火山弧带及稳定陆块基底保存相对完整，挤压型断裂构造、片理化岩石及糜棱岩化现象极为发育（Li et al., 2023）。本文研究的羊拉铜矿位于金沙江构造带中部，两侧分别以南北向的金沙江断裂和羊拉断裂为界夹持于中咱地块和昌都-思茅地块之间（图 1a）（潘家永等，2001；李波等，2021）。

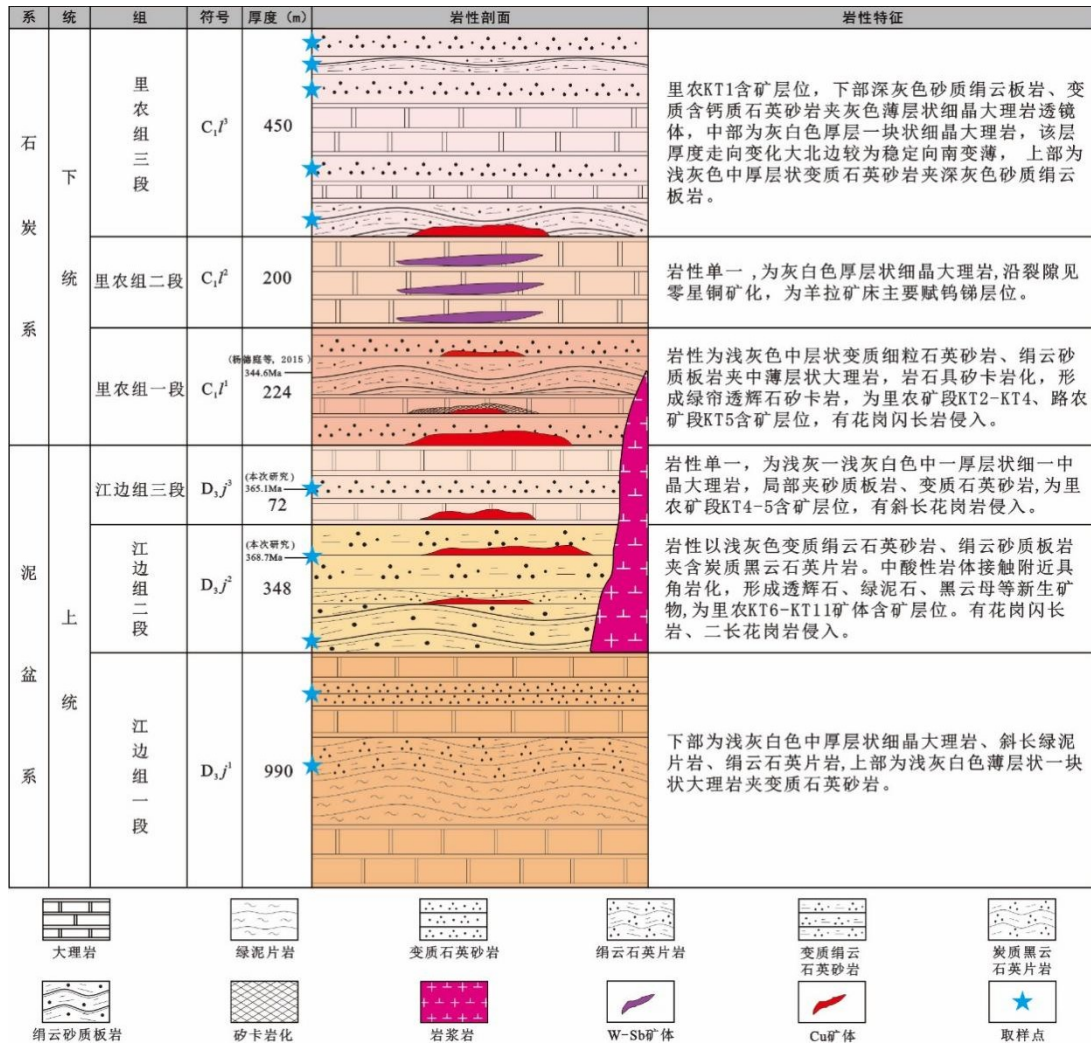


图2 羊拉铜矿赋矿地层岩性剖面柱状图 (修改自朱俊, 2011)

Fig. 2 Columnar Histogram of Lithologic Section for Ore-Bearing Stratum in Yangla Cu Deposit (modified after Zhu, 2011)

羊拉铜矿区域构造属于古特提斯洋盆闭合形成的造山带系统, 经历了洋盆打开、扩张、俯冲至最终闭合的复杂演化 (张圣超等, 2025)。矿区内出露主要地层为下古生界、上古生界、新生界, 其中具体包括志留系、泥盆系、石炭系、第三系、第四系。晚古生代时期, 研究区处于被动大陆边缘, 伴随大陆裂谷伸展作用, 形成了泥盆系-石炭系的碎屑岩-碳酸盐岩沉积建造 (曾礼传等, 2010; 张圣超等, 2025)。

羊拉铜矿区赋矿地层为泥盆系江边组 (D_3j) 与里农组 (C_1l), 主要由大理岩、变质石英砂岩、砂质板岩及绢云石英片岩等构成, 局部可见砂卡岩化 (图2), 可能反映了矿区沉积环境自浅海向相对较深水盆地的演化, 并在后期经历了多期变质改造 (朱俊等, 2009)。金沙江断裂、羊拉断裂等主干断裂及其次级构造共同制约了矿体的空间定

位, 构造叠加与有利岩性层位耦合, 为铜矿化提供了关键的导矿与容矿空间(战明国等, 1998; 潘桂棠等, 2003; 董涛, 2009)。

2 样品采集及分析方法

2.1 样品采集

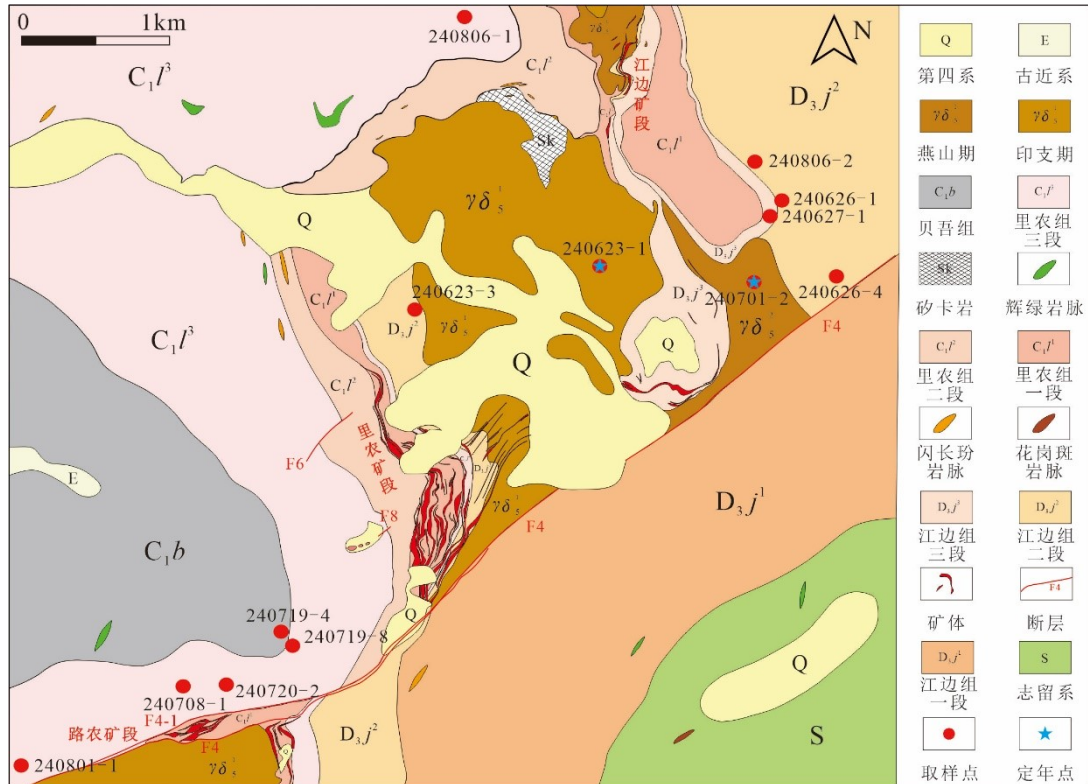


图3 羊拉铜矿赋矿地层样品采集分布图

Fig. 3 Distribution Map of Sample Collection for Ore-Bearing Stratum in Yangla Cu Deposit

本次研究在羊拉矿区路农、里农、江边矿段采集赋矿地层变质碎屑岩样 13 件, 主要为变质石英砂岩与砂质板岩。样品采集遵循层位控制原则, 重点采集矿区内泥盆系江边组 (D_3j) 和石炭系里农组 (C_1l) 地层, 确保样品具有代表性。其中, 用于碎屑锆石 U-Pb 定年的样品 2 件, 采于江边组二段 (D_3j^2)、三段 (D_3j^3); 用于砂岩碎屑统计的样品 13 件, 采于江边组二段 (D_3j^2)、三段 (D_3j^3) 和里农组二段 (C_1l^2)、三段 (C_1l^3) (如图 3)。地层内可见明显矿化, 坑道里见赋矿地层内含黄铁矿等 (图 4c-d)。采取的样品有赋矿地层完整度较好、含矿、石英含量高的变质碎屑岩 (图 4f-g), 进一步证实了所采样品为滇西北羊拉铜矿赋矿地层的变质碎屑岩。

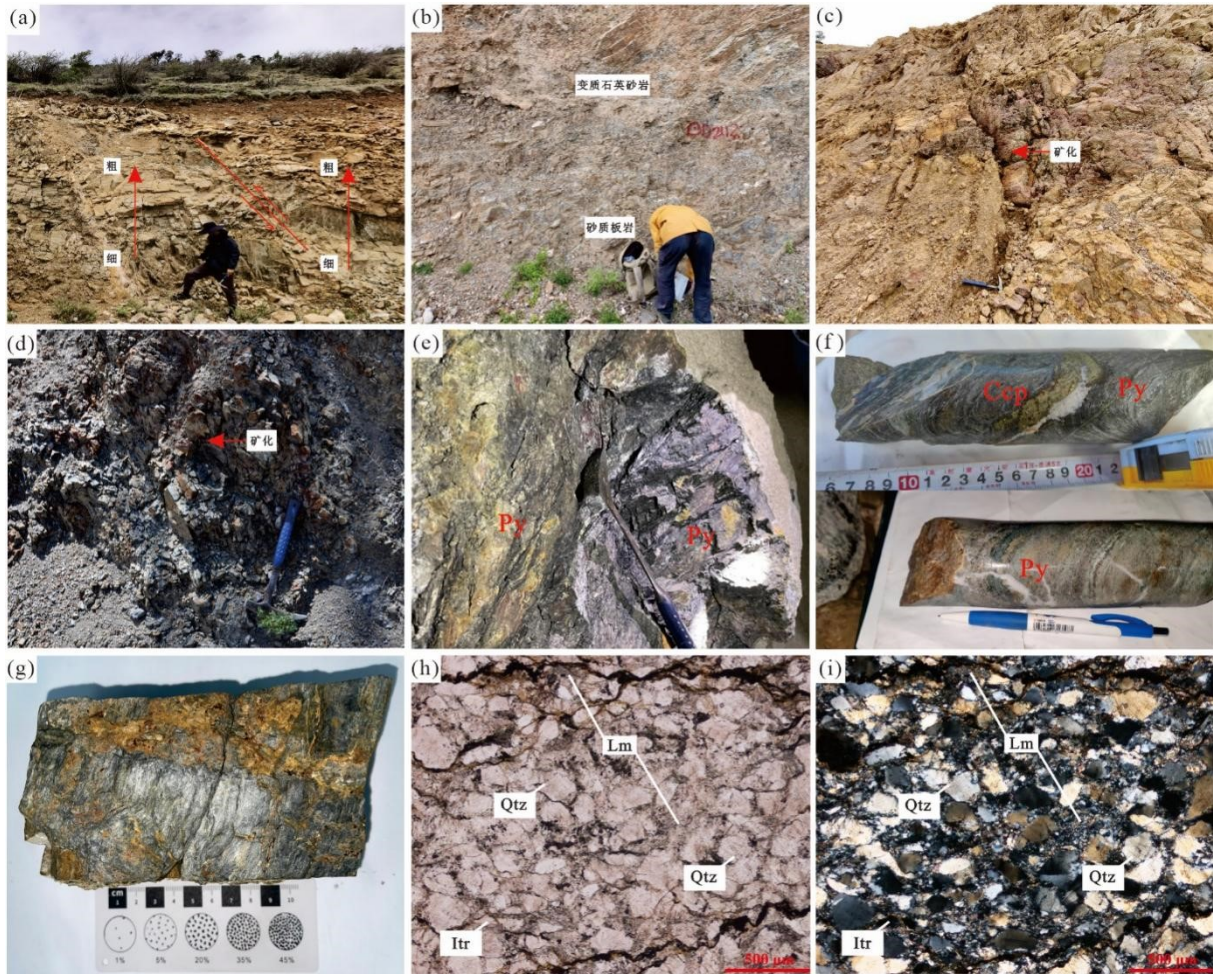


图4 滇西北羊拉铜矿赋矿地层变质碎屑岩野外和镜下照片

Fig.4 Field and Microscopic Photographs of Metamorphic Clastic Sedimentary Rocks in the Ore-Bearing Stratum of the Yangla Cu Deposit, Northwestern Yunnan

(a-d) 赋矿地层变质碎屑岩野外特征；(e) 坑道矿体周围赋矿地层变质碎屑岩；(f) 赋矿地层含矿变质碎屑岩岩心样；(g) 赋矿地层变质石英砂岩样品；(h-i) 赋矿地层变质石英砂岩镜下岩相学特征(对应手标本)。Qtz—石英；Itr—侵入岩岩屑；Lm—变质岩岩屑

(a-d) Field characteristics of metamorphosed clastic sedimentary rocks in the ore-hosting strata;(e) Metamorphosed clastic sedimentary rocks of the ore-hosting strata around the orebody in the drift; (f) Core sample of ore-bearing metamorphosed clastic sedimentary rocks from the ore-hosting strata;(g) Metamorphosed quartz sandstone sample from the ore-hosting strata;(h-i) Microscopic petrographic characteristics of metamorphosed quartz sandstone in the ore-hosting strata

图(a)为赋矿地层变质碎屑岩野外产状，变质石英砂岩与板岩韵律互层，显示层理及后期断裂改造痕迹；图(b)为变质石英砂岩与砂质板岩互层露头，构成复理石韵

律，指示原岩为深海—半深海浊积岩；图（c）为褐铁矿化蚀变带，沿片理及裂隙发育，是矿区重要的找矿标志；图（d）为板岩中的星点状黄铁矿化，反映原岩沉积时的还原环境及后期热液改造；图（e）为坑道内矿体围岩，板岩中发育细脉状黄铁矿化（Py），指示成矿流体沿片理渗透运移；图（f）为含矿变质碎屑岩岩心，可见黄铜矿（Ccp）与黄铁矿（Py）共生，呈细脉状、浸染状分布，为典型热液充填—交代型矿化；图（g）为变质石英砂岩手标本，浅灰色块状，具砂状结构，碎屑以石英为主；图（h）、（i）分别为变质石英砂岩手标本光薄片的正交偏光和单偏光下的镜下特征，碎屑以单晶石英（Qtz）为主，含少量侵入岩岩屑（Itr）和变质岩岩屑（Lm），颗粒呈次棱角—次圆状，部分变质岩岩屑定向排列，反映区域变质作用的改造。

2.2 分析方法

2.2.1 U-Pb 定年测试分析

锆石的单矿物分离在广州市拓岩检测技术有限公司完成。将人工重砂分离出的锆石制成以环氧树脂为基础的样品靶并进行抛光，抛光后对所研究锆石进行透射光、反射光照相，以观察其抛光面是否有裂隙等，然后进行阴极发光（CL）拍照，来反应锆石的内部结构特征，并根据锆石的内部结构特征选取U-Pb同位素测定分析部位。

锆石U-Pb定年测试分析在北京中科矿研检测技术有限公司完成，采用ESI NWR 193型193 nm ArF准分子激光剥蚀系统与Agilent 8900型ICP-MS联机进行。激光束斑直径为30 μm ，频率为6Hz，能量密度约4.5J/cm²。以氦气作为剥蚀物质载气，并与氩气混合后进入ICP-MS。每点分析包括约20秒气体空白和40秒样品剥蚀信号采集。实验中采用锆石标准91500（1062 Ma）作为外标进行分馏校正，并使用GJ-1（600 Ma）和Plešovice（337 Ma）作为盲样监控数据质量，微量元素含量以NIST SRM 610为外标、以Si为内标进行校准，原始数据使用ICPMSDataCal软件处理（Liu et al., 2010）。年龄小于1000 Ma的颗粒采用²⁰⁶Pb/²³⁸U年龄，大于1000 Ma者采用²⁰⁷Pb/²⁰⁶Pb年龄（Sircombe et al., 1999; Cawood and Nemchin, 2000）。本文仅采用谐和度大于95%的数据进行地质解释。

2.2.2 碎屑统计分析

选取滇西北羊拉铜矿赋矿地层变质碎屑岩代表性样品，经切片机切割为25mm×30mm标准规格岩块，采用环氧树脂真空浸渍加固后，通过磨片机逐步减薄至30 μm ，最终制备成透射光薄片，确保碎屑颗粒边界清晰、矿物光学特征完整显现。室内采用Gazzi Dickinson方法（Ingersoll et al., 1984）通过普通偏光显微镜进行其碎屑组成分析和统计。

为了客观的反映该样品组成特征，每块岩石样品统计的碎屑颗粒总数不得少于400 个（[Dockinson, 1985](#)）。由于砂岩在成岩作用和后期各种地质作用的共同影响下，砂岩中的岩屑、长石和石英碎屑发生破碎形成假杂基，导致砂岩中的碎屑组成含量发生变化，从而使得代表源区重要信息的碎屑组分发生破坏，不能客观的反映砂岩源区特征（[Cox and Lowe, 1996](#)）。对于多晶石英颗粒，尤其是发育变形纹的石英颗粒，在统计过程中直接将其归入变质岩岩屑中。因此，我们在砂岩碎屑成分统计过程中，主要选取了13块基质小于10%的砂岩进行其碎屑成分统计，碎屑统计在河北廊坊市宇弘岩矿科技有限公司完成。

3 分析结果

3.1 U-Pb 定年测试分析结果

对变质碎屑岩样品 240623-1 和 240701-2 分别按顺序分析 100 个点，根据筛选一共分别选用 55 个、63 个（见附表）。样品皆选取谐和度 >95%的数据点进行统计，并按照一般原则，对于 ≤ 1000 Ma 的数据点取 $^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$ 年龄值，>1000 Ma 的数据点则取 $^{207}\text{Pb}/^{206}\text{Pb}$ 年龄值。从锆石的阴极发光（CL）图像来看（图 6），锆石形态大小多样，长柱状、棱柱状、浑圆状和破碎状均有发育。绝大部分锆石具有一定的磨圆度，具有明显的震荡环带结构，显示碎屑锆石的特征。锆石颗粒普遍含有狭窄的生长边，个别生长边较宽，亦可作为独立颗粒出现，发育扇状环带或无-弱分带，属于变质成因。矿区赋矿地层变质碎屑岩碎屑锆石 Th/U 比值如图 5 所示，可见两个实验样品可用的锆石颗粒 Th/U 比值均大于 0.1，均为岩浆锆石，得到的年龄数据更加准确，具体分析结果见附表（[Hui et al., 2020](#)）。

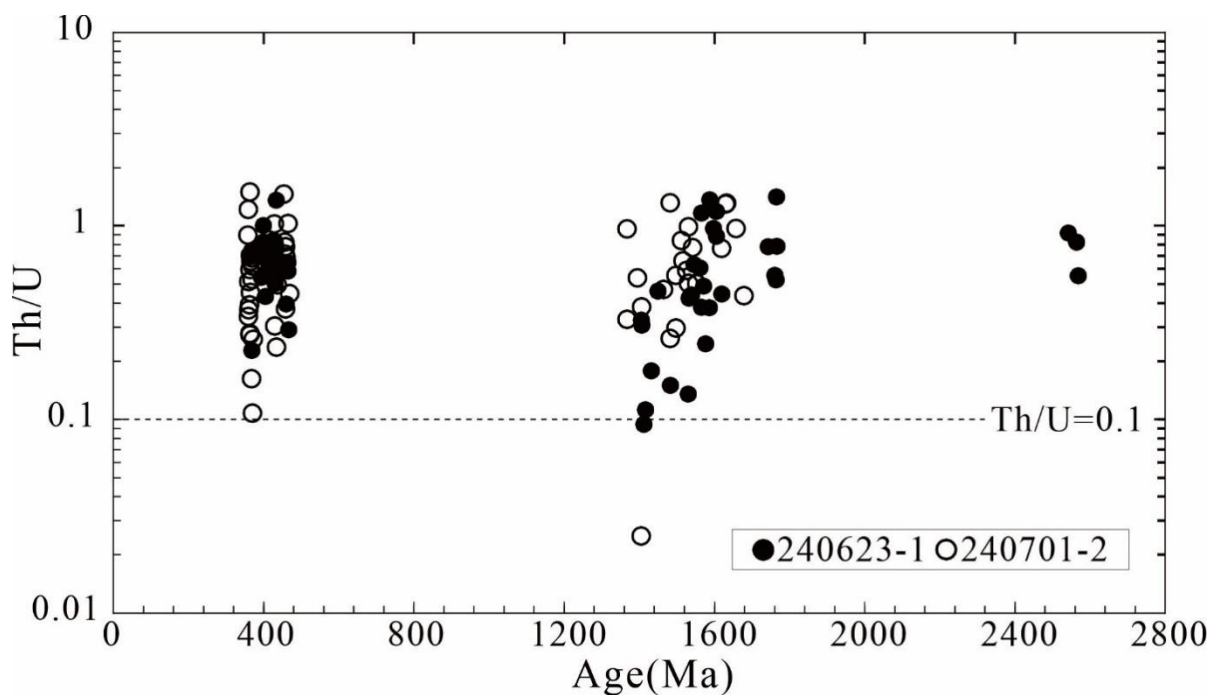


图 5 滇西北羊拉铜矿赋矿地层变质碎屑岩碎屑锆石颗粒 Th/U 比与 U-Pb 年龄对应图

Fig. 5 Correspondence Diagram of Th/U Ratio and U-Pb Age of Detrital Zircon Grains from Metamorphic Clastic Sedimentary Rocks in the Ore-Bearing Stratum of the Yangla Cu Deposit

样品240623-1为江边组三段 (D_3j^3) 变质石英砂岩, 采集于羊拉矿区里农矿段东南处。根据阴极发光图像 (CL) 特征可以将碎屑锆石大致分为3类: 长柱状、浑圆状和破碎状。分析测试100颗碎屑锆石中, 扣除45颗不谐和的年龄数据, 其余55颗年龄数据分布在谐和线附近, 所有锆石具有高的Th/U比值 (>0.1), 具有岩浆锆石Th/U比值特征。根据其谐和度 ($\geq 95\%$) 年龄结果划分为8组年龄段, 其峰值年龄分别为368 Ma、400 Ma、430 Ma、464 Ma、1429 Ma、1553 Ma、1760 Ma、2557 Ma。

样品 240701-2 为江边组二段 (D_3j^2) 变质石英砂岩, 其采集于羊拉矿区江边矿段西边。根据阴极发光图像 (CL) 特征可以将碎屑锆石大致分为 4 类: 长柱状、磨短柱状、浑圆状和破碎状。分析测试 100 颗碎屑锆石中, 扣除 41 颗不谐和的年龄数据和 1 颗变质锆石 ($Th/U < 0.1$), 其余 58 颗年龄数据分布在谐和线附近, 所有锆石具有高的 Th/U 比值 (>0.1), 具有岩浆锆石 Th/U 比值特征。根据其谐和度 ($\geq 95\%$) 年龄结果划分为 8 组年龄段, 其峰值年龄分别为 365 Ma、431 Ma、459 Ma、1390 Ma、1484 Ma、1532 Ma、1640 Ma、2550 Ma。

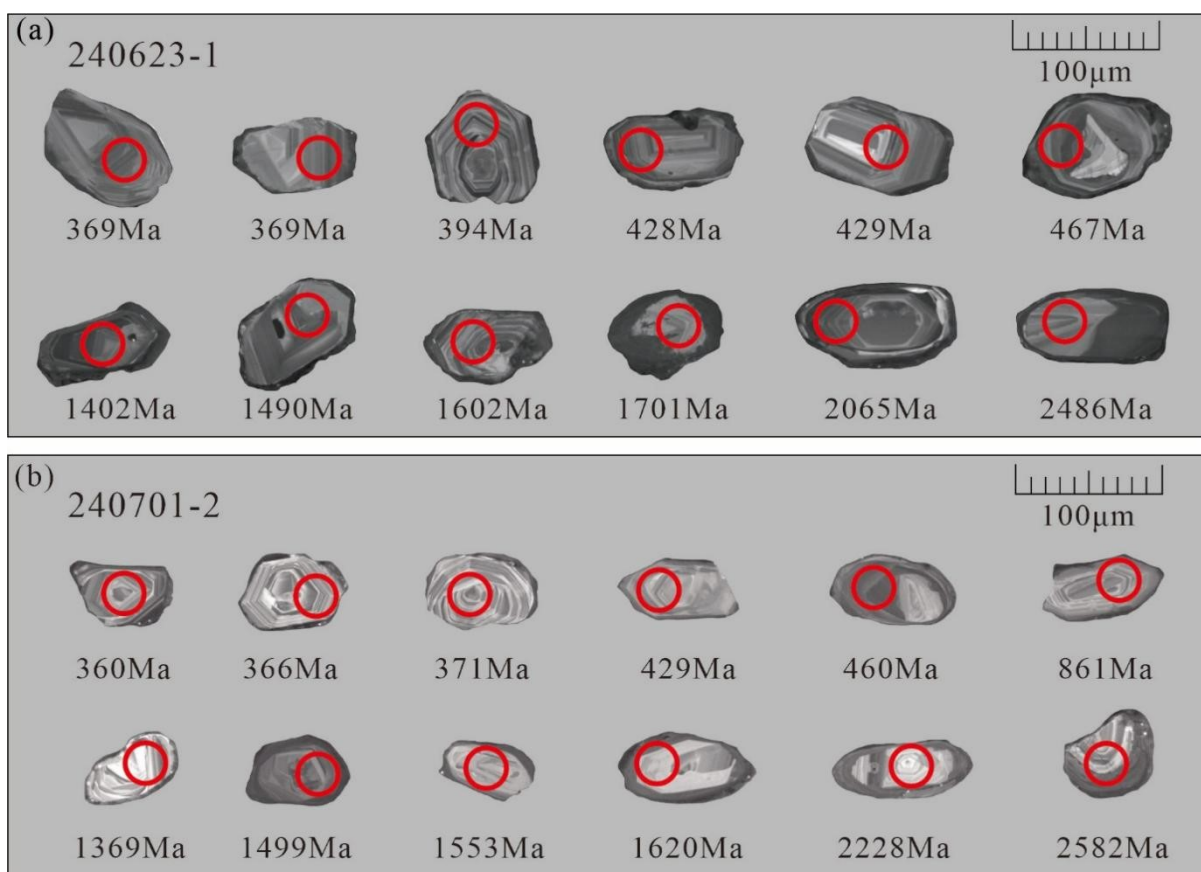


图 6 羊拉矿区变质石英砂岩中碎屑锆石的阴极发光(CL)图像

——带数字的圆圈为锆石测点位置和分析点号 (a)样品 240623-1 (b)样品 240701-2

Fig. 6 Cathodoluminescence (CL) images of detrital zircons in metamorphic quartz sandstone from the Yangla Mining Area

—— The circles with numbers indicate the analysis spot positions and numbers of zircons (a) Sample 240623-1 (b) Sample 240701-2

两个实验样品中的碎屑锆石 U-Pb 定年谐和图与年龄分布直方图如图 7 所示。从中获得的最年轻碎屑锆石峰值年龄分别集中于 369 Ma 和 365 Ma (图 7c-d), 对其中谐和性较好的最年轻峰值年龄数据点进行加权平均, 其加权平均年龄值分别为 368.7 ± 5.6 Ma 和 365.1 ± 2.4 Ma (图 7a-b)。

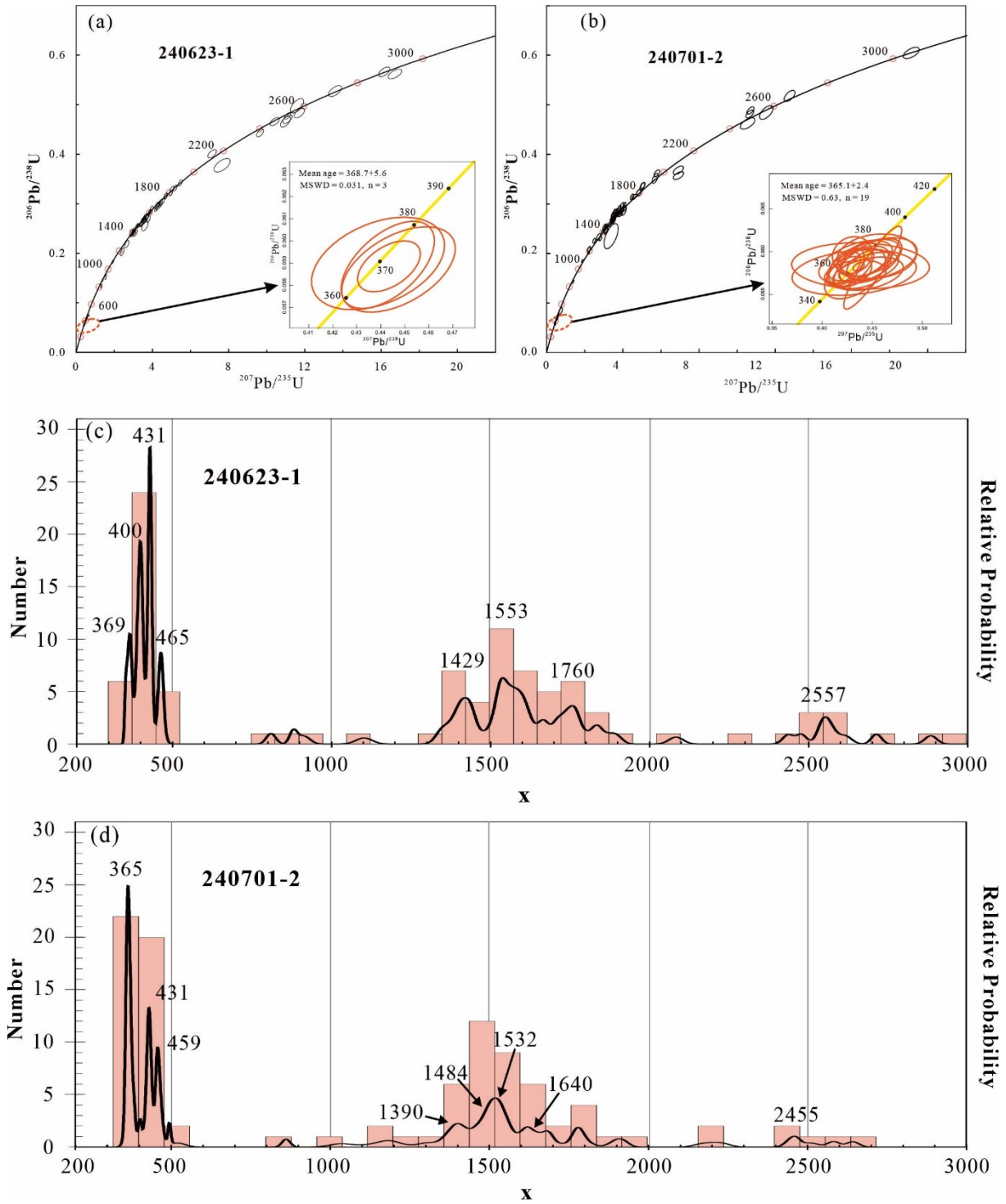


图 7 滇西北羊拉铜矿赋矿地层变质碎屑岩碎屑锆石 U-Pb 定年谐和图(a, b)与年龄分布直方图(c, d)
 Fig. 7 Concordia Diagrams (a, b) and Age Distribution Histograms (c, d) of U-Pb Dating for Detrital
 Zircons from Metamorphic Clastic Sedimentary Rocks in the Ore-Bearing Stratum of the Yangla Cu
 Deposit, Northwestern Yunnan

3.2 砂岩碎屑统计分析

为精准解析滇西北羊拉铜矿赋矿地层的沉积演化与物质组成特征，对采集于矿区赋矿地层的全部变质碎屑岩样品开展碎屑统计分析，样品层位集中于泥盆系江边组二段（ D_3j^2 ）和里农组三段（ C_1l^3 ）。在进行矿区变质碎屑岩薄片镜下观察时，可见变质石英砂岩薄片中含有石英（Qtz）、变质岩岩屑（Lm）、侵入岩岩屑（Itr）等透明矿物，胶结物含量 2~5%，基质含量 4~9%，整体碎屑成熟度中等（图 4h-i）。根据显微结构特征，排除掉变质程度较高的板岩、片岩，然后采用 Gazzi Dickinson 方法通过普通偏光显微镜对矿区赋矿地层变质碎屑岩进行碎屑组成分析和统计。

本研究针对羊拉矿床赋矿地层的 13 件变质碎屑岩样品，采用 Gazzi-Dickinson 点计数法（每样统计 300 颗有效碎屑颗粒），测定单晶石英（Qm）、总石英（Qt）、长石（F）、总岩屑（Lt）及特殊岩屑的相对含量，通过 Dickinson 系列三角图解（Qm-F-Lt、Qt-F-L、Qp-Lv-Ls、Qm-F-Lt）递进开展物源区构造背景判别，为区域构造演化与矿床物质来源提供约束（Dickinson, 1985）。碎屑统计结果如下（表 1）：

表 1 滇西北羊拉铜矿赋矿地层变质碎屑岩碎屑统计分析表

Tab. 1 Clast Statistical Analysis Table of Metamorphic Clastic Sedimentary Rocks in the Ore-Bearing Stratum of the Yangla Cu Deposit, Northwestern Yunnan

薄片号	层位	Qpq	Qm	Cht	Pl	K	Itr	Lv	Lm	Lss	M	Ls	Dol	Do	Gt	Hb	D	Cmt	Mat
240623-1-2	D_3j^2	5	195	19	11	34	4	5	18	5	3	0	0	0	0	0	0	2%	5%
240623-3-3	C_1l^2	3	211	11	7	23	3	3	5	2	10	0	0	0	0	0	0	2%	4%
240626-1-1	D_3j^2	2	220	16	12	59	2	4	12	1	2	0	0	0	0	0	0	3%	7%
240626-4-2	D_3j^2	1	223	14	11	24	2	1	10	4	2	0	0	0	0	0	0	2%	4%
240627-1-1	D_3j^3	4	222	12	13	21	3	4	14	2	3	0	0	0	0	0	0	3%	4%
240701-2-1	D_3j^2	7	189	10	14	26	4	5	11	2	1	0	0	0	0	0	0	3%	4%
240708-1-3	C_1l^3	6	186	15	28	65	3	4	12	3	5	0	0	0	0	0	0	4%	8%
240719-4-2	C_1l^3	6	211	10	16	28	4	1	14	3	2	0	0	0	0	0	0	2%	4%
240719-8-2	C_1l^3	7	178	15	28	67	4	6	13	3	7	0	0	0	0	0	0	5%	9%
240720-2-1	C_1l^3	3	220	17	21	34	5	3	16	2	5	0	0	0	0	0	0	3%	7%
240801-1-2	C_1l^3	5	210	18	28	63	3	3	14	4	6	0	0	0	0	0	0	4%	9%
240806-1-1	C_1l^3	7	225	20	14	26	3	3	11	5	4	0	0	0	0	0	0	3%	4%
240806-2-2	D_3j^2	4	214	16	23	27	2	4	13	1	3	0	0	0	0	0	0	2%	5%

注：Cht——硅质岩碎屑、Cmt——胶结物、D——重矿物、Do——单晶白云石碎屑、Dol——白云岩岩屑、Gt——海绿石、Hb——角闪石及辉石、Itr——侵入岩岩屑、K——钾长石、Lm——变质岩岩屑、Ls——灰岩岩屑、Lss——（变质）陆屑沉积岩岩屑、Lv——火山岩岩屑、M——单晶层状硅酸盐碎屑、Mat——基质、Pl——斜长石、Qpq——多晶石英、Qm——单晶石英

4 讨论

4.1 矿区沉积时代

滇西北羊拉铜矿的形成与金沙江特提斯构造演化密切相关(陈开旭等, 2002)。金沙江古特提期洋盆在晚古生代早泥盆世弧后盆地背景上出现拉张、裂陷,到晚泥盆世时,盆地拉张、裂陷程度最为剧烈,至早石炭世开始发生海底扩张(王保弟等, 2021; 张圣超等, 2025)。前人研究表明,书松堆晶辉长岩 SHRIMP 锆石 U-Pb 年龄为 343.5 ± 2.7 Ma, 认为其近似代表了金沙江古特提斯洋早期形成的时间(Jian et al., 2009)。东竹林层状辉长岩 LA-ICP-MS 锆石 U-Pb 年龄为 354 ± 3 Ma, 可以反映矿区在早石炭世就已发生海底扩张(王冬兵等, 2012)。结合从羊拉矿区嘎金雪山群的玄武岩样品中得到的锆石年龄为 362 Ma, 表明金沙江古特提斯洋在早石炭世已扩张形成洋壳, 暗示其裂解阶段应为更早的泥盆纪(Zhan et al., 1999; 路远发等, 2000)。最新研究表明, 羊拉铜矿赋矿围岩绿泥板岩 LA-MC-ICP-MS 锆石 U-Pb 定年获最年轻主要年龄峰 345 Ma, 限定其沉积时代为石炭纪, 而非以往认为的泥盆纪(杨德庭和王彦斌, 2015)。

碎屑锆石年代学是约束沉积地层最大沉积年龄的常用手段, 其中最年轻谱和年龄或其年龄群的加权平均年龄具有重要指示意义(Zhang et al., 2024)。然而, 对于经历高变质作用的赋矿地层, 后期变质增生锆石可能影响年龄解释(Cawood et al., 2012; Malusà et al., 2013; Vorhies et al., 2013)。本文结合已有及新获得的年代学数据, 排除了后期变质增生锆石的影响后($Th/U > 0.1$, 均为岩浆锆石), 对滇西北羊拉铜矿赋矿变质碎屑岩的沉积时代进行重新界定。

本文利用碎屑锆石最年轻峰值年龄约束原岩最早沉积时代, 结果显示滇西北羊拉铜矿赋矿地层包含晚泥盆世沉积记录。前人测定赋矿围岩里农组绿泥板岩年龄约为 345 Ma, 且在赋矿地层顶板大量出现的灰白色厚层状细晶大理岩中含有早石炭世中期牙形石 *Streptognathodus cancellosus*, 在里农矿体 KT2 顶板标志层的细晶大理岩中获得晚泥盆世牙形石 *Pdygnathus vanus staufferi*(Shear, 2000; 朱俊等, 2011; 杨德庭和王彦斌, 2015)。结合前人研究和本文研究结果表明, 滇西北羊拉铜矿赋矿地层变质碎屑岩的沉积时代横跨泥盆纪和石炭纪, 可能为晚泥盆世-早石炭世, 并非单一泥盆纪或石炭纪地层。

4.2 物源分析

长期以来, 羊拉铜矿赋矿地层的物源一直被认为来源于扬子陆块, 认为该区是在扬子陆块西缘的基底上经历了伸展、断陷俯冲消减、碰撞、多次的盆-山转换形成了多条

弧盆构造（何龙清等，1998；战明国等，1998；朱俊，2011；杨德庭和王彦斌，2015；Liu et al., 2022）。但缺少能够直接证明矿区物源来自扬子陆块的证据，其物源争议较大。研究区与其他地块碎屑锆石 U-Pb 年龄频谱对比是物源分析判断的重要手段和方法，通过与潜在物源区地块的年龄谱系对比，可直接追溯碎屑物质的搬运来源、判别物源贡献比例，是约束区域物质循环与构造耦合关系的关键手段（Fedó et al., 2003; Cawood et al., 2012; Stephan et al., 2019）。

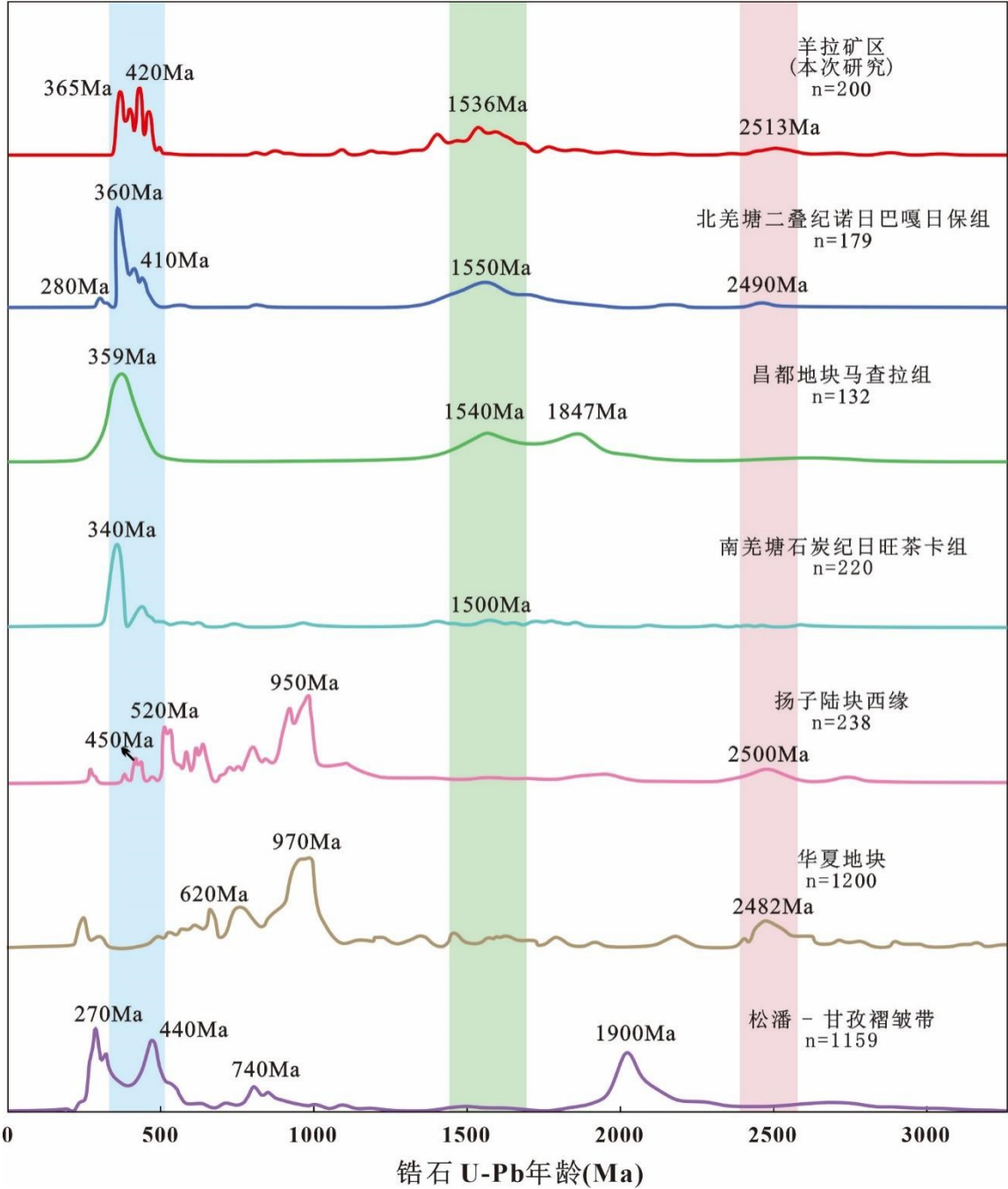


图 8 滇西北羊拉铜矿赋矿地层与其他地块碎屑锆石 U-Pb 年龄频谱对比图（其它地块数据引自

Weislogel et al., 2010; Wu et al., 2010; Han et al., 2021; Wang et al., 2021; Zou et al., 2024; Qiao et al., 2025)

Fig. 8 Comparison of detrital zircon U-Pb age spectra between the Ore-Bearing Stratum of the Yangla Cu Deposit, Northwestern Yunnan and Other Blocks (Data of other blocks are cited from Weislogel et al., 2010; Wu et al., 2010; Han et al., 2021; Wang et al., 2021; Zou et al., 2024; Qiao et al., 2025)

从锆石年龄对比来看，赋矿地层变质碎屑岩样品的碎屑锆石记录了部分古元古代（峰值年龄约 1760 Ma 和 2557 Ma）、中元古代（峰值年龄约 1484 Ma 和 1532 Ma）、中生代（峰值年龄约 365 Ma 和 430 Ma）的锆石年龄信息，这些锆石年龄记录了矿区赋矿地层物源区的地质事件。为了比较碎屑锆石的来源，我们使用了来自北美塘地块、昌都地块、南羌塘地块、扬子陆块西缘、华夏陆块和松潘—甘孜褶皱带的 U-Pb 锆石年龄与本文得到的 U-Pb 锆石年龄进行对比，从而判断羊拉地区的物源区（图 8）（Weislogel et al., 2010; Wu et al., 2010; Han et al., 2021; Wang et al., 2021; Zou et al., 2024; Qiao et al., 2025）。这些地块在晚古生代—中生代期间曾同属古特提斯洋东缘的泛华夏大陆群，是潜在的源区，其年龄谱系可为判别沉积物来源提供关键制约（耿全如等，2021）。北美塘二叠纪诺日巴嘎日保组古生代碎屑锆石 U-Pb 峰值年龄集中 360 Ma 和 410 Ma，与羊拉矿区的古生代碎屑锆石 U-Pb 峰值年龄相对应（Han et al., 2021）；扬子陆块西缘集中于 450 Ma 和 520 Ma，比矿区古生代峰值年龄更早（Zou et al., 2024）；昌都和南羌塘地块碎屑锆石 U-Pb 峰值年龄分别集中在 359 Ma 和 340 Ma，缺少矿区更早一期的峰值年龄（Wang et al., 2021; Qiao et al., 2025）。U-Pb 锆石年龄对比图表明，矿区赋矿地层碎屑锆石年龄分布与北美塘二叠纪诺日巴嘎日保组高度契合，其中晚古生代和中元古代也与昌都地块马查拉组契合，由此可以推断羊拉矿床赋矿地层物源区可能为北美塘—昌都地块（Pullen et al., 2008; Zou et al., 2024），而在晚古生代时南羌塘仍靠近冈瓦纳大陆，并非是北美塘、昌都、扬子陆块等所在的泛华夏大陆群，几乎无法参与到物源供给（吴福元等，2020；袁四化等，2020；耿全如等，2021）。

碎屑岩的石英、长石、岩屑组成是物源区构造背景的直接“物质响应”，不同构造环境（如大陆克拉通、再旋回造山带、火山弧）的母岩经风化、搬运后，其碎屑组分比例可能会呈现显著差异。羊拉铜矿赋矿地层变质碎屑岩根据碎屑组分分析，主要为变质长石石英砂岩和变质长石砂岩。砂岩样品中石英含量平均为 75%，长石 18%，岩屑 7%（图 9）；胶结物以泥质和钙质为主。样品颗粒分选度和磨圆度相对较差，主要呈次棱

角状-次圆状，显示未发生长距离搬运特征，平均粒径 0.15-0.35mm，以变余砂状结构，块状构造为主，可见弱定向构造、水平层理构造等。通常情况下，石英颗粒主要以单晶石英为主，并具有明显的波状消光特征，长石具相对较高的泥岩基质比例，常被蚀变为微小云母晶体。

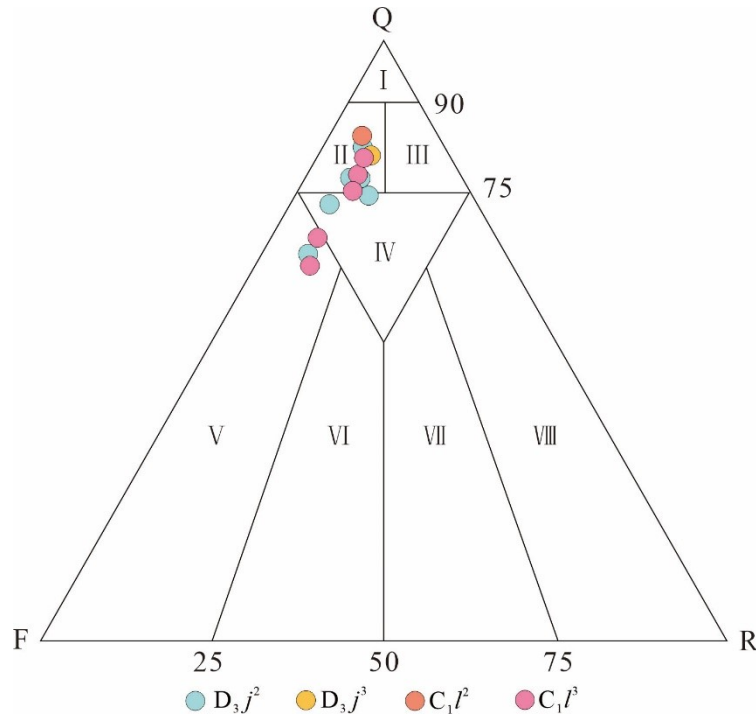


图9 滇西北羊拉铜矿赋矿地层岩性三元相图

Fig.9 Lithologic ternary diagram of the ore-hosting strata in the Yangla Cu Deposit, Northwestern Yunnan
 I -石英砂岩； II -长石石英砂岩； III-岩屑石英砂岩； IV-长石岩屑质石英砂岩； V-长石砂岩； VI-岩屑长石砂岩； VII-长石岩屑砂岩； VIII-岩屑砂岩

I -Quartz sandstone; II -Feldspathic quartz sandstone; III- Lithic quartz sandstone; IV-Feldspathic-lithic quartz sandstone; V -Arkose; VI-Lithic arkose; VII-Feldspathic lithic sandstone; VIII- Lithic sandstone

在 Dickinson (1983) 物源判别体系中，Q-F-L 图解 (图 10a) 显示羊拉矿床变质砂岩样品均投于“过渡大陆区”，Q、F、L 含量指示物源以大陆型物质为主，经历一定再旋回作用，构造活动性介于稳定克拉通与火山弧之间。Qt-F-L 图解 (图 10b) 进一步揭示样品位于“再循环造山带”与“大陆块”过渡带，具中等成熟度，反映物源为稳定陆块与再造山带的混合体系。为精细识别造山带类型与火山贡献，Qp-Lv-Ls 图解 (图 10c) 显示样品集中落入“碰撞造山带”与“混合造山带”区域，Lv 含量极低 (<8%)，证实无同期火山弧活动，物源主要来自大陆基底及再循环的沉积-变质岩系。这一结论在岩屑类型细分图 (图 10d) 中得到印证，样品同样指向碰撞-混合造山背景，Lv 和 Ls 含量少 (Dickinson and Seely, 1979; Dickinson et al., 1983)。

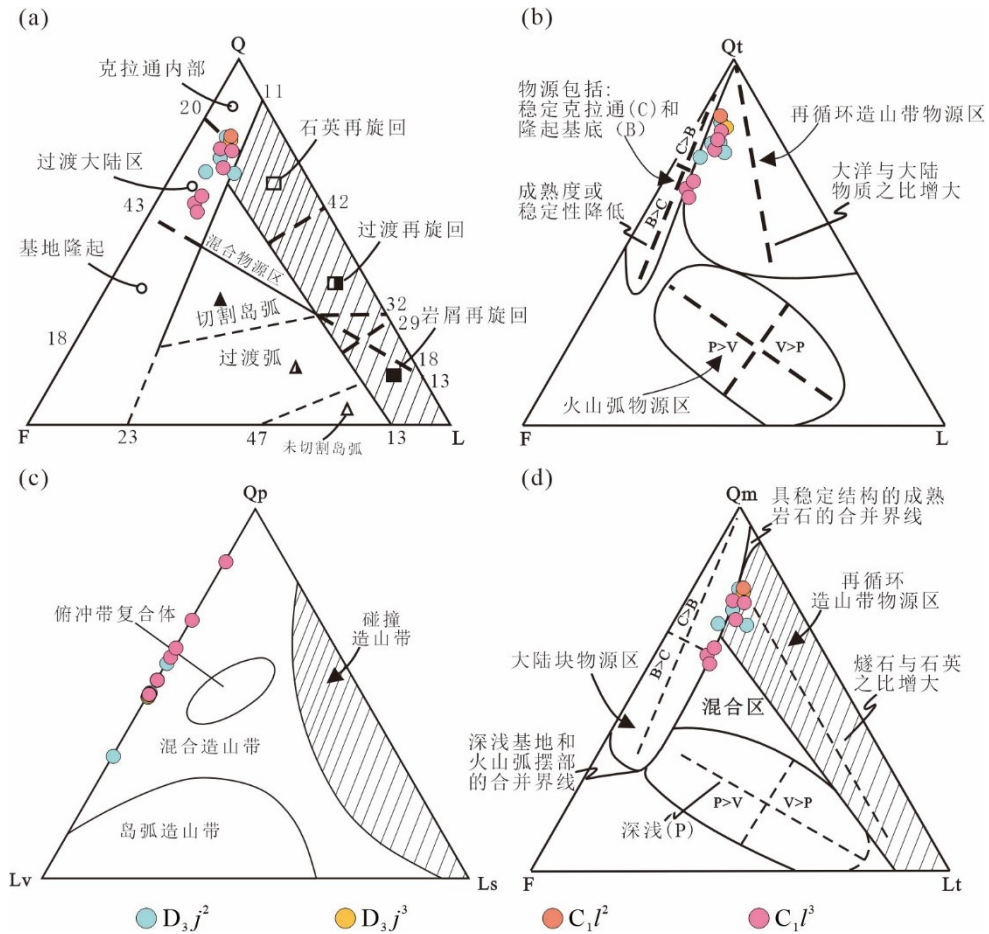


图 10 滇西北羊拉铜矿赋矿地层变质碎屑岩物源区构造背景判别图 (Dickinson, 1985)

(a) Q-F-L; (b) Qt-F-L; (c) Qp-Lv-Ls; (d) Qm-F-Lt

Fig. 10 Dickinson's Tectonic Setting Discrimination Diagram for Provenance of Metamorphic Clastic Sedimentary Rocks in the Ore-Bearing Stratum of the Yangla Cu Deposit, Northwestern Yunnan (Dickinson, 1985)

综合 Dickinson 系列图解分析结果表明, 矿区赋矿地层物源主要来自古老克拉通基底与再旋回造山带的混合, 构造上属于稳定大陆边缘的弱活动带, 无强烈火山弧活动, 但受区域构造影响存在明确再旋回作用, 与区域早古生代被动陆缘背景及泛非造山运动后续影响相符 (杨德庭和王彦斌, 2015; Liu et al., 2022)。本研究表明, 羊拉矿区赋矿地层形成于江边组-里农组被动大陆边缘背景下的碎屑岩-碳酸盐岩建造, 响应金沙江古特提斯洋裂谷伸展至初始扩张的构造阶段, 其物源属性与同期扬子陆块西缘存在根本差异, 扬子陆块西缘同期地层 (如龙门山、盐源地区) 以极高成熟度的石英砂岩 (石英含量常>90%) 为特征, 属典型的克拉通内稳定物源 (康滇古陆) 经长距离搬运的产物, Dickinson 图解投点集中分布于“稳定克拉通内部”区域 (张雄华等, 2021)。与之形

成鲜明对比的是，羊拉赋矿地层碎屑岩为长石石英砂岩（石英~75%、长石~18%、岩屑~7%）占比显著，指示中等沉积成熟度（图 9）。该组分特征与北美塘地块东缘被动大陆边缘盆地中同期沉积物的记录相符，在 Dickinson 图解中投于“再旋回造山带”与“稳定大陆块”过渡区，反映物源区为经历了抬升剥蚀的古老基底及先期沉积盖层，兼具稳定与弱活动属性。

北美塘作为位于原特提斯洋与古特提斯洋之间的独立陆块，在古生代时北美塘东侧可能受到了原特提斯洋俯冲闭合远程效应和金沙江古特提斯洋裂解-扩张演化的影响。其东缘可能因弧-陆碰撞、地体拼贴、洋盆打开等动力学过程，引发了地壳熔融或幔源岩浆的底侵作用，从而形成了~410 Ma 和~360 Ma 的岩浆岩体（Jiang et al., 2015; 解超明等, 2021）。羊拉矿区赋矿地层中~420 Ma 和~365Ma 的显著碎屑锆石峰值年龄，正是北美塘地块东侧被动陆缘在加里东晚期发生构造-岩浆活化和在晚泥盆-早石炭世金沙洋盆打开的直接物源记录。这些同期岩浆岩被剥蚀后，为盆地提供了主要的碎屑物质。这一解释不仅完美契合了锆石年龄谱的对比结果（与北美塘-昌都吻合，与扬子陆块西缘不符），也从根本上解构了前人将矿区物源与扬子陆块西缘加里东期造山带相关联的传统认识。因此，物源并非来自扬子陆块西缘，而是源于经历了独立“构造-岩浆”事件和金沙江古特提斯洋盆“裂解-扩张”的北美塘地块东侧被动陆缘。

综合表明，羊拉铜矿赋矿地层的物源区为北美塘-昌都地块，呈现北美塘和昌都共同供给的特征。在 460-400 Ma 正处在加里东期晚期，表明羊拉矿区物源区可能存在加里东期的岩浆活动。锆石年龄谱中 460-400 Ma 的峰值指示物源区存在加里东晚期岩浆活动。从区域背景看，该期岩浆活动可能主要响应原特提斯洋闭合引发的陆块碰撞或陆内造山事件（舒良树, 2006; Pullen et al., 2008）。而金沙江古特提斯洋盆的主体扩张则始于晚志留世之后，其演化可能继承了加里东期构造-岩浆活动形成的薄弱带（王鹤年和周丽娅, 2006; 于津海等, 2006; 张芳荣等, 2009）。在晚泥盆世-早石炭世，羊拉矿区处于被动大陆边缘，伴随大陆裂谷伸展作用，形成了江边组-里农组碎屑岩-碳酸盐岩沉积建造，与扬子陆块西缘被动陆缘地层有显著区别，进一步证实金沙江洋盆于晚泥盆-早石炭世已打开，两侧物源差异受洋盆隔绝。

4.3 沉积构造背景

从野外宏观构造看，矿区赋矿地层变质碎屑岩发育典型韵律层理构造，清晰呈现“细粒-粗粒”沉积旋回（图4a）。这种旋回性沉积是沉积动力与物源供给强度周期性

变化的耦合产物，指示沉积环境存在“低能-高能”的周期性转换，可能对应浅海潮汐环境下的砂泥互层沉积或深海浊流沉积的多期次叠加，推测羊拉矿床沉积环境为浅海相（Desjardins et al., 2012）。

韵律层理及其控制的“变质石英砂岩-砂质板岩”互层岩相组合（图4b），是判别其形成于浅海相前滨-近滨环境的关键证据。该韵律结构直接响应了古潮汐或风暴活动导致的水动力旋回，即低能期细粒泥质沉降与高能期粗粒砂质沉积的周期性交替（Bucher and Grapes, 2011; Desjardins et al., 2012）。自层序底部向顶部，石英波状消光增强、绢云母定向性显著等现象（图4h-i），清晰地记录了同一套地层在沉积成岩后，又经历了加里东期-海西期区域构造热事件引发的递进变质作用改造（李声固，1988；彭东等，2008）。因此，该地层完整经历了“浅海沉积-构造变质”的演化序列，此过程不仅形成了标志性的沉积-变质构造，也为后期热液成矿提供了至关重要的岩相与构造基础（刘彬等，2023）。

长期以来，北美塘地块古生代的古地理位置一直存在争议。一种观点基于连续裂解-漂移模型，认为北美塘与南美塘曾属同一构造单元，并于二叠纪之前或二叠纪期间从冈瓦纳大陆北缘裂离（Yin and Harrison, 2000; Gehrels et al., 2011; Yang et al., 2016; Song et al., 2017）。另一种观点则认为，北美塘地体在晚古生代已与南美塘分离，位于古特提斯洋北缘，并可能作为扬子地块的西延部分（Li and Zheng, 1993; Li et al., 2006; Pan et al., 2012）；或是自泥盆纪至三叠纪与扬子地块共同向北漂移（Metcalf, 2013）。最新研究表明，北美塘与南美塘在古生代（尤其泥盆纪-二叠纪）并非单一构造单元，而是被龙木错-双湖古特提斯洋分隔的两个独立构造单元，南北美塘地块的古生代地层、古生物组合存在显著差异，北美塘地块的古生代岩石具有华夏造山运动特征，其古生物组合以“暖水型生物群”为主，而南美塘地体的古生代岩石则具有冈瓦纳造山运动特征，其古生物组合以“冷水型生物群”为主（BGMR, 1993; Jin, 2002; Zhang et al., 2013; Zhang et al., 2016; 耿全如等，2021; Cheng, et al., 2024）。这些差异为北美塘地块独立的古地理演化路径提供了关键佐证，也为进一步厘清北美塘晚古生代的构造格局与古洋盆演化提供了重要线索。结合本次研究与滇西北羊拉铜矿赋矿地层变质碎屑岩的碎屑锆石研究及区域构造演化背景，滇西北羊拉铜矿赋矿地层物源为北美塘地块与昌都地块的混合输入，且受加里东期岩浆活动控制，这与矿区碎屑锆石年龄特征及北美塘和昌都地块加里东期构造演化背景相契合（杨德庭等，2013；杨德庭和王彦斌，2015; Jiang et al., 2015；解

超明等, 2021)。

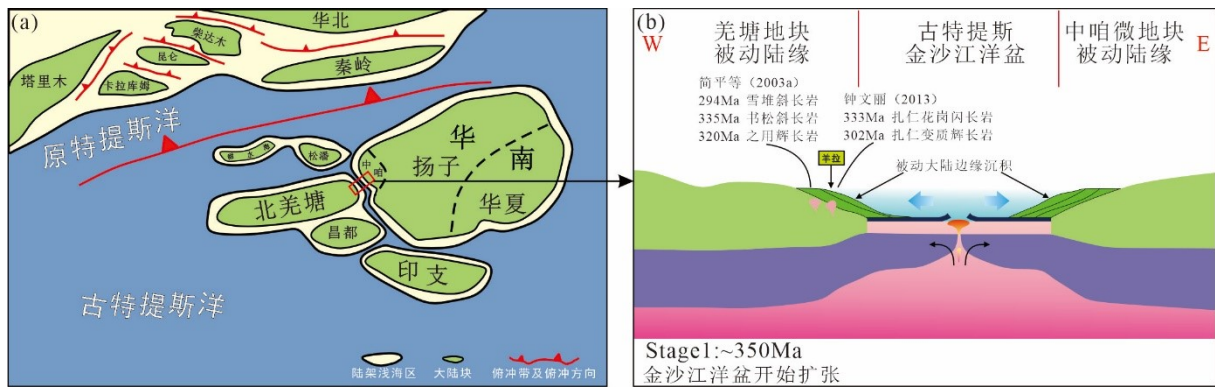


图 11 滇西北羊拉铜矿赋矿地层晚古生代古地理格局 (a) 与对应大地构造背景图 (b) (修改自 Li et al., 2023; 张圣超等, 2025)

Fig. 11 Map of Late Paleozoic Paleogeographic Framework (a) and Corresponding Tectonic Setting of the Ore-Hosting Strata (b) in the Yangla Cu Deposit, Northwestern Yunnan (modified from Li et al., 2023; Zhang et al., 2025)

通过本文研究分析, 结合前人研究和全球大陆演化事件, 对羊拉铜矿赋矿地层形成时期的古地理格局与大地构造背景提供依据 (图 11)。晚泥盆世-早石炭世, 羊拉铜矿所在区域处于古特提斯洋北缘关键构造转换带: 西侧北羌塘地块与昌都地块呈“软碰撞”后的拼合状态, 受加里东期岩浆活动 (430~400 Ma) 驱动, 地块边缘地壳抬升并发生强烈剥蚀, 构造-岩浆活化带与再旋回造山带共同构成物源供给中心, 为沉积盆地提供了以变质杂岩和岩浆岩为主的碎屑物质; 随着原特提斯洋闭合与古特提斯洋初始扩张, 该区域表现为弱伸展背景, 形成一套碎屑岩-碳酸盐岩混合沉积建造 (朱俊, 2011; Li et al., 2023)。这种构造-沉积特征类似于现代红海型陆间洋盆的被动边缘模式, 而非典型的活动陆缘或弧后盆地。最新研究表明, 热水沉积成岩成矿作用可发育于构造伸展带、大洋中脊、海沟、岛弧、弧后盆地、大陆裂谷及陆内断裂活动带等构造环境; 其中, 发育于大陆边缘断陷槽及毗邻碳酸盐台地深陷洼地、与潮间低能带共生的礁滩浅海相盆地, 是热水沉积矿床形成的最有利环境 (李金高等, 2001; 王玉奇, 2009; 苏特等, 2025)。据此推断, 羊拉铜矿具备热水沉积成矿的构造前提。

综合碎屑统计结果, 羊拉赋矿地层为红海型陆间洋盆稳定大陆边缘浅海台地环境。该属性响应晚古生代早期原特提斯洋闭合与古特提斯洋初始扩张的构造体制转换。原特提斯洋闭合 (~420 Ma) 促使北羌塘、昌都等地块拼合, 形成刚性陆缘基底。随之而来

的古特提斯洋裂解-扩张, 在晚泥盆世-早石炭世表现为陆缘弱伸展, 而非强烈的岩浆弧活动。因此, Dickinson 图解中极低的火山岩屑含量 ($L_v < 8\%$)、高石英 ($Q_m=58-65\%$) 及“再旋回造山带”特征, 正是该弱伸展背景下古老基底与早期沉积盖层缓慢隆升、剥蚀的物源响应。这一构造-沉积背景为后续岩浆-热液活动与成矿提供了重要的预备条件。

5 结论

(1) 滇西北羊拉铜矿赋矿地层变质碎屑岩的碎屑锆石最年轻加权平均年龄 ($365.1 \pm 2.4 \text{ Ma}$ 、 $368.7 \pm 5.6 \text{ Ma}$) 限定最大沉积年龄为晚泥盆世, 结合前人牙形石与岩浆岩年代学数据, 确认地层沉积横跨晚泥盆世-早石炭世, 与金沙江古特提斯洋“裂解-扩张”演化过程一致。

(2) 赋矿地层物源区为北羌塘-昌都地块, 而非前人认为的扬子陆块西缘。碎屑锆石 U-Pb 年龄谱系显示显著的古元古代 ($\sim 1760 \text{ Ma}$ 、 $\sim 2557 \text{ Ma}$)、中元古代 ($\sim 1484 \text{ Ma}$ 、 $\sim 1532 \text{ Ma}$) 以及古生代 ($\sim 430 \text{ Ma}$ 、 $\sim 365 \text{ Ma}$) 峰值年龄, 与北羌塘及昌都地块高度吻合, 碎屑组分 Dickinson 图解分析进一步表明, 物源区为“稳定大陆块-再旋回造山带”混合体系, 修正了以往将矿床物源归因于扬子陆块西缘的认识, 进一步证实金沙江洋盆于晚泥盆-早石炭世已打开, 两侧物源差异受洋盆隔绝。

(3) 羊拉矿床赋矿地层岩石组合、沉积构造及碎屑组分特征共同指示, 赋矿地层形成于稳定的浅海沉积环境。Dickinson 图解投点落入稳定大陆边缘弱活动带, 含少量火山碎屑, 成熟度中等, 反映物源区为经历缓慢隆升的古老基底与先期沉积盖层。结合前人研究结果, 认为羊拉地区江边组-里农组碎屑岩-碳酸盐地层形成于金沙江古特提斯洋“裂解-扩张”演化过程中红海型陆间洋盆稳定大陆边缘浅海台地环境, 且具备热水沉积成矿的构造前提。

致谢: 在野外工作中, 得到云南迪庆矿业开发有限公司刘小青、刘凤泽等工程师的大力支持和帮助; 锆石 U-Pb 同位素测年是在北京中科矿研检测技术有限公司完成的, 碎屑统计实验是由廊坊市宇弘岩矿科技有限公司完成的; 论文成稿过程中, 得到了昆明理工大学的邢令老师和杜研博士的悉心指导; 同时, 匿名审稿老师和编辑部老师提出了宝贵的修改意见, 在此一并表示诚挚感谢!

References

Bucher, K., Grapes, R., 2011. Petrogenesis of Metamorphic Rocks. *Springer-Verlag*, 8th ed.: 1-428.
doi:10.1007/978-3-540-74169-5.

- Bureau of Geology and Mineral Resources of Xinjiang Uygur Autonomous Region, 1993. Regional geology of Xinjiang Uygur autonomous region. *Geol. Mem. Geol. Surv. China*, Ser. 1, 32.
- Cawood, P. A., Nemchin, A. A., 2000. Provenance record of a rift basin: U/Pb ages of detrital zircons from the Perth Basin, Western Australia. *Sedimentary Geology*, 134(3): 209-234. doi:10.1016/S0037-0738(00)00044-0.
- Cawood, P. A., Hawkesworth, C. J., Dhuime, B. , et al ., 2012. Detrital zircon record and tectonic setting. *Geology*, 40(10): 895-898. doi: 10.1130/G32945.1.
- Cheng, X., Wei, B. T., Jiang, N., et al ., 2024, Evolution of the North Qiangtang Block in the late Paleozoic: Paleomagnetism and its tectonic implications. *Bulletin*, 136(1-2): 707-724. doi: 10.1130/B36825.1.
- Cox, R., Lowe, D. R., 1996. Quantification of the Effects of Secondary Matrix on the Analysis of Sandstone Composition, and a Petrographic-Chemical Technique for Retrieving Original Framework Grain Modes of Altered Sandstones. *Journal of Sedimentary Research*, 66(3): 548-555. doi: 10.1306/D42683A1-2B26-11D7-8648000102C1865D.
- Desjardins, P. R., Buatois, L. A., Mangano, M. G., 2012. Tidal flats and subtidal sand bodies. *Developments in Sedimentology*, 64, 529-561. doi: 10.1016/B978-0-444-53813-0.00018-6.
- Dickinson, W. R., Seely, D. R. 1979. Structure and stratigraphy of forearc regions. *AAPG Bulletin*, 63(6):809-814. doi: 10.1306/C1EA55AD-16C9-11D7-8645000102C1865D.
- Dickinson, W. R., Beard, L. S., Brakenridge, G. R., et al., 1983. Provenance of North American Phanerozoic sandstones in relation to tectonic setting. *GSA Bulletin*, 94(2): 222-235. doi: 10.1130/0016-7606(1983)94<222:PONAPS>2.0.CO;2.
- Dickinson, W. R., 1985. Interpreting Provenance Relations from Detrital Modes of Sandstones. *Provenance of Arenites*. Dordrecht: Springer Netherlands, 1985: 333-361. doi: 10.1007/978-94-017-2809-6_15.
- Fedo, C. M., Sircombe, K. N., Rainbird, R. H, 2003. Detrital zircon analysis of the sedimentary record. *Reviews in mineralogy and geochemistry*, 53(1): 277-303. doi: 10.2113/0530277.
- Gehrels, G., Kapp, P., DeCelles, P., et al., 2011. Detrital zircon geochronology of pre-Tertiary strata in the Tibetan-Himalayan orogen. *Tectonics*, 30 (5). doi: 10.1029/2011TC002868.
- Han, W. H., Ma, H. Z., Fang, W. X., et al., 2021. U-Pb Detrital Zircon Ages and Geochemical Features of the Jingxing Formation, (Qamdo Basin, Tibet: Implications): Inferences for the Metallogenic Model of

- the East Tethys Evaporite. *Minerals*, 11: 745. doi: 10.3390/min11070745.
- Hui, B., Dong, Y. P., Neubauer, F., et al., 2020. Detrital zircon U–Pb ages of metasedimentary rocks from the Neoproterozoic Zhoutan Group in the northern Cathaysia Block (South China) : Provenance and tectonic implications. *International Geology Review*, 1-17. doi: 10.1080/00206814.2020.1752827.
- Ingersoll, R. V., Graham, S. A., Suczek, C. A., 1984. The effect of grain size on detrital modes: A test of the Gazzi-Dickinson point-counting method. *Journal of Sedimentary Petrology*, 54(1): 103-116. doi: 10.1306/212F83B9-2B24-11D7-8648000102C1865D.
- Jian, P., Liu, D., Sun, X., 2003. SHRIMP Dating of Carboniferous Jinshajiang Ophiolite in Western Yunnan and Sichuan: Geochronological Constraints on the Evolution of the Paleo-Tethys Oceanic Crust. *Acta Geologica Sinica*, 77(4) : 969-1001.
- Jiang, Q. Y., Li, C., Su, L., et al., 2015. Carboniferous arc magmatism in the Qiangtang area, northern Tibet: Zircon U–Pb ages, geochemical and Lu–Hf isotopic characteristics, and tectonic implications, *Journal of Asian Earth Sciences*, 100: 132-144. doi: 10.1016/j.jseas.2015.01.012.
- Jin, X. C., 2002. Permo-Carboniferous sequences of Gondwana affinity in southwest China and their paleogeographic implications. *Journal of Asian Earth Sciences*, 20(6): 633-646. doi: 10.1016/S1367-9120(01)00084-0.
- Li, B., Wang, X. F., Tang, G., et al., 2021. S–Pb isotopes and tectono-geochemistry of the Lunong ore block, Yangla large Cu deposit, SW China: Implications for mineral exploration. *Ore Geology Reviews*, 136: 104249. doi: 10.1016/j.oregeorev.2021.104249.
- Li, C., Huang, X. P., Zhai, Q. G., et al., 2006. The Longnu Co-Shuanghu-Jitang plate suture and the northern boundary of Gondwanaland in the Qinghai-Tibet plateau. *Earth Science Frontiers*, 13 (4): 136–147.
- Li, C., Zheng, A. Z., 1993. Paleozoic stratigraphy in the Qiangtang region of Tibet: relations of the Gondwana and Yangtze continents and ocean closure near the end of the Carboniferous. *International Geology Review*, 35 (9), 797–804. doi: 10.1080/00206819309465558.
- Li, W. C., Pan, G. T., Hou, Z. Q., et al., 2023. Metallogenic Theory and Exploration Technology of Multi-Arc-Basin-Terrane Collision Orogeny in “Sanjiang” Region, Southwest China. In: The China Geological Survey Series. *Springer Singapore*. doi: 10.1007/978-981-99-3652-6.
- Li, Y. J., Ying, Y. C., Li, W. C., et al., 2024. Genesis of W mineralization in the Yangla Cu-pol

- ymetallic Deposit(NW Yunnan, China): Constraints from scheelite microstructure, trace element, U-Pb dating and Sr isotope geochemistry. *Ore Geology Reviews*, 169: 106098. doi: 10.1016/j.oregeorev.2024.106098.
- Liu, H., Li, W. C., Liu, H., et al., 2022. Petrogenesis and tectonic implications of Maoniushan monzogranites in the western margin of the Yangtze Block, Southwest China: Constraints from geochemistry, zircon U–Pb geochronology, and Hf–Nd–Sr isotopes. *Geological Journal*, 57(4): 1638-1657. doi: 10.1002/gj.4367.
- Liu, Y., Gao, S., Hu, Z., 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. *Journal of Petrology*, 51(1-2): 537-571. doi: 10.1093/petrology/egp082.
- Malusà, M. G., Garzanti, E., Andò, S., et al., 2013. Bias in detrital zircon geochronology and thermochronometry. *Chemical Geology*, 359: 90-107. doi: 10.1016/j.chemgeo.2013.09.016.
- Metcalfe, I., 2013. Gondwana dispersion and Asian accretion: tectonic and palaeogeographic evolution of eastern Tethys. *Journal of Asian Earth Sciences*, 66(8): 1-33. doi: 10.1016/j.jseaes.2012.12.020.
- Pan, G. T., Wang, L. Q., Li, R. S., et al., 2012. Tectonic evolution of the Qinghai-Tibet Plateau. *Journal of Asian Earth Sciences*, 53: 3-14. doi: 10.1016/j.jseaes.2011.12.018.
- Pullen, A., Kapp, P., Gehrels, G. E., et al., 2008. Triassic continental subduction in central Tibet and Mediterranean-style closure of the Paleo-Tethys Ocean. *Geology*, 36(5) : 351-354. doi: 10.1130/G24435A.1.
- Qiao, J. W., Fu, X. R., Zhao, X. C., et al., 2025. Provenance of the Carboniferous Clastic Rocks in the Eastern Tibetan Plateau: Insights Into the Palaeogeography and Tectonic Evolution of the Northern Margin of East Gondwana. *Geological Journal*. doi: 10.1002/gj.70015.
- Shear, W. A., 2000. Gigantocharinus szatmaryi, a new trigonotarbid arachnid from the late Devonian of North America (Chelicerata, Arachnida, Trigonotarbida) . *Journal of Paleontology*, 74(1): 25-31.
- Sircombe, K., Pickard, A., Nelson, D., 1999. Detrital zircon U-Pb geochronology of the Capricorn Orogen: Implications for crustal evolution and provenance of the Hamersley Basin, Western Australia. *Australian Journal of Earth Sciences*, 46(5): 687-701.

- Song, P. P., Ding, L., Li, Z. Y., et al., 2017. An early bird from Gondwana: Paleomagnetism of lower Permian lavas from northern Qiangtang (Tibet) and the geography of the Paleo-Tethys. *Earth and Planetary Science Letters*, 475: 119–133. doi: 10.1016/j.epsl.2017.07.023.
- Stephan, T., Kroner, U. W., Romer, R. L., 2019. The pre-orogenic detrital zircon record of the Peri-Gondwanan crust. *Geological Magazine*, 156(2): 281-307. doi: 10.1017/S0016756818000031.
- Vorhies, C. R., Valley, J. W., Whitehouse, M. J., 2013. Zircon growth and recrystallization during progressive metamorphism, Barrovian zones, Scotland. *American Mineralogist*, 98(1): 219-230. doi: 10.2138/am.2013.4240.
- Wang, X. F., Li, B., Xiang, Z. P., et al., 2020. Chemical compositions of sulfides in the porphyry Cu ores, Yangla Cu deposit, Yunnan, China: implication for ore genesis. *Acta Geochimica*, 39(06): 947-972. doi: 10.1007/s11631-020-00433-3.
- Wang, W., Cawood, P. A., Pandit, M. K., et al. 2021. Fragmentation of South China From Greater India During the RodiniaGondwana Transition. *Geology*, 49(2): 228-232. doi: 10.1130/G48308.1.
- Weislogel, A. L., Graham, S. A., Chang, E. Z., et al., 2010. Detrital zircon provenance from three turbidite depocenters of the Middle–Upper Triassic Songpan-Ganzi complex, central China: Record of collisional tectonics, erosional exhumation, and sediment production. *Bulletin*, 122(11-12): 2041–2062. doi: 10.1130/B26606.1.
- Wu, L., Jia, D., Li, H. B., et al., 2010. Provenance of detrital zircons from the late Neoproterozoic to Ordovician sandstones of South China: implications for its continental affinity. *Geological Magazine*, 147(6): 974–980. doi: 10.1017/S0016756810000725.
- Yang, X. F., Cheng, X., Zhou, Y. N., et al., 2016. Paleomagnetic results from Late Carboniferous to Early Permian rocks in the northern Qiangtang terrane, Tibet, China, and their tectonic implications. *Science China Earth Sciences*, 60(1): 124–134. doi: 10.1007/s11430-015-5462-7.
- Yin, A., Harrison, T. M., 2000. Geologic evolution of the Himalayan-Tibetan Orogen. *Annual review of earth and planetary sciences*, 28(1): 211-280. doi: 10.1146/annurev.earth.28.1.211.
- Zhan, M. G., Lu, Y. F., Chen, K. X. et al., 1999. Genesis of Yangla Banded Skarn-Hosted Copper Deposit in Tethys Orogenic Belt of Southwestern China. *Journal of China University of Geosciences*, 10(1): 58-61.
- Zhang, C., Cui, Y. C., Liu, C. G. et al., 2024. Early Triassic Legoupil Formation in Schmidt Peninsula,

Antarctic Peninsula: Provenance and Depositional Settings. *Journal of Earth Science*, 35(2): 317-331.
doi: 10.1007/s12583-021-1601-1.

Zhang, Y. C., Shi, G. R., Shen, S. Z., 2013. A review of Permian stratigraphy, palaeobiogeography and palaeogeography of the Qinghai-Tibet Plateau. *Gondwana Research*, 24(1): 55-76. doi: 10.1016/j.gr.2012.06.010.

Zhang, Y. C., Shen, S. Z., Zhai, Q. G., et al., 2016. Discovery of a Sphaeroschwagerina fusuline fauna from the Raggyorcaka Lake area, northern Tibet: implications for the origin of the Qiangtang Metamorphic Belt, *Geological Magazine*, 153(3): 537-543. doi: 10.1017/S0016756815000795.

Zhu, J. J., Hu, R., Richards, J. P., et al., 2015. Genesis and magmatic-hydrothermal evolution of the Yangla skarn Cu deposit, Southwest China. *Economic Geology*, 110(3): 631-652. doi: 10.2113/econgeo.110.3.631.

Zou, H., Li, H., Li, Z., et al., 2024. Integrated detrital rutile and detrital zircon ages: a new perspective on the tectonic evolution of South China. *National Science Review*, 11(12): nwae356. doi:10.1093/nsr/nwae356.

中文参考文献

陈开旭, 路远发, 魏君奇, 等, 2002. 滇西北羊拉铜矿区成矿地质背景及多期成矿作用. *矿床地质*, 21(S1): 361-364.

Chen, K. X., Lu, Y. F., Wei, J. Q., et al., 2002. Geological Settings and Multiple Mineralization of Yangla Copper Deposit, Northwestern Yunnan. *MINERAL DEPOSITS*, 21(S1): 361-364 (in Chinese with English abstract).

董涛, 2009. 德钦县羊拉铜矿床地球化学特征及成因研究(硕士学位论文). 昆明: 昆明理工大学.

Dong, T., 2009. Geochemical Characteristics and Metallogenic Genesis of the Yangla Copper Deposit, Deqin County (Dissertation). Kunming University of Science and Technology, Kunming (in Chinese with English abstract).

杜丽娟, 黄智龙, 李波, 等, 2017. 滇西北羊拉铜矿床里农-路农接合段构造地球化学与找矿预测. *矿物学报*, 37(04): 434-442.

Du, L. J., Huang, Z. L., Li, B., et al., 2017. Tectono-Geochemical Features and Orientation Prognosis of Concealed Ores of Yangla Cu Deposit, Yunnan Province, SW China. *ACTA MINERALOGICA*

- SINICA*, 37(04) : 434-442(in Chinese with English abstract).
- 耿全如, 李文昌, 王立全, 等, 2021.特提斯中西段古生代洋陆格局与构造演化.沉积与特提斯地质, 41(02): 297-315.
- Geng, Q. R., Li, W. C., Wang, L. Q., et al., 2021. Paleozoic tectonic framework and evolution of the central and western Tethys. *Sedimentary Geology and Tethyan Geology*, 41(02):297-315 (in Chinese with English abstract).
- 何龙清, 1998.金沙江造山带的大地构造环境及演化模式.现代地质, 12(2): 185~191.
- He, L. Q., 1998. Tectonic Setting and Evolutionary Pattern of the Jinshajiang Orogenic Belt. *GEOSCIENCE*, 12(2) : 185~191(in Chinese with English abstract).
- 何龙清, 战明国, 路远发, 1998.滇西羊拉铜矿区层序地层划分及赋矿层位研究. 华南地质与矿产, (03) : 37-41.
- He, L. Q., Zhan, M. G., Lu, Y. F., 1998. Division of Sequence Stratigraphy and Study on Ore-Bearing Beds in Yangla Copper Orefield, Western Yunnan. *Geology and Mineral Resources of South China*, (03) : 37-41(in Chinese with English abstract).
- 李波, 王新富, 岳言, 等, 2021.滇西北羊拉铜矿床构造体系及其控岩控矿作用.中国有色金属学报, 31(09): 2596-2611.
- Li, B., Wang, X. F., Yue, Y., et al., 2021. Ore-field structural system and its mechanism of rock-and ore-controlling processes of Yangla Cu deposit in northwest Yunnan, China. *The Chinese Journal of Nonferrous Metals*, 31(09) : 2596-2611(in Chinese with English abstract).
- 李金高, 王全海, 郑明华, 等, 2001.西藏Sedex型矿床赋矿盆地性质对成矿元素的制约作用.沉积与特提斯地质, 21(4): 11-20.
- Li, J. G., Wang, Q. H., Zheng, M. H., et al., 2001. The controls of the host basins on ore-forming elements from the sedex deposits in Xizang. *Sedimentary Geology and Tethyan Geology*, 21(4) : 11-20 (in Chinese with English abstract).
- 李声固, 1988.长乐-南澳变质带显微构造和岩组特征及应力场分析.华东地质,(2): 117-123, 125.
- Li, S. G., 1988. The Microstructure and Petrofabric Features and Stress Field of Changle-Nanao Metamorphic Belt, *Bull. Nanjing Inst. Geol. Miner. Resour., Chin. Acad. Geol. Sci.*(2) : 117-123,125 (in Chinese with English abstract).
- 李石磊, 苏昌学, 燕永锋, 等, 2008.羊拉铜矿床地质特征与成矿规律的研究.现代矿业, 24(12): 27-30.

- Li, S. L., Su, C. X., Yan, Y. F., et al., 2008. Research on Geological Features and Mineralogenesis Lasryang Copper Deposit. *EXPRESS INFORMATION OF MINING INDUSTRY*, 24(12) : 27-30(in Chinese with English abstract).
- 刘彬, 伍炼华, 马昌前, 等, 2023. 东昆仑造山带东段志留纪—泥盆纪中性岩的成因及其构造意义. *地球科学*, 48(06): 2398-2414.
- Liu, B., Wu, L. H., Ma, C. Q., et al., 2023. Petrogenesis and Tectonic Implications of Silurian to Devonian Intermediate Rocks from East Part of East Kunlun Orogenic Belt. *Earth Science*, 48(06) : 2398-2414(in Chinese with English abstract).
- 路远发, 陈开旭, 何龙清, 2002. 德钦县羊拉铜矿区碳—氧同位素组成特征及其地质意义. *地质论评*, (S1): 5.
- Lu, Y. F., Chen, K. X., He, L. Q., 2002. Carbon and Oxygen Isotopic Compositions of the Yagla Copper Deposit in Deqen and Their Implication. *GEOLOGICAL REVIEW*, (S1) : 5(in Chinese with English abstract).
- 路远发, 战明国, 陈开旭, 2000. 金沙江构造带嘎金雪山岩群玄武岩铀—铅同位素年龄. *中国区域地质*, (002): 19.
- Lu, Y. F., Zhan, M. G., Chen, K. X., 2000. U-Pb isotopic dating of basalt from the Gajinxueshan Group in the Jinshajiang tectonic belt. *REGIONAL GEOLOGY OF CHINA*, (002) : 19(in Chinese with English abstract).
- 潘桂棠, 侯增谦, 王立全, 等, 2003. 西南"三江"多岛弧造山过程成矿系统与资源评价. 北京: 地质出版社.
- Pan, G. T., Hou, Z. Q., Wang, L. Q., et al., 2003. Metallogenic System and Resource Evaluation of the Multi-Island-Arc Orogenic Process in the "Sanjiang" Region, Southwest China. Beijing: Geological Publishing House (in Chinese).
- 潘家永, 张乾, 马东升, 等, 2001. 滇西羊拉铜矿区硅质岩特征及与成矿的关系. *中国科学D辑*, 31(1):7.
- Pan, J. Y., Zhang, Q., Ma, D. S., et al., 2001. Characteristics of Siliceous Rocks and Their Metallogenic Relationship in the Yangla Copper Orefield, Western Yunnan. *SCIENCE IN CHINA (Series D)*, 31(1): 7 (in Chinese).
- 彭东, 徐胜兰, 林丽, 等, 2008. 新疆阿尔泰西北部白哈巴—冲乎尔一带加里东和海西两期区域变质作用的厘定. *中国地质*, 35(4): 11.

- Peng, D., Xu, S. L., Lin, L., et al., 2008. Redefinition of Caledonian and Hercynian regional metamorphism in the Baihaba- Chonghu'er district, northwestern Altay, Xinjiang. *GEOLOGY IN CHINA*, 35(4): 11 (in Chinese with English abstract).
- 曲晓明, 杨岳清, 李佑国, 2004.从赋矿岩系岩石类型的多样性论羊拉铜矿的成因.矿床地质, (04): 23-34.
- Qu, X. M., Yang, Y. Q., Li, Y. G., 2004. A Discussion on Origin of Yangla Copper Deposit in Light of Diversity of Ore-hosting Rock Types. *MINERAL DEPOSITS*,(04): 23-34 (in Chinese with English abstract).
- 舒良树, 2006.华南前泥盆纪构造演化: 从华夏地块到加里东期造山带.高校地质学报,(04): 418-431.
- Shu, L. S., 2006. Precambrian Tectonic Evolution of South China: from Cathaysian Block to Caledonian Period Folded Orogenic Belt. *Geological Journal of China Universities*, (04): 418-431 (in Chinese with English abstract).
- 苏特, 刘明民, 方维萱, 等, 2025.贵州镇宁乐纪大型重晶石矿床热水沉积岩相特征及其构造古地理单元.地质论评, 1-14[2026-02-03].
- Su, T., Liu, M. M., Fang, W. X., et al., 2025. The hydrothermal sedimentary lithofacies characteristics and tectonic paleogeographic units of the large barite deposit in Leji, Zhenning, Guizhou. *GEOLOGICAL REVIEW*, 1-14[2026-02-03] (in Chinese with English abstract).
- 王保弟, 王立全, 王冬兵, 等, 2021.西南三江金沙江弧盆系时空结构及构造演化.沉积与特提斯地质, 41(02): 246-264.
- Wang, B. D., Wang, L. Q., Wang, D. B., et al., 2021. The temporal and spatial framework and its tectonic evolution of the Jinsha river arc-basin system, Southwest China. *Sedimentary Geology and Tethyan Geology*, 41(02): 246-264 (in Chinese with English abstract).
- 王冬兵, 王立全, 尹福光, 等, 2012.滇西北金沙江古特提斯洋早期演化时限及其性质: 东竹林层状辉长岩锆石U-Pb年龄及Hf同位素约束.岩石学报, 28(05): 1542-1550.
- Wang, D. B., Wang, L. Q., Yin, F. G., et al., 2012. Timing and nature of the Jinshajiang Paleo Tethys: Constraints from zircon U-Pb age and Hf isotope of the Dongzhulin layered gabbro from Jinshajiang ophiolite belt, northwestern Yunnan. *Acta Petrologica Sinica*, 28(5): 1542-1550 (in Chinese with English abstract).
- 王鹤年, 周丽娅, 2006.华南地质构造的再认识.高校地质学报,(04): 457-465.

- Wang, H. N., Zhou, L. Y., 2006. A Further Understanding in Geological Structure of South China. *Geological Journal of China Universities*, (04): 457-465 (in Chinese with English abstract).
- 王立全, 潘桂棠, 李定谋, 等, 1999.金沙江弧-盆系时空结构及地史演化.地质学报,(03): 206-218.
- Wang, L. Q., Pan, G. T., Li, D. M., et al., 1999. The Spatio-temporal Framework and Geological Evolution of the Jinshajiang Arc-Basin Systems. *ACTA GEOLOGICA SINICA*, (03): 206-218 (in Chinese with English abstract).
- 王新富, 李波, 刘月东, 等.滇西北羊拉大型铜矿床深部高品位锑矿体的发现及意义.大地构造与成矿学, 2023, 47(5): 1063-1068.
- Wang, X. F., Li, B., Liu, Y. D., et al., Discovery of High Grade Antimony Orebody in the Depth of Yangla Large Cu Deposit, Northwest Yunnan, China, and its Geological Significance. *Geotectonica et Metallogenia*, 2023, 47(5): 1063-1068 (in Chinese with English abstract).
- 王玉奇, 2009. Sedex型矿床与VMS型矿床对比研究.资源环境与工程, 23(3): 4.
- Wang, Y. Q., 2009. Comparative Study on Sedex Deposits and MVT Deposits. *Resources Environment & Engineering*, 23(3): 4 (in Chinese with English abstract).
- 王泽传, 赵茂春, 严城民, 等, 2015.滇西北大地构造单元的划分与特征.沉积与特提斯地质, (02): 66-75.
- Wang, Z. C., Zhao, M. C., Yan, C. M., et al., 2015. Division of the tectonic units in northwestern Yunnan. *Sedimentary Geology and Tethyan Geology*, (02): 66-75 (in Chinese with English abstract).
- 吴福元, 万博, 赵亮, 等, 2020.特提斯地球动力学.岩石学报, 36(6): 1627-1674.
- Wu, F. Y., Wan, B., Zhao, L., et al., 2020. Tethyan geodynamics. *Acta Petrologica Sinica*, 36(6):1627-1674 (in Chinese with English abstract).
- 解超明, 李才, 翟庆国, 等, 2021.藏北羌塘早古生代岩浆作用及其地质意义.沉积与特提斯地质, 41(02): 340-350.
- Xie, C. M., Li, C., Zhai, Q. G., et al., 2021. The Early Paleozoic magmatism in Qiangtang, northern Tibet and its geological significance. *Sedimentary Geology and Tethyan Geology*, 41(02): 340-350 (in Chinese with English abstract).
- 杨德庭, 王彦斌, 韩娟, 等, 2013.滇西北金沙江缝合带格亚顶-茂顶地区变质岩系的锆石 LA-MCI-CP-MSU-Pb年龄-原岩的沉积时代和物源区特征.地质论评, 59(6): 1131~1142.
- Yang, D. T., Wang, Y. B., Han, J., et al., 2013. LA-MC-ICP-MS U-Pb Zircon Dating of the Metamorphic Rocks from Geyading—Maoding Area, Jinsha Suture, Northwestern Yunnan Province: Depositional

- Ages of Protoliths and Provenance Characteristics. *GEOLOGICAL REVIEW*, 59(6): 1131~1142 (in Chinese with English abstract).
- 杨德庭, 王彦斌, 2015.滇西北羊拉铜矿床赋矿围岩的时代和物源区特征: 锆石LA-MC-ICP-MSU-Pb 年龄的制约.地质论评, 61(03): 694-708.
- Yang, D. T., Wang, Y. B., 2015. Detrital Zircon LA-MC-ICP-MS U-Pb Age and Provenance Characteristics of Ore-hosting Rocks in Yangla Copper Deposit, Northwestern Yunnan. *GEOLOGICAL REVIEW*, 61(03): 694-708(in Chinese with English abstract).
- 杨广全, 2009.云南德钦羊拉铜矿地质特征、成因和成矿预测(博士学位论文).北京: 中国地质大学.
- Yang, G. Q., 2009. Geological Characteristics, Genesis and Metallogenic Prediction of the Yangla Copper Deposit, Deqin, Yunnan Province(Dissertation). China University of Geosciences, Beijing (in Chinese with English abstract).
- 于津海, 魏震洋, 王丽娟, 等, 2006.华夏地块: 一个由古老物质组成的年轻陆块.高校地质学报, (04): 440-447.
- Yu, J. H., Wei, Z. Y., Wang, L. J., et al., 2006. Cathaysia Block: A Young Continent Composed of Archaean Blocks. *Geological Journal of China Universities*, (04): 440-447 (in Chinese with English abstract).
- 袁四化, 刘永江, NEUBAUER Franz, 等, 2020.东阿尔卑斯原-古特提斯构造演化.岩石学报, 36(8): 2357-2362.
- Yuan, S. H., Liu, Y. J., Neubauer, F., et al., 2020. Zircon Hf isotopic SHRIMP dating of the Paleo-Tethyan in the East Alps. *Acta Petrologica Sinica*, 36(8): 2357-2362 (in Chinese with English abstract).
- 战明国, 路远发, 甘金木, 等, 1998.滇西德钦羊拉铜矿.北京: 中国地质大学出版社.
- Zhan, M. G., Lu, Y. F., Gan, J. M., et al., 1998. Yangla Copper Deposit, Deqin, Western Yunnan. China University of Geosciences Press, Beijing (in Chinese).
- 张芳荣, 舒良树, 王德滋, 等, 2009.华南东段加里东期花岗岩类形成构造背景探讨.地学前缘, 16(01): 248-260.
- Zhang, F. R., Shu, L. S., Wang, D. Z., et al., 2009. Discussions on the tectonic setting of Gezhongniang the eastern segment of South China. *Earth Science Frontiers*, 16(1):248-260 (in Chinese with English abstract).

- 张圣超, 朱政坤, 江小均, 等, 2025.金沙江造山带印支期碰撞造山作用过程——来自羊拉旭龙韧性剪切带构造变形特征和年代学证据.地球学报, 46(04): 760-776.
- Zhang, S. C., Zhu, Z. K., Jiang, X. J., et al., 2025. Constraints on the Indosinian Orogeny in the Jinshajiang Orogenic Process: Evidence from the Deformation Characteristics and Geochronological Results of the Xulong Ductile Shear Zone in Yangla Town. *Acta Geoscientica Sinica*, 46(04): 760-776(in Chinese with English abstract).
- 张雄华, 黄兴, 张孟, 等, 2021.中国石炭纪构造-地层区划与地层格架.地学前缘, 28(5): 362-379.
- Zhang, X. H., Huang, X., Zhang, M., et al., 2021. Carboniferous tectonostratigraphic framework and tectonic-tipic framework in China. *Earth Science Frontiers*, 28(5): 362-379 (in Chinese with English abstract).
- 张雪峰, 吴亮, 王宇, 等, 2017.滇西北羊拉乡贝吾玄武岩形成的大地构造环境探讨.沉积与特提斯地质, 37(4): 7.
- Zhang, X. F., Wu, L., Wang, Y., et al., 2017. Tectonic setting of the Beiwu basalts from Yangla, northwestern Yunnan: An approach. *Sedimentary Geology and Tethyan Geology*, 37(4): 7 (in Chinese with English abstract).
- 曾礼传, 2010.云南德钦羊拉铜矿区地层研究.云南地质, 29(01): 84-89.
- Zeng, L. C., 2010. The Stratigraphic Division of Yangla Cu Orefield in Deqin, Yunnan. *YUNNAN GEOLOGY*, 29(01): 84-89 (in Chinese with English abstract).
- 曾普胜, 王彦斌, 麻菁, 等, 2018.滇西北羊拉地区金沙江古洋盆的穿时碰撞闭合: 来自花岗岩年龄的制约.地学前缘, 25(6): 192-205.
- Zeng, P. S., Wang, Y. B., Ma, J., et al., 2018. Diachronous collision-close of the Jinshajiang paleo-Tethyan basin in the Yangla area: constraints from ages of the granites. *Earth Science Frontiers*, 25(6): 192-205 (in Chinese with English abstract).
- 朱经经, 胡瑞忠, 毕献武, 等, 2011.滇西北羊拉铜矿矿区花岗岩成因及其构造意义.岩石学报, 27(09): 2553-2566.
- Zhu, J. J., Hu, R. Z., Bi, X. W., et al., 2011. Genesis and tectonic significance of the Yangla ore district, northwestern Yunnan Province. *Acta Petrologica Sinica*, 27(9): 2551-2566 (in Chinese with English abstract).
- 朱俊, 2011.云南省德钦县羊拉铜矿地质地球化学特征与成因研究(博士学位论文).昆明: 昆明理工大

学.

Zhu, J. 2011. Geological, Geochemical Characteristics and Genesis of the Yangla Copper Deposit, Deqin county, Yunnan(Dissertation). Kunming University of Science and Technology, Kunming (in Chinese with English abstract).

朱俊, 李文昌, 曾普胜, 等, 2011.滇西羊拉矿区层状铜矿床复合成因的地质地球化学证据.地质论评, 57(03): 337-349.

Zhu, J., Li, W. C., Zeng, P. S., et al., 2011. Geological and Geochemical Evidences of Compound Genesis of Yangla Bedded Copper Deposit Northwestern Yunnan. *GEOLOGICAL REVIEW*, 57(03): 337-349 (in Chinese with English abstract).

朱俊, 曾普胜, 曾礼传, 等, 2009.滇西北羊拉铜矿区地层划分.地质学报, 83(010): 1415-1420.

Zhu, J., Zeng, P. S., Zeng, L. C., et al., 2009. Stratigraphic Subdivision of the Yangla Copper Ore District Northwestern Yunnan. *ACTA GEOLOGICA SINICA*, 83(010): 1415-1420 (in Chinese with English abstract).

附表 滇西北羊拉铜矿床赋矿地层变质碎屑岩中碎屑锆石 U-Pb 定年数据年龄表

Table 2 U-Pb Dating Age Data of Detrital Zircons from Metamorphic Clastic Sedimentary Rocks in the Ore-Bearing Stratum of the Yangla Cu Deposit,

Northwestern Yunnan

点号	元素含量			$\frac{^{232}\text{Th}}{^{238}\text{U}}$	同位素比值							年龄 (Ma)						
	Pb ppm	Th ppm	U ppm		$^{207}\text{Pb}/^{235}\text{U}$		$^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$		$^{207}\text{Pb}/^{206}\text{Pb}$		Rho	$^{207}\text{Pb}/^{235}\text{U}$		$^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$		$^{207}\text{Pb}/^{206}\text{Pb}$		谐和度 (%)
					Ratio	1sigma	Ratio	1sigma	Ratio	1sigma		Age	1sigma	Age	1sigma	Age	1sigma	
1-46	26.8442	254.6851	367.3983	0.69	0.4474	0.0097	0.0587	0.0008	0.0553	0.0011	0.49	375.4	6.8	367.8	4.8	433.4	38.0	97%
1-26	24.8005	86.4195	382.1537	0.23	0.4429	0.0079	0.0589	0.0008	0.0546	0.0009	0.55	372.3	5.6	369.1	4.9	394.5	38.9	99%
1-22	19.0222	190.7681	257.0660	0.74	0.4388	0.0113	0.0590	0.0009	0.0539	0.0011	0.39	369.4	8.0	369.4	5.2	364.9	48.1	99%
1-95	32.0755	292.5109	406.2176	0.72	0.4757	0.0078	0.0631	0.0008	0.0548	0.0008	0.43	395.1	5.4	394.2	4.8	466.7	35.2	99%
1-54	88.3574	642.1852	1193.2335	0.54	0.4870	0.0081	0.0632	0.0010	0.0559	0.0007	0.69	402.9	5.5	394.9	5.8	450.0	27.8	98%
1-88	35.0555	398.3224	397.8719	1.00	0.4988	0.0081	0.0640	0.0009	0.0567	0.0010	0.38	410.9	5.5	399.9	5.5	479.7	37.0	97%
1-28	18.4805	185.1742	225.3131	0.82	0.4811	0.0094	0.0641	0.0007	0.0545	0.0011	-0.11	398.8	6.5	400.6	4.5	390.8	46.3	99%
1-43	21.4931	155.7346	279.0495	0.56	0.4889	0.0098	0.0642	0.0011	0.0553	0.0010	0.45	404.2	6.7	401.3	6.6	433.4	40.7	99%
1-93	14.0321	123.5597	164.3081	0.75	0.4911	0.0137	0.0647	0.0010	0.0551	0.0014	0.42	405.7	9.4	403.9	6.1	416.7	52.8	99%
1-2	33.6043	193.4280	450.0038	0.43	0.4930	0.0171	0.0649	0.0015	0.0550	0.0013	0.58	407.0	11.6	405.2	9.3	413.0	51.8	99%
1-68	20.0235	168.3184	248.8940	0.68	0.5008	0.0103	0.0653	0.0008	0.0557	0.0011	0.40	412.2	7.0	407.6	5.1	438.9	42.6	98%
1-24	48.3013	371.4454	583.2011	0.64	0.5273	0.0089	0.0686	0.0008	0.0558	0.0008	0.45	430.0	5.9	427.5	4.8	442.6	33.3	99%
1-69	14.3962	123.4583	163.8532	0.75	0.5535	0.0154	0.0688	0.0010	0.0584	0.0015	0.40	447.3	10.1	428.8	6.3	542.6	55.5	95%
1-45	49.2323	320.5682	595.4805	0.54	0.5503	0.0124	0.0688	0.0011	0.0580	0.0009	0.32	445.2	8.1	428.8	6.4	527.8	35.2	96%
1-11	9.5401	61.4935	107.7938	0.57	0.5561	0.0151	0.0688	0.0008	0.0587	0.0016	0.07	449.0	9.8	429.2	5.0	553.7	59.2	95%
1-87	16.8865	113.3443	198.3186	0.57	0.5240	0.0110	0.0689	0.0007	0.0552	0.0012	0.23	427.9	7.3	429.6	4.4	420.4	52.8	99%
1-10	23.6055	175.2792	270.6138	0.65	0.5182	0.0119	0.0690	0.0007	0.0545	0.0012	0.24	424.0	8.0	430.2	4.4	390.8	48.1	98%
1-85	58.1203	350.5914	700.6753	0.50	0.5176	0.0092	0.0691	0.0008	0.0544	0.0010	0.01	423.5	6.1	430.6	4.5	387.1	42.6	98%
1-83	13.5824	122.7782	149.6828	0.82	0.5474	0.0126	0.0691	0.0011	0.0578	0.0016	0.10	443.3	8.3	430.8	6.6	520.4	65.7	97%

1-4	34.5454	302.9435	390.3516	0.78	0.5404	0.0103	0.0695	0.0009	0.0564	0.0008	0.74	438.7	6.8	433.0	5.4	464.9	31.5	98%
1-67	23.7625	318.2536	236.0380	1.35	0.5671	0.0133	0.0697	0.0012	0.0592	0.0016	-0.20	456.1	8.6	434.4	7.3	572.3	57.4	95%
1-58	7.4626	33.8639	86.0745	0.39	0.5838	0.0175	0.0740	0.0012	0.0573	0.0017	0.28	466.9	11.2	460.5	7.3	501.9	64.8	98%
1-100	27.8438	178.4987	306.7330	0.58	0.5878	0.0135	0.0749	0.0011	0.0570	0.0013	0.31	469.5	8.6	465.6	6.5	500.0	48.1	99%
1-55	21.5001	150.4058	233.7534	0.64	0.6033	0.0119	0.0749	0.0012	0.0585	0.0011	0.38	479.3	7.5	465.6	7.4	546.3	42.6	97%
1-78	66.0537	228.4366	790.0949	0.29	0.6048	0.0137	0.0753	0.0017	0.0584	0.0008	1.05	480.3	8.7	467.9	10.2	542.6	27.8	97%
1-7	101.7281	119.1996	367.6937	0.32	3.0309	0.0685	0.2462	0.0039	0.0891	0.0012	0.94	1415.4	17.3	1418.7	20.1	1406.5	25.9	99%
1-34	91.9785	103.5892	338.4252	0.31	2.9295	0.0458	0.2383	0.0033	0.0891	0.0009	0.94	1389.6	11.9	1377.7	17.1	1407.1	19.9	99%
1-21	135.4426	48.6622	517.9822	0.09	2.9933	0.0361	0.2429	0.0029	0.0894	0.0009	0.78	1405.9	9.2	1401.7	15.3	1413.0	18.5	99%
1-15	118.1015	49.4327	442.9375	0.11	2.9795	0.0357	0.2411	0.0024	0.0896	0.0009	0.65	1402.4	9.2	1392.6	12.6	1417.6	18.1	99%
1-70	179.1494	116.9872	658.1098	0.18	3.0343	0.0421	0.2448	0.0027	0.0898	0.0009	0.78	1416.3	10.6	1411.6	14.0	1433.3	15.7	99%
1-82	150.6460	234.6169	512.6045	0.46	3.0534	0.0411	0.2430	0.0031	0.0912	0.0010	0.67	1421.1	10.3	1402.5	16.0	1450.3	21.8	98%
1-47	225.4581	123.4597	827.6276	0.15	3.0943	0.0749	0.2411	0.0044	0.0928	0.0011	0.98	1431.3	18.6	1392.3	23.1	1483.6	22.1	97%
1-63	139.3535	62.7406	465.3340	0.13	3.5648	0.0467	0.2714	0.0031	0.0952	0.0010	0.94	1541.7	10.4	1547.8	15.5	1531.5	14.0	99%
1-23	75.1606	98.8979	234.9207	0.42	3.5225	0.0437	0.2681	0.0026	0.0952	0.0010	0.81	1532.3	9.9	1531.3	13.4	1533.0	15.7	99%
1-64	84.5507	119.7747	273.3873	0.44	3.4331	0.0656	0.2605	0.0048	0.0956	0.0014	0.71	1512.0	15.1	1492.3	24.4	1539.8	23.1	98%
1-9	142.2933	262.0488	416.9834	0.63	3.6234	0.0511	0.2740	0.0034	0.0959	0.0009	1.02	1554.7	11.3	1561.3	17.3	1546.3	18.5	99%
1-14	159.1947	291.9272	482.4469	0.61	3.5954	0.0536	0.2697	0.0040	0.0967	0.0009	0.96	1548.5	11.9	1539.1	20.1	1562.0	21.3	99%
1-3	57.3238	67.3249	177.9074	0.38	3.6219	0.0428	0.2709	0.0025	0.0969	0.0010	0.60	1554.3	9.5	1545.3	12.9	1566.4	20.2	99%
1-25	99.8714	317.3967	274.2828	1.16	3.4579	0.0605	0.2600	0.0037	0.0964	0.0013	0.75	1517.7	13.8	1490.0	18.7	1566.7	24.5	98%
1-86	49.2351	72.5979	149.2233	0.49	3.6473	0.1076	0.2717	0.0054	0.0972	0.0017	0.95	1559.9	23.5	1549.2	27.5	1572.2	33.3	99%
1-42	59.0206	46.8766	191.8274	0.24	3.5575	0.0568	0.2645	0.0028	0.0975	0.0011	0.70	1540.1	12.7	1512.7	14.3	1576.9	21.9	98%
1-57	152.8489	177.9369	473.6151	0.38	3.6812	0.0623	0.2722	0.0041	0.0980	0.0012	0.72	1567.3	13.6	1552.2	20.7	1587.0	22.4	99%
1-52	30.2527	106.4047	78.1580	1.36	3.5750	0.0793	0.2656	0.0045	0.0976	0.0018	0.57	1544.0	17.6	1518.5	22.9	1588.9	34.9	98%
1-91	98.0468	190.8897	245.5939	0.78	4.4460	0.0592	0.3022	0.0034	0.1067	0.0011	0.81	1721.0	11.1	1702.0	17.1	1744.1	20.2	98%
1-97	222.5273	328.1615	593.8656	0.55	4.4042	0.0512	0.2970	0.0037	0.1076	0.0010	0.77	1713.1	9.7	1676.3	18.4	1761.1	17.1	97%

1-13	82.2791	111.3352	212.9740	0.52	4.6889	0.0602	0.3152	0.0035	0.1080	0.0012	0.64	1765.3	10.8	1766.3	16.9	1765.1	20.4	99%
1-74	117.8970	354.7110	252.3151	1.41	4.6981	0.0706	0.3153	0.0042	0.1080	0.0010	0.84	1766.9	12.6	1766.7	20.5	1766.4	17.1	99%
1-35	9.0680	17.7184	22.6756	0.78	4.4789	0.0997	0.3033	0.0048	0.1074	0.0024	0.34	1727.1	18.5	1707.6	23.9	1766.7	42.1	98%
1-8	403.2616	553.2339	603.4050	0.92	11.0885	0.1112	0.4771	0.0042	0.1685	0.0013	0.88	2530.6	9.5	2514.7	18.4	2542.9	17.6	99%
1-61	57.6230	73.3414	89.4900	0.82	11.0865	0.1638	0.4708	0.0057	0.1706	0.0020	0.71	2530.4	13.9	2486.9	25.2	2564.8	20.1	98%
1-50	153.0205	138.8808	252.8054	0.55	10.9865	0.1746	0.4656	0.0072	0.1711	0.0021	0.79	2522.0	14.9	2464.0	31.6	2568.8	21.5	97%
2-65	13.0857	155.5410	174.4071	0.89	0.4330	0.0125	0.0573	0.0007	0.0548	0.0016	0.24	365.3	8.9	359.3	4.2	405.6	66.7	98%
2-1	14.1863	72.5246	213.5298	0.34	0.4458	0.0144	0.0574	0.0008	0.0563	0.0017	0.38	374.3	10.1	359.9	4.8	464.9	64.8	96%
2-17	49.3988	736.2078	608.5556	1.21	0.4329	0.0124	0.0574	0.0012	0.0547	0.0014	0.51	365.3	8.8	360.0	7.4	466.7	55.6	98%
2-8	15.0012	87.1029	236.9336	0.37	0.4320	0.0253	0.0575	0.0011	0.0544	0.0031	0.23	364.6	18.0	360.7	6.6	390.8	125.9	98%
2-95	23.7240	179.8947	350.8494	0.51	0.4281	0.0088	0.0577	0.0007	0.0539	0.0010	0.32	361.9	6.2	361.5	4.4	364.9	44.4	99%
2-86	32.4243	189.0396	486.5437	0.39	0.4217	0.0069	0.0580	0.0008	0.0528	0.0008	0.56	357.3	4.9	363.6	4.7	320.4	35.2	98%
2-15	19.2600	82.2877	296.9697	0.28	0.4465	0.0122	0.0581	0.0007	0.0557	0.0013	0.50	374.8	8.6	364.1	4.5	438.9	58.3	97%
2-99	66.6074	1355.7531	908.6663	1.49	0.4506	0.0118	0.0581	0.0020	0.0567	0.0010	0.91	377.7	8.3	364.2	12.1	479.7	40.7	96%
2-92	40.2780	169.2795	621.5989	0.27	0.4318	0.0081	0.0581	0.0009	0.0539	0.0008	0.64	364.4	5.7	364.2	5.5	368.6	67.6	99%
2-54	69.0065	598.7405	1012.8379	0.59	0.4236	0.0076	0.0582	0.0009	0.0529	0.0009	0.54	358.6	5.4	364.6	5.5	324.1	38.9	98%
2-29	8.1102	79.0423	112.5404	0.70	0.4384	0.0281	0.0583	0.0011	0.0550	0.0037	-0.06	369.1	19.8	365.4	6.7	413.0	148.1	98%
2-96	30.1678	200.4456	444.0821	0.45	0.4467	0.0090	0.0584	0.0007	0.0555	0.0010	0.39	375.0	6.3	365.9	4.5	431.5	40.7	97%
2-24	32.8453	301.9286	461.1790	0.65	0.4364	0.0123	0.0586	0.0008	0.0540	0.0014	0.54	367.7	8.7	367.1	5.1	368.6	55.6	99%
2-68	7.7609	69.7974	102.8159	0.68	0.4336	0.0150	0.0588	0.0010	0.0535	0.0017	0.50	365.7	10.6	368.5	6.2	350.1	72.2	99%
2-87	22.3126	57.7579	356.6047	0.16	0.4485	0.0127	0.0589	0.0011	0.0551	0.0013	0.59	376.2	8.9	369.2	6.5	416.7	56.5	98%
2-97	8.7307	64.6809	122.7022	0.53	0.4564	0.0157	0.0592	0.0010	0.0560	0.0018	0.38	381.8	10.9	370.5	6.1	450.0	65.7	97%
2-35	26.3400	45.3920	422.5557	0.11	0.4464	0.0129	0.0593	0.0009	0.0546	0.0015	0.46	374.8	9.1	371.2	5.4	394.5	54.6	99%
2-30	15.4919	135.6195	220.3810	0.62	0.4548	0.0162	0.0595	0.0011	0.0556	0.0021	0.14	380.6	11.3	372.4	6.5	438.9	85.2	97%
2-81	24.9621	99.1925	383.8961	0.26	0.4301	0.0081	0.0596	0.0009	0.0525	0.0010	0.12	363.2	5.7	373.2	5.4	309.3	46.3	97%
2-41	21.0737	200.7762	242.9352	0.83	0.5145	0.0142	0.0686	0.0010	0.0545	0.0016	0.15	421.5	9.6	427.9	6.2	390.8	64.8	98%

2-73	44.1997	369.1537	501.2804	0.74	0.5182	0.0099	0.0687	0.0008	0.0547	0.0010	0.43	424.0	6.6	428.3	4.9	466.7	40.7	98%
2-34	17.5592	201.9164	197.8545	1.02	0.5430	0.0147	0.0688	0.0012	0.0574	0.0016	0.32	440.4	9.7	429.1	7.3	505.6	63.0	97%
2-22	18.4170	129.8628	223.7237	0.58	0.5426	0.0167	0.0689	0.0011	0.0574	0.0018	0.12	440.1	11.0	429.2	6.9	505.6	68.5	97%
2-7	18.7565	73.7931	243.8719	0.30	0.5395	0.0287	0.0691	0.0018	0.0563	0.0021	0.40	438.1	18.9	430.5	10.6	464.9	78.7	98%
2-62	35.7129	243.7890	427.8204	0.57	0.5180	0.0082	0.0692	0.0007	0.0543	0.0009	0.29	423.8	5.5	431.1	4.2	383.4	37.0	98%
2-26	25.8792	176.3389	310.0604	0.57	0.5567	0.0217	0.0695	0.0013	0.0583	0.0024	0.08	449.4	14.1	433.2	8.0	542.6	89.6	96%
2-53	23.6254	73.6033	312.8869	0.24	0.5371	0.0140	0.0698	0.0010	0.0559	0.0015	0.27	436.5	9.2	434.7	6.0	455.6	59.3	99%
2-10	9.9923	71.9166	123.1529	0.58	0.5388	0.0172	0.0701	0.0014	0.0562	0.0021	0.02	437.7	11.4	436.7	8.2	461.2	83.3	99%
2-16	17.6095	106.8543	216.1942	0.49	0.5436	0.0128	0.0703	0.0012	0.0563	0.0015	0.27	440.8	8.4	437.8	7.1	464.9	57.4	99%
2-46	57.1158	795.4818	547.3156	1.45	0.5470	0.0092	0.0731	0.0008	0.0543	0.0009	0.32	443.1	6.1	454.6	4.7	383.4	37.0	97%
2-91	55.7444	486.6154	591.5809	0.82	0.5593	0.0083	0.0734	0.0008	0.0552	0.0008	0.30	451.1	5.4	456.7	4.9	420.4	31.5	98%
2-18	21.9554	170.1583	239.1696	0.71	0.5694	0.0151	0.0737	0.0011	0.0562	0.0015	0.21	457.6	9.7	458.7	6.7	457.5	59.3	99%
2-48	14.1307	119.8828	153.8424	0.78	0.5796	0.0182	0.0739	0.0010	0.0569	0.0017	0.30	464.2	11.7	459.4	5.9	500.0	66.7	98%
2-40	42.9885	187.6728	507.1530	0.37	0.5740	0.0205	0.0740	0.0016	0.0561	0.0014	0.67	460.6	13.3	459.9	9.8	457.5	55.6	99%
2-58	17.7045	136.0844	198.1900	0.69	0.6123	0.0179	0.0741	0.0014	0.0601	0.0018	0.32	485.0	11.3	460.8	8.3	605.6	95.4	94%
2-23	15.7742	168.3338	163.8505	1.03	0.6025	0.0219	0.0750	0.0012	0.0584	0.0023	0.05	478.8	13.9	466.4	7.0	546.3	87.0	97%
2-55	19.2759	99.2399	223.3926	0.44	0.6027	0.0160	0.0756	0.0015	0.0580	0.0015	0.33	478.9	10.2	469.9	9.1	527.8	54.6	98%
2-11	202.6285	582.4717	605.1020	0.96	3.0436	0.0635	0.2527	0.0043	0.0873	0.0012	0.90	1418.6	16.0	1452.4	22.2	1368.5	25.9	97%
2-66	121.4439	140.3871	428.2271	0.33	2.9317	0.0338	0.2433	0.0026	0.0874	0.0010	0.53	1390.1	8.8	1404.0	13.5	1368.8	22.1	99%
2-64	40.0447	70.9788	132.4254	0.54	3.0265	0.0351	0.2476	0.0029	0.0886	0.0009	0.85	1414.3	8.9	1426.3	15.1	1396.0	20.2	99%
2-51	337.6461	31.6040	1269.9038	0.02	3.1123	0.0433	0.2531	0.0027	0.0891	0.0011	0.87	1435.7	10.7	1454.5	13.9	1406.5	24.1	98%
2-28	185.2801	244.3376	642.0866	0.38	3.1217	0.0654	0.2535	0.0042	0.0891	0.0011	1.04	1438.0	16.1	1456.7	21.7	1407.1	23.9	98%
2-39	165.0231	385.0688	460.5534	0.84	3.6232	0.0520	0.2786	0.0032	0.0943	0.0012	0.67	1554.6	11.5	1584.5	16.4	1513.3	18.4	98%
2-69	128.2850	241.7975	367.2441	0.66	3.5780	0.0474	0.2746	0.0031	0.0944	0.0009	0.59	1544.7	10.6	1564.2	15.6	1517.0	22.7	98%
2-12	78.1974	138.4977	236.4698	0.59	3.5084	0.0545	0.2679	0.0030	0.0950	0.0013	0.47	1529.1	12.3	1530.0	15.1	1527.8	25.9	99%
2-84	140.6360	408.5475	415.3476	0.98	3.5147	0.0740	0.2676	0.0051	0.0951	0.0008	1.15	1530.5	16.7	1528.7	25.7	1531.5	15.0	99%

2-2	97.9615	154.3361	306.7965	0.50	3.4909	0.0614	0.2663	0.0037	0.0951	0.0014	0.55	1525.2	13.9	1521.9	19.1	1531.5	28.6	99%
2-44	103.2826	226.8088	294.9255	0.77	3.6623	0.0503	0.2774	0.0032	0.0957	0.0012	0.63	1563.2	11.0	1578.1	16.0	1542.6	24.1	99%
2-88	101.8270	151.1868	302.0423	0.50	3.6968	0.0483	0.2784	0.0033	0.0962	0.0009	0.77	1570.7	10.5	1583.5	16.7	1553.7	16.7	99%
2-80	66.9404	96.5437	206.9317	0.47	3.4074	0.0488	0.2692	0.0036	0.0919	0.0011	0.81	1506.1	11.3	1536.8	18.3	1465.1	22.2	97%
2-42	46.0975	153.3258	117.0418	1.31	3.5506	0.0686	0.2800	0.0063	0.0927	0.0024	0.08	1538.6	15.3	1591.4	31.6	1483.3	49.2	96%
2-98	102.8926	97.5275	329.5301	0.30	3.5971	0.0579	0.2788	0.0036	0.0935	0.0011	0.95	1548.9	12.8	1585.5	18.1	1499.1	22.5	97%
2-57	50.5553	88.5266	160.0482	0.55	3.4905	0.0684	0.2708	0.0043	0.0935	0.0017	0.58	1525.1	15.5	1544.8	21.9	1499.1	34.1	98%
2-63	123.8815	105.3986	404.3874	0.26	3.6271	0.0781	0.2831	0.0048	0.0928	0.0013	0.89	1555.5	17.2	1606.8	24.0	1483.3	26.1	96%
2-74	78.7794	161.9359	212.7288	0.76	3.9349	0.0612	0.2863	0.0047	0.0997	0.0009	0.96	1620.9	12.6	1623.1	23.7	1620.4	16.2	99%
2-25	30.7255	98.9154	76.3650	1.30	3.8718	0.0837	0.2805	0.0043	0.1003	0.0022	0.37	1607.8	17.5	1594.0	21.7	1631.5	40.7	99%
2-70	38.3116	119.8781	91.7030	1.31	3.9474	0.0725	0.2864	0.0032	0.1000	0.0017	0.43	1623.5	14.9	1623.3	15.8	1633.3	31.2	99%
2-83	96.8313	235.7316	244.2054	0.97	4.0751	0.0660	0.2900	0.0034	0.1019	0.0011	0.71	1649.3	13.2	1641.3	17.0	1658.3	20.4	99%
2-19	170.1825	215.2165	496.1402	0.43	4.0456	0.0908	0.2849	0.0055	0.1031	0.0017	0.84	1643.4	18.3	1615.8	27.8	1679.9	30.1	98%
2-82	132.3008	121.0714	210.6424	0.57	10.6699	0.1334	0.4813	0.0053	0.1608	0.0015	0.90	2494.8	11.7	2532.7	23.0	2464.8	14.7	98%
2-52	172.9560	103.1522	316.4381	0.33	10.5562	0.2541	0.4623	0.0075	0.1651	0.0026	1.09	2484.9	22.4	2449.6	33.2	2509.3	25.5	98%
2-33	178.5715	155.1001	295.2432	0.53	11.5345	0.2331	0.4844	0.0091	0.1725	0.0020	0.94	2567.4	19.0	2546.3	39.6	2582.4	18.4	99%
2-90	65.5693	51.4594	97.6973	0.53	12.7585	0.1907	0.5178	0.0074	0.1787	0.0021	0.74	2662.0	14.2	2689.7	31.6	2642.6	19.1	98%

注：1 代表样品 240623-1，2 代表样品 240701-2