

云南富宁地区两期基性岩对者桑金矿成矿贡献——来自年代学制约

王宁, 皮桥辉*, 罗排龙

桂林理工大学, 广西 桂林

收稿日期: 2022年12月19日; 录用日期: 2023年1月24日; 发布日期: 2023年1月31日

摘要

基性岩对卡林型金矿成矿起着至关重要的作用, 不仅为其提供物质来源还提供形成所需的环境。早期基性岩为卡林型金矿提供环境, 晚期基性岩提供成矿物质。本文主要针对云南富宁者桑金矿的早晚两期基性岩的岩石学、锆石U-Pb年代学进行研究, 并与利用年代学来探讨两期基性岩的源区特征和成因机制, 分析两期基性岩对金矿化的影响, 建立该区卡林型金矿的成矿模式。

关键词

卡林型金矿, 基性岩, 年代学

Two Periods of Basic Rocks in Funing Area, Yunnan Province, Have Contributed to the Mineralization of the Zhesang Gold Deposit Contribution—From the Constraints of Chronology

Ning Wang, Qiaohui Pi*, Pailong Luo

Guilin University of Technology, Guilin Guangxi

Received: Dec. 19th, 2022; accepted: Jan. 24th, 2023; published: Jan. 31st, 2023

*通讯作者。

文章引用: 王宁, 皮桥辉, 罗排龙. 云南富宁地区两期基性岩对者桑金矿成矿贡献——来自年代学制约[J]. 地球科学前沿, 2023, 13(1): 62-74. DOI: 10.12677/ag.2023.131006

Abstract

Basic rocks play an important role in the mineralization of Carlin type gold deposits, not only providing material sources but also providing the necessary environment for their formation. The early basic rocks provide the environment for Carlin type gold deposits, while the late basic rocks provide the minerals. This paper mainly studies the petrology and zircon U-Pb chronology of the early and late basic rocks of Zhesang gold deposit in Funing, Yunnan, and discusses the source characteristics and genetic mechanism of the two basic rocks by using chronology, analyzes the impact of the two basic rocks on gold mineralization, and establishes the metallogenic model of the Carlin type gold deposit in this area.

Keywords

Carlin Type Gold Deposit, Basic Rock, Chronology

Copyright © 2023 by author(s) and Hans Publishers Inc.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY 4.0).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



Open Access

1. 引言

基性岩是指软流圈或岩石圈地幔的基性熔融岩浆受地质构造作用对地壳浅部进行入侵, 并经过冷却凝结从而形成的岩石。国内对基性岩的研究大多集中于东南部, 少部分在西部和华北地块[1]-[6]。近年来, 随着对矿床研究的深入, 研究表明基性岩对于金成矿有着必然的联系, 新疆巴尔鲁克金矿进行的研究说明基性岩体不仅为金矿成矿的主要成矿物质, 还为金矿成矿流体提供了运移通道。对于地球整体, 金富集于地核中(2600×10^{-9}), 而在地壳中含量相对较低(4×10^{-9}), 在地幔中含量适中(500×10^{-9}) [7]。另外, 基性岩浆的构造作用极为强烈, 受深大断裂的控制较为明显, 因此导致成矿物质容易从地层中释放并活化运移[8]。

基性岩不仅在物质来源和构造结构上与金矿有关, 在时间上二者也密切相关[9], 例如, 对胶东地区多个金矿及基性岩脉进行年代学测定的结果显示, 玲珑金矿的主成矿年龄为 121.6 Ma, 邓各庄和金青顶金矿的年龄为 104.97 Ma [10], 栖霞金矿的年龄为 125.8 Ma [11]。从已测定的年龄发现, 胶东地区金矿主要以燕山期矿化为主, 而该区的基性岩成岩年龄也多集中在燕山期, 与金矿年龄高度相似。除胶东金矿聚集区外, 对小秦岭地区、滇黔桂“金三角”地区中煌斑岩脉与金矿的年龄研究也表明二者在时间上密切相关。

卡林型金矿指产于碳酸盐岩建造中呈微细浸染状的金矿床。该类矿床主要分布于美国西部, 在中国广泛分布于西南的滇黔桂地区和西北的川陕甘地区, 此外在南美洲和东南亚也少有分布。由于卡林型金矿规模大、产出集中、开采成本低、经济价值高, 我国的矿床地质研究学者对此类矿床给予了高度重视, 因此研究此类矿床的成矿机制有助于揭示其分布规律, 指导深部探矿, 缓解资源压力, 推动西部大开发战略的实施。近几年国家“973”项目(2007CB411408、G1999043200)、中科院项目(41230316、41030423、40773036、51174062、40572065)、国家自然科学基金重点项目(41072057、41303014、41362006、40973035、40973036、40873036、40672067、40173024)都对该类型金矿床的研究给予了大力资助, 自上世纪 80 年代以来, 相

继在滇黔桂地区、陕甘宁地区、秦岭地区、湘中地区发现数百处卡林型金矿，其中滇黔桂地区探明的黄金储量已达 1000 多吨，陕甘宁地区探明的黄金储量已达 200 多吨[12]。

滇东南地区地质构造背景较为复杂，且矿床在空间上与岩浆活动不十分密切，因此对于成矿年代以及基性岩与金成矿关系的研究稍显薄弱。本文依托于国自科《运用独居石和磷钇矿 U-Pb 法精确测定卡林型金矿成矿年龄》，以云南者桑金矿床为例，采集两期基性岩矿石，对其进行镜下观察、锆石 U-Pb 定年。通过对矿床进行精确定年来确定成矿物质的来源及迁移过程，继而确定岩浆活动与金矿的关系，建立该区卡林型金矿的成矿模式，指导该类矿床大规模的开发利用，解决资源枯竭问题。

2. 区域地质背景

者桑金矿位于云南省富宁县，处于滇、黔、桂“金三角”成矿带。地处扬子板块西南缘(图 1)[13]。位于华南褶皱系滇东褶皱带邱北-广南褶皱束与文山-富宁端褶束东端结合部位。研究区发育的主要地层按由老到新的顺序为：寒武系、奥陶系、泥盆系、石炭系、二叠系、三叠系、新生界。上、中、下泥盆统主要为泥岩、粉砂质泥岩、硅质岩和灰岩，下二叠统灰岩和硅质岩，上二叠统灰岩、泥质粉砂岩夹凝灰岩和硅质岩，中、下三叠统泥岩、粉砂岩、灰岩夹硅质岩和少量凝灰岩。

研究区构造整体上以东西向为主，在构造作用的强烈影响下形成了一系列破碎断裂的复式背斜和复式向斜。者桑背斜的周围发育有一系列东西向和北东向的断裂，这些断裂在经历了后期的构造叠加作用后又转为了北西向。构造作用强烈发生，导致大部分地层出现断层，部分地层出现倒转甚至平卧的现象，还有部分地层直接缺失。岩浆活动以基性为主，包括玄武岩和辉绿岩脉。

滇黔桂地区的主要岩浆活动为海西期和印支期的基性、超基性侵入岩。燕山期的岩浆活动主要有超基性岩以及酸性侵入岩。其中超基性岩主要发育在黔西南的镇宁-贞丰断裂带附近，受构造作用控制强烈，多以岩墙的形式产出；酸性侵入岩多发育于广西西部的巴马及其周围地区。此外，还有大范围的基性岩和酸性岩组合发育于右江盆地的深大断裂带。不过目前尚未在研究区发现有燕山期的基性岩或酸性岩作为赋矿围岩出现，说明燕山期的岩浆活动可能晚于该地区的成矿活动[14]。

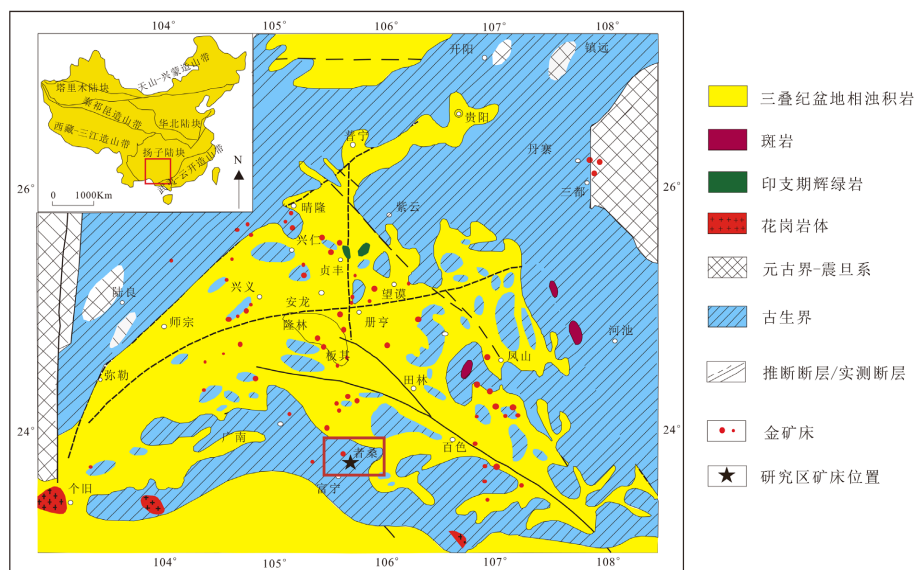


Figure 1. Rough map of geological background of the Golden Triangle area of Yunnan and Guizhou (asterisk is the sampling location) [15]

图 1. 滇黔桂金三角地区地质背景略图(星号为采样位置) [15]

3. 矿区地质特征

者桑金矿区出露的地层主要有吴家坪组、百逢组、罗楼组(图 2)。上二叠统吴家坪组(P_{3w}): 主要为泥岩、粉砂岩、凝灰岩, 除此之外还可见灰岩以及碎屑岩。下三叠统罗楼组(T_{1l}): 主要为细砂岩、粉砂岩、泥岩, 有细砂岩和凝灰岩夹杂其中, 百逢组(T_{2b}): 主要为泥岩, 偶见细砂岩夹于其中。

矿区构造整体以东西向为主, 研究区的矿化主要集中在背斜的南部, 主要出露在罗楼组地层中, 背斜核部的矿化不可见。受大地构造应力的影响, 地层揉皱变形强烈, 次级构造极为发育。早期形成的断裂带主要以东北方向为主, 随后在构造叠加的作用影响下断裂带开始扭转为北西向。主要控矿断裂带为: F2、F3、F5 断裂带。F2 断裂带控制了研究区内的大部分矿化。F5 断裂带该断裂形成于最晚期, 能为矿体的氧化和次生富集作用提供合适的通道和空间, 但也会破坏前期生成的矿体和地层。该矿区一共有 8 个主要矿体为 I~VIII 号矿体。其中 F2 断裂带内 VI、VII 号矿体规模最大。

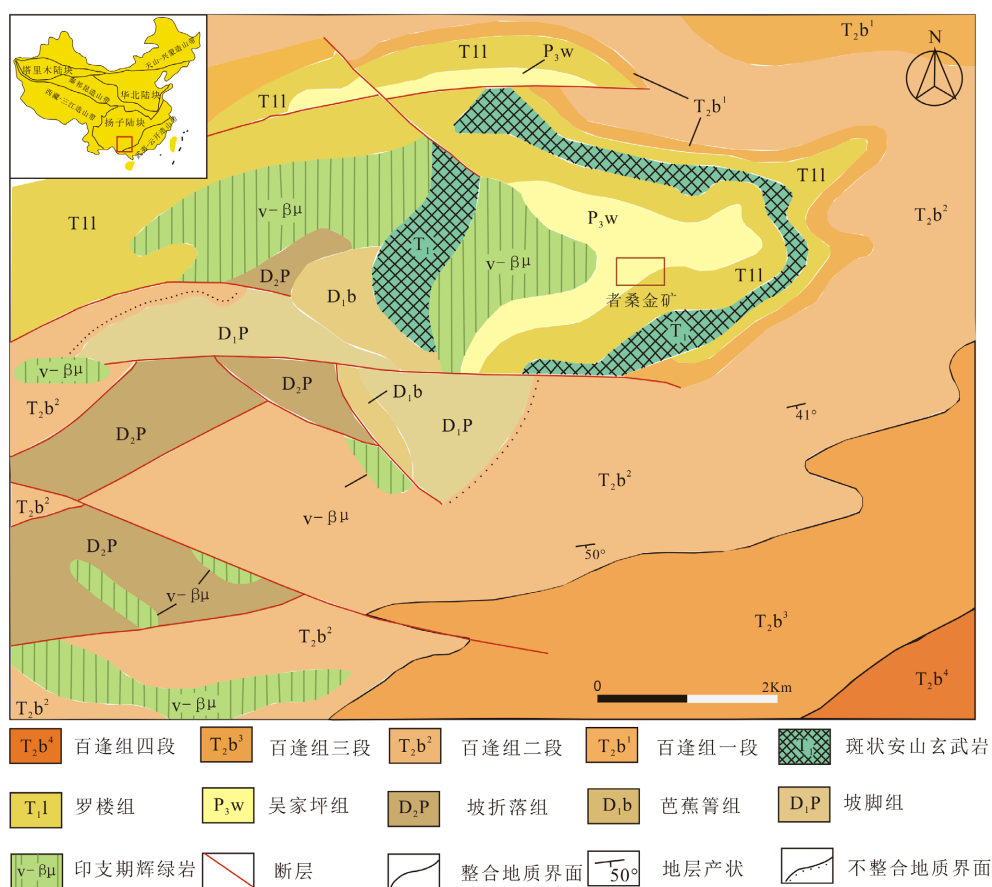


Figure 2. Geological sketch map of Zhesang gold mine [16]

图 2. 者桑金矿地质略图[16]

VII 号矿体(图 3): 该矿体和 VI 号矿体一样受 F2 断裂带的强烈控制, 与 F2 断裂带近似平行。矿体长约 400~500 m, 地表出露宽度约为 10~30 m, 总体走向为北东 50°, 倾向为南东 140°, 倾角 45°~75°。岩脉的侵入作用和构造运动的叠加作用导致矿体厚度发生不均匀变化, 局部膨胀延伸出几个分支。矿体平均品位约为 2.3 g/t, 而位于断裂接触带附近的金矿石品位可高达 2~7 g/t。

VIII 号矿体(图 3): 该矿体受 F9 构造断裂带的控制作用强烈, 构造位置处于研究区的南部。矿体遭

受了强烈的风化作用，风化后的颜色呈褐黄色、白灰色或者青灰色等，此外矿体还发生了褐铁矿的浸染作用，矿层的粘土化蚀变强烈。矿体长为 50~100 m，厚度为 5~35 m，平均品位为 0.4~8 g/t，金品位分布不均，一般在构造裂隙发育部位金的含量较高。

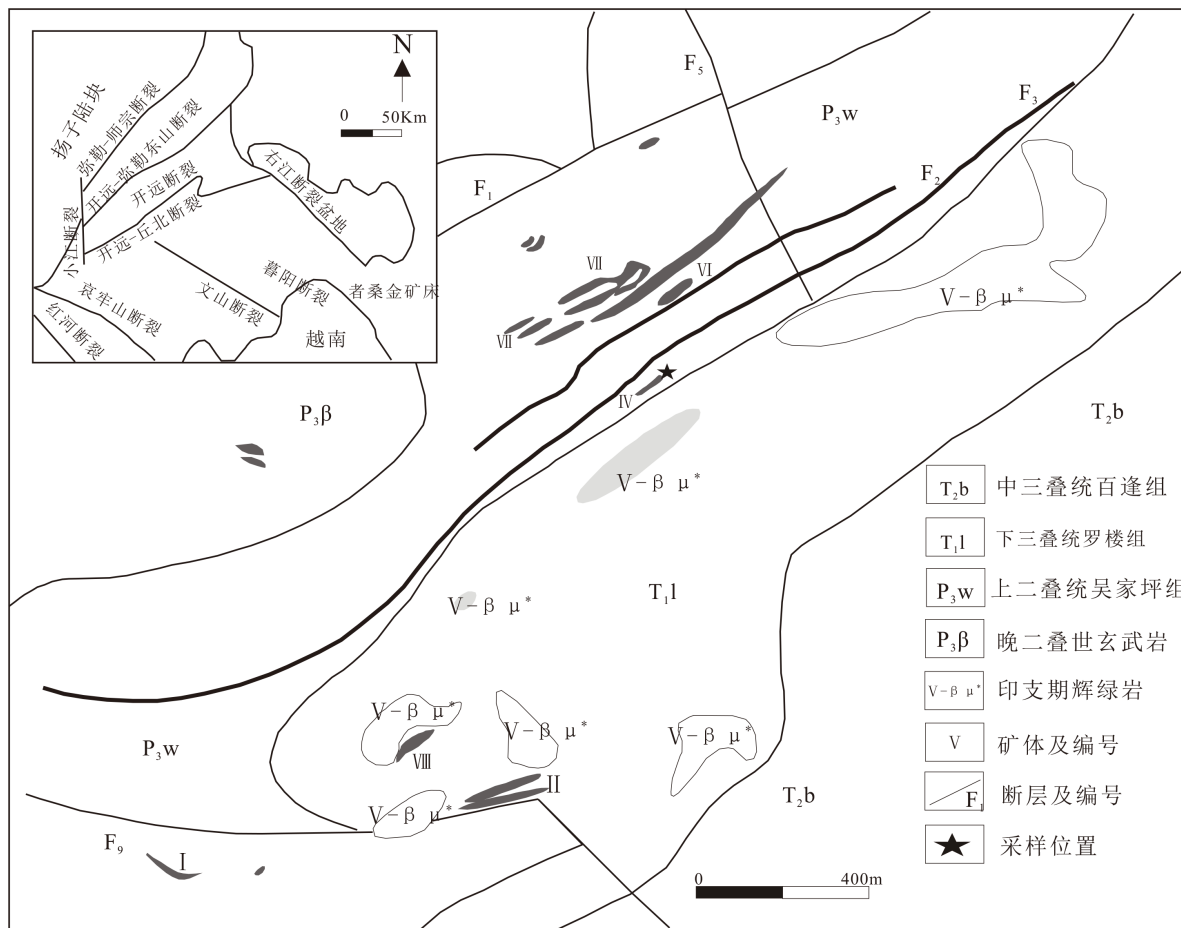


Figure 3. Geological sketch map of Zhesang gold mine [17]

图 3. 者桑金矿床矿体平面分布图[17]

4. 矿石特征

本区的矿石分为原生矿石和氧化矿石。原生矿石形成于沉积期，氧化矿石是受氧化作用形成的高品位岩矿石，产生于表生期。矿石中的金属矿物主要为毒砂、黄铁矿，约占 10%。其中黄铁矿占绝大多数，约占金属矿物的 70%左右，毒砂约占金属矿物 25%左右，剩下的 5%则为闪锌矿、黄铜矿和黝铜矿。矿石结构主要为填隙结构、泥质结构。矿石构造主要为土状构造、角砾状构造。

矿区热液蚀变现象极为普遍，围岩蚀变及金矿化则更为发育，矿化作用主要类型有毒砂化、黄铁矿化、硅化、褐铁矿化、粘土化、碳酸盐化。毒砂化主要在矿区断裂破碎接触带附近出现，通过从显微镜中观察其特征可知，毒砂颜色一般为钢灰色，常与黄铁矿共生；黄铁矿化是该矿区最为普遍且重要的围岩蚀变现象，通过显微观察发现黄铁矿粒度较为细小，粒度最大为 4 mm 左右，形态多样，有胶状、浸染状等；硅化常出现在断裂带附近并且常伴随褐铁矿化，局部蚀变作用较强，硅化一般伴随着金矿化一起发生，因此石英脉附近的金矿化一般都较好，可作为金矿化的重要指示标志；粘土化主要产物是水云

母, 也受断裂构造的控制强烈, 因此常出现在断裂破碎带附近, 局部会伴随有炭化, 叠加蚀变作用会使金的含量更高; 本研究区的碳酸盐化作用仅局部微弱发育, 具体表现为有脉状的方解石, 镜下可观察到石英脉与之共生(图 4)。

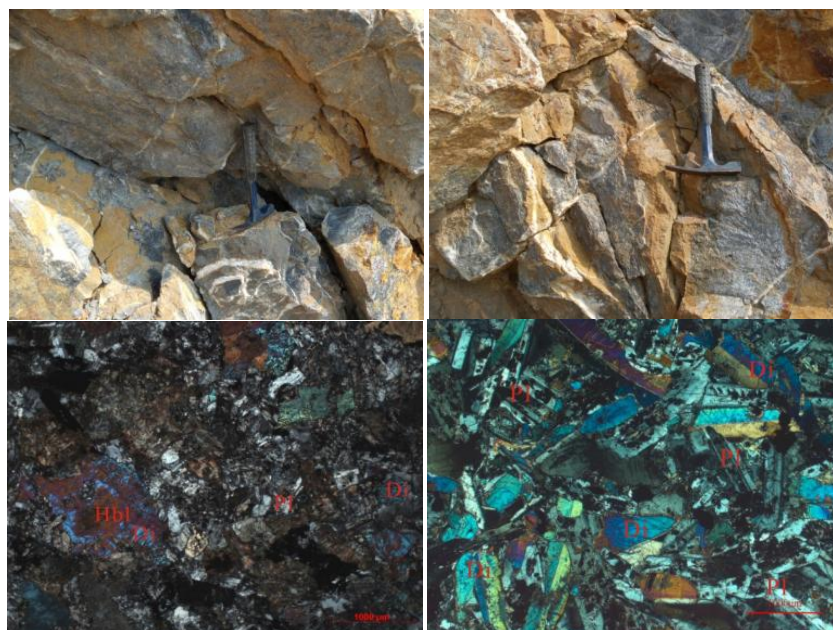


Figure 4. Wall rock hand specimen and micrograph of Zhesang gold mine

图 4. 者桑金矿围岩手标本及显微图片

者桑金矿的形成分三个阶段: 沉积期、热液期、表生期。沉积期阶段(成岩期)金初步富集, 由于二叠世基性岩浆频繁活动产生深大断裂, 从而使含金量高的物质沉积在坳陷区的隆起边缘, 基性岩在成矿过程中既作为赋矿岩石, 也提供了成矿物质。热液期分为三个阶段: 第一成矿阶段主要的蚀变作用是硅化和硫化, 其中硫化作用形成了自然金; 第二成矿阶段主要的蚀变作用是绢云母化和硫化, 有铁质矿物生成; 第三成矿阶段有辉锑矿、方解石等矿物生成, 形成 Zn、Sb、Cu、S 等系列矿物。表生期阶段金经过表生氧化作用被解离、活化、迁移, 部分会被褐铁矿等吸附。直接的证据是黄铁矿经过表生氧化蚀变作用形成纤铁矿, 而在纤铁矿中可观察到保留着原生自形晶假象的黄铁矿。

5. 采样位置及锆石 U-Pb 测年方法

本次研究以滇黔桂金三角地区的者桑金矿为研究对象, 在研究区进行了系统的、有针对性的样品采集(图 5), 尽可能的采取新鲜岩石样品或经受过很小蚀变的基性侵入岩露头区。早晚两期基性岩各采取样品 20 件。

锆石 U-Pb 年龄测试在中国科学院广州地球化学研究所矿床地球化学重点实验室利用 LA-ICP-MS 完成, 首先将采集的样品粉碎至 100 目, 通过电磁和重液分离技术, 并结合显微镜手工挑选出无裂隙、无包裹体、透明度高的纯净锆石颗粒。然后将挑选好的锆石颗粒制成环氧树脂靶, 固结后进行打磨抛光, 直至靶上的锆石核部暴露出来, 最后再用 Milli-Q 水清洗并风干。在分析之前, 所有锆石都进行反射光、透射光和 CL 分析, 以确定内部结构, 并选择用于锆石 U-Pb 分析的点。将锆石样品送去河北廊坊市诚信地质服务有限公司进行破碎和挑选; 之后在北京锆年领航科技有限公司使用 JSM6510 扫描电镜进行拍摄。最后使用 ICPMSDataCal 软件将原始测试数据离线处理完成[18] [19]。

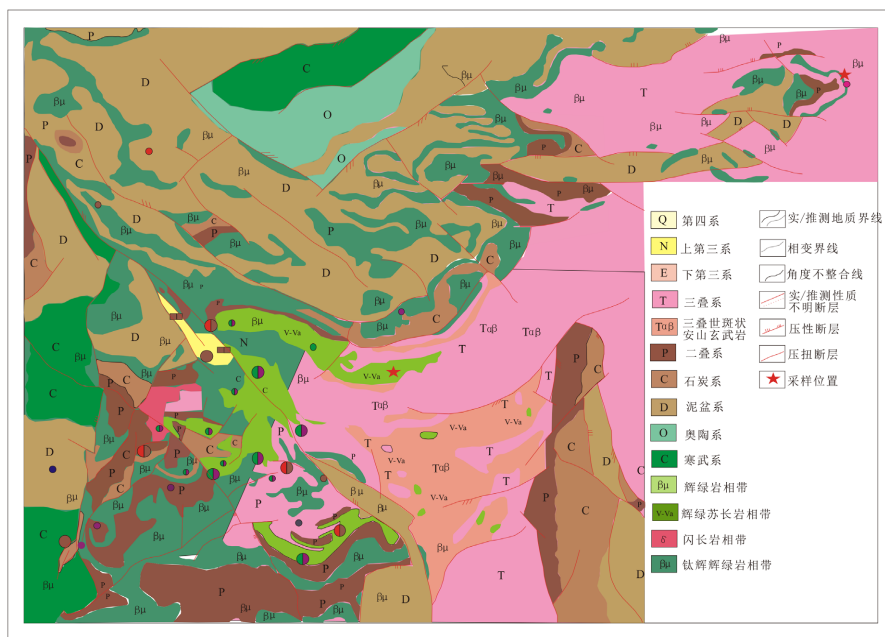


Figure 5. Distribution relationship between basic rock and gold deposit [20]
 图 5. 基性岩与金矿分布关系图[20]

6. 锆石 U-Pb 年代学

对早期基性岩(ZSE)和晚期基性岩(ZSL)中的 20 个锆石颗粒进行测试分析, CL 图像显示(图 6)锆石颜色成深灰色至浅灰色, 多呈棱柱状, 自形程度较好, 大小在 50~100 μm, 长宽比约为 1:1~2:1。在阴极发光成像过程中可见比较完好的振荡环带(图 6), 少数锆石的内部结构和残余核比较复杂, 为典型的岩浆锆石。因此, 样品锆石年龄可代表基性岩原岩成岩年龄。

根据表 1 和表 2 看出, 早期基性岩与晚期基性岩中的 Th 与 U 的值变化范围较大, 但 Th/U 值差距较小分别在 0.34~2.82 (早期基性岩)、0.00~3.16 (晚期基性岩), 绝大部分样品的 Th/U 值大于 0.4, 表明其岩浆结晶作用[21]。挑选出最具代表性的锆石颗粒进行测试定年, 剔除掉不符合谐和度要求(<90%)的年龄数据, 将剩余符合谐和条件的数据进行投图(图 7(a)), 从谐和图上可知, 大部分数据都落于谐和线及其附近, 表明可信度较好, 可以代表基性岩的结晶年龄。结果显示早期基性岩谐和年龄为 248 ± 5 Ma, 晚期基性岩年龄为 213 ± 5 Ma, 形成时代为三叠系。

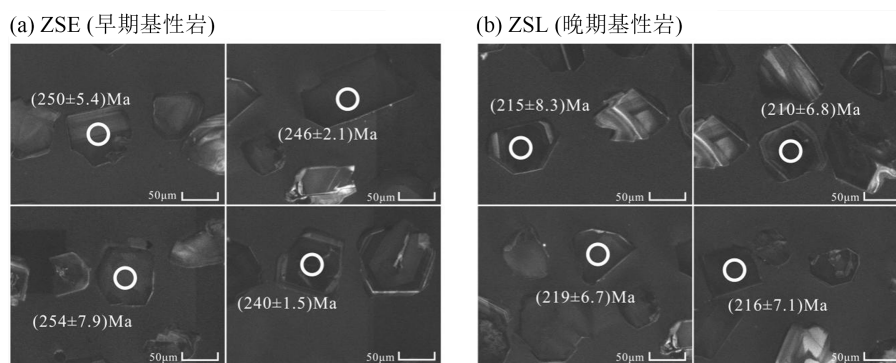


Figure 6. Cathodoluminescence diagram of zircon from early and late basic rocks
 图 6. 早晚两期基性岩锆石阴极发光图

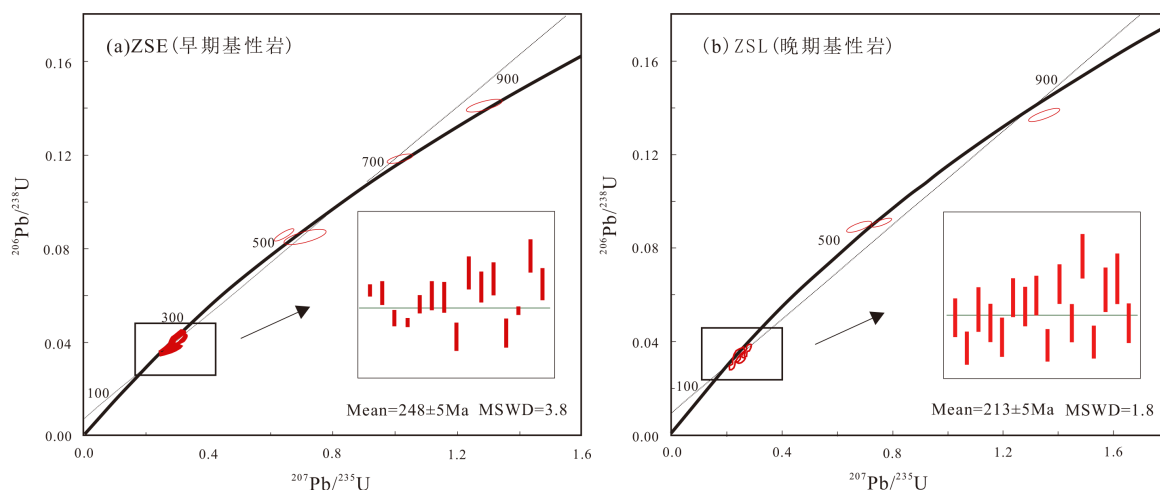


Figure 7. Zircon age harmony diagram of early and late basic rocks
图 7. 早晚两期基性岩锆石年龄谐和图

Table 1. Early mafic zircon U-Pb age table
表 1. 早期基性岩锆石 U-Pb 年龄表

测点号	含量 ppm			比值						年龄 Ma						
	Pb	Th	U	Th/U	$^{207}\text{Pb}/^{235}\text{U}$	$^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$	$^{208}\text{Pb}/^{232}\text{Th}$	$^{207}\text{Pb}/^{235}\text{U}$	$^{207}\text{Pb}/^{235}\text{U}$	$^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$	$^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$	$^{208}\text{Pb}/^{232}\text{Th}$	$^{208}\text{Pb}/^{232}\text{Th}$			
ZSE-1	161.81	3228.49	2303.31	1.40	0.3003	0.0065	0.0408	0.0005	0.0142	0.0003	267	5	258	3	285	6
ZSE-2	294.30	8002.86	3910.11	2.05	0.2814	0.0082	0.0405	0.0011	0.0125	0.0009	252	7	256	7	252	18
ZSE-3	226.91	6049.41	3138.22	1.93	0.2825	0.0073	0.0384	0.0007	0.0111	0.0007	253	6	243	4	223	14
ZSE-4	400.92	12489.73	4423.34	2.82	0.2740	0.0043	0.0380	0.0004	0.0120	0.0006	246	3	240	2	240	11
ZSE-5	333.20	9453.77	3773.95	2.51	0.2765	0.0067	0.0396	0.0008	0.0134	0.0005	248	5	250	5	270	9
ZSE-6	68.72	578.94	1283.92	0.45	0.2875	0.0107	0.0403	0.0013	0.0112	0.0004	257	8	255	8	226	9
ZSE-7	432.62	5449.16	7432.32	0.73	0.2976	0.0118	0.0402	0.0013	0.0127	0.0005	265	9	254	8	254	9
ZSE-8	15.32	144.18	303.84	0.47	0.2815	0.0139	0.0367	0.0012	0.0122	0.0005	252	11	233	8	246	11
ZSE-9	31.98	301.23	568.29	0.53	0.2966	0.0128	0.0423	0.0014	0.0132	0.0006	264	10	267	9	265	11
ZSE-10	27.97	294.85	481.21	0.61	0.3081	0.0138	0.0411	0.0013	0.0125	0.0007	273	11	259	8	251	13
ZSE-11	13.78	131.73	235.16	0.56	0.2955	0.0153	0.0418	0.0014	0.0128	0.0007	263	12	264	9	257	13
ZSE-12	11.88	133.82	220.81	0.61	0.2854	0.0218	0.0370	0.0013	0.0124	0.0006	255	17	234	8	249	12
ZSE-13	14.98	177.90	289.18	0.62	0.2763	0.0258	0.0364	0.0013	0.0113	0.0005	248	21	230	8	226	11
ZSE-14	34.06	165.65	185.92	0.89	1.0135	0.0277	0.1186	0.0014	0.0317	0.0021	711	14	722	8	631	41
ZSE-15	115.46	647.09	1007.75	0.64	0.6435	0.0211	0.0857	0.0014	0.0247	0.0012	504	13	530	8	494	23
ZSE-16	94.17	370.23	1102.31	0.34	0.7136	0.0470	0.0849	0.0020	0.0275	0.0032	547	28	525	12	549	63
ZSE-17	46.64	144.61	266.26	0.54	1.2838	0.0338	0.1412	0.0021	0.0436	0.0014	839	15	852	12	862	27
ZSE-18	1167.07	34484.65	12497.5	2.76	0.3011	0.0045	0.0390	0.0004	0.0121	0.0004	267	4	246	2	243	7
ZSE-19	16.32	132.93	265.36	0.50	0.3099	0.0151	0.0438	0.0014	0.0134	0.0008	274	12	276	9	269	15
ZSE-20	14.93	147.57	259.71	0.57	0.3127	0.0163	0.0413	0.0014	0.0147	0.0008	276	13	261	9	296	16

Table 2. Late mafic zircon U-Pb age table**表 2.** 晚期基性岩锆石 U-Pb 年龄表

测点号	含量 ppm			比值												
	Pb	Th	U	Th/ U	²⁰⁷ Pb/ ²³⁵ U	²⁰⁶ Pb/ ²³⁸ U	²⁰⁸ Pb/ ²³² Th	²⁰⁷ Pb/ ²³⁵ U	²⁰⁷ Pb/ ²³⁵ U	²⁰⁶ Pb/ ²³⁸ U	²⁰⁶ Pb/ ²³⁸ U	²⁰⁸ Pb/ ²³² Th	²⁰⁸ Pb/ ²³² Th			
ZSL-1	344	8859	5134	2	0.2453	0.0089	0.0334	0.0011	0.0104	0.0004	223	7	212	7	208	9
ZSL-2	193	3841	3166	1	0.2312	0.0085	0.0316	0.0010	0.011	0.0004	211	7	201	6	221	8
ZSL-3	176	5523	2351	2	0.2508	0.0105	0.034	0.0013	0.0114	0.0006	227	8	215	8	229	13
ZSL-4	243	7973	3318	2	0.2359	0.0097	0.0332	0.0011	0.0105	0.0004	215	8	210	7	210	8
ZSL-5	91	1745	1597	1	0.2538	0.0111	0.0324	0.0011	0.0104	0.0004	230	9	205	7	209	8
ZSL-6	606	18987	8231	2	0.262	0.0103	0.0346	0.0012	0.0107	0.0006	236	8	219	7	214	11
ZSL-7	57	1524	833	2	0.2515	0.0116	0.0341	0.0012	0.0103	0.0004	228	9	216	7	206	9
ZSL-8	97	2853	1311	2	0.2358	0.0101	0.0347	0.0011	0.0103	0.0004	215	8	220	7	207	8
ZSL-9	146	1121	842	1	0.7526	0.0287	0.0906	0.0014	0.0276	0.0009	570	17	559	9	550	18
ZSL-10	203	7444	2495	3	0.2473	0.0119	0.0318	0.0010	0.0104	0.0004	224	10	202	6	208	8
ZSL-11	59	1573	999	2	0.2195	0.0086	0.0293	0.0009	0.009	0.0003	201	7	186	6	180	7
ZSL-12	615	13390	8922	2	0.2512	0.0096	0.0353	0.0012	0.0112	0.0005	228	8	224	7	224	9
ZSL-13	336	9087	4958	2	0.2337	0.0088	0.033	0.0011	0.0102	0.0005	213	7	210	7	205	11
ZSL-14	259	365	1717	0	1.3480	0.0389	0.1369	0.0018	0.0466	0.0019	867	17	827	10	920	36
ZSL-15	142	4422	1548	3	0.2767	0.0115	0.037	0.0013	0.0123	0.0005	248	9	234	8	248	10
ZSL-16	367	11072	5174	2	0.2371	0.0091	0.0319	0.0010	0.0104	0.0004	216	7	203	6	208	8
ZSL-17	227	7706	2838	3	0.2442	0.0100	0.035	0.0012	0.0107	0.0004	222	8	222	8	215	8
ZSL-18	109	889	605	1	0.6782	0.0308	0.0889	0.0016	0.0263	0.0009	526	19	549	10	524	18
ZSL-19	293	8970	3792	2	0.2475	0.0111	0.0356	0.0014	0.0111	0.0005	225	9	226	9	223	11
ZSL-20	105	2829	1566	2	0.2426	0.0099	0.0331	0.0011	0.0102	0.0004	221	8	210	7	204	8

7. 两期基性岩对金矿化的可能作用

晚三叠纪, 由于华北板块和扬子克拉通板块碰撞导致华夏地台形成, 并且在此之前的泥盆纪由于伸展断裂的构造活动在扬子板块形成了两个盆地分别是右江裂谷盆地和川西北坳陷区。两个盆地在三叠纪之后又发生了造山运动(早侏罗世至晚白垩世)并形成褶皱。一系列运动导致在中生代时形成大范围低温成矿区域并形成大量的花岗岩体和伴生的钨锡矿床。低温的条件使后生沉积物大量富集于沉积岩中, 这为卡林型金矿形成提供了有利条件。矿床形成时间在 200~230 Ma 和 130~160 Ma, 对应与印支期(三叠纪)和燕山期(侏罗纪 - 白垩纪)的造山运动[22]。由于印支期的造山运动中, 中南半岛地块与华南克拉通的碰撞, 导致盆地卤水循环, 大量成矿元素从沉积层浸出, 并且因此次造山运动中形成的深部花岗质岩浆引起了大气降水的广泛循环, 也导致成矿物质的浸出, 最终在右江盆地形成了卡林型金矿床。而燕山期的成矿作用不太重要, 主要是对右江盆地和湘中盆地先前形成的矿床进行叠加。

7.1. 早期基性岩对金矿的可能作用

根据实验测得早期基性岩年龄为 248 ± 5 Ma, 这是远大于金成矿年龄(215.3 ± 1.9 Ma)的, Lin Li *et al.* (2016)指出, 基性岩脉的入侵触发了地幔衍生富 CO_2 热液流体的后续循环, 以从周围的岩石中浸出金。

因此认为成矿流体中的 CO_2 不可能来自早期基性岩。代鸿章等[23]在通过对石英及方解石中的流体包裹体的 O、H 同位素组成进行分析,得出者桑金矿的成矿流体来源为大气降水,同时发现成矿初阶段的 H、O 同位素组成与变质水的 H、O 同位素组成十分相近,说明成矿流体的来源为大气降水及建造水的混合。章永梅等[17]再对载金矿物黄铁矿和毒砂进行 S、Pb 同位素组成分析测试,得出的结论 S 主要是由地层中有机质与海水硫酸盐的热还原作用提供,Pb 一般来自于地壳,因此说明成矿物质主要来自地层。而这与早期基性岩的元素含量极为不符。

结合以上证据,无论时间还是物质来源上都可说明成矿流体与该区的早期基性岩浆活动应该没有直接的联系,所以我们推断早期基性岩可能只是提供了一个较为有利的还原环境。通过图 5 早期基性岩与金矿的空间关系也可以看出早期基性岩为金矿提供成矿环境和成矿物质并为其提供构造通道。

7.2. 晚期基性岩对金矿的可能作用

最近的很多晚期基性岩($213 \pm 5 \text{ Ma}$)和金矿床($215.3 \pm 1.9 \text{ Ma}$)不仅在时代一致(图 6(b)),而且从图 5 可以看出基性岩脉与金矿床在空间上是密切相关的。大多数晚期基性岩显示出强烈的自交代作用,表明水和其他挥发物的富集、与矿石有关的矿物(如黄铁矿、毒砂和辉绿岩)在某些岩脉中的组合,以及成矿组分的地幔来源与晚期基性岩相似。晚期基性岩在金矿的形成中起着尤为重要的作用。通过前人对本区主要的赋矿岩石凝灰岩和辉绿岩进行主微量元素分析得出母岩体侵入活动期后热液含有较高的矿化及矿化剂元素,构成了成矿热液或参与其他成矿热液构成了混合成矿热液,因此推测认为成矿物质可能主要由矿区外围的印支期基性岩浆活动期后热液提供以及对微量元素变化都可以证实成矿物质更可能来自于构造运动及晚期基性隐伏岩体。

最后我们总结了两期基性岩的成因及其与富宁地区金矿化的关系,并推断出了该类矿床的成矿模式图,如图 8 所示,印支期早期,研究区受峨眉山幔柱的影响形成了早期基性侵入岩,对成矿物质进行了初步富集,随着地幔柱在该区的活动减弱,最终形成了早期基性岩。到了晚二叠世-中三叠世早期,由于华南板块向印支板块俯冲造岩作用的影响,软流圈的上升流导致岩石圈不均匀减薄,使岩石圈地幔与下地壳发生部分熔融形成岩浆房,基性岩浆侵入到岩浆房中,造成不同程度的岩浆混合,形成了地幔与俯冲物质混合的岩浆源区,S 饱和度过高进行分离,分馏后的残留岩浆在上升的过程中不断萃取地层中的成矿物质,使成矿物质活化,最终形成以岩脉为中心的温度梯度带。温度差异使得由大气降水与建造水混合而成的成矿流体与其进行物质交换,受热的成矿流体向上循环往复,在不断的循环往复中从硫化物中萃取出金,这一过程使地层内成矿元素变得活化并发生迁移,并与晚期基性岩脉相互作用,随着温度的降低,成矿作用发生在构造叠加及成矿有利的部位,所以该区的矿床大多受构造断裂的严格控制,后期的褶皱弯曲使得矿体增厚变富,说明构造叠加改造作用对形成大规模的矿床同样有重要的意义。晚期基性岩在该过程中除了作为重要的热源,同时也带来了从地层中萃取的成矿物质,这些成矿物质一部分与成矿流体进行了物质交换,另一部分形成了透镜状矿体。

8. 找矿方向

矿床依附于区域性短轴状者桑背斜轴部,北东向断层破碎带控制了矿体和矿化基性侵入岩体的分布,矿体赋存于北东向断层破碎带和辉绿岩与围岩接触带中。上述构造部位是良好的构造找矿标志。吴家坪组和罗楼组细碎屑岩,是金的有利赋矿岩石,当其孔隙发育、成分复杂且含有机质时,更易成矿。金矿体产于侵入岩与围岩接触带,且在接触带附近辉长辉绿岩矿石品位较高。黄铁矿化、毒砂化、硅化是找金的蚀变标志,当黄铁矿、毒砂呈细粒浸染状,黄铁矿五角十二面体和毒砂“星状”双晶发育、黄铁矿具环边和环带结构时含金较高[24]。

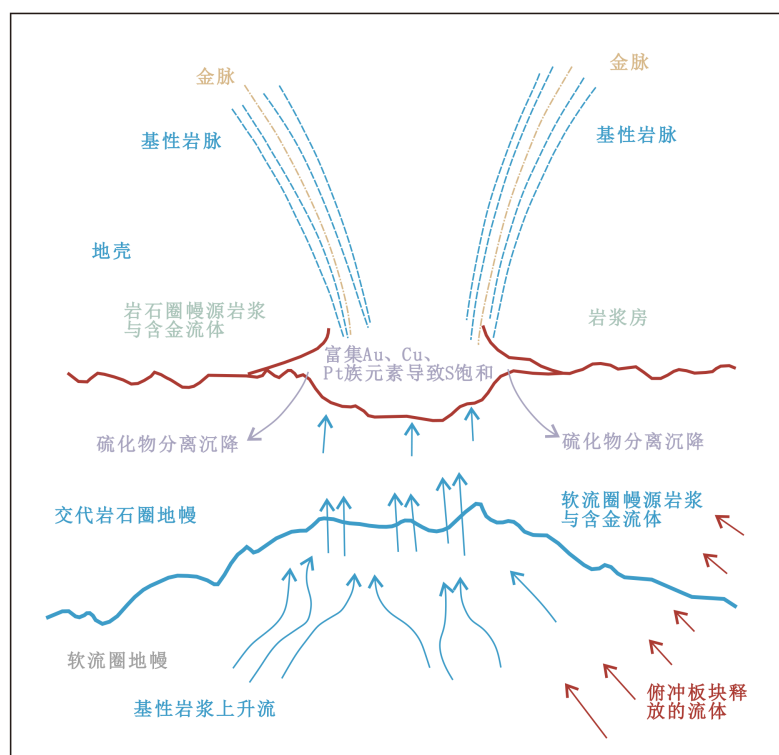


Figure 8. Genetic process of basic dyke and its tectonic model in relation to mineralization

图 8. 基性岩脉成因过程及其与成矿关系的构造模式图

9. 结论

对云南富宁地区两期基性岩进行了岩石学、年代学研究，通过测试分析并结合前人的研究成果得到如下结论：

锆石 U-Pb 年龄分析结果显示，早期基性岩年龄为 248 ± 5 Ma，符合前人推断的早期基性岩是峨眉山地幔柱与古特提斯洋俯冲作用的产物这一论点；晚期基性岩年龄为 213 ± 5 Ma，与前人测得的者桑金矿年龄 215.3 ± 1.9 Ma 高度一致。早期基性岩的年龄远大于金矿化年龄，通过前人资料显示流体包裹体和载金矿物的同位素分析及稀土元素配分模式图等均指示早期基性岩与金矿化关系不大，而晚期基性岩在时间和空间尺度上均显示出与金矿的密切联系，不仅作为热驱动力，还提供了成矿物质，在上升运移的过程中不断与成矿流体发生物质交换，反复从地层中萃取出 Au、Cu、Pt 等元素[25] [26] [27] [28]，使成矿物质活化运移最终在构造有利的位置沉淀成矿。因此我们认为金矿化主要受晚期基性岩的构造叠加影响，这一结论可为滇黔桂地区卡林型金矿的成因研究提供一定的参考。

在矿区外围沿者桑短轴背斜和北东向断裂带具有黄铁矿化、毒砂化、硅化蚀变部位和辉绿岩与围岩接触带的有利成矿地段，具备有利的成矿条件，有找到新金矿产地的可能。矿区内沿断裂破碎蚀变带和辉绿岩与围岩接触带，加大深部找原生矿的投入和工作力度，可以发现和找到新的矿体，扩大矿床规模。

参考文献

- [1] 李献华, 胡瑞忠, 饶冰. 粤北白垩纪基性岩脉的年代学和地球化学[J]. 地球化学, 1997, 26(2): 14-31.

- [2] Xu, H.J., Ma, C.Q., Song, Y.R., *et al.* (2012) Early Cretaceous Intermediate-Mafic Dykes in the Dabie Orogen, Eastern China: Petrogenesis and Implications for Crust-Mantle Interaction. *Lithos*, **154**, 83-99. <https://doi.org/10.1016/j.lithos.2012.06.030>
- [3] 葛小月, 李献华, 周汉文. 琼南晚白垩世基性岩墙群的年代学、元素地球化学和 Sr-Nd 同位素研究[J]. 地球化学, 2003, 32(1): 11-20.
- [4] Xiong, F.H., Ma, C.Q., Jiang, H.A., *et al.* (2014) Geochronology and Geochemistry of Middle Devonian Mafic Dykes in the East Kunlun Orogenic Belt, Northern Tibet Plateau: Implications for the Transition from Prototethys to Paleotethys or Ogeny. *Geochemistry*, **74**, 225-235. <https://doi.org/10.1016/j.chemer.2013.07.004>
- [5] Zhang, D., Zhao, K.D., Chen, W., *et al.* (2018) Early Jurassic Mafic Dykes from the Aigao Uranium Ore Deposit in South China: Geochronology, Petrogenesis and Relationship with Uranium Mineralization. *Lithos*, **308-309**, 118-133. <https://doi.org/10.1016/j.lithos.2018.02.028>
- [6] 胡瑞忠, 毕献武, 苏文超, 等. 华南白垩-第三纪地壳拉张与铀成矿的关系[J]. 地学前缘, 2004, 11(1): 153-160.
- [7] 方福康, 乔树岩, 田源, 等. 新疆巴尔鲁克西段基性-超基性岩带中金矿找矿潜力分析[J]. 西北地质, 2015, 48(3): 314-324.
- [8] 谢贵明. 基性-超基性岩与金矿[J]. 黄金科技动态, 1992(2): 19-20.
- [9] Nie, F.J., Jiang, S.H., Hou, W.R., *et al.* (2010) Geological Features and Genesis of Gold Deposits Hosted by Low-Grade Metamorphic Rocks in Central-Western Inner Mongolia. *Mineral Deposits*, **29**, 58-70.
- [10] 杨敏之, 黄国君. 胶东乳山钠长浅粒岩型金矿床地质地球化学研究[J]. 地质找矿论丛, 1992, 7(2): 1-14.
- [11] 翟建平, 徐光平, 胡凯. 栖霞金矿矿物、流体和同位素特征及意义[J]. 矿床地质, 1998, 17(4): 307-313
- [12] 阎凤增, 齐金忠, 郭俊华. 甘肃省阳山金矿地质与勘查[M]. 北京: 地质出版社, 2010.
- [13] Chen, M., Mao, J., Li, C., *et al.* (2015) Re-Os Isochron Ages for Arsenopyrite from Carlin-Like Gold Deposits in the Yunnan-Guizhou-Guangxi "Golden Triangle", South Western China. *Ore Geology Reviews*, **64**, 316-327. <https://doi.org/10.1016/j.oregeorev.2014.07.019>
- [14] Chen, J.H., Li, Y.Q. and Zhao, C.H. (2014) First Principles Study of the Occurrence of Gold in Pyrite. *Computational Materials Science*, **8**, 1-6. <https://doi.org/10.1016/j.commatsci.2014.02.033>
- [15] Hu, R.Z., Su, W.C., Xia, B., *et al.* (2002) Geology and Geochemistry of Carlin-Type Gold Deposits in China. *Mineralium Deposita*, **37**, 378-392. <https://doi.org/10.1007/s00126-001-0242-7>
- [16] 张建强, 王平, 窦世荣, 等. 云南省富宁县者桑金矿(阶段性)生产勘查报告[R]. 2008, 1-14.
- [17] 章永梅, 顾雪祥, 摆祥, 等. 云南富宁者桑金矿床硫铅同位素地球化学特征与成矿物质来源[J]. 地学前缘, 2013, 20(1): 32-39.
- [18] 李杰, 梁细荣, 董彦辉, 等. 利用多接收器电感耦合等离子体质谱仪(MC-ICPMS)测定镁铁-超镁铁质岩石中的镓-铟同位素组成[J]. 地球化学, 2007(2): 153-160.
- [19] 谢建成, 杨晓勇, 杜建国, 等. 铜陵地区中生代侵入岩 LA-ICP-MS 锆石 U-Pb 年代学及 Cu-Au 成矿指示意义[J]. 岩石学报, 2008, 24(8): 1782-1800.
- [20] 皮桥辉, 胡瑞忠, 彭科强, 等. 云南富宁者桑金矿床与基性岩年代测定-兼论滇黔桂地区卡林型金矿成矿构造背景[J]. 岩石学报, 2016, 32(11): 3331-3342.
- [21] Hoskin, P.W.O. and Black, L.P. (2000) Metamorphic Zircon Formation by Solid-State Recrystallization of Protolith Igneous Zircon. *Journal of Metamorphic Geology*, **18**, 423-439. <https://doi.org/10.1046/j.1525-1314.2000.00266.x>
- [22] Yan, D.P., Zhou, M.F., Song, H.L., *et al.* (2003) Origin and Tectonic Significance of a Mesozoic Multi-Layer Over-Thrust within the Yangtze Block (South China). *Tectonophysics*, **361**, 239-254. [https://doi.org/10.1016/S0040-1951\(02\)00646-7](https://doi.org/10.1016/S0040-1951(02)00646-7)
- [23] 代鸿章, 陈翠华, 顾雪祥, 等. 云南者桑金矿床载金矿物标型特征研究[J]. 矿床地质, 2014, 33(1): 70-86.
- [24] 潘光松, 胡桂明, 向群, 林芳. 云南富宁者桑金矿控矿条件及找矿方向分析[J]. 贵州地质, 2014, 31(3): 190-194.
- [25] Li, Q., Santosh, M., Li, S.R., *et al.* (2015) Petrology, Geochemistry and Zircon U-Pb and Lu-Hf Isotopes of the Cretaceous Dykes in the Central North China Craton: Implications for Magma Genesis and Gold Metallogeny. *Ore Geology Reviews*, **67**, 57-77. <https://doi.org/10.1016/j.oregeorev.2014.11.015>
- [26] Shen, J.F., Li, S.R., Santosh, M., *et al.* (2013) He-Ar Isotope Geochemistry of Iron and Gold Deposits Reveals Heterogeneous Lithospheric Destruction in the North China Craton. *Journal of Asian Earth Sciences*, **78**, 237-247. <https://doi.org/10.1016/j.jseaes.2013.04.004>
- [27] Shen, J.F., Santosh, M., Li, S.R., *et al.* (2013) The Beiminghe Skarn Iron Deposit, Eastern China: Geochronology, Iso-

tope Geochemistry and Implications for the Destruction of the North China Craton. *Lithos*, **156-159**, 218-229. <https://doi.org/10.1016/j.lithos.2012.11.003>

- [28] Li, L., Santosh, M., and Li, S.R. (2015) The “Jiaodong Type” Gold Deposits: Characteristics, Origin and Prospecting. *Ore Geology Reviews*, **65**, 589-611. <https://doi.org/10.1016/j.oregeorev.2014.06.021>