

文章编号: 1000-4734(2018) 05-0499-15

云南富宁两期基性岩地球化学性质与金矿成矿

韦朝文¹, 皮桥辉^{1, 2*}, 胡瑞忠³, 胡云沪¹, 吴建标¹, 李国¹, 杨雄¹

(1. 桂林理工大学 地球科学学院, 广西 桂林 541004; 2. 桂林理工大学 广西隐伏金属矿产勘查重点实验室, 广西 桂林 541004; 3. 中国科学院 地球化学研究所 矿床地球化学国家重点实验室, 贵州 贵阳 550081)

摘 要: 基性岩与金矿的关系一直备受关注。本文研究了富宁周边分布的 2 期基性岩, 以及该地区的几个大型金矿。结果表明, 早期基性岩的 U-Pb 年龄为(258±5) Ma, 与前人研究成果相吻合, 认为富宁早期基性岩与峨眉山幔柱相关。晚期基性岩²⁰⁶Pb/²³⁸U 年龄为(219. 9±6. 6) Ma (MSWD=1. 2), 与早期基性岩差异明显。晚期基性岩的主微量和稀土元素研究均显示可能存在俯冲物质混染, 熔体源区为富集岩石圈地幔端元(E-MORB) 和亏损岩石圈地幔端元(N-MORB) 部分熔融的混合产物。结合前人对该地区构造活动的研究, 认为晚期基性岩来源于地幔并受俯冲物质污染。矿相学与地球化学的研究显示, 2 期基性岩对于金矿的形成均有贡献, 早期基性岩提供了有限的作用, 而晚期基性岩年龄与该区几个大型金矿成矿年龄大致相吻合。结合地球化学分析与前人研究, 认为晚期基性岩除了大量萃取地层成矿物质外, 也是成矿流体循环成矿的重要热源。加之频繁的构造活动对早期矿床的叠加成矿作用, 最终形成该区的几个大型金矿。因此晚期基性岩与该区金矿成矿有密切关系, 是该区下一步寻大矿揪小矿的重要标志。

关键词: 基性岩; U-Pb 定年; 地球化学特征; 岩石成因; 金矿

中图分类号: P588. 124; P597. 3; P618. 51 文献标识码: A doi: 10. 16461/j.cnki.1000-4734. 2018. 38. 231

作者简介: 韦朝文, 男, 1994 年生, 硕士研究生, 主要从事低温矿床成矿科研工作。E-mail: 1193199489@qq.com

Geochemical Characteristics of Two Stages of Basic Dykes and Gold Mineralization at Funing , Yunnan Province , China

WEI Chao-wen¹, PI Qiao-hui^{1, 2*}, HU Rui-zhong³, HU Yun-hu¹, WU Jian-biao¹,
LI Guo¹, YANG Xiong¹

(1. Guilin University of Technology , Earth sciences institute , Guilin 541004 , China; 2. Guangxi Key Laboratory of Hidden Metallic Ore Deposits Exploration , Guilin University of Technology , Guilin 541004 , China; 3. State Key Laboratory of Ore Deposit Geochemistry , Institute of Geochemistry , Chinese Academy of Sciences , Guiyang 550081 , China)

Abstract: The relationship between basic rocks and gold deposits has always been paid much attention. In this paper , two basic dykes and several large gold deposits in the Funing area have been studied. The results show that , the U-Pb age of 258±5 Ma for the early basic rock is consistent with those of previous studies which had shown that the early basic rock in the Funing area was associated with the Emeishan mantle plume. The ²⁰⁶Pb/²³⁸U age of 219. 9±6. 6 Ma (MSWD=1. 2) for the late basic rock suggest that it is significantly different from the early basic rock. The study on the major , trace , and rare earth elements of the late basic rock shows that there could be subduction material contamination for the magma which was a mixture of melts derived from the partial melting of the enriched lithospheric mantle (E-MORB) and the depleted lithospheric mantle (N-MORB) . Combined with previous researches on the tectonic activity in the region , it was concluded that the late basic rock was derived from the mantle and contaminated by subduction materials. A comprehensive study of mineralography and geochemistry shows that the basic rocks of two

收稿日期: 2018-03-26

基金项目: 国家自然科学基金项目(批准号: 41563004) ; 广西自然科学基金(编号: 2017GXNSFAA198336) ; 国家自然科学基金项目(编号: 41674075) ; 广西自然科学基金项目(编号: 2016GXNSFGA380004) ; 广西高等学校高水平创新团队及卓越学者计划

*通讯作者 E-mail: 1481561260@qq.com

stages had contribution to the formation of gold deposits. The early basic rock played a limited role for the gold mineralization. Due to the age of the late basic rock is roughly coincided with the metallogenic ages of several large gold deposits in the region, with the combination of the geochemical analyses and previous studies, it is believed that the late basic rock has provided not only ore-forming materials mainly extracted from strata, but also an important heat source for the metallogenic fluid circulation and mineralization. Together with superposed mineralization of frequent tectonic activities on early deposits, several large gold deposits were finally formed in this area. Therefore, we think that the late basic rock could be closely related to the gold mineralization in this region, and it is an important sign for further exploring various sized gold deposits in the area.

Keywords: basic rock; zircon U-Pb dating; geochemical characteristics; rock genesis; gold deposit

基性岩与金的成矿作用的关系一直是国内外学者研究的热点。许多国内外学者把基性岩中的煌斑岩作为金矿的标志^[1-5]。近几年大量研究表明,基性岩与金矿联系紧密^[6-8],例如在对国内外卡林型金矿的研究过程中,发现部分卡林型金矿与基性岩浆活动关系非常密切^[9-15]。滇东南老寨湾金矿^[16]、陕西凤县八卦庙金矿^[17-18]、湖南万古金矿^[19-20]等金矿床的形成过程中都有地幔流体的参与,部分基性岩在矿床的形成阶段起到十分重要的作用^[21-22]。对一些金矿床,基性岩浆中的地幔流体不仅仅是部分成矿物质,也是成矿流体重要的物质来源^[23-25]。除此之外,基性岩与金矿在时间和空间上都存在密切的关系^[26-29]。

根据富宁幅区域地质调查报告^[30],富宁地区发育有早晚 2 期基性岩,本次研究所采基性岩以此为依据进行分类。早期为中三叠世碱性基性侵入岩,其分布范围较广。晚期基性侵入岩体,分布范围较早期小,侵入岩侵入于石炭纪、二叠纪及下、中三叠世地层组成的断裂及褶皱带之中,部分岩体见有捕掳体^[31-32]。关于富宁地区基性岩的成因存在几种不同的观点:一种观点认为该区基性岩与经过富宁的华南板块与印支板块的缝合带有关^[33-35];另一种观点认为富宁地区基性岩,成因上与陆缘裂谷扩张形成的弧后裂谷盆地体系密切相关^[36-37],在二叠—三叠纪,该地区属于因陆缘裂谷扩张形成的弧后裂谷盆地^[38-41],这也间接支持弧后裂谷盆地的观点;还有一种观点认为,该地区位于峨眉山大火成岩省外带,其形成时间和地球化学性质与峨眉山火成岩省存一定联系^[42],推测该区基性岩是峨眉山慢柱与特提斯洋俯冲共同作用的产物^[43]。

综上,前人对富宁地区基性岩进行了大量工作。其中针对早期基性岩的研究较为深入,但是对于晚期基性岩,相关研究较为缺乏,对富宁 2 期基性岩进行地球化学性质上的对比较少。本文将

结合前人研究,综合对比 2 期基性岩的地球化学性质,结合地质构造,分析了该区晚期基性岩的成因,并在此基础上,对该区的几个金矿成因进行对比分析,认为该区金矿与该区晚期基性岩两者在时空上存在藕合关系,在地球化学上存在一定关联性,故晚期基性岩可以为进一步找矿提供依据。

1 地质背景

研究区富宁县城周边区域大地构造位置处于华南陆块西南缘,属华南加里东褶皱系西缘,文山—富宁褶断束西部。区域总体构造线为北西向,局部构造线呈北东向,多为压扭性断层,暗示该区受来自于东南部的强大挤压。富宁地区位于右江盆地,右江盆地又处于扬子板块西南缘,记录了古特提斯分支洋盆俯冲闭合^[44-45]。该区地层众多,主要有寒武系、泥盆系、石炭系、二叠系、三叠系第三系及第四系,呈深水相,下寒武统未见出露,缺失下中奥陶统、志留系及白垩系(图 1)。

早期基性岩多呈钛辉辉长辉绿岩相,与围岩接触以热力变质为主,因原岩成分不同,故变质岩也有所不同。主要表现为斜长石的黝帘石化、绢云母化、绿帘石化,钛辉石被次闪石、绿泥石、粘土类矿物交代,橄榄石被蛇纹石、皂石交代,黑云母绿泥石化、皂石化。晚期基性侵入岩分为四个岩相带,分别为:致密辉绿岩相带(βua)、辉长苏长岩相带($v-ab$)、闪长岩相带(δb)^[30],各岩相带之间的岩石均有不同程度的蚀变^[46],岩石成分上主要由斜长石、辉石、角闪石、黑云母组成,含少量磁铁矿。结构有辉长结构、辉绿结构、嵌晶含长结构、堆晶结构、见明显的纳黝帘石化、绿帘石化、绢云母化、次闪石化、皂石化。晚期基性岩岩石一般呈深灰绿色,仅辉石连斑闪长岩为灰色,节理有三组,其中与围岩走向基本一致的一组最为发育,一般均球星风化,普遍含黄色金属硫化物。辉长苏长岩中金属硫化物较为富集,块状构造,仅见橄榄

辉长苏长岩具不明显的条带构造,其条带由矿物的定向排列组成,并与围岩走向基本一致。

晚期的基性岩与该区矿产的分布关系密切(图 1),区域矿产以金为主,金矿产地有 10 多处,多分布在辉长岩、辉绿岩体出露部位。区内金矿床、矿点的分布明显受构造、地层及火成岩的控制。总体而言,不同岩相带的接触带为矿化集中的部位。矿石矿物有黄铁矿、毒砂及少量褐铁矿,还有微量黄铜矿、黝铜矿及闪锌矿^[47-48]。

2 采样及分析测试方法

2.1 采样方法

本次研究,于富宁地区进行了 5 个地点的采样,样品均从最具代表性和最小蚀变的侵入基性岩露头区采集。其中于者桑附近采集了早期基性

岩样品,由于前人对早期基性岩已做了大量工作^[41-42, 50-55],故本次早期基性岩样品主要用于与前人的成果进行对比验证。另于采样剖面(FN)采集晚期基性岩样品(图 1) 12 件(GN-02、GN-03、GN-06、GN-10、HL-01、HL-02、HS-01、HS-02、SC-02、SC-03、WDW-02、WDW-04),WDW 为岩心附加样。进行年代学研究时将晚期基性岩锆石测试点统一编号为 FN,将早期基性岩测点编号为 ZSH-1。

2.2 测试方法

样品用金刚石浸渍的黄铜刀片切割,在钢带式破碎机中破碎并用去离子水清洗,最后采样玛瑙研钵粉碎以尽可能减少潜在的污染。使用飞利浦 PW2400 光谱仪,通过波长分散 X 射线荧光光谱法(WD-XRFS)测定主要氧化物。

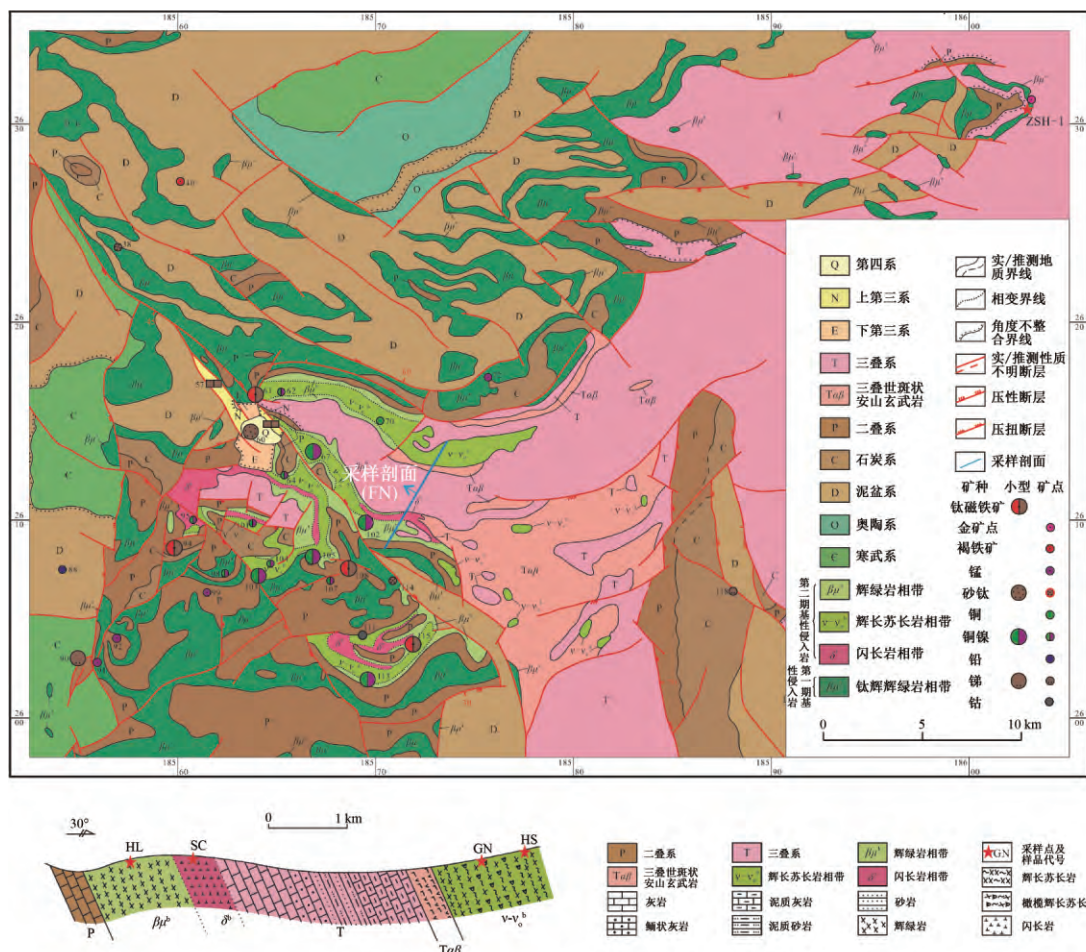


图 1 富宁基性岩与矿产分布关系及采样剖面(FN)图(据邵有元等^[49]修改)

Fig. 1. The plan map and profile for the distribution of basic rocks, mineral occurrences, and sampling sites from the Funing Area.

微量元素测试在中国科学院地球化学研究所矿床地球化学国家重点实验室完成,采用四级杆型电感耦合等离子体质谱分析。

基性岩样品破碎和锆石挑选在廊坊市诚信地质服务有限公司完成。锆石的阴极发光图像在北京锆年领航科技有限公司扫描电镜室拍摄完成,仪器型号为日本电子 JSM6510 扫描电镜,配有 Gantan 阴极荧光探头。

LA-ICP-MS 锆石 U-Pb 定年测试在中国科学院地球化学研究所矿床地球化学国家重点实验室完成。测试过程中以标准锆石 91500 为外标;以标准锆石 GJ-1 与 Plesovice 为盲样 检验 U-Pb 定年数据质量;以 NIST SRM 610 为外标,以 Si 为内标标定锆石中的 Pb 元素含量,以 Zr 为内标标定锆石中其余微量元素含量^[56-57]。原始的测试数据经过 ICPMSDataCal 软件离线处理完成^[57]。

原位微区锆石 Hf 同位素比值测试在中国地质大学(武汉)地质过程与矿产资源国家重点实验室(GPMR)利用激光剥蚀多接收杯等离子体质谱(LA-MC-ICP-MS)完成。

3 测试结果

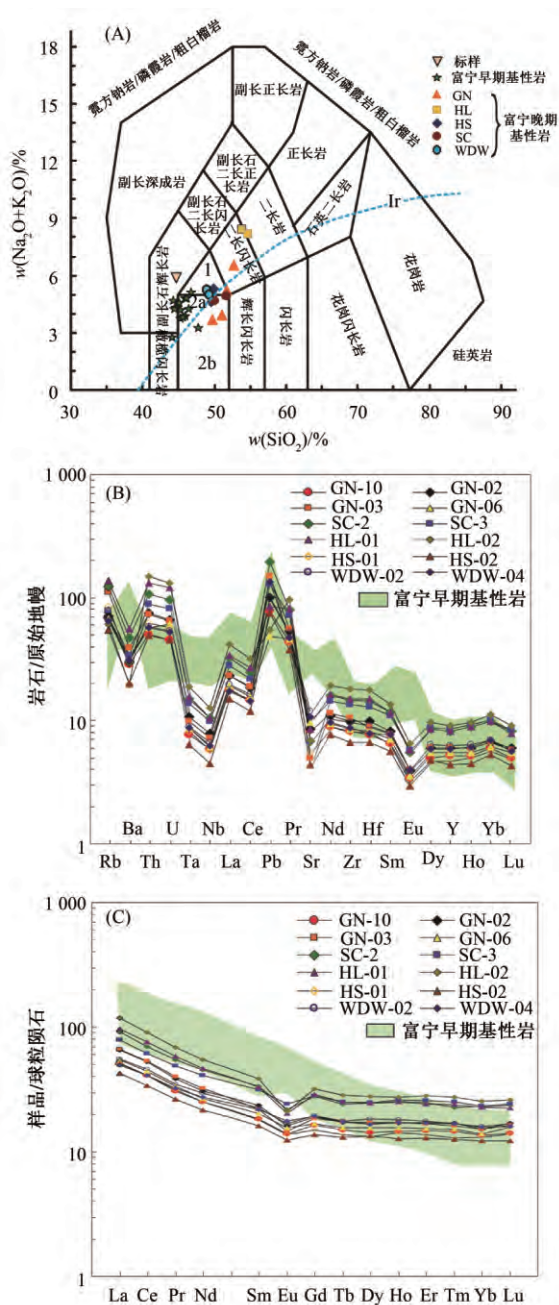
3.1 主微量元素地球化学

本次研究对富宁地区晚期基性岩 12 件样品

主微量元素进行了分析,结果见表 1 及表 2。早期基性岩样品(ZSH)符合前人高 Ti 基性岩($w(\text{TiO}_2) > 1.2\%$)的界定,且高精度 U-Pb 年龄与前人成果吻合,故收集前人高 Ti 基性岩数据进行对比研究,该组基性岩为该区早期基性岩,锆石 U-Pb 年龄为 $(258 \pm 3) \text{ Ma}$ ^[58],而早期的高 Ti 基性岩与峨眉山地幔柱相关,已得到证实^[52,58]。

TAS 图解(图 2 A)中早期基性岩均落于辉长岩区域,具有较窄范围的 $w(\text{SiO}_2)$ 变化范围(44.2%~47.9%),矿片中可见载金矿物(图 3a、b,电子探针数据见表 3),少量成矿前期黄铁矿被热液蚀变,形成胶状结构,或者热液成矿阶段的粗粒黄铁矿被后期毒砂交代形成骸晶结构。

对于晚期基性岩样品,总体 SiO_2 变化幅度较小,HL-01、HL-02 中全碱含量很高,分别为 8.43%和 8.14%,其中 $w(\text{Na}_2\text{O})$ 分别为 6.33%和 7.32%, $w(\text{K}_2\text{O})$ 相差不大,结合矿相学研究,可判定样品受到了次生蚀变过程中绿泥石化(图 3c、d)的影响,综合因素下导致这 2 样品落在闪长岩区域内。GN-10(52.79%)、HL-01(53.90%)、HL-02(54.75%) SiO_2 含量略高,在电镜下可见空隙中充填着石英细脉(图 3e、f),为岩浆后期热液活动产物,导致基性岩中 SiO_2 含量增高。



A: 岩浆/火成岩系统全碱-硅 (TAS) 分类图解 (Eric A.K. Middelmost) (资料来源: Earth-Science Reviews, vol. 37, (1994): 215-224, 数据来源: 早期基性岩^[58], 晚期基性岩, 自测; Ir-Irvine 分界线, 上方为碱性, 下方为亚碱性。1-二长辉长岩; 2a-碱性辉长岩; 2b-亚碱性辉长岩); B: 微量元素原始地幔标准化蛛网图; C: 富宁晚期基性岩稀土元素分布形式图(早期基性岩数据来源^[58])

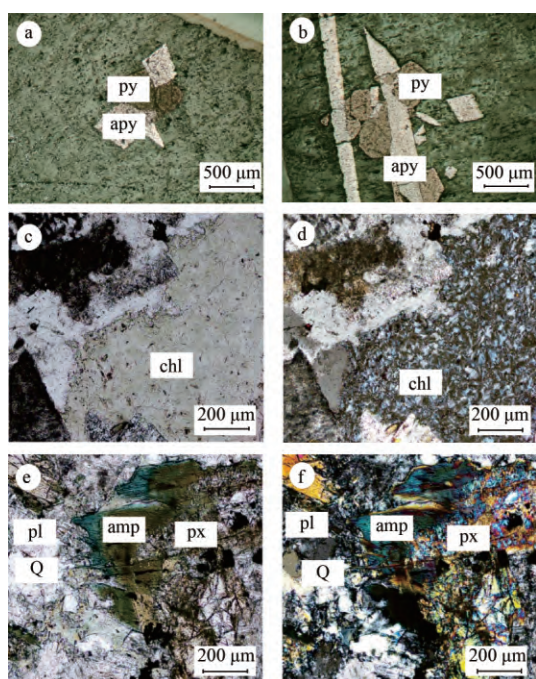
图 2 主微量元素综合图

Fig. 2. Integrated diagrams for major and trace elements.

表 1 富宁晚期基性岩主量元素分析结果 ($w_B / \%$)

Table 1. Analytical results of major elements of the late basic rocks from the Funing Area

样品	SiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	MgO	CaO	Na ₂ O	K ₂ O	MnO	P ₂ O ₅	TiO ₂	LOI	TOTAL
GN-10	52.79	14.21	10.32	5.53	7.47	4.64	1.88	0.15	0.12	1.05	2.34	100.50
GN-02	51.05	12.99	8.52	8.64	8.65	2.86	1.08	0.15	0.07	0.68	5.4	100.08
GN-03	51.65	12.75	8.89	9.66	7.97	3.68	1.52	0.15	0.07	0.66	2.94	99.93
GN-06	49.69	14.51	8.22	9.01	9.02	2.58	1.09	0.14	0.08	0.71	4.53	99.58
SC-2	50.12	13.04	9.36	10.61	9.23	3.60	1.09	0.16	0.07	0.64	1.28	99.20
SC-3	51.77	13.85	11.48	5.60	8.91	3.62	1.26	0.17	0.12	1.28	1.24	99.30
HL-01	53.90	14.08	8.88	5.24	5.79	6.33	2.10	0.11	0.09	0.89	2.99	100.39
HL-02	54.75	13.50	8.36	5.28	5.88	7.32	0.82	0.11	0.11	1.05	2.90	100.07
HS-01	49.52	13.59	7.90	10.27	9.14	3.31	1.27	0.14	0.06	0.56	3.70	99.45
HS-02	49.87	12.87	8.14	10.73	9.01	4.50	0.79	0.14	0.05	0.56	3.60	100.27
WDW-02	49.13	14.02	9.79	8.57	9.26	4.15	1.07	0.15	0.09	0.90	2.24	99.37
WDW-04	49.42	13.37	10.24	8.77	9.34	3.96	1.03	0.16	0.09	0.89	2.25	99.52



Py-黄铁矿, Apy-毒砂, Opx-正斜辉石, Q-石英, Cpx-单斜辉石, Chl-绿泥石, Hbl-角闪石, Pl-斜长石, Px-辉石
a, b. 早期基性岩中的载金矿物; c. 绿泥石化(单偏光); d. 绿泥石化(正交偏光); e. 辉石边部的闪石(单偏光); f. 辉石边部的闪石(正交偏光)

图 3 两期基性岩矿片

Fig. 3. Micrographs for two stages of basic rocks.

其余 9 件样品均落于碱性-亚碱性辉长岩图区,全碱含量为 4.35%,高于正常值(2.51%); $w(K_2O)$ 范围在 0.79%~1.52%,表现为低钾,样品中 Ti_2O 范围在 0.56%~1.28%之间,属于中低范围。样品总体烧失量(LOI)在 1.24%~5.4%,表明在岩浆演化的过程中伴有轻微的蚀变作用,在镜下也可见辉石的绿泥石化及斜长石的纳黝帘石化。

富宁县城周边晚期基性岩的稀土总量 ΣREE

为 $58.92 \times 10^{-6} \sim 120.47 \times 10^{-6}$,轻重稀土比值 $\Sigma LREE / \Sigma HREE = 3.60 \sim 4.61$, $(La/Yb)_N = 3.17 \sim 4.32$ 如图 2B 所示属于轻稀土富集型, $(Gd/Lu)_N = 1.10 \sim 1.34$, $\delta Eu = 0.60 \sim 0.84$,显示为 Eu 负异常。同时晚期基性岩的大离子亲石元素(LILE) Ba、Nb、Sr 存在轻微的负异常。

对于早期基性岩,在原始地幔标准化蛛蛛图中,表现出 LREE 富集,并具有正 Eu 异常,其特征在 Ba 相对于 Rb 和 Th 富集(图 2c)。早期基性岩显示富 Ti ($TiO_2 > 2.0$) 特征,同时具有富大离子亲石元素(LILE)和 Nb、Ta 等高场强元素(HFSE)、富轻稀土(LREE)等地球化学特征。

3.2 锆石 U-Pb 定年

此次用于分析的锆石,数据见表 4。均显示了岩浆成因锆石特征(岩浆成因锆石的 $Th/U > 0.1$),锆石的普通 Pb 含量较低,锆石阴极发光(CL)照相见图 4a-b。对于晚期基性岩(FN)将所有符合谐和条件的数据投于图 4c-d,除点 FN-32 可能打于继承锆石上外,其余各点 $^{206}Pb/^{238}U$ 谐和年龄(219.9±6.6) Ma (MSWD=1.2)。

对于早期基性岩(ZSH-1),对 15 个锆石颗粒进行了 U-Pb 同位素分析,其 Th/U 比值在 0.38~1.00 之间,将所有符合谐和条件的数据投于图 4c-d。U-Pb 同位素组成在误差范围内谐和, $^{206}Pb/^{238}U$ 加权平均年龄为(258±5) Ma (MSWD=0.35, 95%置信度),代表了基性岩的结晶年龄。

表2 富宁晚期基性岩主微量元素分析结果

Table 2. Analytical results of trace elements of the late mafic rocks from the Funing Area

	GN-10	GN-02	GN-03	GN-06	SC-2	SC-3	HL-01	HL-02	HS-01	HS-02	WDW-02	WDW-04
Li	21.70	16.40	12.70	26.90	21.50	13.40	12.10	10.10	14.20	15.00	13.20	17.40
Be	0.67	1.19	1.28	1.35	1.29	1.53	1.39	2.23	0.97	0.56	1.03	0.96
Sc	29.00	29.10	29.60	29.40	32.00	30.80	31.30	32.20	30.70	31.00	27.30	29.70
V	192.00	192.00	198.00	198.00	212.00	241.00	201.00	191.00	187.00	211.00	208.00	203.00
Cr	729.00	599.00	681.00	636.00	39.40	76.30	25.40	29.20	753.00	590.00	433.00	436.00
Co	49.50	41.70	42.00	46.20	36.80	37.00	30.30	29.40	42.80	45.30	43.90	46.80
Ni	181.90	189.31	134.16	164.62	38.27	33.25	23.87	26.17	148.16	127.58	118.53	129.23
Cu	50.46	69.13	69.59	52.37	36.43	37.73	18.90	16.39	112.05	62.81	42.30	48.17
Zn	85.95	87.63	86.79	81.23	123.86	128.92	75.16	70.78	84.01	76.85	89.32	105.33
Ga	13.00	13.80	13.90	14.40	17.80	17.80	17.10	17.20	13.50	12.40	14.50	14.80
Ge	1.48	1.52	1.54	1.30	1.51	1.61	1.44	1.36	1.28	1.30	1.47	1.49
As	0.30	0.50	1.37	0.97	0.74	0.86	0.54	0.44	0.62	0.79	0.47	0.40
Rb	42.80	43.30	68.30	42.40	75.60	48.30	84.00	37.20	52.40	34.00	41.80	39.70
Sr	174.00	178.00	103.00	200.00	139.00	141.00	178.00	143.00	114.00	91.40	246.00	221.00
Y	23.20	26.60	26.60	24.30	36.70	37.70	36.30	40.20	20.60	19.60	27.90	26.10
Zr	89.20	109.00	114.00	94.20	162.00	148.00	165.00	198.00	88.40	72.50	105.00	94.90
Nb	4.13	5.43	5.05	4.28	7.35	6.90	7.38	8.93	3.97	3.14	4.67	4.33
Mo	0.34	0.49	0.36	0.43	0.57	0.68	0.96	0.47	0.41	0.26	0.47	0.42
Cd	0.15	0.14	0.16	0.10	0.17	0.20	0.17	0.13	0.16	0.12	0.14	0.17
In	0.07	0.08	0.08	0.06	0.09	0.09	0.08	0.10	0.06	0.06	0.06	0.07
Sn	1.24	2.03	1.55	1.55	2.37	1.81	1.98	2.96	1.36	1.07	1.25	1.19
Sb	0.21	0.25	0.28	0.43	0.27	0.21	0.11	0.13	0.29	0.12	0.15	0.18
Cs	2.56	2.40	2.83	2.37	2.67	2.49	2.80	1.74	2.64	1.93	1.71	1.68
Ba	195.00	205.00	267.00	224.00	319.00	230.00	377.00	134.00	202.00	138.00	213.00	210.00
Hf	2.34	2.98	2.71	2.49	4.34	3.90	4.50	5.29	2.43	2.03	2.72	2.37
Ta	0.31	0.43	0.40	0.35	0.60	0.55	0.63	0.76	0.33	0.26	0.36	0.35
W	0.65	0.65	1.31	0.64	1.69	1.31	1.79	1.88	0.96	0.75	0.79	1.01
Tl	0.18	0.17	0.24	0.17	0.36	0.27	0.36	0.13	0.26	0.16	0.19	0.20
Pb	5.41	6.90	10.20	3.35	13.50	8.82	5.82	3.76	10.70	5.15	6.75	9.25
Bi	0.11	0.15	0.30	0.08	0.11	0.07	0.05	0.04	0.23	0.17	0.08	0.10
Th	4.17	6.18	6.06	4.72	8.78	7.26	10.90	12.30	5.11	4.10	4.80	4.68
U	0.93	1.35	1.31	1.23	1.97	1.65	2.47	2.69	1.17	0.92	1.09	1.08
La	12.00	15.50	15.70	12.90	21.60	18.60	22.80	27.80	12.10	10.10	13.10	11.70
Ce	25.20	32.30	32.60	27.10	42.70	37.50	46.20	55.30	25.00	20.80	28.10	25.00
Pr	2.90	3.65	3.81	3.16	5.20	4.66	5.52	6.49	2.97	2.50	3.30	3.06
Nd	11.70	14.40	15.00	12.50	21.20	19.10	21.70	25.50	11.70	10.10	13.70	12.80
Sm	2.80	3.58	3.35	3.10	5.09	4.79	5.06	5.90	2.76	2.47	3.43	3.35
Eu	0.81	0.93	0.85	0.90	1.27	1.39	1.18	1.22	0.80	0.72	0.98	1.02
Gd	3.37	3.89	3.83	3.43	5.70	5.77	5.92	6.52	3.07	2.80	3.99	3.95
Tb	0.56	0.65	0.65	0.58	0.90	0.94	0.94	1.07	0.51	0.49	0.66	0.65
Dy	3.60	4.30	4.34	3.96	6.21	6.25	6.19	7.02	3.37	3.41	4.63	4.20
Ho	0.83	0.96	0.97	0.88	1.43	1.48	1.42	1.55	0.80	0.72	1.02	0.98
Er	2.44	2.84	2.78	2.55	4.10	4.27	4.00	4.66	2.26	2.12	2.92	2.80
Tm	0.37	0.43	0.41	0.39	0.58	0.64	0.61	0.69	0.33	0.32	0.43	0.43
Yb	2.31	2.58	2.56	2.35	3.89	3.96	3.87	4.34	2.22	2.07	2.72	2.66
Lu	0.36	0.43	0.41	0.40	0.60	0.61	0.57	0.66	0.35	0.31	0.42	0.41
ΣREE	69.23	86.44	87.26	74.19	120.47	109.96	125.97	148.73	68.24	58.92	79.40	72.99
LREE	55.41	70.36	71.31	59.66	97.06	86.04	102.46	122.21	55.33	46.69	62.61	56.93
HREE	13.83	16.08	15.95	14.53	23.41	23.92	23.51	26.52	12.91	12.23	16.79	16.07
LREE/HREE	4.01	4.38	4.47	4.11	4.15	3.60	4.36	4.61	4.29	3.82	3.73	3.54
LaN/YbN	4.90	5.66	5.78	5.17	5.23	4.43	5.55	6.04	5.14	4.60	4.54	4.14
δEu	0.86	0.82	0.78	0.90	0.77	0.87	0.71	0.64	0.90	0.90	0.87	0.92
δCe	0.78	0.79	0.77	0.78	0.74	0.74	0.76	0.75	0.77	0.76	0.79	0.77

表 3 早期基性岩载金矿物电子探针分析数据($w_B/\%$)

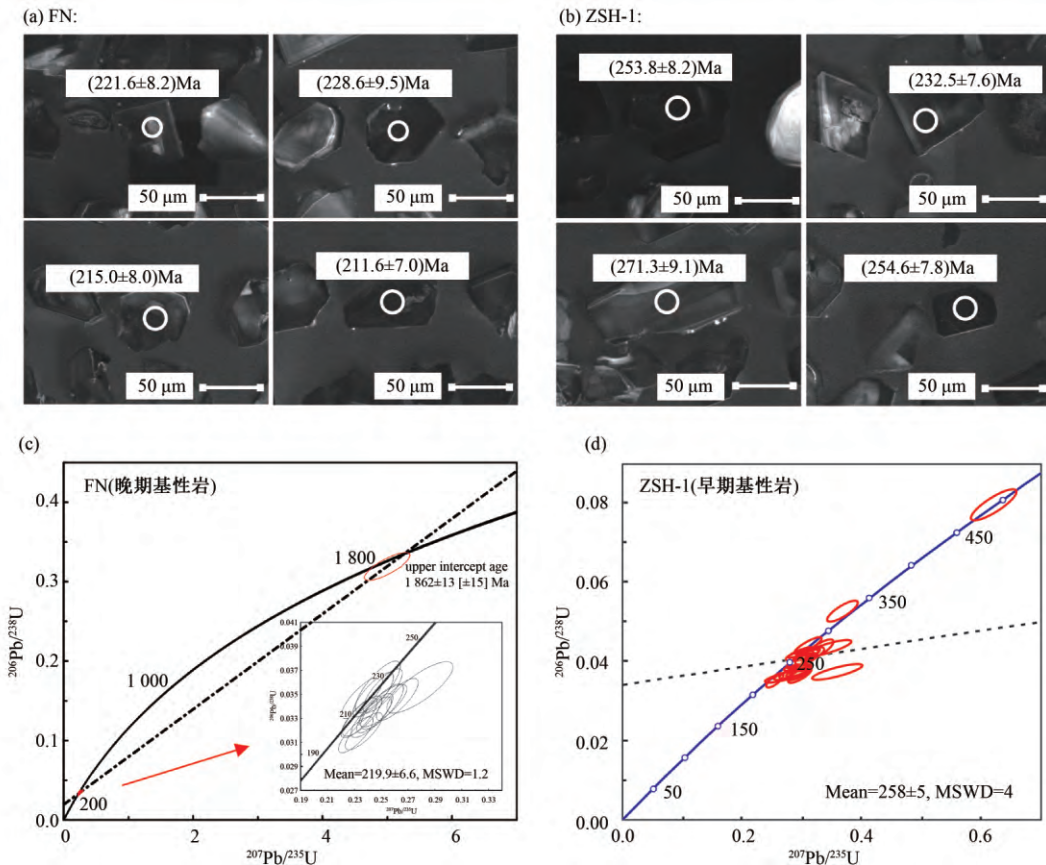
Table 3. EPMA analytical results of gold-bearing minerals in the early basic rocks

样品号	测试点编号	As	Se	Zn	Ni	S	Au	Co	Fe	Total
ZSH-1-82	Apy-5	40.59	0	0	0	22.6	0.04	0	34.64	97.87
	Apy-4	44.21	0	0.17	0.03	21.54	0.04	0	33.88	99.87
	Apy-1	41.3	0	0	0.03	22.5	0.04	0	34.44	98.29
	Py-1	2.89	0	0.06	0.04	50.54	0.01	0	45.92	99.45
	Apy-6	52.59	0	0	0.04	25.57	0.06	0	21.7	99.95
	Apy-3	36.26	0	0.04	0.05	21.58	0.01	0	30.96	88.91
	Apy-2	38.48	0	0	0	22.85	0.05	0	33.79	95.18
ZSH-1-81	Py-1	7.97	0	0	0	61.17	0.46	0	31.31	100.91
	Apy-2	70.39	0	0	0	17.16	0.16	0	12.85	100.57
	Apy-1	69.95	0	0	0.22	17.58	0.09	0	12.05	99.89
ZSH-1-72	Py-1	2.59	0	0.28	0.01	46.81	0.04	0	50.12	99.85
	Apy-2	39.34	0	0	0	21.98	0.05	0	38.06	99.42
	Py-3	4.55	0	0.06	0	46.16	0.03	0	49.24	100.04
	Py-2	13.89	0	9.22	0.44	56.83	0.89	0	16.5	97.78
	Py-1	13.31	0	0	0.67	64.97	0.12	0	20.8	99.88
ZSH-1-64	Apy-1	68.41	0	3.31	0.14	17.28	2.17	0	8.1	99.41
	Apy-5	36.32	0	0	0.02	21.88	0.03	0	41.2	99.46
	Apy-4	35.04	0	0	0.01	22.83	0.1	0	42.01	99.99
	Apy-3	35.65	0.07	0	0	22.35	0.05	0	41.86	99.98
ZSH-1-17	Apy-2	33.4	0	0	0	23.59	0.09	0	42.06	99.14
	Apy-5	41.14	0	0	0	23.66	0.03	0	34.32	99.15
	Apy-3	43.27	0	0	0	23.2	0.01	0	33.86	100.34

表 4 富宁地区两期基性岩锆石年龄表

Table 4. Zircon U-Pb dating results of the two basic rocks from the Funing Area

测点号	$w_B/10^{-6}$			w (Th)		R_w			$w(^{238}\text{U})$		年龄/Ma	
	Pb	Th	U	w (U)	$^{207}\text{Pb}/^{235}\text{U}$	$^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$	$^{208}\text{Pb}/^{232}\text{Th}$	$w(^{232}\text{Th})$	$^{207}\text{Pb}/^{235}\text{U}$	$^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$	$^{208}\text{Pb}/^{232}\text{Th}$	
FN-06	203.12	7443.96	2494.99	2.98	0.2312 ± 0.0085	0.0316 ± 0.001	0.011 ± 0.0004	0.8495	211±7.0	201±6.2	221±8.2	
FN-08	91.31	1744.74	1597.35	1.09	0.2371 ± 0.0091	0.0319 ± 0.001	0.0104 ± 0.0004	0.4833	216±7.5	203±6.4	208±8.4	
FN-09	192.96	3841.18	3166.27	1.21	0.2512 ± 0.0096	0.0353 ± 0.0012	0.0112 ± 0.0005	0.6773	228±7.8	224±7.5	224±9.4	
FN-10	128.35	3681.29	1907.00	1.93	0.2426 ± 0.0099	0.0331 ± 0.0011	0.0102 ± 0.0004	0.5520	221±8.1	210±6.9	204±8.2	
FN-15	367.28	11072.20	5174.40	2.14	0.2508 ± 0.0105	0.034 ± 0.0013	0.0114 ± 0.0006	0.5275	227±8.5	215±7.8	229±12.7	
FN-16	614.95	13390.27	8921.68	1.50	0.2337 ± 0.0088	0.033 ± 0.0011	0.0102 ± 0.0005	0.5665	213±7.3	210±6.8	205±11.0	
FN-18	104.99	2828.55	1566.07	1.81	0.262 ± 0.0103	0.0346 ± 0.0012	0.0107 ± 0.0006	0.4625	236±8.3	219±7.2	214±11.2	
FN-20	359.18	12077.92	3938.66	3.07	0.2475 ± 0.0111	0.0356 ± 0.0014	0.0111 ± 0.0005	0.4328	225±9.0	226±8.9	223±10.9	
FN-21	74.34	2393.63	872.44	2.74	0.2453 ± 0.0089	0.0334 ± 0.0011	0.0104 ± 0.0004	0.6045	223±7.3	212±6.7	208±8.9	
FN-23	480.53	12236.11	5969.00	2.05	0.2515 ± 0.0116	0.0341 ± 0.0012	0.0103 ± 0.0004	0.5630	228±9.5	216±7.3	206±8.9	
FN-26	90.33	3266.66	1032.39	3.16	0.2359 ± 0.0097	0.0332 ± 0.0011	0.0105 ± 0.0004	0.4264	215±8.0	210±6.9	210±8.1	
FN-27	176.39	5522.63	2351.38	2.35	0.2788 ± 0.0163	0.0356 ± 0.0014	0.0121 ± 0.0006	0.5714	250±13.0	225±8.8	243±11.2	
FN-29	335.68	9087.45	4957.87	1.83	0.2442 ± 0.01	0.035 ± 0.0012	0.0107 ± 0.0004	0.3862	222±8.1	222±7.6	215±8.4	
FN-30	352.41	14432.51	4679.61	3.08	0.2358 ± 0.0101	0.0347 ± 0.0011	0.0103 ± 0.0004	0.4630	215±8.3	220±7.1	207±8.2	
FN-32	33.09	21.46	84.90	0.25	4.9978 ± 0.2322	0.3192 ± 0.0116	0.0883 ± 0.0056	4.4831	1819±39.3	1786±56.6	1711±105	
ZSH-1-01	14.98	177.90	289.18	0.61	0.276 ± 0.026	0.036 ± 0.001	0.011 ± 0.001	1.632	248±21	230±8	226±11	
ZSH-1-02	59.47	352.04	596.68	0.59	0.773 ± 0.031	0.071 ± 0.002	0.018 ± 0.001	1.763	582±17	444±14	353±15	
ZSH-1-04	41.01	172.75	309.87	0.55	0.367 ± 0.017	0.053 ± 0.002	0.01 ± 0	1.898	318±13	330±11	198±9	
ZSH-1-05	13.17	91.20	254.98	0.35	0.296 ± 0.015	0.037 ± 0.001	0.015 ± 0.001	2.935	263±12	235±8	304±23	
ZSH-1-06	17.35	282.83	375.23	0.75	0.27 ± 0.014	0.03 ± 0.001	0.011 ± 0	1.337	242±11	189±6	217±9	
ZSH-1-07	336.9	4764.64	6220.42	0.76	0.293 ± 0.011	0.036 ± 0.001	0.011 ± 0	1.288	261±9	229±7	222±8	
ZSH-1-08	65.69	935.72	1257.71	0.74	0.254 ± 0.01	0.035 ± 0.001	0.011 ± 0	1.328	230±8	222±7	228±9	
ZSH-1-09	11.88	133.82	220.81	0.60	0.285 ± 0.022	0.037 ± 0.001	0.012 ± 0.001	1.650	255±17	234±8	249±12	
ZSH-1-12	44.09	264.92	400.62	0.66	0.871 ± 0.04	0.08 ± 0.003	0.026 ± 0.001	1.512	636±22	495±16	517±23	
ZSH-1-13	13.78	131.73	235.16	0.56	0.296 ± 0.015	0.042 ± 0.001	0.013 ± 0.001	1.770	263±12	264±9	257±13	
ZSH-1-16	36.21	85.06	172.60	0.49	1.707 ± 0.077	0.166 ± 0.006	0.049 ± 0.003	1.959	1011±29	990±34	967±54	
ZSH-1-17	23.28	85.31	147.65	0.57	2.799 ± 0.159	0.07 ± 0.003	0.082 ± 0.005	1.780	1355±43	434±16	1591±101	
ZSH-1-18	16.32	132.93	265.36	0.50	0.31 ± 0.015	0.044 ± 0.001	0.013 ± 0.001	1.962	274±12	276±9	269±15	
ZSH-1-19	71.56	664.44	1245.44	0.53	0.332 ± 0.013	0.043 ± 0.001	0.014 ± 0.001	1.799	291±10	273±9	290±14	
ZSH-1-20	18.56	134.09	134.11	1.00	0.722 ± 0.035	0.091 ± 0.003	0.027 ± 0.001	1.003	552±20	561±19	529±25	



a-b. 富宁地区基性岩代表性锆石阴极发光影像; c-d. 富宁两期基性岩锆石年龄谐和图
图 4 富宁地区两期基性岩代表性锆石阴极发光影响及年龄谐和图

Fig. 4. CL images and Concordia U-Pb age diagrams for zircons of two stages of basic dykes from the Funing Area.

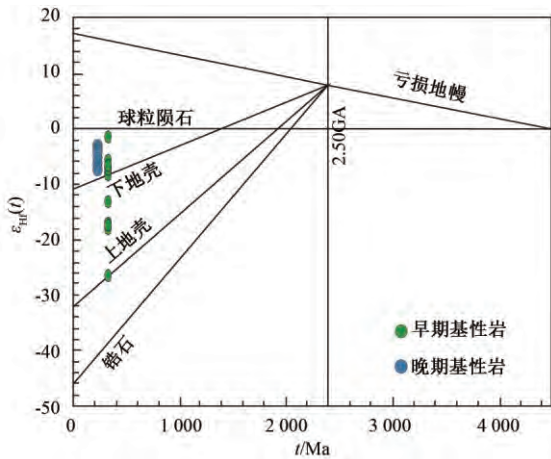


图 5 地球化学储源库 Hf 同位素图解

Fig. 5. Hf isotope diagram for geochemical reservoirs.

3.3 Hf 同位素

早晚两期锆石的 Hf 同位素数据列于表 5。 $\epsilon_{Hf}(t)$ 值按侵位年龄计算。除晚期锆石的 1 个点 其余各点 $^{176}\text{Lu} / ^{177}\text{Hf}$ 比值小于 0.004 表明锆

石在形成后基本没有明显的放射性成因 Hf 的积累, 所测定的 $^{176}\text{Hf} / ^{177}\text{Hf}$ 比值基本代表了其形成时体系的 Hf 同位素组成。

形成于 219.9 Ma 的晚期基性岩体 (FN-1), $\epsilon_{Hf}(t)$ 值为 $-3.34 \sim -7.18$ (图 5), 对应的 t_{DM1} 分别变化于 1016~1233 Ma (表 5)。

形成于 258 Ma 的早期基性岩 (ZSH-1) $\epsilon_{Hf}(t)$ 值较之晚期基性岩表现出相对宽广的范围值, 为 $-1.37 \sim -26.67$, 但多集中于 $-6 \sim -8$, 及 $-16 \sim -18$ 这 2 个区间 (图 5), 对应的 t_{DM1} 变化也分为 2 个区间, 分别为 1137~1264 Ma 和 1576~1611 Ma (表 5), 推测早期基性岩形成过程中, 岩浆混合作用强烈。

4 讨论

4.1 两期基性岩化学性质对比

本文对早期基性岩进行了锆石年代学及矿相学研究, 早期基性岩的结晶年龄为 $(258 \pm 5) \text{ Ma}$,

表 5 Hf 同位素测试结果

Table 5. Analytical results of the Hf isotope

点号	年龄/Ma	$^{176}\text{Lu}/^{177}\text{Hf}$	$^{176}\text{Hf}/^{177}\text{Hf}$	$f_{\text{Lu}/\text{Hf}}$	$\varepsilon_{\text{Hf}}(t)$	t_{DM1}/Ma	t_{DM2}/Ma	资料来源
FN-1-4		0.002341	0.282489	-0.93	-5.54	1119	1333	
FN-1-6		0.004037	0.282450	-0.88	-7.18	1233	1416	
FN-1-7		0.001866	0.282523	-0.94	-4.26	1055	1267	
FN-1-8	219.9	0.001300	0.282492	-0.96	-5.27	1083	1319	自测
FN-1-11		0.002870	0.282553	-0.91	-3.34	1040	1221	
FN-1-12		0.001969	0.282476	-0.94	-5.93	1125	1352	
FN-1-13		0.000918	0.282450	-0.97	-6.72	1132	1393	
FN-1-15		0.001341	0.282540	-0.96	-3.57	1016	1233	
ZSH-1-01	258	0.000675	0.281861	-0.98	-26.67	1936	2443	自测
ZSH-1-02		0.001691	0.282388	-0.95	-8.22	1244	1510	
ZSH-1-03		0.002400	0.282409	-0.93	-7.59	1237	1477	
ZSH-1-04		0.000486	0.282093	-0.99	-18.45	1611	2030	
ZSH-1-05		0.001280	0.282408	-0.96	-7.42	1201	1470	
ZSH-1-06		0.001722	0.282450	-0.95	-6.03	1156	1399	
ZSH-1-07		0.003546	0.282418	-0.89	-7.46	1264	1469	
ZSH-1-08		0.000913	0.282375	-0.97	-8.55	1236	1528	
ZSH-1-09		0.001363	0.282413	-0.96	-7.27	1197	1463	
ZSH-1-10		0.001425	0.282129	-0.96	-17.34	1600	1972	
ZSH-1-11	258	0.001006	0.282383	-0.97	-8.25	1227	1513	自测
ZSH-1-12		0.000209	0.282110	-0.99	-17.80	1576	1998	
ZSH-1-13		0.001182	0.282370	-0.96	-8.76	1252	1539	
ZSH-1-14		0.001064	0.282449	-0.97	-5.93	1137	1395	
ZSH-1-15		0.003107	0.282426	-0.91	-7.12	1237	1452	
ZSH-1-16		0.000903	0.282567	-0.97	-1.74	967	1182	
ZSH-1-17		0.000141	0.282233	-1.00	-13.43	1406	1777	
ZSH-1-18		0.001858	0.282409	-0.94	-7.50	1219	1474	
ZSH-1-19		0.000337	0.282446	-0.99	-5.91	1119	1395	
ZSH-1-20		0.002190	0.282426	-0.93	-6.95	1206	1445	
球粒陨石		0.0332±2	0.282772±29	0				BlichertToft and Albaredo
亏损地幔		0.0384	0.28325	0.16				Griffinetal. 2000
下地壳(镁铁质)		0.022		-0.34				Amelinetal. ,1999
上地壳(长英质)		0.0093		-0.72				Amelinetal. ,1999
平均地壳		0.015		-0.55				Griffinetal. 2002

注: 锆石 Hf 同位素组成的计算参数为: ^{176}Lu 衰变常数 $\lambda = 1.867 \times 10^{-11}$ (Soderlund et al. 2004)。

前人测得该区高 Ti 基性岩锆石 U-Pb 年龄为(253 ± 8) Ma^[58], 为本次研究的早期基性岩。前人研究已经证明富宁高 Ti 基性岩与峨眉山地幔柱相关^[42, 50, 58], 故我们认为本区早期基性岩与地幔柱有关。峨眉山大火成岩省事件发生于 260 Ma 左右, 该事件发生时间上与早期基性岩形成基本一致, 而锆石 U-Pb 定年将富宁晚期基性岩形成时间厘定为(219.9 ± 6.6) Ma, 已有研究表明尽管大火成岩事件的持续时间可达 10 Ma 以上, 但其主喷发期仅有几个百万年, 时间上与本次研究的晚期基性岩存在较大差距。

主量元素显示, 晚期基性岩成岩过程中岩浆的分离程度较低, 接近与初始岩浆的成分。 Al_2O_3 、 K_2O 、 Na_2O 随着 SiO_2 含量的增加而增加,

表现为正相关性, CaO 、 Fe_2O_3 、 MgO 随着 SiO_2 含量的增加而降低, 表现为负相关性, 表明晚期岩浆相比早期岩浆, 其演化过程中有斜长石、镁铁质矿物的分异结晶。在微量元素分析中, 晚期基性岩的大离子亲石元素(LILE) Ba、Nb、Sr 存在轻微负异常, 高场强元素(HFSE) Ta 为负异常, Ti 为轻微负异常, 具有弧后盆地玄武岩的特征, 而早期基性岩则显示类似于洋岛型玄武岩(OIB)的特征^[33]。进一步对比早期基性岩, 我们发现二者的 $w(\text{TiO}_2)/w(\text{SiO}_2)$ 和 $w(\text{P}_2\text{O}_5)/w(\text{SiO}_2)$ 具有明显不同的趋势, 早期基性岩中 2 个比值的巨大变化可能是由于磁铁矿和磷灰石的积累不均, 这说明了二期基性岩不同的 FC 过程。Cu、Ni 作为是亲硫元素, Cu / Ni 值的变化受硫化物分异的控制, 晚期基性岩中 Cu / Ni 值变化较早期基性岩

大,说明早期基性岩中硫化物的分异结晶不是重要的阶段^[58] 暗示两期基性岩的形成过程存在较大差异。

在蛛网图中,晚期基性岩中存在显著的 Nb-Ta 负异常,造成 Nb-Ta 和 Ti 显著的负异常有多种可能,在该地区特征性负异常的最大可能为俯冲板片流体交代地幔楔时,角闪石发生沉淀,流体中 Nb、Ta 进入结晶的角闪石。我们在进行岩相学观察过程中也发现了角闪石的存在(图 3c、d),推测这些负异常的形成与俯冲板有关,这也暗示了晚期基性岩来源于地幔并受俯冲物质污染。同时在晚期基性岩岩浆岩分离结晶过程中,斜长石的大量结晶,导致残余熔体中出现明显的 Eu 负异常,而早期基性岩则显示 Eu 的正异常,这也说明了二者成岩过程存在差异。

晚期基性岩的 La/Sm=3.88~4.71 表明岩浆受到了地壳混染作用。在 Hf 同位素分析中,晚期基性岩岩浆的分离程度较低,其源区特征接近地壳,暗示其受俯冲物质混染严重,同时 Hf 模式年龄大于其形成年龄,也表明其岩浆源区受到过地壳物质的混染,而早期基性岩显示的地壳源区与该时期的华南板块运动密切相关。

一些不相容元素的显著差异,以及分配系数十分相近的两个元素(如 Nb/Yb、Th/Yb)在两期基性岩之间的比例表明,它们的来源于具有不同程度的地壳污染的不同岩浆^[59],两图中早期基性岩数据均接近 OIB 端元显示与峨眉山地幔柱的密切关系,图 6a 中未受结晶分异及部分熔融响

的晚期基性岩显示出了富岩石圈地幔端元(NORB)和亏损岩石圈地幔端元(MORB)的特征,暗示其具有 2 个端元的混合源区;而图 6b 中显示了晚期基性岩 Th/Yb 比值的升高,这暗示了俯冲物质的混入。

滇东南八步发现的蛇绿岩,证明了富宁地区在构造上受板块俯冲的影响,徐伟等(2008)^[38]认为,由于八步蛇绿岩部分元素 Li、Th 的富集以及 Nb、Ta、Zr、Hf 的亏损表现出俯冲带的特征,故提出八步蛇绿岩的形成与特提斯无关,而是代表了与太平洋板块俯冲有关。张俊斌等^[60]认为早二叠世时特提斯分支—右江洋盆的彻底张开,八步蛇绿岩代表了强烈扩张期的残留洋壳。晚二叠世—中三叠世早期,随着右江盆地的收缩,洋壳的俯冲和消减在滇—桂边界发育了大量的岛弧火山岩^[34]。中三叠世晚期(约 231Ma)仰冲至活动大陆边缘,随后在三叠纪中晚期印支晚期造山过程中,被从南边越南 Phu Ngu 带逆冲推覆体外来物质覆盖,这与推覆体锆石 U-Pb 年龄 237~228 Ma^[61]吻合,说明推覆体的形成与华南板块的俯冲有关,结合该区的成岩时期的挤压环境这暗示了富宁地区受到了晚二叠世—中三叠世早期板块俯冲造岩作用的影响,并形成了该区域晚期基性岩,这也解释了晚期基性岩具有弧后盆地玄武岩特征的原因为古陆壳或洋壳的混染。

综上,晚期基性岩和早期基性岩的不同地球化学特征,不能由同种岩浆的结晶分异或者部分熔融作用产生,这些都暗示了富宁地区晚期基性

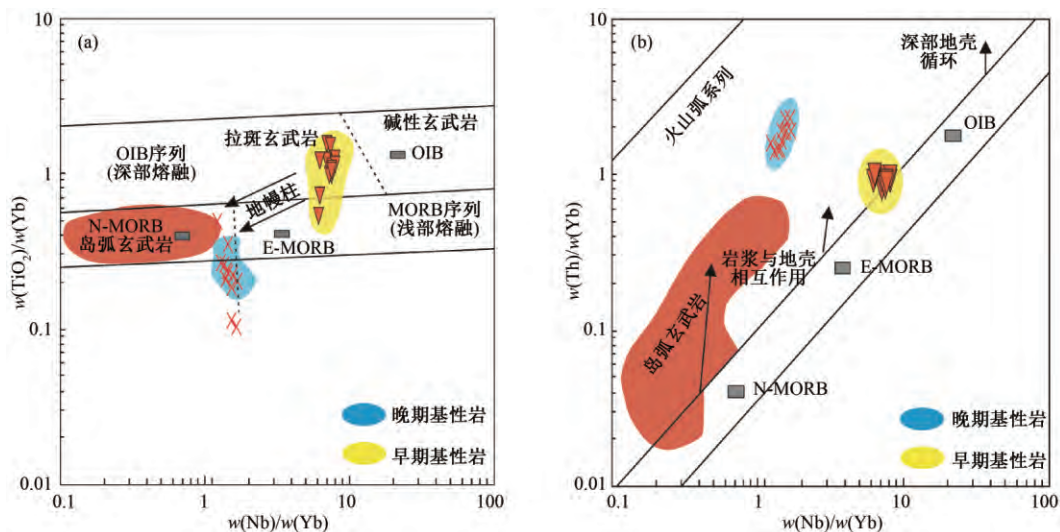


图 6 富宁基性岩 Nb/Yb—TiO₂/Yb (a) 和 Nb/Yb—Th/Yb (b) 图解(仿 Pearce, 高 Ti 基性岩数据来源^[58])

Fig. 6. Diagrams of Nb/Yb—TiO₂/Yb (a) and Nb/Yb—Th/Yb (b) for basic rocks from the FuNing Area.

岩与峨眉山地幔柱之间在物质来源方面联系不大,而是与板块俯冲具有紧密联系,区域构造的特征也支持该观点。

4.2 两期基性岩与金矿的关系

富宁地区在中三叠世晚期,岩浆的侵入活动为成矿物质的活化运移提供了条件,使得成矿热液流体得以通过深大断裂,从高压部位运移并且沉淀在低压断裂破碎带的富矿部位中,并在后期的构造运动中叠加成矿^[31 62]。热液流体对围岩产生了一定的蚀变作用,表现为绿泥石化、绢云母化、蛇纹石化、矽卡岩化等,热液流体的沉淀形成了许多与之相关的热液蚀变型矿床,如熔离—热液硫化物矿床,矽卡岩型钛磁铁矿矿床,卡林型金矿等^[16 41 63-65]。区内铁、镁质岩石中含量高于硅、铝质岩石和沉积岩,在区内几个重要的含金层位均发现有火山岩或火山物质,特别是基性火山岩^[66]。在玄武岩及含火山物质的碎屑岩中,Zn,Cu,Cr,Ni,V等元素远远高于其它类岩石。这一规律说明了金矿与铁、镁质火山物质的密切关系^[65 67]。

富宁地区者桑金矿矿区内的辉绿岩是矿区的主要赋矿岩体,最新的绢云母 Ar-Ar 定年,将者桑金矿形成时间厘定为(215.3±1.9) Ma^[9],者桑金矿周边的基性岩主要为印支期早期基性岩^[12 68-69],两者在时间上存在一定差距。通过对者桑金矿中矿物包裹体的氢氧同位素组成研究,说明成矿流体不可能来源于地幔分异,而是主要来源于大气降水与地层^[47],这些证据从时间和物质来源上,说明成矿流体与该区早期岩浆活动无直接联系。但在本次研究中发现者桑地区的早期基性岩中存在作为载金矿物的黄铁矿和毒砂(图3a、b),这说明早期基性岩很可能萃取了地层中的成矿元素,并与大气降水或建造水形成的成矿流体进行了物质交换,但由于构造等因素的制约并没有形成较好的矿化。

者桑金矿床硫同位素组成与在区域上同处于滇东南金成矿带的革档和老寨湾金矿床较为一致,后两者富集重硫的特征同样反映了矿石硫主要来自地层(下泥盆统)^[70-71],值得注意的是者桑金矿的地层铅和矿石铅主要来自于上地壳,并显示有少量岩浆物质的混入^[72]。这些证据表明富宁地区成矿应晚于早期基性岩浆活动,但者桑金矿成矿时间与本次采集的晚期基性岩活动

(219±6.6 Ma)一致。

在稀土元素组成上,将晚期基性岩稀土分布形式图(阴影部分)叠合到者桑金矿矿石稀土元素球粒陨石标准化分布型式图上(图7)。不难发现辉绿岩矿石样品稀土元素特征与本次研究的晚期基性岩样品稀土元素特征基本一致,本区早期基性岩表现出来的Eu正异常与辉绿岩矿石稀土特征不符,进一步说明晚期基性岩相对于早期基性岩与金矿关系更为密切,虽然者桑金矿附近无晚期基性岩出露,但仍有存在隐伏岩体的可能,这也与前人的物探成果相一致^[73]。前人研究还表明与者桑金矿时间空间上紧密联系的革档金矿矿石的稀土元素分布型式图中也表现出了相同的特征,并且认为除了地层,基性岩的入侵对于成矿物质来源也有一定的贡献^[71 74-75]。

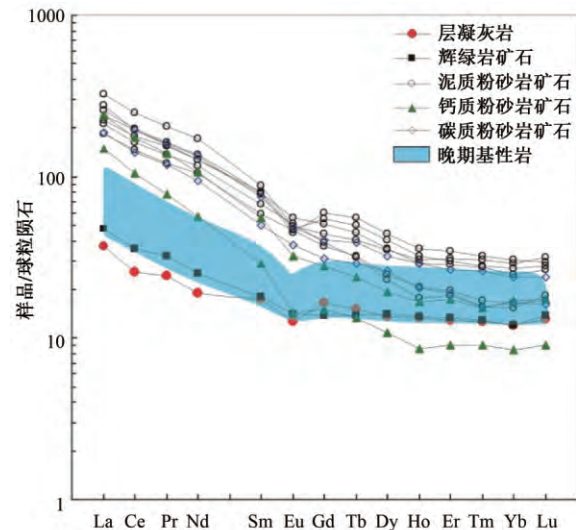


图7 者桑金矿矿石稀土元素球粒陨石标准化分布型式图 (矿石数据引自文献[48])

Fig. 7. Chondrite-normalized REE distribution patterns of ores from the Zheshang gold deposit (Data of ores are sourced from Dai et al. (2015)).

皮桥辉等^[76]热液金红石 U-Pb 年龄显示者桑金矿床成矿时代为(213.6±5.4) Ma,这个时代处于周围地区的热液钨锡矿床和相关的S型花岗岩形成的时间范围内,据此推测金三角地区卡林型金矿的形成与内华达卡林型金矿的模式类似,是在后碰撞伸展构造环境中形成的。这种观点是从时间尺度上给出了一种可能性,通过本次研究,我们认为若存在花岗岩隐伏岩体,其真正的意义是在时间和空间上对该区成矿的动力和热驱动机制进行了补充。随着该区基性岩浆岩的活动,者桑

金矿在(219.9±6.6) Ma 这个时间点甚至更早, 已经发生了金的沉淀, 基性岩除了提供热驱动力, 同时还提供了成矿空间, 至少量的成矿物质, 尽管成矿流体中的水主要是大气成因地下水。时间来到(213.6±5.4) Ma, 金矿中出现随成矿流体一同沉淀的金红石, 该阶段花岗岩体并不提供成矿物质, 而是作为热驱动力, 当然对该区隐伏岩体的研究可能得出更精确的结论。本次研究中该区晚期基性岩的活动时间, 与皮桥辉等使用热液金红石 U-Pb 法测得的者桑金矿床成矿时代, 在误差范围内是吻合的, 据(213.6±5.4) Ma 这个时间点推断的花岗岩隐伏岩体, 虽然与该区基性岩来源于不同种动力背景, 但均为该区金矿的形成提供了热驱动力, 而基性岩在物质来源与成矿空间上对金矿的形成与发展贡献更大。

国家辉^[67, 77]等通过对本区凝灰岩及辉绿岩进行主微量元素分析, 认为 Au、Ag、Cu 及 Pb、Zn、Co、Ni 等成矿物质是由区域地壳裂陷(桂西裂谷)导致幔源物质上涌而形成较大规模的基性岩浆侵入和海底火山喷溢活动而带入, 而 S、As、Fe 则主要来源于矿源层或富矿层位岩石。这些观点与本文对于晚期基性岩成因的理解具有一定相似性, 暗示了成矿过程中后期的叠加作用, 更可能来自于构造运动及晚期基性隐伏岩体, 这与分布型式叠合图相吻合, 也解释了铅的混入。

综上将富宁地区基性岩与该区金矿化的关系总结如下: 该区的基底为元古代变质岩建造, 盖层为显生宙碳酸盐-细碎屑岩建造^[78], 卡林型金矿主要赋存在三叠系泥质灰岩中^[79]。印支期早期, 该区受峨眉山地幔柱影响, 形成早期基性侵入岩, 岩浆对地层中的成矿元素进行了萃取, 形成了富宁地区较小的多金属矿物的矿化点, 故早期基性岩中发现了载金矿物, 随着地幔柱在该区活动减弱, 最终形成该区早期的高钛基性岩体(脉)。到了晚二叠世-中三叠世早期, 富宁地区受到了华南板块向印支板块俯冲造岩作用的影响, 形成地幔物质与俯冲物质混合的岩浆源区, 上升过程中萃取地层中的部分成矿物质, 使成矿物质活化, 并形成以岩脉为中心的温度梯度带, 并开始与主要由大气降水与建造水形成的成矿流体进行物质交换, 而大气降水下渗后在地热或者岩浆热的驱动下向上循环, 在循环过程中反复浸取地层中的金等元素, 使地层内成矿元素发生活化、迁移, 同时局部与晚期基性岩脉相互作用, 随着温度降低, 成

矿作用在构造叠加及成矿有利部位发生, 所以该区矿床多受构造严格控制, 如者桑金矿受断裂带控制, 而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意义。晚期基性在该过程中除了作为重要热源, 同时也带来了少量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。晚期基性岩由于受该段时间强烈构造运动的影响, 及部分构造通道为早期基性岩占据, 多在构造有利的部位冷凝成岩, 并未如早期基性岩一般在该区大规模出露地表, 其成矿模式如图 8。

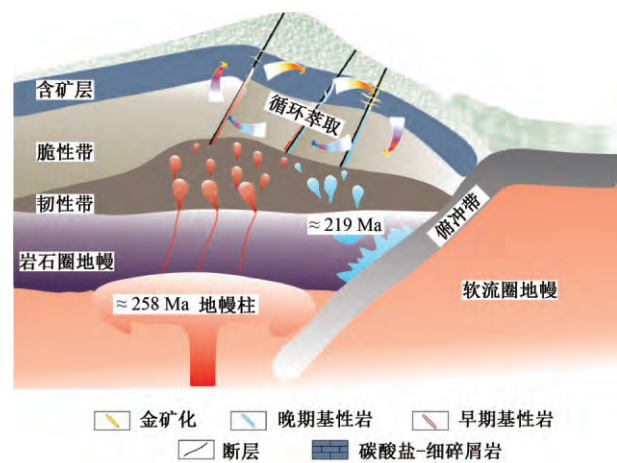


图 8 富宁地区金矿成矿模式图

Fig. 8. A genetic model for the gold mineralization FROM the Funing Area.

5 结 论

富宁地区分布的两期基性岩, 其同位素特征存在明显不同, 晚期基性岩与该区金矿的形成存在联系, 通过研究可以得出如下结论:

1) 富宁地区晚期基性岩形成于(219.9±6.6) Ma, 与峨眉山地幔柱活动时间不符。同时主微量元素特征, Nb、Ta、Ti 负异常, 及 $\epsilon_{\text{Hf}}(t)$ 近地壳均显示了俯冲物质的混染。

2) 通过与该区早期基性岩对比, 两者物质含量组成差异较大, 蛛网图、稀土分布形式图中晚期和早基性岩的不同变化趋势不能由同种岩浆的结晶分异或者部分熔融作用产生。

3) 晚期基性岩形成环境具有富岩石圈地幔端元(NORB)和亏损岩石圈地幔端元(MORB)的特征, 暗示其具有 2 个端元的混合源区, 同时 Nb/Yb-TiO₂/Yb 和 Nb/Yb-Th/Yb 图解暗示在源区熔体形成过程中受板块俯冲物质混染, 该区的

构造演化也支持该观点。

4) 综合前人研究认为富宁区域内金矿受晚期基性岩叠加成矿作用的影响,故可将晚期基性岩作为该区金矿的找矿标志。

致谢: 锆石颗粒挑选在廊坊市诚信地质服务有限公司完成。锆石的阴极发光图像在北京铂年领航科技有限公司扫描电镜室拍摄完成。桂林理工大学电子探针室陈宏毅老师为本次工作提供了方便。同位素定年得到中国科学院地球化学研究所矿床地球化学国家重点实验室激光等离子体质谱实验室的帮助。在此一并表示感谢。

参 考 文 献:

- [1] 涂光炽. 我国西南地区两个别具一格的成矿带(域) [J]. 矿物岩石地球化学通报, 2002, 21(1): 1-2.
- [2] Mcneil A-M, Kerrich R. Archean lamprophyre dykes and gold mineralization, Matheson, Ontario: the conjunction of LILE-enriched mafic magmas, deep crustal structures, and Au concentration [J]. *Canadian Journal of Earth Sciences*, 1986, 23(3): 324-343.
- [3] Chen Yaohuang, Yao Shuzhen, Pan Yuanming. Geochemistry of lamprophyres at the Daping gold deposit, Yunnan Province, China: Constraints on the timing of gold mineralization and evidence for mantle convection in the eastern Tibetan Plateau [J]. *Journal of Asian Earth Sciences*, 2014, 93(1): 129-145.
- [4] Lanjewar Shubhangi, Randive Kirtikumar. Lamprophyres from the Harohalli Dyke Swarm in the Halaguru and Mysore Areas, Southern India: Implication for Backarc Basin Magmatism [J]. Elsevier Ltd, 2017, 157(2): 329-347.
- [5] Gan Ting, Huang Zhilong. Platinum-group element and Re-Os geochemistry of lamprophyres in the Zhenyuan gold deposit, Yunnan Province, China: Implications for petrogenesis and mantle evolution [J]. Elsevier B.V., 2017, 282-283(2): 228-239.
- [6] Yan Yutong, Zhang Na, Li Shengrong, Li Yongsheng. Mineral chemistry and isotope geochemistry of pyrite from the Heilangou gold deposit, Jiaodong Peninsula, Eastern China [J]. *Geoscience Frontiers*, 2014, 5(2): 205-213.
- [7] Groves D I, Goldfarb R J, Gebre-mariam M, Hagemann S G, Robert F. Orogenic gold deposits: A proposed classification in the context of their crustal distribution and relationship to other gold deposit types [J]. *Ore Geology Reviews*, 1998, 13(1): 7-27.
- [8] Kovalev K-R, Kuzmina O-N, Dyachkov B-A, Vladimirov A-G, Kalinin Yu-A, Naumov E-A, Kirillov M-V, Annikova I-Yu. Disseminated gold-sulfide mineralization at the Zhaima deposit, eastern Kazakhstan [J]. *Pleiades Publishing*, 2016, 58(2): 116-133.
- [9] 皮桥辉, 胡瑞忠, 彭科强, 吴建标, 韦朝文, 黄勇. 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.
- [10] 苏文超, 杨科佑, 胡瑞忠, 陈丰. 中国西南部卡林型金矿床流体包裹体年代学研究——以贵州烂泥沟大型卡林型金矿床为例 [J]. 矿物学报, 1998, 18(3): 359-362.
- [11] 陈阳阳, 陈兵. 黔西南水银洞卡林型金矿地质地球化学特征及成因 [J]. 中国地质调查, 2016, 3(2): 10-14.
- [12] 庞保成, 林畅松. 滇黔桂地区微细浸染型金矿成因的地球化学制约 [J]. 地学前缘, 2000, 7(3): 38.
- [13] Chen Maohong, Zhang Zhiqiang, Santosh M, Dang Yuan, Zhang Wei. The Carlin-type gold deposits of the "golden triangle" of SW China: Pb and S isotopic constraints for the ore genesis [J]. *Journal of Asian Earth Sciences*, 2015, 103(1): 115-128.
- [14] Ressel M-W. Igneous Geology of the Carlin Trend, Nevada: Development of the Eocene Plutonic Complex and Significance for Carlin-Type Gold Deposits [J]. *Economic Geology*, 2006, 101(2): 347-383.
- [15] Sillitoe R-H. Special Paper: Major Gold Deposits and Belts of the North and South American Cordillera: Distribution, Tectonomagmatic Settings, and Metallogenic Considerations [J]. *Economic Geology*, 2008, 103(4): 663-687.
- [16] 张静, 苏蔷薇, 刘学飞, 和中华, 周云满, 李智, 赵凯. 滇东南老寨湾金矿床地质及同位素特征 [J]. 岩石学报, 2014, 30(9): 2657-2668.
- [17] FENG Jianzhong, WANG Dongbo, WANG Xueming, ZENG Yishan, LI Tiefeng. Magmatic Gold Mineralization in the Western Qinling Orogenic Belt: Geology and Metallogenesis of the Baguamiao, Liba and Xiaogouli Gold Deposits [J]. *Acta Geologica Sinica*, 2004, 78(2): 529-533.
- [18] 何鸿, 韦龙明, 张寿庭, 高阳, 徐毅. 陕西八卦庙金矿床成矿流体 He、Ar、H、O 同位素特征 [J]. 黄金, 2009, 30(8): 9-11.
- [19] 文志林, 邓腾, 董国军, 邹凤辉, 许德如, 王智琳, 林舸, 陈根文. 湘东北万古金矿床控矿构造特征与控矿规律研究 [J]. 大地构造与成矿学, 2016, 7(2): 281-294.
- [20] 毛景文, 李延河, 李红艳, 王登红, 宋鹤彬. 湖南万古金矿床地幔流体成矿的氦同位素证据 [J]. 地质论评, 1997, 43(6): 646-649.
- [21] 周余国, 刘继顺, 王作华, 欧阳玉飞, 高启芝, 刘德利, 黄元有. 从滇黔桂“金三角”区域地层地球化学演化特征探讨卡林型金矿的物质来源 [J]. 地学前缘, 2009, 16(2): 199-208.
- [22] 贾大成, 胡瑞忠. 滇黔桂地区卡林型金矿床成因探讨 [J]. 矿床地质, 2001, 20(4): 378-384.
- [23] Zhai Mingguo, Santosh M.. Metallogeny of the North China Craton: Link with secular changes in the evolving Earth [J]. *Gondwana Research*, 2013, 24(1): 275-297.
- [24] Li Lin, Li Sheng-Rong, Santosh M., Li Qing, Gu Yue, Lü Wen-Jie, Zhang Hua-Feng, Shen Jun-Feng, Zhao Guo-Chun. Dyke swarms and their role in the genesis of world-class gold

- deposits: Insights from the Jiaodong peninsula, China [J]. *Journal of Asian Earth Sciences*, 2016, 130(1): 2-22.
- [25] Bierlein F-P, Arne D-C, Mcknight S, Lu J, Reeves S, Besanko J, Marek J, Cooke D. Wall-Rock Petrology and Geochemistry in Alteration Halos Associated with Mesothermal Gold Mineralization, Central Victoria, Australia [J]. *Economic Geology*, 2000, 95(2): 283-311.
- [26] Zhu RiXiang, Fan HongRui, Li JianWei, Meng QingRen, Li ShengRong, Zeng QingDong. Decratonic gold deposits [J]. *Science China Press*, 2015, 58(9): 1523-1537.
- [27] Zhao Hai-Xiang, Frimmel Hartwig-E., Jiang Shao-Yong, Dai Bao-Zhang. LA-ICP-MS trace element analysis of pyrite from the Xiaoqinling gold district, China: Implications for ore genesis [J]. *Ore Geology Reviews*, 2011, 43(1): 142-153.
- [28] Nie F, Jiang S, Hou W, Liu Y, Xiao W, Language Original. Geological features and genesis of gold deposits hosted by low-grade metamorphic rocks in central-western Inner Mongolia [J]. *Mineral deposits.*, 2010, 29(1): 58-70.
- [29] 聂凤军, 江思宏, 侯万荣, 刘翼飞, 肖伟. 内蒙古中西部浅变质岩为容矿围岩的金矿床地质特征及形成过程 [J]. *矿床地质*, 2010, 29(1): 58-70.
- [30] 邵有元. 1:20万富宁幅区域地质研究报告 [R], 1978.
- [31] 王迎春, 张小兵, 秦辉. 广南-富宁微细浸染型金矿分类及代表性矿床 [J]. *云南地质*, 2013, 32(3): 259-263.
- [32] 李政林, 刘希军, 时毓, 吴伟男, 姚野, 梁琼丹, 闫海忠, 谭森. 右江盆地南缘二叠-三叠纪基性岩研究及其与金矿的成矿关系探讨 [J]. *矿物学报*, 2015, (S1): 227-228.
- [33] 王忠诚, 吴浩若, 邝国敦. 桂西晚古生代海相玄武岩的特征及其形成环境 [J]. *岩石学报*, 1997, 13(2): 135-140.
- [34] 吴根耀, 吴浩若, 钟大赉, 邝国敦, 季建清. 滇桂交界处古特提斯的洋岛和岛弧火山岩 [J]. *现代地质*, 2000, 14(4): 393-400.
- [35] 侯清亚, 傅保国, 康云骥. 广西右江盆地南部岩岩的大地构造特征 [C]//地球科学与资源环境——华南青年地学学术研讨会论文集, 2003: 33-37.
- [36] 丘元禧, 张伯友. 华南古特提斯东延问题的探讨 [J]. *中国区域地质*, 2000, 19(2): 175-180.
- [37] Cai Jian-Xin, Zhang Kai-Jun. A new model for the Indochina and South China collision during the Late Permian to the Middle Triassic [J]. *Tectonophysics*, 2009, 467(1): 35-43.
- [38] 徐伟, 刘玉平, 郭利果, 叶霖, 皮道会, 廖震. 滇东南八布蛇绿岩地球化学特征及构造背景 [J]. *矿物学报*, 2008, 28(1): 6-14.
- [39] 张锦泉, 蒋廷操. 右江三叠纪弧后盆地沉积特征及盆地演化 [J]. *广西地质*, 1994, 7(2): 1-14.
- [40] 方维萱, 张海, 贾润幸. 滇桂个旧-那坡三叠纪弧后裂谷盆地动力学与成矿序列 [J]. *大地构造与成矿学*, 2011, 35(4): 552-566.
- [41] QIN Xiaofeng, WANG Zongqi, ZHANG Yingli, PAN Luozhong. Geochemistry of Permian Mafic Igneous Rocks from the Napo - Qinzhou Tectonic Belt in Southwest Guangxi, Southwest China - Implications for Arc-Back Arc Basin Magmatic Evolution [J]. *Acta Geologica Sinica (English Edition)*, 2012, 85(5): 1182-1199.
- [42] 范蔚茗, 王岳军, 彭头平, 苗来成, 郭峰. 桂西晚古生代玄武岩 Ar-Ar 和 U-Pb 年代学及其对峨眉山玄武岩省喷发时代的约束 [J]. *科学通报*, 2004, 49(18): 1892-1900.
- [43] 廖帅, 刘希军, 时毓, 黄文龙, 郭琳. 地幔柱与岛弧岩浆相互作用的产物: 来自桂西辉绿岩型金矿中基性岩证据 [J]. *矿物学报*, 2013, 49(S2): 111-113.
- [44] Yang Jianghai, Cawood P-A, Du Yuansheng, Huang Hu, Hu Lisha. Detrital record of Indosinian mountain building in SW China: Provenance of the Middle Triassic turbidites in the Youjiang Basin [J]. *Tectonophysics*, 2012, 574-575(1): 105-117.
- [45] 宋博, 闫全人, 向忠金, 陈辉明, 马铁球, 杨广元. 广西凭祥中三叠世盆地沉积特征与构造属性分析 [J]. *地质学报*, 2013, 87(4): 453-473.
- [46] 仕竹焕, 杨云保. 初论滇东南地区微细粒型金矿找矿标志 [J]. *西部探矿工程*, 2007, (5): 65-68.
- [47] 代鸿章, 陈翠华, 顾雪祥, 李保华, 董树义, 程文斌. 云南省富宁县桑金矿床成矿流体特征 [J]. *现代地质*, 2014, 28(5): 893-904.
- [48] 代鸿章, 陈翠华, 刘家军, 张燕, 何朝鑫. 云南者桑金矿床元素地球化学特征及其地质意义 [J]. *矿物岩石地球化学通报*, 2015, 34(4): 744-754.
- [49] 邵有元. 1:200000 富宁幅矿产图 [Z], 1978.
- [50] 张晓静, 肖加飞. 桂西北玉凤、巴马晚二叠世辉绿岩年代学、地球化学特征及成因研究 [J]. *矿物岩石地球化学通报*, 2014, 33(2): 163-176.
- [51] 范蔚茗, 彭头平, 王岳军. 滇西古特提斯俯冲-碰撞过程的岩浆作用记录 [J]. *地学前缘*, 2009, 16(6): 291-302.
- [52] 黄文龙, 刘希军, 时毓, 许继峰, 廖帅, 郭琳, 吴伟男, 李政林, 梁琼丹. 桂西巴马地区极高 Ti/Y 值基性岩地球化学特征——来自峨眉山地幔柱高 Ti 母岩浆? [J]. *地质通报*, 2015, 34(Z1): 474-486.
- [53] 胡瑞忠, 毛景文, 范蔚茗, 华仁民, 毕献武, 钟宏, 宋谢炎, 陶琰. 华南陆块内成矿作用的一些科学问题 [J]. *地学前缘*, 2010, 17(2): 13-26.
- [54] 张招崇, 王福生, 范蔚茗, 邓海琳, 徐义刚, 许继峰, 王岳军. 峨眉山玄武岩研究中的一些问题的讨论 [J]. *岩石矿物学杂志*, 2001, 20(3): 239-246.
- [55] 张宏福, 周新华, 范蔚茗, 孙敏, 郭峰, 英基丰, 汤艳杰, 张瑾, 牛利锋. 华北东南部中生代岩石圈地幔性质、组成、富集过程及其形成机理 [J]. *岩石学报*, 2005, 21(4): 1271-1280.
- [56] 李杰, 梁细荣, 董彦辉, 涂湘林, 许继峰. 利用多接收器电感耦合等离子体质谱仪 (MC-ICPMS) 测定镁铁-超镁铁质岩石中的铷-锶同位素组成 [J]. *地球化学*, 2007, 36(2): 153-160.
- [57] 谢建成, 杨晓勇, 杜建国, 孙卫东. 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.
- [58] Zhou M, Zhao J, Qi L, Su W, Hu R. Zircon U - pb

- Geochronology and Elemental and Sr-nd Isotope Geochemistry of Permian Mafic Rocks in the Funing Area , Sw China [J]. *Contributions to Mineralogy and Petrology* ,2006 ,151(1) : 1-19.
- [59] 李政林,刘希军,许继峰,康志强,时毓,黄文龙,陈雪峰,吴伟男,梁琼丹,姚野. 右江盆地基性岩的地球化学演化特征及其区域构造意义[J]. 桂林理工大学学报,2015,35(4): 727-735.
- [60] 张斌辉,丁俊,张林奎,张彬,陈敏华. 滇东南八布蛇绿岩的 SHRIMP 锆石 U-Pb 年代学研究[J]. 地质学报,2013,87(10): 1498-1509.
- [61] 陈泽超,林伟, Faure Michel, Lepvrier Claude, 褚杨,王清晨. 越南东北部早中生代构造事件的年代学约束[J]. 岩石学报,2013,29(5): 1825-1840.
- [62] 周文龙,李波,黄庆,刘明. 富宁基性岩区尾铜镍硫化物矿床矿化特征及矿床成因探讨[J]. 科学技术与工程,2013,13(20): 5908-5914.
- [63] 张建强. 云南者桑金矿矿石特征和金赋存状态研究[J]. 华南地质与矿产,2014,30(4): 383-388.
- [64] 陈赶良,杨柏林. 滇黔桂地区金矿空间分布的分形特征[J]. 地质找矿论丛,1996,11(2): 44-50.
- [65] 刘建明,刘家军. 滇黔桂三角区微细浸染型金矿床的盆地流体成因模式[J]. 矿物学报,1997,17(4): 448-456.
- [66] 石能学,李旭俊,张树鹏. 富宁渭林金矿矿化富集规律[J]. 云南地质,2011,30(2): 129,134-137.
- [67] 国家辉. 滇东南桂西北微细粒型金矿成矿作用探讨[J]. 矿床地质,2002,21(S1): 121-124.
- [68] 刘建明,叶杰,刘家军,顾雪祥. 论我国微细浸染型金矿床与沉积盆地演化的关系——以右江盆地为例[J]. 矿床地质,2001,20(4): 367-377.
- [69] 陈翠华,何彬彬,顾雪祥,刘建明. 右江沉积盆地演化与微细浸染型金矿床成矿作用关系探讨[J]. 地质与勘探,2004,40(1): 21-25.
- [70] 姚娟,罗梅,任光明,王玉婷. 云南老寨湾金矿床成矿流体的特征[J]. 资源环境与工程,2008,22(2): 163-167.
- [71] 魏震环,李连生,敬成贵. 云南革档金矿地质特征及成因[J]. 黄金地质科技,1993,37(3): 22-28.
- [72] 章永梅,顾雪祥,摆祥,刘瑞萍,郑砾,吴程赞,彭义伟. 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.
- [73] 周永峰. 区域重力资料研究在广西深部地质和成矿预测中的应用[J]. 广西地质,1993,6(2): 15-24.
- [74] 李连生,敬成贵,魏震环,白崇裕. 云南革档金矿地质地球化学特征及成矿模式[J]. 地质找矿论丛,1992,7(4): 24-34.
- [75] 张宏宾,黄映聪,赵存法,葛俊逸. 云南省革档金矿流体包裹体地球化学特征[J]. 有色金属(矿山部分),2010,62(2): 25-30.
- [76] Qiaohui Pi, Ruizhong Hu, Bin Xiong, Qiuli Li, Richen Zhong. In situ SIMS U-Pb dating of hydrothermal rutile: reliable age for the Zhesang Carlin-type gold deposit in the golden triangle region, SW China [J]. *Mineral Deposita* ,2017,52(8): 1179-1190.
- [77] 国家辉. 桂西北地区岩浆活动与超微粒型金矿化的关系[J]. 贵金属地质,2000,9(3): 133-143.
- [78] 胡瑞忠,付山岭,肖加飞. 华南大规模低温成矿的主要科学问题[J]. 岩石学报,2016,32(11): 3239-3251.
- [79] Rui-zhong Hu, Wen-chao Su, Xian-wu Bi, Guang-zhi Tu, Hofstra Albert. Geology and geochemistry of Carlin-type gold deposits in China [J]. *Mineralium Deposita* ,2002,37(3): 378-392.