

马达加斯加 Maevatanana 金矿床 Re-Os 同位素 年龄及其地质意义

杨喜安^{1,2}, 许德如¹

(1. 东华理工大学 核资源与环境国家重点实验室, 江西 南昌 330013; 2. 中国科学院矿产资源研究重点实验室,
中国科学院 地质与地球物理研究所, 北京 100029)

摘要: 马达加斯加 Maevatanana 金矿床是一个产在绿岩带中的石英脉型金矿床, 其成因备受争议。本文对其进行元素地球化学分析和测年, 探讨了金矿床的成矿时代和成矿过程。马达加斯加 Maevatanana 片麻岩金含量为 $1.11 \times 10^{-9} \sim 80.8 \times 10^{-9}$, 平均值 19.55×10^{-9} ; 片麻岩中黄铁矿为主要载金矿物, 黄铁矿 Re-Os 同位素等时线年龄为 752 ± 27 Ma。含金石英脉金品位 $26.44 \times 10^{-6} \sim 132.22 \times 10^{-6}$, 黄铁矿为主要载金矿物, 含金石英脉中黄铁矿 Re-Os 同位素等时线年龄为 535 ± 26 Ma, 代表了 Maevatanana 金矿床的成矿年龄。两期黄铁矿 Re-Os 同位素等时线年龄与泛非造山事件两次碰撞的时间相对应。片麻岩金含量远远高于地壳平均品位, 在黄铁矿中可见包裹金, 黄铁矿 Re-Os 同位素等时线年龄表明 752 ± 27 Ma 花岗岩、辉长岩侵入, 马达加斯加地体发生了广泛的绿片岩相到角闪岩相的变质作用, 火山沉积岩中的金被活化、迁移、富集形成矿源层。含金石英脉的成矿年龄 535 ± 26 Ma 和马达加斯加中北部寒武纪后碰撞 A 型花岗岩的年龄一致, 野外证据和地球化学数据表明 Maevatanana 金矿床和寒武纪后碰撞 A 型花岗岩有密切的成因联系。在岩浆上升过程中, 岩浆逐渐演化形成成矿流体, 这些成矿流体进入容矿构造, 富集成矿。

关键词: 黄铁矿; Re-Os 同位素; 成矿年龄; Maevatanana 金矿床; 马达加斯加

中图分类号: P618.51; P597+.3

文献标识码: A

文章编号: 1000-6524(2024)05-1302-11

Re-Os isotope age of pyrite from the Maevatanana gold deposit in Madagascar and its geological significance

YANG Xi-an^{1,2} and XU De-ru¹

(1. State Key Laboratory of Nuclear Resources and Environment, East China University of Technology, Nanchang 330013, China;
2. Key Laboratory of Mineral Resources, Institute of Geology and Geophysics, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100029,
China)

Abstract: The Maevatanana gold deposit in Madagascar is a quartz-vein type gold deposit hosted in a greenstone belt, and its genesis is highly controversial. This article conducts elemental geochemical analysis and dating of the Maevatanana gold deposit, and explores the mineralization age and process of the Maevatanana gold deposit in Madagascar. The gold content of gneiss is $1.11 \times 10^{-9} \sim 80.8 \times 10^{-9}$, with an average of 19.55×10^{-9} ; pyrite is the main gold-bearing mineral in gneiss, with a Re-Os isotopic age of 752 ± 27 Ma. The gold grade of the gold-bearing quartz vein is $26.44 \times 10^{-6} \sim 132.22 \times 10^{-6}$, and pyrite is the main gold-bearing mineral. The Re-Os isotopic age of pyrite in the gold-bearing quartz vein is 535 ± 26 Ma, representing the mineralization age of the Maevatanana gold deposit. The Re-Os isotope isochron ages of two phases of pyrite correspond to the time of two collisions during the Pan Afri-

收稿日期: 2023-05-23; 接受日期: 2024-05-12; 编辑: 郝艳丽

基金项目: 国家自然科学基金项目(41930428, 41830430)

作者简介: 杨喜安(1972-), 男, 博士, 高级工程师, 主要从事金铜矿床等成矿作用和找矿方面的研究, E-mail: yangxianyantai@163.com; 通讯作者: 许德如(1966-), 男, 博士, 教授, 从事大陆边缘构造与成矿学研究, E-mail: xuderu@gig.ac.cn。

网络首发时间: 2024-06-21; 网络首发地址: <http://kns.cnki.net/kcms/detail/11.1966.P.20240620.1655.002.html>

can orogeny event. The gold content in gneiss is much higher than the average grade of the crust, and encapsulated gold can be seen in pyrite. The Re-Os isotopic age of pyrite indicates intrusion of granite and gabbro at 752 ± 27 Ma. The Madagascar terrane underwent extensive metamorphism from greenschist to amphibolite facies, and gold in volcanic sedimentary rocks was activated, migrated, and enriched to form a source layer. The mineralization age of the gold-bearing quartz vein is 535 ± 26 Ma, which is consistent with the age of the Cambrian post collisional A-type granite in central northern Madagascar. Field evidence and geochemical data indicate a close genetic relationship between the Maevatanana gold deposit and the Cambrian post collisional A-type granite. During the process of magma ascending, the high-Si melts entered the magma and gradually evolved into ore-forming fluids, which enter the host structures and enrich mineralization.

Key words: pyrite; Re-Os isotope; mineralization age; Maevatanana gold deposit; Madagascar

Fund support: National Natural Science Foundation of China(41930428, 41830430)

金矿床形成于一系列地质环境中,分为不同类型。每一种金矿床类型是一定矿化机制的结果(许德如等,2019),即地壳中金的异常富集。在众多类型的金矿床中,中温热液石英脉型金矿床的金产量在全世界每年金产量中占重要的比例(Harraz, 2000; Harraz and Hamdy, 2015)。有关中温热液石英脉型金矿床的成因仍在争论中,主要有两种观点:①成矿流体来源于岩浆(Meinert, 2000; Halter *et al.*, 2005; Schindler *et al.*, 2016)。侵入体通常和金矿床在时间和空间上具有密切的联系,但是一些学者认为这些侵入体中金含量太低不足以形成金矿床(Meyer and Saager, 1985)。②成矿流体来源于变质流体。虽然绿岩带中金含量高于地壳平均丰度,但是金含量太低也不足以形成金矿床(Ferry and Dipple, 1991; Thompson, 1997; Jia *et al.*, 2003)。目前还不清楚来自岩浆侵入体的流体在成矿过程中形成中温热液石英脉型金矿床,或者中温热液石英脉型金矿床与绿岩带和岩浆侵入体是否都具有成因联系。中温热液石英脉型金矿床的形成机制是一个长期存在的问题,它可能包括多次成矿作用。

马达加斯加 Maevatanana 金矿床产在太古宙绿岩带中,是一个中温热液石英脉型金矿床。2007年5月,江西省崇义章源投资控股有限公司以中国地质科学院矿产资源研究所为技术依托,在马达加斯加开展境外矿产资源风险地质勘查工作。历经5年的探索,该项目在 Maevatanana 金矿区实现了地质找矿新突破,截止到2011年12月,探获金金属资源量(333+334)50吨,其远景资源量在100吨以上,具有形成超大型金矿床的潜力(中国地质调查局网站报道)。Andrianjakavah 等(2007)研究了 Maevatanana

金矿床条带状铁建造毫米级硫化物石英脉中流体包裹体,认为成矿流体来自变质水。以往学者研究认为马达加斯加地体具有 820~720 Ma(Handke *et al.*, 1999)和 550~520 Ma(Paquette and Nédélec, 1998; Rambeloson, 1999)的2期金矿化。杨喜安等(2013)研究了马达加斯加 Maevatanana 金矿床控矿构造,认为该地区具有2期成矿作用,分别对应着长英质脉和后期含金石英脉。为了获得准确的成矿年龄, Yang 等(2016)测得长英质脉的锆石 U-Pb 年龄为 $2\,548.3 \pm 5.3$ Ma,与第1期成矿作用的时间不符。长英质脉是否存在金矿化?如何获得 Maevatanana 金矿床准确的成矿年龄?

Maevatanana 金矿床的主要载金矿物为黄铁矿,在含金石英脉和围岩片麻岩中均可见到。本文尝试用黄铁矿单矿物 Re-Os 同位素测年来确定该矿床的成矿年龄。同时,采集了大量的片麻岩样品和长英质脉样品,分析 Au、Ag 含量,以查明第1期金矿化和变质岩还是长英质脉有关,进一步指导本地区找矿。

1 区域地质

马达加斯加地体由两部分组成,东部为前寒武系岩石,西部为上石炭统到近代的沉积岩(de Wit, 2003)。前寒武系岩石分为5个构造区(Collins and Windley, 2002; Collins, 2006; Thomas *et al.*, 2009): Bemarivo 带、Antananarivo 和 Antongil 地块以及 Itremo 和 Tsaratanana 岩片(图1)。这些构造域之间为构造接触。Antongil 地块由 3 200 Ma 的片麻岩和 2 600~2 500 Ma 的花岗岩组成; Antananarivo 地块由 2 600~2 500 Ma 的片麻岩和新元古代花岗岩组

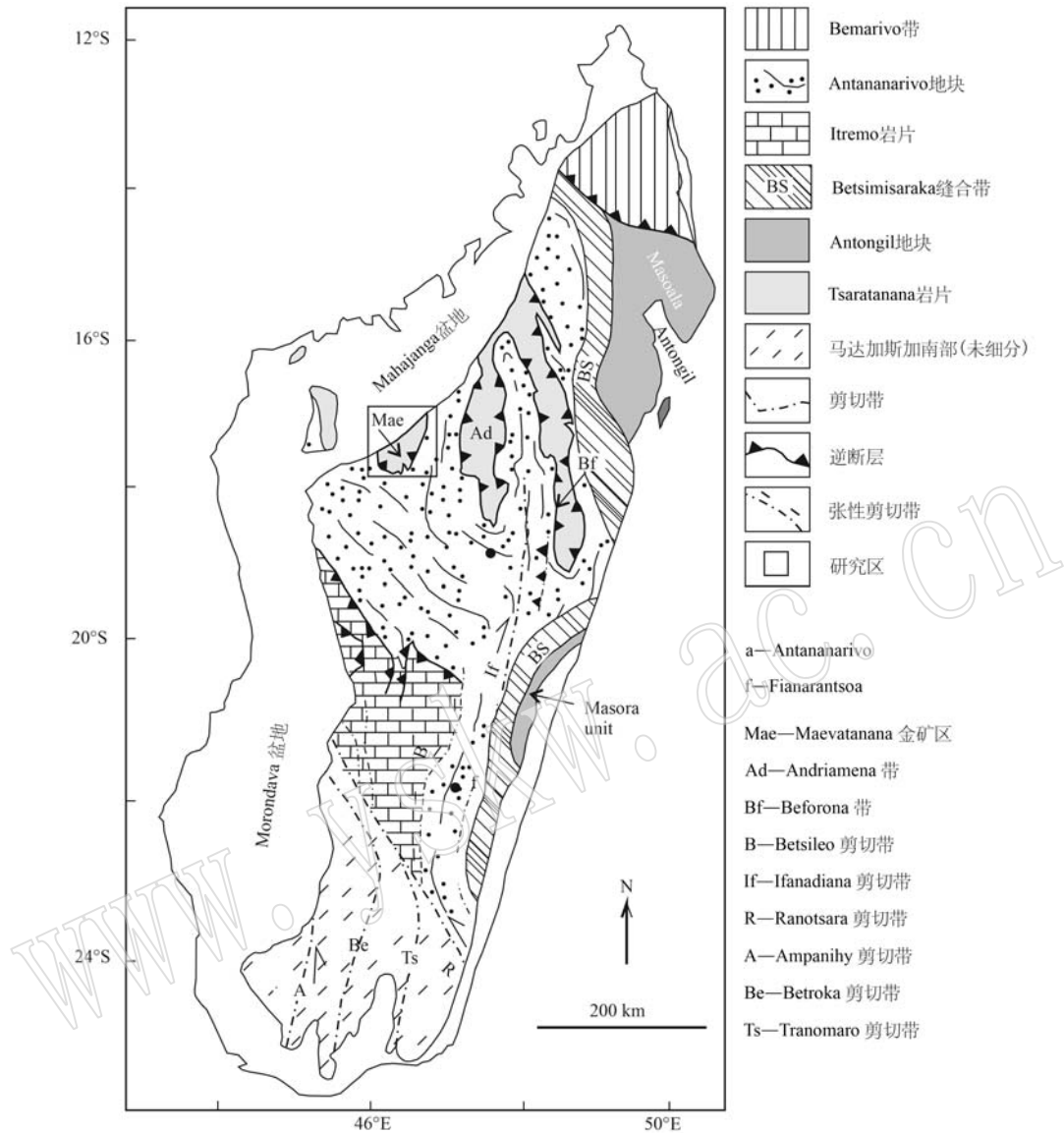


图 1 马达加斯加区域地质图(Collins *et al.* , 2003)

Fig. 1 Geological map showing the principal tectonic units of Madagascar (modified after Collins *et al.* , 2003)

成。Tsaratanana 岩片由近南北向的 3 个绿岩带组成,侵入岩为花岗岩。绿岩带岩性主要由基性片岩、片麻岩组成,有少量滑石片岩、黑云母-硅线石副片麻岩、角闪岩和条带状铁建造。Antananarivo 地块和 Tsaratanana 岩片呈断层接触,二者均被 820~720 Ma 花岗岩、辉长岩侵入,发生广泛的变形和变质作用,变质程度为绿片岩相到角闪岩相(Tucker *et al.* , 2014)。Itremo 岩片由古元古代到早新元古代的沉积岩组成。Bematovo 带被一条韧性剪切带分为南北两块,南部由 Sahantaha 群副片麻岩组成,北部由变质沉积岩组成(Thomas *et al.* , 2009)。

2 矿区地质

Maevatanana 绿岩带是 Tsaratanana 岩片最西侧的一个绿岩带(图 1),主要由片麻岩、角闪岩、磁铁石英岩和变质基性岩-超基性岩组成(Collins *et al.* , 2003; Collins, 2006)。该绿岩带被花岗质岩石侵入(Tucker *et al.* , 1999; Collins, 2006)。在新元古代马达加斯加地体前寒武纪泛非造山事件中,该绿岩带变质相为绿片岩相到角闪岩相(Tucker *et al.* , 1999; Collins, 2006)。

分为显微金,也可在手标本上看到自然金。

3 样品采集与分析

金矿石样品 Q1~Q5 采自 Maevatanana 村南部含金石英脉,片麻岩样品 G1~G3、T1~T22 和长英质脉样品 W1~W30 采自 Maevatanana 村南部片麻岩。

3.1 Re-Os 同位素年龄测试

在国家地质实验测试中心 Re-Os 同位素年代学实验室完成黄铁矿样品的 Re-Os 同位素年龄测试。Re-Os 同位素分析方法和过程见 Du 等(2004)。

3.2 元素地球化学测试方法

片麻岩中暗色带、长英质脉 Au、Ag 含量分析在国

家地质实验测试中心完成,首先使用酸溶法溶解样品,用 2.5 mL 高纯度的 HF 和 0.5 mL 高纯度的 HNO₃ 在高压下溶解样品,再用 HNO₃ 提取样品并稀释定容,使用电感耦合等离子质谱仪(ICP-MS)进行分析。

4 结果

4.1 黄铁矿 Re-Os 同位素等时线年龄

运用光学显微镜,在片麻岩中的黄铁矿、含金石英脉中的黄铁矿中均发现金显微颗粒(图3),说明金和黄铁矿是共生关系,金和黄铁矿同时形成。因此,含金黄铁矿的 Re-Os 同位素年龄能够代表片麻岩中金的成矿年龄和含金石英脉的成矿年龄。

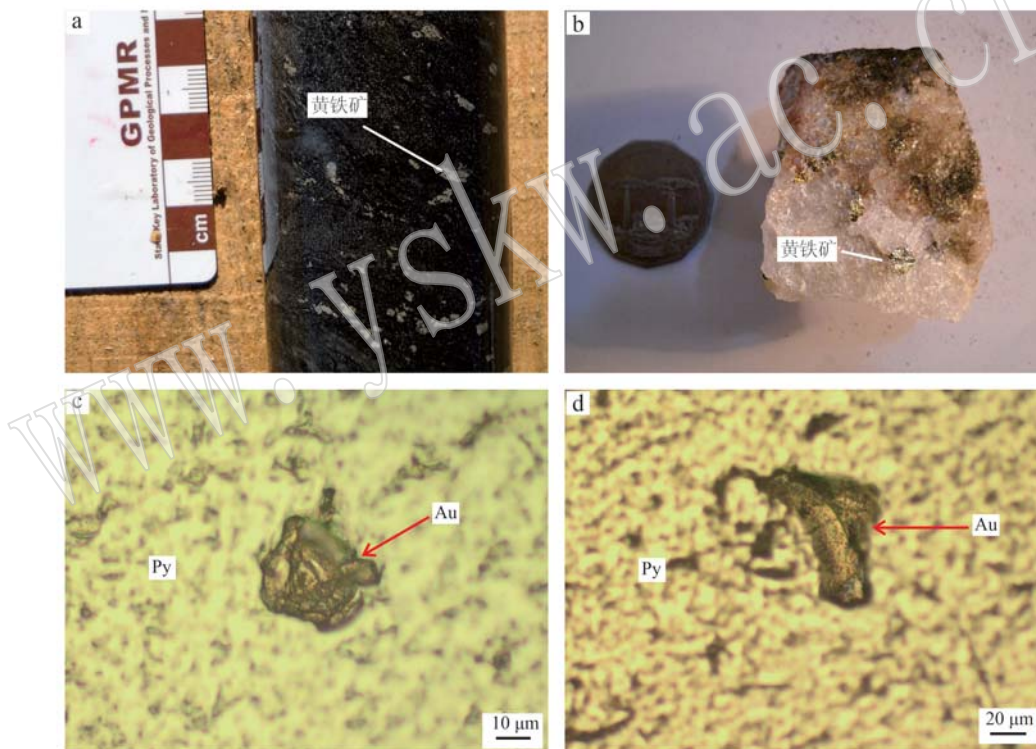


图3 马达加斯加 Maevatanana 金矿床样品照片

Fig. 3 Photos of Au grains within pyrite of Maevatanana gold area in Madagascar

a—片麻岩样品; b—金矿石样品; c—片麻岩中黄铁矿包裹金; d—含金石英脉中黄铁矿包裹金

a—gneisses; b—gold ore; c—Au grains within pyrite in the gneisses; d—Au grains within pyrite in the auriferous quartz veins

4.1.1 片麻岩暗色带中黄铁矿 Re-Os 同位素等时线年龄

片麻岩暗色带中黄铁矿 Re-Os 同位素分析结果见表1。Re 含量为 $0.65 \times 10^{-9} \sim 1.28 \times 10^{-9}$, 普 Os 含量为 $0.01 \times 10^{-9} \sim 0.07 \times 10^{-9}$, $^{187}\text{Re}/^{188}\text{Os}$ 值为 61.57 ~ 321.89。使用 Isoplot 4.15 软件(Ludwig, 2003)计

算,片麻岩暗色带中黄铁矿 Re-Os 同位素等时线年龄为 752 ± 27 Ma (MSWD=2.3) (图4a)。

4.1.2 含金石英脉中黄铁矿 Re-Os 同位素等时线年龄

含金石英脉中黄铁矿 Re-Os 同位素分析结果见表1。Re 含量为 $0.87 \times 10^{-9} \sim 2.718 \times 10^{-9}$, 普 Os 含

量为 $0.03 \times 10^{-9} \sim 0.06 \times 10^{-9}$, $^{187}\text{Re}/^{188}\text{Os}$ 值为 77.597 算,含金石英脉中黄铁矿 Re-Os 同位素等时线年龄 ~ 224.43 。使用 Isoplot 4.15 软件(Ludwig, 2003)计 为 535 ± 26 Ma (MSWD=0.79) (图 4b)。

表 1 片麻岩和含金石英脉中黄铁矿 Re-Os 同位素测试数据
Table 1 Re-Os isotopic data of auriferous pyrite from the gneiss and gold-bearing quartz vein in the Maevatanana gold deposit

样号	Re($w_B/10^{-9}$)		普 Os($w_B/10^{-9}$)		$^{187}\text{Os} (w_B/10^{-9})$		$^{187}\text{Re}/^{188}\text{Os}$		$^{187}\text{Os}/^{188}\text{Os}$	
	测定值	不确定度	测定值	不确定度	测定值	不确定度	测定值	不确定度	测定值	不确定度
片麻岩										
G1	1.28	0.01	0.04	0.00	0.01	0.00	144.39	1.49	2.38	0.03
G2	0.65	0.00	0.01	0.00	0.01	0.00	321.89	3.15	4.71	0.06
G3	0.93	0.00	0.07	0.00	0.01	0.00	61.57	0.30	1.38	0.01
含金石英脉										
Q1	0.87	0.00	0.05	0.00	0.01	0.00	77.59	0.87	1.65	0.02
Q2	1.14	0.01	0.03	0.00	0.01	0.00	172.33	1.96	2.56	0.04
Q3	0.96	0.00	0.03	0.00	0.01	0.00	178.23	1.36	2.56	0.03
Q4	2.71	0.03	0.06	0.00	0.02	0.00	224.43	3.06	2.96	0.03
Q5	2.66	0.01	0.06	0.00	0.02	0.00	221.48	1.36	2.93	0.02

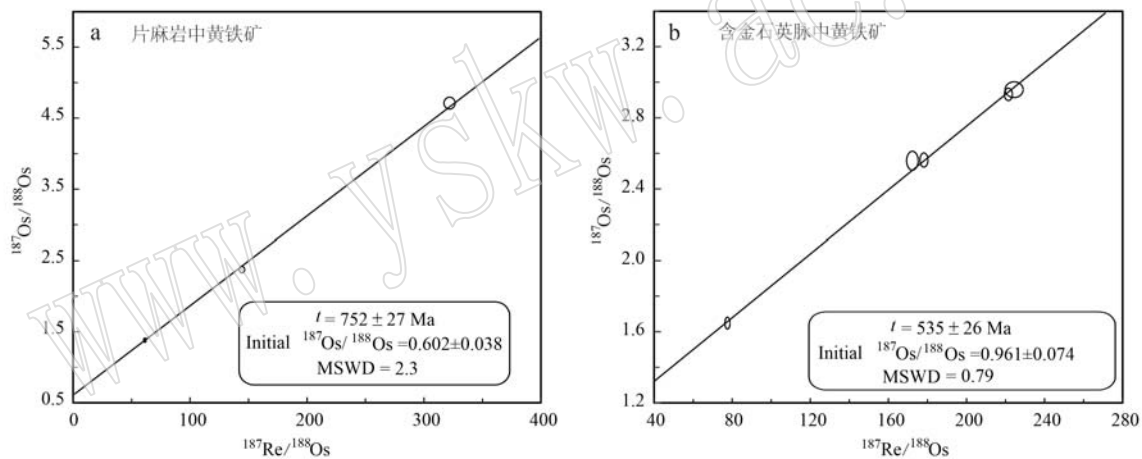


图 4 马达加斯加 Maevatanana 金矿区黄铁矿 Re-Os 同位素等时线年龄
Fig. 4 Re-Os isotopic isochron diagram of pyrite separates from Maevatanana gold area in Madagascar

4.2 片麻岩 Au、Ag 含量

片麻岩暗色带 22 件样品的 Au 含量为 $1.11 \times 10^{-9} \sim 80.50 \times 10^{-9}$, 平均值 19.55×10^{-9} ; Ag 含量为 $0.12 \times 10^{-6} \sim 2.06 \times 10^{-6}$, 平均值 0.62×10^{-6} (表 2)。片麻岩中长英质脉 30 件样品的 Au 含量为 $1.01 \times 10^{-9} \sim 2.19 \times 10^{-9}$, 平均值 1.40×10^{-9} ; Ag 含量为 $0.04 \times 10^{-6} \sim 2.91 \times 10^{-6}$, 平均值 0.46×10^{-6} (表 2)。

5 讨论

5.1 第 1 期金矿化

片麻岩中暗色带原岩为火山沉积岩,片麻岩中长英质脉 U-Pb 年龄为 2 548 Ma,为片麻岩中暗色带

部分熔融的产物(Yang *et al.* , 2016)。长英质脉 Au 含量为 $1.01 \times 10^{-9} \sim 2.19 \times 10^{-9}$, 平均值 1.40×10^{-9} ,说明原岩火山沉积岩的金含量较低,接近地壳平均值 1.5×10^{-9} 。然而,片麻岩暗色带 Au 含量为 $1.11 \times 10^{-9} \sim 80.50 \times 10^{-9}$, 平均值 19.55×10^{-9} , 高于地壳平均值 1.5×10^{-9} ,表明暗色带中金富集可能和后期金矿化有关。Maevatanana 金矿区片麻岩暗色带中黄铁矿 Re-Os 同位素等时线年龄为 752 ± 27 Ma, 和 Maevatanana 金矿区南部 747 ± 9 Ma 花岗岩体锆石 U-Pb 年龄(Yang *et al.* , 2015)在误差范围内基本一致,并且符合前文提到的马达加斯加地体金矿化的时间段,表明片麻岩中富金暗色带可能与新元古代泛非造山事件有关。

表 2 片麻岩 (T1~T22) 和长英质脉 (W1~W30) 中暗色体的 Au ($w_B/10^{-9}$)、Ag ($w_B/10^{-6}$) 含量
Table 2 Au ($w_B/10^{-9}$) and Ag ($w_B/10^{-6}$) content of dark bodies in gneisses (T1~T22) and felsic veins (W1~W30)

样品号	T1	T2	T3	T4	T5	T6	T7	T8	T9	T10	T11	T12	T13
Au	2.73	1.11	14.7	17.8	11.8	11.1	38.1	16.3	13.9	2.82	4.45	26	13.5
Ag	0.173	0.139	0.264	0.484	0.579	0.998	1.04	0.697	0.661	0.668	0.418	0.144	0.218
样品号	T14	T15	T16	T17	T18	T19	T20	T21	T22				
Au	17.3	21.1	19.3	4.89	18.1	29.8	80.5	35.8	29				
Ag	0.298	0.863	1.35	0.12	0.257	2.06	1.06	0.57	0.551				
样品号	W1	W2	W3	W4	W5	W6	W7	W8	W9	W10	W11	W12	W13
Au	1.25	1.55	1.25	1.08	1.42	1.05	1.15	1.01	1.38	1.15	1.25	2.19	1.42
Ag	2.91	0.383	0.09	0.296	0.408	0.075	0.067	0.07	0.038	0.067	0.22	1.86	0.169
样品号	W14	W15	W16	W17	W18	W19	W20	W21	W22	W23	W24	W25	W26
Au	1.69	1.65	1.89	1.35	1.05	1.48	1.11	1.11	1.42	1.42	1.18	1.15	1.18
Ag	0.2	0.464	1.72	0.529	0.204	0.296	0.085	0.083	0.502	0.954	0.167	0.17	0.469
样品号	W27	W28	W29	W30									
Au	1.75	1.42	2.16	1.72									
Ag	0.26	0.386	0.367	0.207									

泛非造山期,马达加斯加地体先后经历了 820~720 Ma 的中微大陆之间碰撞和 550~520 Ma 东、西冈瓦纳碰撞这 2 次大规模的碰撞 (Rambeloson *et al.*, 2003)。820~720 Ma 马达加斯加、斯里兰卡、印度、南极、西澳大利亚等微陆块碰撞合并形成东冈瓦纳,这些微陆块间的碰撞导致了大规模的岩浆构造活动 (Handke *et al.*, 1999),并发生了广泛的变形作用和区域变质作用,形成了大量褶皱、层间片理带、糜棱岩带、碎裂岩带、韧性剪切带和断层等构造,花岗质岩浆或铁镁质-超铁镁质岩浆沿断层或裂隙侵入,形成新元古代花岗岩体和辉长岩脉 (Bybee *et al.*, 2010),同时发生了区域变质作用,变质程度达绿片岩相至角闪岩相。在 Maevatanana 金矿区,747±9 Ma 新元古代花岗岩侵入原火山沉积岩 (Yang *et al.*, 2015),原火山沉积岩变质为片岩和片麻岩 (Yang *et al.*, 2016) (图 2),产生黑云母化、黄铁矿化等。黄铁矿 Re-Os 同位素等时线年龄为 752±27 Ma,与新元古代花岗岩年龄一致。片麻岩暗色带 Au 含量为 $1.11 \times 10^{-9} \sim 80.50 \times 10^{-9}$,在黄铁矿中可见包裹金 (图 3a),说明金矿化与黄铁矿化有关。以上表明原火山沉积岩在变质过程中,产生了金矿化,即在变质过程中,原火山沉积岩中的金被活化、迁移、富集,形成矿源层。成矿流体除了变质水,不排除天水、海水和岩浆水等共同作用。该研究与陈毓川等 (2001) 对中国境内产在绿岩带中石英脉型金矿床的研究一致。

片麻岩暗色带 Au 含量最低为 1.11×10^{-9} ,最高为 80.50×10^{-9} ,这种 Au 含量的不均一性可能与岩石

中裂隙发育程度和金矿化程度有关。裂隙发育强烈,富集较多成矿流体和成矿物质,金品位较高;反之,亦然。如果原岩火山沉积岩富集金,那么金品位应该是均一的。因此,Maevatanana 金矿区片麻岩金含量的不均一性与新元古代变质作用有关。

Meyer 和 Saager (1985) 对 Kaapvaal 克拉通和 Rhodesian 克拉通绿岩带各种岩石类型地球化学的研究发现,火山沉积岩是太古宙绿岩带中石英脉型金矿床的矿源层。在 Maevatanana 金矿区, Maevatanana 绿岩带部分被沉积岩覆盖 (图 2),相似于其他马达加斯加地体内的盆地。Antsiranana 盆地被 3~6 km 沉积岩覆盖 (Papini and Benvenuti, 2008)。Morondava 盆地的沉积物达到 8 km (Bertil and Regnault, 1998),表明 Maevatanana 绿岩带的深度大于 3~8 km。Maevatanana 金矿床成矿深度为 8.7~9.3 km (Yang *et al.*, 2017)。花岗岩脉侵入片麻岩,在花岗岩脉上下盘发育含金硅化片麻岩,说明在成矿过程中 Maevatanana 绿岩带可能位于地壳深部,是 Maevatanana 石英脉型金矿床的矿源层。

5.2 第 2 期金矿化

含金石英脉切穿了 747~727 Ma 的新元古代花岗岩体 (Yang *et al.*, 2015),表明含金石英脉的年龄晚于新元古代花岗岩,而在 150 Ma 的火山岩地区没有含金石英脉分布 (Yang *et al.*, 2014),说明含金石英脉的年龄早于火山岩。Maevatanana 金矿床含金石英脉中黄铁矿 Re-Os 同位素等时线年龄为 535±26 Ma,与马达加斯加地体中西部 Dabolava 金矿床构造控矿的含金石英脉成矿年龄一致,其黄铁矿 Re-Os 同位

素模式年龄为 533 ± 23 Ma (André-Mayer *et al.*, 2014), 说明获得的黄铁矿 Re-Os 同位素等时线年龄是可靠的。

含金石英脉中黄铁矿 Re-Os 同位素等时线年龄为 535 ± 26 Ma, 与泛非造山运动后碰撞 A 型花岗岩的年龄 537 ~ 522 Ma 一致 (Goodenough *et al.*, 2010), 说明 Maevatanana 金矿床和泛非造山运动后碰撞 A 型花岗岩具有密切的成因联系。

Maevatanana 金矿床 S、H、O、He 和 Ar 等同位素组成表明成矿物质和成矿流体来源于岩浆 (Yang *et al.*, 2017)。在 Maevatanana 金矿床 ZK3-5 钻孔岩心可见一条花岗岩脉上下盘发育硅化, 硅化带金品位 0.20 ~ 0.53 g/t。该硅化带稀土元素分布图和微量元素分布图与围岩片麻岩相似 (Yang *et al.*, 2019)。如果硅化带是花岗岩脉和片麻岩的水岩反应产物, 应该有元素的带入和带出, 将导致硅化带稀土元素分布图和微量元素分布图与围岩片麻岩有显著不同。然而, 花岗岩脉两侧硅化带稀土元素分布图和微量元素分布图与围岩片麻岩相似, 说明花岗岩脉侵入片麻岩, 可能是一定的温度和压力下部分片麻岩部分熔融的结果 (Barley *et al.*, 1989)。在马达加斯加地体中部后碰撞 A 型花岗岩体内可见大量太古代片岩、片麻岩等暗色包体 (BCGS-USGS-GLW2008), 说明后碰撞 A 型花岗岩发生了同化混染作用。550 Ma 左右, 马达加斯加地体中部发生地壳熔融作用的最高温度 $> 800^{\circ}\text{C}$ (Markl *et al.*, 2000; Buchwaldt *et al.*, 2003; CGS, 2009), 远远高于太古代片麻岩的熔融温度 (Thompson and Connolly, 1995; Holtz *et al.*, 2001)。Clemens 等 (1986) 通过实验证明 A 型花岗岩的熔融温度大于 830°C 。Meyer 和 Saager (1985) 通过绿岩带大量的各类岩石样品地球化学分析, 认为绿岩带石英脉型金矿床来自太古代绿岩带部分熔融。Hou 等 (2017) 通过研究北衙金矿床岩体内富铜金角闪岩, 建议富金铜下地壳熔融形成含矿岩浆。因此, 在泛非造山运动后期, 绿岩带部分熔融形成含矿岩浆是可能的 (Jacobs *et al.*, 2008)。

在含矿岩浆向上侵入过程中, 岩浆和围岩之间发生广泛的熔融。随着深度的减小, 压力降低, 地温梯度减小, 岩浆熔融围岩过程中温度逐渐降低。在一定的温度压力条件下, 低程度的部分熔融产生高硅熔体和大量挥发分 (Rapp and Watson, 1995; Vigneresse *et al.*, 1996), 如 CO_2 、 SO_2 、 H_2O (Svensen

et al., 2009, 2012)。De Vivo 等 (2005) 发现流纹质岩浆含有 6% 的水, 当岩浆上升到距地表 7 km 左右深度, 这些水在岩浆中转化为气体。Maevatanana 金矿床激光拉曼探针分析表明成矿流体中含有 CO_2 、 SO_2 和 H_2O 等 (Yang *et al.*, 2017)。Maevatanana 金矿床含金石英脉的稀土元素分布图和微量元素分布图与 ZK3-5 钻孔岩心中花岗岩脉上下盘硅化一致, 和围岩片麻岩相似 (Yang *et al.*, 2019), 表明成矿流体可能来自于由片麻岩部分熔融形成的含挥发分的高硅熔体。陈毓川等 (2001) 在中国境内绿岩带中石英脉型金矿床的研究中提到, 这些金矿床的稀土元素分布图和微量元素分布图与围岩片麻岩相似。也就是说这种情况普遍存在, 不是个案。

这些含挥发分的高硅熔体进入含矿岩浆后迅速上升, 随着温度压力降低, 高硅熔体中的长石结晶, 高硅熔体逐渐演化为硅质流体。另一方面, 当这些高硅熔体进入含矿岩浆后, 高硅熔体中的 S 和含矿岩浆中的 Au 生成 Au-S 络合物 (Pokrovski *et al.*, 2009; Seo *et al.*, 2009), 即这些高硅熔体萃取了含矿岩浆中的 Au, 最后形成成矿流体。

高硅熔体中的挥发分增加了高硅熔体的压力, 有利于高硅熔体在岩浆中快速上升。在岩浆上升过程中, 随着压力的降低, 挥发分的溶解度降低, 在岩浆中产生大量气泡。部分含挥发分的高硅熔体在岩浆中结晶形成晶洞, 说明这种高硅熔体和岩浆是不混溶的。在野外, 部分同成矿期岩浆岩中可见到大量晶洞。一些学者对这些晶洞进行了研究, 发现这些含挥发分的高硅熔体萃取了岩浆中的金 (Duncan *et al.*, 1998; Hart *et al.*, 2000; Baker and Lang, 2001; Zachariáš *et al.*, 2001)。部分同成矿期岩体含金相对较高, 部分同成矿期岩体含金相对较低 (Lang and Baker, 2001)。Hou 等 (2015) 发现木吉村铜矿床同成矿期岩体铜含量较低, 认为成矿流体萃取了岩浆中的铜。剧烈的岩浆活动诱发强烈的构造活动, 这些高温成矿流体以蒸气形式 (池国祥等, 2008) 或被脉岩如煌斑岩等携带进入断层、剪切带等容矿构造形成金矿床 (Rock and Groves, 1988)。

6 结论

(1) 片麻岩暗色带中黄铁矿 Re-Os 同位素等时线年龄为 752 ± 27 Ma, 含金石英脉中黄铁矿 Re-Os 同位素等时线年龄为 535 ± 26 Ma。

(2) 752 Ma, Maevatanana 绿岩带发生广泛的变形和变质作用, 绿岩带中的金被活化、迁移、富集, 形成矿源层; 535 Ma, 矿源层熔融形成含矿岩浆; 在岩浆上升过程中, 地壳部分熔融, 逐步演化为成矿流体, 萃取了岩浆中的金, 富集成矿。

References

- André-Mayer A S, Ramiandrisoa N, Vanderhaeghe O, *et al.* 2014. Re-Os geochronological constraints on the Dabolava mesothermal gold occurrence, Madagascar: Implications for the Ikalamavony sub-domain deposition age [J]. *Journal of African Earth Sciences*, 94: 119~127.
- Andrianjakavah P, Salvi S, Béziat D, *et al.* 2007. Textural and fluid inclusion constraints on the origin of the banded-iron-formation-hosted gold deposits at Maevatanana, central Madagascar [J]. *Mineralium Deposita*, 42(4): 385~398.
- Baker T and Lang J R. 2001. Fluid inclusion characteristics of intrusion-related gold mineralization, Tombstone-Tungsten magmatic belt, Yukon Territory, Canada [J]. *Mineralium Deposita*, 36(6): 563~582.
- Barley M E, Eisenlohr B N, Groves D I, *et al.* 1989. Late Archean convergent margin tectonics and gold mineralization: A new look at the Norseman-Wiluna Belt, Western Australia [J]. *Geology*, 17(9): 826.
- Bertil D and Marc Regnault J. 1998. Seismotectonics of Madagascar [J]. *Tectonophysics*, 294(1): 57~74.
- BGs-USGS-GLW. 2008. Revision de la cartographie géologique et minière des zones Nord, Centre, et Centre Est de Madagascar [R]. BGS Report CR/08/078, Keyworth, England.
- Buchwaldt R, Tucker R D and Dymek R F. 2003. Geothermobarometry and U-Pb Geochronology of metapelitic granulites and pelitic migmatites from the Lokoho Region, Northern Madagascar [J]. *American Mineralogist*, 88(11~12): 1 753~1 768.
- Bybee G M, Ashwal L D and Wilson A H. 2010. New evidence for a volcanic arc on the western margin of a rifting Rodinia from ultramafic intrusions in the Andriamena Region, north-central Madagascar [J]. *Earth and Planetary Science Letters*, 293(1~2): 42~53.
- CGS(Council for Geoscience). 2009. Map explanation of 1:100 000 scale (Zone E): sheets I46—Ambararata, J46—Beopoaka, 47—Itondy, J47—Belobaka, K47—Ambatofotsy, I48—Miandrivazo, J48—Betrondro, K48—Ambatondradama, I49—Ankotrofotsy, J49—Dabolava, K49—Anjoma-Ramartina, I49—Vasiana, M49—Ankazomiriotra, N49—Antsirabe. Antananarivo [Z]. *Projet de Gouvernance des Ressources Minérales, Ministère de L'Energie et des Mines; and Pretoria, Council for Geoscience.*
- Chen Yuchuan, Li Zhaonai and Wu Ruishen. 2001. Gold Deposits in China and Their Metallogenic Regularity [M]. Beijing: Geological Publishing House, 1~465 (in Chinese with English abstract).
- Chi Guoxiang and Lu Huanzhang. 2008. Validation and representation of fluid inclusion microthermometric data using the fluid inclusion assemblage (FIA) concept [J]. *Acta Petrologica Sinica*, 24(9): 1 945~1 953 (in Chinese with English abstract).
- Clemens J D, Holloway J R and White A J R. 1986. Origin of an A-type granite: Experimental constraints [J]. *American Mineralogist*, 71(3~4): 317~324.
- Collins A S. 2006. Madagascar and the amalgamation of central Gondwana [J]. *Gondwana Research*, 9(1~2): 3~16.
- Collins A S, Fitzsimons I C W, Hulscher B, *et al.* 2003. Structure of the eastern margin of the East African Orogen in central Madagascar [J]. *Precambrian Research*, 123(2~4): 111~133.
- Collins A S and Windley B F. 2002. The tectonic evolution of central and northern Madagascar and its place in the final assembly of Gondwana [J]. *The Journal of Geology*, 110(3): 325~339.
- de Vivo B, Lima A and Webster J D. 2005. Volatiles in magmatic-volcanic systems [J]. *Elements*, 1(1): 19~24.
- de Wit M J. 2003. Madagascar: Heads it's a continent, tails it's an island [J]. *Annual Review of Earth and Planetary Sciences*, 31: 213~248.
- Du A D, Wu S Q, Sun D Z, *et al.* 2004. Preparation and certification of Re-Os dating reference materials: Molybdenites HLP and JDC [J]. *Geostandards and Geoanalytical Research*, 28(1): 41~52.
- Duncan R, Russell J, Hastings N, *et al.* 1998. Relationships between chemical composition, physical properties, and geology of the mineralized Emerald Lake Pluton, Yukon Territory [R]. *Geological Survey of Canada Current Research*, 1998-A: 1~11.
- Ferry J M and Dipple G M. 1991. Fluid flow, mineral reactions, and metasomatism [J]. *Geology*, 19(3): 211.
- Goodenough K M, Thomas R J, De Waele B, *et al.* 2010. Post-collisional magmatism in the central East African Orogen: The Maevarano Suite of North Madagascar [J]. *Lithos*, 116(1~2): 18~34.
- Halter W E, Heinrich C A and Pettke T. 2005. Magma evolution and the formation of porphyry Cu-Au ore fluids: Evidence from silicate and sulfide melt inclusions [J]. *Mineralium Deposita*, 39(8): 845~863.

- Handke M J, Tucker R D and Ashwal L D. 1999. Neoproterozoic continental arc magmatism in west-central Madagascar[J]. *Geology*, 27(4): 351.
- Harraz H Z. 2000. A genetic model for a mesothermal Au deposit: Evidence from fluid inclusions and stable isotopic studies at El Sid Gold Mine, Eastern Desert, Egypt[J]. *Journal of African Earth Sciences*, 30(2): 267~282.
- Harraz H Z and Hamdy M M. 2015. Zonation of primary haloes of Atud auriferous quartz vein deposit, Central Eastern Desert of Egypt: A potential exploration model targeting for hidden mesothermal gold deposits[J]. *Journal of African Earth Sciences*, 101: 1~18.
- Hart C J R, Baker T and Burke M. 2000. New exploration concepts for country-rock hosted, intrusion-related gold systems, Tintina Gold Belt, British Columbia and Yukon Chamber of Mines[J]. *Special Volume 2*: 145~172.
- Holtz F, Becker A and Wilhelm J. 2001. The water-undersaturated and dry Qz-Ab-Or system revisited. Experimental results at very low water activities and geological implications[J]. *Contributions to Mineralogy and Petrology*, 141(3): 347~357.
- Hou Z Q, Li Q Y, Gao Y F, *et al.* 2015. Lower-crustal magmatic hornblende in North China Craton: Insight into the genesis of porphyry Cu deposits[J]. *Economic Geology*, 110(7): 1 879~1 904.
- Hou Z Q, Zhou Y, Wang R, *et al.* 2017. Recycling of metal-fertilized lower continental crust: Origin of non-arc Au-rich porphyry deposits at cratonic edges[J]. *Geology*, 45(6): 563~566.
- Jacobs J, Bingen B, Thomas R J, *et al.* 2008. Early Palaeozoic orogenic collapse and voluminous late-tectonic magmatism in Dronning Maud Land and Mozambique: Insights into the partially delaminated orogenic root of the East African-Antarctic Orogen? [J]. *Geological Society, London, Special Publications*, 308(1): 69~90.
- Jia Y, Kerrich R and Goldfarb R. 2003. Metamorphic origin of ore-forming fluids for orogenic gold-bearing quartz vein systems in the North American Cordillera: Constraints from a reconnaissance study of $\delta^{15}\text{N}$, δD , and $\delta^{18}\text{O}$ [J]. *Economic Geology*, 98(1): 109~123.
- Kabete J, Groves D, McNaughton N, *et al.* 2006. The geology, SHRIMP U-Pb geochronology and metallogenic significance of the Ankisatra-Besakay District, Andriamena belt, northern Madagascar[J]. *Journal of African Earth Sciences*, 45(1): 87~122.
- Ludwig K R. 2003. ISOPLOT 3.00: A Geochronological toolkit for Microsoft Excel[C]//Berkeley Geochronology Center Special Publication, 1~70.
- Markl G, Bäuerle J and Grujic D. 2000. Metamorphic evolution of Pan-African granulite facies metapelites from Southern Madagascar[J]. *Precambrian Research*, 102(1~2): 47~68.
- Meinert L D. 2000. Gold in skarns related to epizonal intrusions[J]. *Reviews in Economic Geology*, 13: 347~375.
- Meyer M and Saager R. 1985. The gold content of some Archaean rocks and their possible relationship to epigenetic gold-quartz vein deposits [J]. *Mineralium Deposita*, 20(4): 284~289.
- Papini M and Benvenuti M. 2008. The Toarcian-Bathonian succession of the Antsiranana Basin (NW Madagascar): Facies analysis and tectono-sedimentary history in the development of the East Africa-Madagascar conjugate margins[J]. *Journal of African Earth Sciences*, 51(1): 21~38.
- Paquette J L and Nédélec A. 1998. A new insight into Pan-African tectonics in the East-West Gondwana collision zone by U-Pb zircon dating of granites from central Madagascar[J]. *Earth and Planetary Science Letters*, 155(1~2): 45~56.
- Pokrovski G S, Tagirov B R, Schott J, *et al.* 2009. A new view on gold speciation in sulfur-bearing hydrothermal fluids from in situ X-ray absorption spectroscopy and quantum-chemical modeling[J]. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 73(18): 5 406~5 427.
- Rambeloson A R. 1999. Gold in Madagascar[J]. *Gondwana Research*, 2: 423~431.
- Rambeloson R A, Yoshida M, Ramasiarino V, *et al.* 2003. The central granites-gneiss-migmatite belt (CGGMB) of Madagascar: The eastern Neoproterozoic suture of the East African Orogen[J]. *Gondwana Research*, 6(4): 641~651.
- Rapp R P and Watson E B. 1995. Dehydration melting of metabasalt at 8-32 kbar: Implications for continental growth and crust-mantle recycling[J]. *Journal of Petrology*, 36(4): 891~931.
- Rock N M S and Groves D I. 1988. Can lamprophyres resolve the genetic controversy over mesothermal gold deposits? [J]. *Geology*, 16(6): 538.
- Schindler C, Hagemann S G, Banks D, *et al.* 2016. Magmatic hydrothermal fluids at the sedimentary rock-hosted, intrusion-related tellur gold-copper deposit, Paterson Orogen, western Australia: Pressure-temperature-composition constraints on the ore-forming fluids[J]. *Economic Geology*, 111(5): 1 099~1 126.
- Seo J H, Guillong M and Heinrich C A. 2009. The role of sulfur in the formation of magmatic-hydrothermal copper-gold deposits[J]. *Earth and Planetary Science Letters*, 282(1~4): 323~328.
- Svensen H, Schmidbauer N, Roscher M, *et al.* 2009. Contact metamorphism, halocarbons, and environmental crises of the past[J]. *Environmental Chemistry*, 6(6): 466.
- Svensen H, Corfu F, Polteau S, *et al.* 2012. Rapid magma emplacement

- in the Karoo Large Igneous Province[J]. *Earth and Planetary Science Letters*, 325: 1~9.
- Thompson A B. 1997. Flow and focusing of metamorphic fluids[C]// Jamtveit B and Yardley B W D. *Fluid Flow and Transport in Rocks*. Dordrecht: Springer, 297~314.
- Thompson A B and Connolly J A D. 1995. Melting of the continental crust: Some thermal and petrological constraints on anatexis in continental collision zones and other tectonic settings[J]. *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*, 100(B8): 15 565~15 579.
- Thomas R J, De Waele B, Schofield D I, *et al.* 2009. Geological evolution of the Neoproterozoic Bemarivo Belt, northern Madagascar[J]. *Precambrian Research*, 172(3~4): 279~300.
- Tucker R D, Ashwal L D, Handke M J, *et al.* 1999. U-Pb geochronology and isotope geochemistry of the Archean and Proterozoic rocks of north-central Madagascar[J]. *Journal of Geology*, 107(2): 135~153.
- Tucker R D, Roig J Y, Moine B, *et al.* 2014. A geological synthesis of the Precambrian shield in Madagascar[J]. *Journal of African Earth Sciences*, 94: 9~30.
- Vigneresse J L, Barbey P and Cuney M. 1996. Rheological transitions during partial melting and crystallization with application to felsic magma segregation and transfer[J]. *Journal of Petrology*, 37(6): 1 579~1 600.
- Xu Deru, Ye Tingwei, Wang Zhilin, *et al.* 2019. Spatially heterogeneous distribution of metallogenesis and its controlling factors[J]. *Geotectonica et Metallogenia*, 43(3): 368~388 (in Chinese with English abstract).
- Yang Xi'an. 2015. Magma mixing and gold mineralization of the Maevatanana gold deposit in Madagascar[J]. *Acta Geologica Sinica*, 89(8): 1 437~1 447 (in Chinese with English abstract).
- Yang X, Carranza E J M, Wu J, *et al.* 2019. Gold mineralization assisted by crustal melting: The case of the Maevatanana mesothermal gold deposit, Madagascar[J]. *Arabian Journal of Geosciences*, 12(11): 345.
- Yang X, Chen Y C, Hou K J, *et al.* 2014. U-Pb zircon geochronology and geochemistry of Late Jurassic basalts in Maevatanana, Madagascar; Implications for the timing of separation of Madagascar from Africa[J]. *Journal of African Earth Sciences*, 100: 569~578.
- Yang X A, Chen Y C, Liu S B, *et al.* 2015. U-Pb zircon geochronology and geochemistry of Neoproterozoic granitoids of the Maevatanana area, Madagascar; Implications for Neoproterozoic crustal extension of the Imorona-Itsindro Suite and subsequent lithospheric subduction[J]. *International Geology Review*, 57(11~12): 1 633~1 649.
- Yang X, Li C, Hou K J, *et al.* 2017. Magma mixing and gold mineralization in the Maevatanana gold deposit, Madagascar[J]. *Ore Geology Reviews*, 91: 1 013~1 024.
- Yang X, Liu S B and Hou K J. 2016. U-Pb zircon geochronology and geochemical constraints on the age and origin of late Neoproterozoic leucosomes in migmatites from the Maevatanana area, Madagascar[J]. *Journal of African Earth Sciences*, 119: 52~66.
- Yang Xi'an, Liu Shanbao, Wang Guangliang, *et al.* 2013. Characteristics of ore-controlling structure in Maevatanana gold deposit, Madagascar[J]. *Gold*, 34(9): 16~22 (in Chinese with English abstract).
- Zachariáš J, Pertold Z, Pudilová M, *et al.* 2001. Geology and genesis of Variscan porphyry-style gold mineralization, Petrůčkova hora deposit, Bohemian Massif, Czech Republic[J]. *Mineralium Deposita*, 36(6): 517~541.

附中文参考文献

- 陈毓川, 李兆鼎, 毋瑞身. 2001. 中国金矿床及其成矿规律[M]. 北京: 地质出版社, 1~465.
- 池国祥, 卢焕章. 2008. 流体包裹体组合对测温数据有效性的制约及数据表达方法[J]. *岩石学报*, 24(9): 1 945~1 953.
- 许德如, 叶挺威, 王智琳, 等. 2019. 成矿作用的空间分布不均匀性及其控制因素探讨[J]. *大地构造与成矿学*, 43(3): 368~388.
- 杨喜安. 2015. 马达加斯加 Maevatanana 金矿床岩浆混合成矿作用[J]. *地质学报*, 89(8): 1 437~1 447.
- 杨喜安, 刘善宝, 王光良, 等. 2013. 马达加斯加 Maevatanana 金矿床构造控矿特征[J]. *黄金*, 34(9): 16~22.