

甘肃阳山金矿独居石 Th-U-Pb 化学年龄及其地质和成矿意义*

杨荣生¹ 陈衍景^{2**} 张复新³ 李志宏⁴ 毛世东^{2,4} 刘红杰⁵ 赵成海⁵

YANG RongSheng¹, CHEN YanJing², ZHANG FuXin³, LI ZhiHong⁴, MAO ShiDong^{2,4}, LIU HongJie⁵ and ZHAO ChengHai³

1. 北京大学 造山带与地壳演化重点实验室, 北京 100871
2. 中国科学院广州地球化学研究所 成矿动力学重点实验室, 广州 510640
3. 西北大学 地质学系, 西安 710069
4. 武警黄金部队 12 支队, 成都 610036
5. 中国科学院地球化学研究所, 贵阳 550002

1. *Key Laboratory of Orogen and Crust Evolution, Peking University, Beijing 100871*
2. *Key Laboratory of Metallogenic Dynamics, Guangzhou Institute of Geochemistry, CAS, Guangzhou 510640*
3. *Department of Geology, Northwest University, Xi'an 710069*
4. *No. 12 Team, Gold Exploration Branch of Armed Police, Chengdu 610036*
5. *Institute of Geochemistry, CAS, Guiyang 550002*

2006-08-06 收稿, 2006-08-23 改回.

Yang RS, Chen YJ, Zhang FX, Li ZH, Mao SD, Liu HJ and Zhao CH. 2006. Chemical Th-U-Pb ages of monazite from the Yangshan gold deposit, Gansu province and their geologic and metallogenic implications. *Acta Petrologica Sinica*, 22(10):2603–2610

Abstract The Yangshan gold deposit is a superlarge deposit recently found in western Qinling Orogen. Using electron microprobe technique, the authors analyzed the contents of Y, Th, U and Pb in monazites from the Au-bearing altered granite-porphry dykes, and then calculate their apparent ages using ChemAge procedure. The apparent ages cluster into three groups. Group 1 includes nine analyses spotted on the cores of monazites, with apparent ages ranging from 297 to 251Ma, and gives an isochron age of 268 ± 4 Ma (MSWD = 0.24), representing Late Paleozoic arc-magmatism induced by northward subduction of the Mian-Lue Ocean. Group 2 includes twelve apparent ages ranging from 237 to 207Ma and yields an isochron age of 220 ± 3 Ma (MSWD = 0.20). This age records the crystallization of the granite-porphry dike and accords with the beginning time of the large-scale collision-type granitic magmatism in western Qinling Orogen. Group 3 contains seven analyses spotted on the margins of monazites, yielding apparent ages of 200 ~ 179Ma and an isochron age of 190 ± 3 Ma (MSWD = 0.15), which represents the metallogenic time of the Yangshan gold deposit. Hence the Yangshan gold deposit is a typical representative resulted from collisional fluid flow and metallogeny due to its metallogenic time agrees with the large-scale hydrothermal metallogenesis during the Mesozoic continental collision in western Qinling Orogen.

Key words Yangshan gold deposit, Chemical Th-U-Pb age of monazite, Metallogenic time, Late Paleozoic magmatic arc, Collisional fluid flow and metallogeny

摘要 阳山金矿是西秦岭地区新发现的超大型金矿, 作者运用电子探针测定了含矿花岗斑岩脉的独居石 Y-Th-U-Pb 含量, 采用 ChemAge 软件计算了各测点的表面年龄。各测点表面年龄落入 3 个组。第一组包括 9 个数据, 来自独居石的核心部位, 表面年龄变化于 297-251Ma, 等时线年龄为 268 ± 4 Ma (MWSO = 0.24), 记录了勉略洋俯冲引发的晚古生代弧岩岩浆活动。

* 本文得到国家自然科学基金项目 (Nos. 40572065, 40425006)、国家 973 项目 2006CB403508 课题、科学院百人计划项目和武警黄金部队科研项目的资助。

第一作者简介: 杨荣生, 男, 1976 年生, 博士研究生, 矿床学方向, E-mail: youngs@sohu.com

** 通讯作者: 陈衍景, E-mail: yjchen@pku.edu.cn; gigyjchen@126.com

第二组包括 12 个数据,表面年龄变化于 237~207Ma,等时线年龄为 $220 \pm 3\text{Ma}$ (MWS $D=0.20$),属花岗斑岩侵入结晶年龄,与西秦岭碰撞型花岗岩开始大规模发育的时间一致。第三组包括 7 件位于独居石边缘的测点,表面年龄变化于 200~179Ma,等时线年龄为 $190 \pm 3\text{Ma}$ (MSWD=0.15),属阳山金矿的成矿时间。因此,阳山金矿成矿时间与西秦岭中生代陆陆碰撞体制的大规模流体成矿事件一致,是陆陆碰撞体制流体成矿作用的典型代表。

关键词 阳山金矿;独居石 Th-U-Pb 化学年龄;电子探针;成矿时间;晚古生代岩浆弧;碰撞体制流体成矿作用
中图分类号 P597.3;P618.51

成矿时间是研究成矿构造背景、矿床成因和建立成矿构造模式的重要依据之一,因此是矿床地质和同位素地质年代学研究的重要内容。然而,由于成矿系统的复杂性和同位素测年方法的局限性,成矿时间的确定一直是固体地球科学研究领域的难题之一。在各类矿床中,卡林型-类卡林型金矿系统因其缺乏热液锆石和辉钼矿等矿物、矿物结晶粒度细、围岩为沉积岩、与岩浆活动关系不密切等,而成为同位素年代学研究的最大难题。虽然铀钍铷 Rb/Sr 定年方法曾给出了 Getchell (Tretbar *et al.*, 2000)、Redeo (Arehart *et al.*, 2003) 等卡林型金矿的精确成矿年龄,但铀钍铷 Rb/Sr 定年方法在多数卡林型金矿中很难发现;绢云母 $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$ 分步加热法是常用的成矿定年方法,但并不适合于卡林型金矿 (Hofstra *et al.*, 1999; Arehart *et al.*, 2003; Chakurian *et al.*, 2003); 卡林型金矿常见雄黄、雌黄、黄铁矿、毒砂等矿物,但因其 Re、Os 含量低而难以给出可信的 Re-Os 年龄 (Hofstra *et al.*, 1999); 萤石、闪锌矿等矿物的 Sm-Nd 或 Rb-Sr 法曾成功用于 SEDEX 型或 MVT 型矿床的定年 (如 Jiang *et al.*, 2000),但对卡林型金矿的尝试均不成功 (Arehart *et al.*, 2003); Hofstra *et al.* (2000) 曾尝试萤石、方解石、黄铁矿等矿物的 U-Th-Pb 法测定卡林型金矿的年龄,但获得的年龄与地质实际不符 (Hofstra *et al.*, 2000),Arehart *et al.* (2003) 归因于卡林型金矿的矿物 U、Th 含量太低。

独居石电子探针定年是新的原位地质定年方法 (Suzuki and Adachi, 1991, 1998; Williams *et al.*, 1999; 刘树文等, 2004; Liu *et al.*, 2006; 及其引文)。其有效性在于:独居石的普通铅含量低,通常只有 $1\mu\text{g/g}$ 左右,相对于放射性成因铅含量可以忽略不计 (Parrish, 1990; 及其引文);独居石一旦形成,其 U/Th/Pb 比值基本不受后期地质作用影响,为封闭体系,使放射性成因铅被完好保存 (Parrish, 1990; Montel *et al.*, 1996; Cherniak *et al.*, 2004; Cocherie *et al.*, 2005)。例如,只有当变质温度大于 600°C 时,独居石的 Pb 才会丢失 (Vielreicher *et al.*, 2003);即使在麻粒岩相变质过程中,独居石的元素扩散运动也非常有限 (Zhu and O' Nions, 1999)。在缺乏流体作用的岩浆过程中,独居石的 U-Th-Pb 体系于 700°C 封闭,并不受后期热事件干扰 (Cocherie *et al.*, 2005)。在中-低级变质作用中,独居石可以很好地保存 (Montel *et al.*, 1996; Foster *et al.*, 2002; Wing *et al.*, 2003; Cocherie *et al.*, 2005),所以,继承性独居石仍可给出较好的地质年龄。自然,热液成因独居石的年龄可以约束水-岩作用的时间 (Poitrasson *et al.*, 2000)。同时,电子探针测试精度的提高又大大提高了独居石 U-Th-Pb 年龄的精度 (刘树文等,

2004)。因此,独居石 Th-U-Pb 电子探针化学定年方法已成为强有力的地质年代学研究工具 (Zhu and O' Nions, 1999; Catlos *et al.*, 2002; Cocherie *et al.*, 2005; Dahl *et al.*, 2005; Goncalves *et al.*, 2005),并被广泛运用于岩浆岩 (Cocherie *et al.*, 2005; Mezeme *et al.*, 2006)、沉积岩 (Santosh *et al.*, 2005)、变质岩 (Fernandez *et al.*, 2003; Dahl *et al.*, 2005; Goncalves *et al.*, 2005) 的年代学研究,虽然独居石的 U-Th-Pb 定年方法也被运用到成矿年代学研究中 (Wang *et al.*, 1994; Rasmussen *et al.*, 2006),但单个独居石矿物颗粒的电子探针定年方法在矿床学的研究方面还未见及报道,本文则在此方面进行了探索性研究。

甘肃阳山金矿是我国最大的类卡林型金矿,也是世界最大的 6 个卡林型-类卡林型金矿之一。为确定阳山金矿的成矿年龄,前人曾尝试绢云母 K-Ar 法、Ar-Ar 法和锆石 SHRIMP U-Pb 法,虽然给出了成矿时间的重要信息,但仍没较好解决成矿年龄问题。作者在阳山金矿的矿相学和岩相学研究过程中,发现了大量独居石矿物存在,部分独居石被包裹在热液矿物黄铁矿中,通过独居石电子探针分析,获得了具有多项重要地质意义的 3 组年龄,特做专门报道。

1 矿床地质及样品地质

甘肃文县阳山金矿由武警黄金部队第十二支队在 1997 年发现,目前探明储量已接近 300 吨,平均品位为 5.64×10^{-6} ,属超大型矿床。阳山金矿是西秦岭卡林型-类卡林型金矿省 (图 1; 陈衍景等, 2004) 的代表性矿床,它位于南秦岭造山带与松潘前陆褶冲带的接合部位,玛曲-略阳-勉县断裂带 (即勉略断裂带或缝合带) 的北侧。勉略缝合带几乎横贯中国大陆,记录着古特提斯东部北支洋盆俯冲、闭合以及洋盆闭合后扬子古板块与中朝古板块的碰撞造山作用 (张国伟等, 2001, 2004; 陈衍景等, 2004; 及其引文)。勉略断裂带的北侧次级构造,即文县弧形构造带控制着矿床的空间分布 (图 1)。

文县弧形构造由一系列近于平行的断裂构成,阳山金矿即位于其中的安昌河-观音坝断裂带中 (图 2)。矿区及附近地层主要有元古宇碧口群白云岩、灰岩、硅质岩、千枚岩、板岩及绿片岩等,泥盆系三河口群砂岩、粉砂岩、板岩、千枚岩、灰岩、黑色泥岩等,石炭系和/或二叠系灰岩、白云岩、砂岩、粉砂岩、板岩等,以及局部发育的三叠系海相复理石建造和侏罗系陆相碎屑岩 (图 2)。矿区岩浆岩主要为花岗斑岩脉,多沿切穿三河口群的构造破碎带侵入。阳山金矿的主要矿

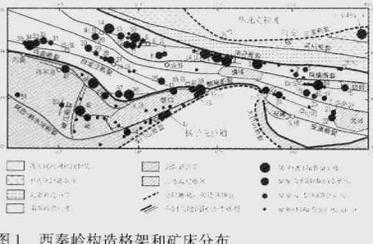


图1 西秦岭构造格架和矿床分布

(据 Zhang *et al.*, 2006, 略修改; 编号矿床详细资料见陈衍景等, 2004; 36号为阳山金矿)

Fig. 1 Tectonic framework and gold distribution in the western Qinling

(modified from Zhang *et al.*, 2006; for details of the numbered deposits see Chen Yanjing *et al.*, 2004; No. 36 is the Yangshan deposit)



图2 阳山金矿区地质图

D₂S₁₂、D₁S₃、D₂S₄、D₂S₅ 分别代表中混盆统三河口组下部砂岩和板岩、中部灰岩夹砂质千枚岩、上部千枚岩夹薄层灰岩和顶部灰岩地层

Fig. 2 The geological map of the Yangshan gold deposit

体均产于三河口群地层,三河口群地层发生了强烈的变形和低级变质作用,主要赋矿围岩岩性是碳质或砂泥质千枚岩。

阳山金矿带共发现金矿脉 49 条,规模最大者为 305 号(已控制金资源量为 56.133t)和 314 号矿脉(已控制金资源量为 27.570t),矿脉沿断裂构造发育,平面上呈舒缓波状,剖面上呈脉状。矿石主要是微细浸染状黄铁矿化、毒砂化的千枚岩及花岗岩,金主要以显微-次显微状不可见自然金的形式包裹于毒砂、黄铁矿等矿物中,但矿区还发育一条含金的石英脉,此石英脉呈扁豆体孤立产出(齐金忠等, 2005)。前人(郭俊华等, 2002; 齐金忠等, 2003, 2005; 刘伟等, 2003; 罗锡明等, 2004; 袁士松等, 2004)已不同程度地总结和报道了该矿床的矿床地质-地球化学、流体包裹体、成矿同位素年代学等方面的研究成果。

我们的矿相学和岩相学研究表明,除赋矿围岩在成岩期发育草帽状黄铁矿外,阳山金矿的蚀变矿化经历了如下 5 个阶段:(1)石英-绢云母-黄铁矿阶段(I阶段),黄铁矿多为自形和半自形的 $\{100\}$ 、 $\{110\}$ 晶形集合体和 $\{210\}$ 晶形,粒

径约 100~1000(μm),压碎结构发育,碎屑可成为后一阶段黄铁矿晶体生长的核心。(2)黄铁矿-毒砂-石英阶段(II阶段),硫化物以黄铁矿(约 70%)和毒砂(约 20%)为主,黄铁矿多呈自形的 $\{210\}$ 和 $\{100\}$ + $\{210\}$ 聚型,粒径约 50~200(μm),常包裹 I 阶段黄铁矿和其它矿物(独居石等); $\{210\}$ 黄铁矿的砷含量较高,且多具环带结构。(3)毒砂-黄铁矿-石英阶段(III阶段),毒砂占硫化物的 60~90%,多为自形针状、短柱状,长径约 50~300 μm ,黄铁矿占硫化物的 10~30%,粒度细;在蚀变花岗岩岩中,本阶段矿物组合呈细脉沿裂隙贯入,并以此区别于细粒浸染于斑岩内的 II 阶段黄铁矿-毒砂组合。(4)石英-辉锑矿-自然金阶段(IV阶段),主要矿物为石英,可见自然金、辉锑矿、辉铋矿、脱硫辉锑矿、车轮矿、黝铜矿、方铅矿、雄黄和雌黄等矿物;自然金等矿物包裹先成的细粒黄铁矿、毒砂等矿物。(5)方解石-石英阶段(V阶段),发育大量犬牙状石英和/或方解石网脉,切穿此前形成的热液脉体、矿体或岩脉。

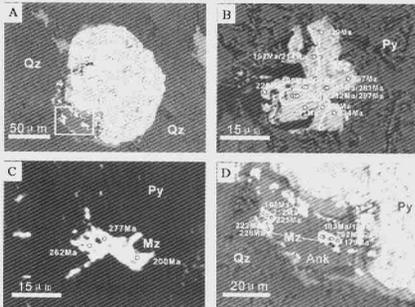


图3 黄铁矿中独居石背散射图像及电子探针 Th-U-Pb 分析点(年龄数据)图

A-蚀变花岗岩岩脉中的黄铁矿及其中的独居石颗粒; B-PD112-12-1 独居石的电子探针打点位置及年龄数值(1.1~1.10),白色虚线为不同的年龄区域,白色圆点为电子探针打点位置; C-黄铁矿中的 PD112-12-2 独居石及电子探针年龄(2.1~2.4); D-黄铁矿周围的 PD112-12-3 和 PD112-12-4 独居石及电子探针年龄(3.1~3.3; 4.1~4.5),独居石赋存于铁白云石中。Py-黄铁矿; Qz-石英; Mz-独居石; Ank-铁白云石。

Fig. 3 BSE pictures and electron microprobe Th-U-Pb analytical spots (age mapping) plotted of monazites in pyrite of the Yangshan Gold Deposit

本文所研究的独居石样品来自含金蚀变花岗岩岩体,主要蚀变有发生绢云母化、硅化、铁白云石化、黄铁矿化,以及毒砂化等蚀变作用。独居石有两种产状:(1)以斜方柱状晶形被包裹在 II 阶段含砷黄铁矿中(图 3A, 3B, 3C),粒径约 20~30 μm ,表面溶蚀现象显著;(2)以细小晶体的独居石分布在 II 阶段黄铁矿边缘的铁白云石中(图 3A, 3D),独居石粒径约

10~15 μm ,表面比较平整。赋矿的花岗斑岩主要发生绢云母化、硅化、铁白云石化、黄铁矿化以及毒砂化等蚀变作用。根据矿物之间的包含和穿插关系以及独居石本身的特征,认为独居石的形成年龄早于或者等于II阶段黄铁矿形成,独居石的年龄可确定矿作用的下限时间。

2 样品测试和结果

独居石样品的电子探针测试在北京大学造山带与地壳演化教育部重点实验室完成,所用仪器为JXA28100电子探针仪,实验条件为:加速电压15kV,束流0.1(A,束斑直径1(m,Th,U,Pb)的监测时间分别是120S,180S,270S。每点计数时间为11分钟。U、Th和Pb含量分析的标样均为国际标样,分别是金属U,ThO₂和PbCrO₄。

测试流程参见刘树文等(2004)和Liu *et al.* (2006)。首先,进行独居石背散射图像分析,并拍摄背散射照片(图3);然后,根据背散射照片,选择表面平整、没有裂隙和缺乏包体的位置作为测点,进行U/Th/Pb成分的电子探针分析。各测点的分析结果、标准偏差和误差列于表1。

采用ChemAge软件(Geisler and Schleicher, 2000),依据独居石化学成分的电子探针数据,计算了各测点的表面年龄(图3,表1)。统计所有表面年龄,根据年龄分布情况分为3组(图4),然后分别计算各组的等时线年龄(图5、图6、图7)。

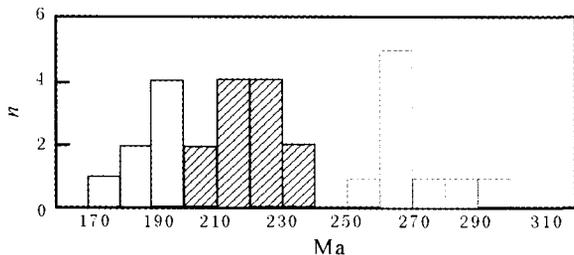


图4 独居石年龄分布直方图

Fig. 4 The histogram of ages of monazite

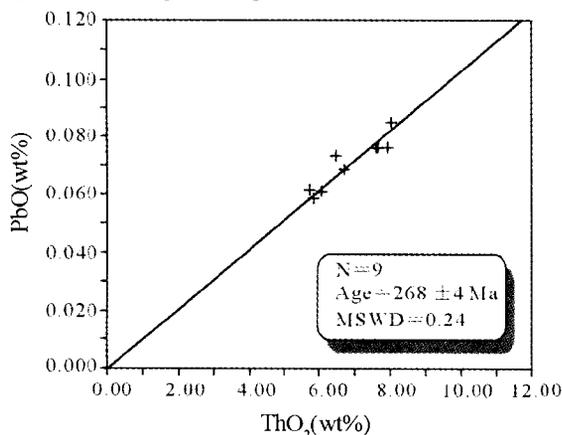


图5 继承独居石的等时线年龄

Fig. 5 The isochron age of the inherited monazites

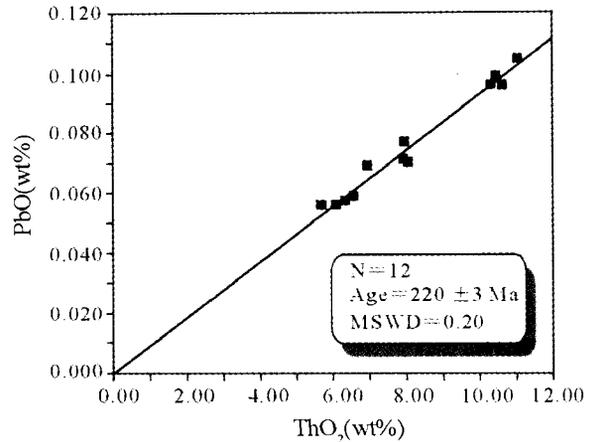


图6 岩浆结晶独居石的等时线年龄

Fig. 6 The isochron age of the magma-crystalline monazites

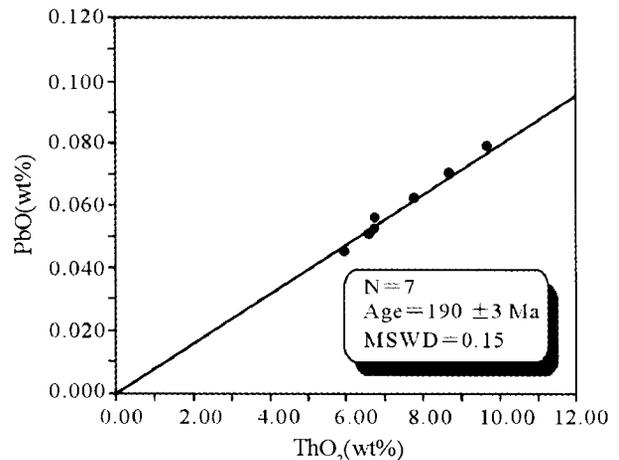


图7 独居石边缘的铅丢失事件的等时线年龄

Fig. 7 The isochron age of Pb-loss at the margin of monazites

表面年龄最大的一组包括9个数据,显示了正态分布的特征(图4),表面年龄变化于251~297Ma,算术平均值为269 \pm 18Ma,等时线年龄为268 \pm 4Ma(图5)。第二组数据的表面年龄介于207~237Ma之间,包括12个数据,显示了完整的正态分布特征,算术平均年龄为221 \pm 16Ma,等时线年龄为220 \pm 3Ma(图6)。第三组数据的表面年龄介于179~200Ma,包括7个数据,也具有正态分布趋势,算术平均值为190 \pm 11Ma,等时线年龄为190 \pm 3Ma(图7)。

3 讨论

3.1 各组年龄的地质意义

岩浆、变质和热液作用均可形成独居石(Vielreicher *et al.*, 2003),而我们研究的独居石来自蚀变花岗斑岩脉,基本排除了变质成因独居石的可能,只需考虑是岩浆或热液成

表 1 阳山金矿独居石 U-Th-Pb 电子探针分析结果及表面年龄(氧化物和误差单位为 $\omega_B/\%$)Table 1 The U, Th and Pb contents and apparent ages of monazite analyzed on electron microprobe, the Yangshan Gold Deposit (oxides in $\omega_B/\%$)

样品编号	Y ₂ O ₃	SD%	ERR	ThO ₂	SD%	ERR	UO ₂	SD%	ERR	PbO	SD%	ERR	Total	Age (Ma)	ERR (Ma)
PD112-12-1.1	0.46527	4.42	0.02056	7.78173	0.99	0.07704	0.05519	9.02	0.00498	0.07689	22.39	0.01722	8.37913	229	51
PD112-12-1.2	0.67704	3.21	0.02173	7.43346	1.03	0.07656	0.08326	6.01	0.00500	0.06239	27.78	0.01733	8.25620	192	53
PD112-12-1.2'	0.72914	2.97	0.02166	7.72564	1.00	0.07726	0.06967	7.12	0.00496	0.07124	19.43	0.01384	8.59574	214	41
PD112-12-1.3	0.72690	2.98	0.02166	7.88695	0.99	0.07808	0.06182	8.12	0.00502	0.07053	23.96	0.01690	8.74625	207	49
PD112-12-1.3'	0.82842	2.71	0.02245	8.31985	0.96	0.07987	0.08484	5.83	0.00495	0.07061	19.63	0.01386	9.30377	195	38
PD112-12-1.4	0.78095	2.83	0.02210	4.67542	1.38	0.06452	0.64080	0.96	0.00615	0.07657	22.64	0.01734	6.17379	269	60
PD112-12-1.4'	0.71358	3.07	0.02191	6.29515	1.14	0.07176	0.06761	7.30	0.00494	0.08189	21.87	0.01791	7.15828	297	65
PD112-12-1.4''	0.86956	2.57	0.02235	5.54230	1.24	0.06872	0.07028	7.03	0.00494	0.06868	26.18	0.01798	6.55087	282	73
PD112-12-1.5'	1.38808	1.79	0.02485	5.84460	1.23	0.07189	0.16570	3.17	0.00525	0.05693	32.36	0.01842	7.45536	211	68
PD112-12-1.6'	0.93973	2.43	0.02284	6.03234	1.18	0.07118	0.16326	3.20	0.00522	0.05784	31.36	0.01814	7.19322	209	65
PD112-12-1.7	0.55204	3.91	0.02158	5.28229	1.27	0.06709	0.11748	4.27	0.00502	0.05598	31.64	0.01771	6.00784	234	74
PD112-12-1.8'	0.64959	3.30	0.02144	7.81782	1.00	0.07818	0.06201	8.00	0.00496	0.08506	20.86	0.01774	8.61453	251	52
PD112-12-1.8''	0.65414	3.27	0.02139	7.53507	1.02	0.07686	0.05765	8.53	0.00492	0.08496	16.33	0.01387	8.33187	261	42
PD112-12-1.9	0.54973	3.89	0.02138	6.70728	1.10	0.07378	0.07261	6.81	0.00494	0.06959	24.95	0.01736	7.39926	237	60
PD112-12-1.10	0.82221	2.67	0.02195	5.81065	1.20	0.06973	0.08172	6.09	0.00498	0.05643	24.29	0.01371	6.77106	220	53
PD112-12-2.1	0.51162	4.17	0.02133	6.40927	1.12	0.07178	0.38746	1.43	0.00554	0.08487	16.55	0.01405	7.39327	262	43
PD112-12-2.2	0.72035	3.17	0.02284	7.37659	1.04	0.07672	0.22388	2.37	0.00531	0.09478	14.49	0.01373	8.41565	277	40
PD112-12-2.4	0.27913	7.19	0.02007	6.08209	1.14	0.06934	0.19498	2.62	0.00511	0.05662	24.31	0.01376	6.61287	200	49
PD112-12-3.1	0.67305	3.28	0.02208	5.92725	1.18	0.06994	0.18945	2.71	0.00513	0.05046	27.03	0.01364	6.84026	183	49
PD112-12-3.1'	0.64414	3.43	0.02209	6.12043	1.15	0.07038	0.17011	3.03	0.00515	0.05196	26.72	0.01388	6.98669	185	49
PD112-12-3.2	0.81824	2.77	0.02267	5.87133	1.18	0.06928	0.07406	6.64	0.00492	0.06819	20.37	0.01389	6.83187	264	54
PD112-12-3.2'	0.79251	2.85	0.02259	5.61091	1.23	0.06901	0.08365	5.90	0.00494	0.06519	21.35	0.01392	6.55231	262	56
PD112-12-3.2''	1.05041	2.23	0.02342	5.66575	1.22	0.06912	0.08206	6.06	0.00497	0.04478	30.93	0.01385	6.84305	179	55
PD112-12-4.1	1.29416	1.90	0.02459	9.43002	0.90	0.08487	0.06451	7.61	0.00491	0.07917	18.27	0.01446	10.86791	195	36
PD112-12-4.2	1.34540	1.83	0.02462	10.43877	0.85	0.08873	0.08170	6.08	0.00497	0.09572	14.73	0.01410	11.96164	212	31
PD112-12-4.3	1.36738	1.78	0.02434	10.61415	0.84	0.08916	0.13653	3.73	0.00509	0.10492	13.72	0.01440	12.22303	225	31
PD112-12-4.4	1.39526	1.74	0.02428	9.56526	0.90	0.08609	0.22723	2.35	0.00534	0.09632	14.85	0.01430	11.28412	222	33
PD112-12-4.5	1.37512	1.72	0.02365	9.92226	0.87	0.08632	0.15576	3.34	0.00520	0.09928	14.11	0.01401	11.55247	226	32

仪器型号: JXA-8100; 分析条件: 加速电压 15KV; 束流 2×10^{-8} 安培; 束斑 $1 \mu\text{m}$; 修正方法 ZAF; 标准样品 U、ThO₂、PbCrO₄、Y₃Al₅O₁₂; SD 为标准偏差; ERR 为误差值

注: 样品编号栏内 PD112-12 为样品号, 倒数第二位为独居石颗粒编号, 最后一位为独居石颗粒内部的打点编号, “'”表示重复测定点。

因。通常, 热液独居石呈脉状产出, 与矿石矿物共生, U 含量低 (McNaughton *et al.*, 1999)、Sm、Gd、Y、Th 含量也低, Th 含量通常小于 1% (洪文兴和朱祥坤, 2000), La 和 Ce 含量高 (Schandl and Gorton, 1991); 岩浆独居石 La 和 Ce 含量低, Sm、Gd、Y、Th 含量高, Th 含量在 3~7% 以上 (洪文兴和朱祥坤, 2000)。本文所测试的独居石具有较高的 Y、U、Th、Pb 含量 (表 1), Th 含量介于 4.67%~10.61%, 平均 7.05%, 显示了岩浆独居石的特征。结合样品岩相学研究和产状, 认为所研究的独居石属岩浆成因。

从图 4 可以看出, 第二组年龄数据最多 (12 个数据), 且具有良好的正态分布特征, 该组数据与最新获得的秦岭梁岩体 (Zhang *et al.*, 2002a) 的锆石 SHRIMP 年龄 ($221 \pm 1.4 \text{Ma}$, 尚未发表) 一致, 也与该区大规模花岗岩岩浆活动的时间 220~205Ma (Sun *et al.*, 2002) 一致, 应为花岗岩之岩浆侵入结晶年龄。

第一组年龄明显较大, 介于 251~297Ma, 而且测点都位于独居石晶体的核心部位 (图 3B、C、D), 它们可能代表了继承独居石的年龄, 表明南秦岭基底中有较多 251~297Ma 期间形成的中酸性岩浆岩, 即研究区曾在二叠纪发生强烈的中酸性岩浆事件。事实上, 独居石在岩浆过程的继承性已被确认 (Mezeme *et al.*, 2006, 及其引文)。

第三组数据的年龄显著低于岩浆侵入结晶年龄。考虑到数据测点均位于独居石晶体的边缘, 花岗斑岩已经蚀变矿化, 数据分布显示右高左低的偏正态的特征, 认为它们代表一次由流体作用造成的逐步减弱的独居石铅丢失事件, 即流体成矿作用。

3.2 晚古生代岩浆弧发育问题

秦岭造山带记录着东古特提斯北支洋盆在泥盆纪-三叠纪期间的演化。勉略缝合带代表着秦岭造山带内最晚闭合

的洋盆,在泥盆纪-三叠纪期间经历了洋盆形成和向北俯冲消亡(Zhang *et al.*, 1996; 张国伟等, 2001, 2004)。勉略带的变质基性火山岩 $^{40}\text{Ar}-^{39}\text{Ar}$ 年龄为 $226.9 \pm 0.9\text{Ma}$ 和 $219.5 \pm 1.4\text{Ma}$ (Li *et al.*, 1999); 勉县安子山地区高压榴辉岩矿物-全岩钐钕等时线年龄为 $192 \pm 34\text{Ma}$ (5个点, 删去2个点后为 $206 \pm 55\text{Ma}$), 其黑云母氩氩坪年龄为 $199.6 \pm 1.7\text{Ma}$, 等时线年龄为 $201.3 \pm 2.5\text{Ma}$ (Zhang *et al.*, 2002b); 三叠系海相地层(特别是复理石)在南秦岭和松潘盆地的广泛发育, 侏罗系地层的总体缺失和零星陆相磨拉石建造发育, 等等。以上表明勉略古洋盆在三叠纪晚期由东向西逐步闭合(Zhu *et al.*, 1998; Chen *et al.*, 2006; Zhang *et al.*, 1996, 2002b)。

勉略缝合带虽已确定, 但其向东、向西如何延续? 勉略洋壳俯冲消减诱发的岩浆弧在哪里? 等等, 仍是争论的问题。而这些问题的回答直接涉及勉略构造带作为缝合带的正确与否, 因此是颇受关注。Li *et al.* (1996) 在陕西略阳县黑沟峡地区发现了与勉略洋消减有关的岛弧火山岩, 并获得其Sm-Nd等时线年龄为 $242 \pm 21\text{Ma}$, Rb-Sr等时线年龄为 $221 \pm 13\text{Ma}$; Lai *et al.* (2000) 确定了巴山弧地区晚古生代岛弧火山岩的存在; Yang *et al.* (1996) 确定了与阿尼玛卿古洋盆(勉略洋的西延)消减有关的岛弧火山岩, 获得全岩Rb-Sr年龄为 $260 \pm 10\text{Ma}$ 。然而, 在略阳与玛曲之间的勉略构造带延伸位置(图1), 尚未确定蛇绿混杂岩带的存在, 也无关于其北侧岛弧火山岩的报道。

本文在阳山金矿区花岗斑岩中发现表面年龄介于 $251 \sim 297\text{Ma}$ 的大量继承性岩浆型独居石, 一定程度上弥补了前述空白。花岗斑岩中继承性独居石的等时线年龄为 $268 \pm 4\text{Ma}$, 反映研究区有大量晚古生代(二叠纪)的中酸性岩浆岩发育; 鉴于阳山矿区位于勉略构造带西延位置的北侧, 认为这次晚古生代中酸性岩浆活动与勉略洋的向北消减有关。如此, 阳山矿区花岗斑岩中的继承性独居石代表了晚古生代南秦岭岛弧岩浆作用。

3.3 碰撞初期的花岗岩浆活动

前面简述了蛇绿混杂带变质年龄和中生代地层发育情况, 已可说明古特提斯洋北支在晚三叠世彻底闭合, 指示秦岭地区晚三叠世逐步实现中朝板块与扬子板块的全面碰撞, 并于侏罗纪达到碰撞造山隆升高潮。陆陆碰撞导致强烈的地壳变形改造、大规模流体作用和花岗岩类岩浆活动(Zhang *et al.*, 2002a; Chen *et al.*, 2006)。杜子图等(1998)和Li *et al.* (2001)的统计均表明, 秦岭地区中生代岩浆岩同位素年龄值集中在 $220 \sim 180\text{Ma}$ 和 $160 \sim 100\text{Ma}$ 两个区间, 并认为前者反映了陆陆碰撞早期(晚三叠世-早侏罗世)的构造-岩浆事件, 后者为代表碰撞造山晚期伸展背景或陆内造山阶段的岩浆事件(Li *et al.*, 2001)。Zhang *et al.* (2002a)和Sun *et al.* (2002)也均认为秦岭地区大规模碰撞型花岗岩发育始于 220Ma 左右。

阳山矿区花岗斑岩之独居石的12件电子探针U-Th-Pb年龄平均值为 $221 \pm 16\text{Ma}$, 等时线年龄为 $220 \pm 3\text{Ma}$, 显然与

秦岭地区碰撞型花岗岩开始发育的时间一致, 似应反映碰撞初期的花岗岩浆活动。因此, 我们认为, 西南秦岭地区陆陆碰撞体制的花岗岩浆活动非常强烈, 只因剥蚀深度偏浅, 缺乏大面积花岗岩类的出露。

3.4 阳山金矿成矿时间和碰撞体制的大规模流体成矿作用

前面已经谈到, 独居石晶体边缘给出了7件 $179 \sim 200\text{Ma}$ 的表面年龄, 等时线年龄为 $190 \pm 3\text{Ma}$, 它们记录了造成独居石铅丢失的流体成矿作用, 与前人用其它方法获得的阳山金矿的成矿年龄基本一致。例如, 含金石英-黄铁矿细脉中的石英 $^{40}\text{Ar}-^{39}\text{Ar}$ 坪年龄为 $195.31 \pm 0.86\text{Ma}$, 等时线年龄为 $190.71 \pm 2.37\text{Ma}$ (相关系数 $\gamma = 0.99972$)(齐金忠等, 2003); 5件蚀变花岗斑岩的绢云母K-Ar年龄变化于 171Ma 和 209Ma 之间, 平均 189Ma ; 石英细脉的锆石SHRIMP U-Pb年龄介于 $187.8 \sim 200.9\text{Ma}$, 平均 $197.6 \pm 1.7\text{Ma}$ (齐金忠等, 2005)。由上可见, $200\text{--}179\text{Ma}$ 的独居石U-Th-Pb表面年龄(平均 $190 \pm 11\text{Ma}$)和 $190 \pm 3\text{Ma}$ 的等时线年龄应属可靠的流体成矿年龄。

Guild(1972)认为, 陆陆碰撞过程难以发生花岗岩浆、中高级变质和成矿作用。尽管碰撞体制中高级变质作用和大规模花岗岩浆作用已经被普遍认可(例: Li *et al.*, 2001; Sun *et al.*, 2002), 陈衍景等(2003, 2004)和Chen *et al.* (2005, 2006; 及其引文)已从多个角度证明了碰撞体制大规模流体成矿作用的客观存在, 但因Guild观点的深远影响和人们的因袭习惯, 陆陆碰撞体制可否发生大规模流体成矿作用的问题仍有争议。前述阳山金矿成矿年龄显示其是典型的碰撞体制流体成矿作用的产物, 因为: (1) 流体成矿作用尾随同碰撞花岗斑岩侵入事件发生, 在空间上与花岗斑岩脉相邻或重合; (2) 秦岭地区在三叠纪-早白垩世期间发生强烈的地壳缩短等地质作用(Zhu *et al.*, 1998), 秦岭应是晚三叠世-早白垩世的印支-燕山期造山带(Yuan, 1996), 成矿作用自然同步于陆陆碰撞造山作用。

事实上, 西秦岭的卡林-类卡林型金矿床均形成于 $220 \sim 100\text{Ma}$ 范围, 以 $180 \sim 170\text{Ma}$ 为成矿峰期(陈衍景等, 2004; 及其引文)。不但是金, 而且铜、汞、铅、锌等也发生了同步矿化。例如, 碧口地体的铜厂脉状铜矿床之石英脉 $^{40}\text{Ar}-^{39}\text{Ar}$ 坪年龄为 $211.3 \pm 1.1\text{Ma}$, 其等时线年龄为 $206.1 \pm 6.1\text{Ma}$ (丁振举等, 1999); 以厂坝超大型铅锌矿为代表的陕甘SEDEX型铅锌矿田在侏罗纪遭受了强烈的热液改造成矿作用(详见王平安等, 1998)。显然, 这些矿床的形成或热液改造时间均为三叠纪-侏罗纪之交, 是大规模同碰撞流体作用的结果。

总之, 阳山超大型金矿形成于同碰撞岩浆-流体作用, 秦岭地区发生了陆陆碰撞体制的大规模流体成矿事件。

4 结论

(1) 阳山金矿黄铁矿中的独居石具有继承性, 继承独居石的等时线年龄为 $268 \pm 4\text{Ma}$ 左右, 代表着二叠纪花岗岩类

的发育,可能记录了晚古生代勉略古洋壳向南秦岭微板块俯冲所派生的岛弧岩浆活动。

(2) 阳山矿区的花岗斑岩形成于 220Ma 左右,与西秦岭地区大规模碰撞型花岗岩类开始发育的时间一致。

(3) 蚀变花岗斑岩中独居石边缘的年龄介于 200 ~ 179Ma, 代表着由流体作用造成的逐步减弱的独居石铅丢失事件,即阳山金矿的流体成矿作用。

(4) 西秦岭地区在陆陆碰撞期间发生了大规模(花岗岩浆-)流体成矿事件,造就了西秦岭卡林型金矿省的形成。

致谢 舒桂明老师指导了电子探针测试,李秋根博士帮助计算实验结果,武警黄金部队第十二支队官兵帮助开展野外调研,刘树文教授提出了宝贵的指导意见,特致谢意!

References

- Arehart GB, Chakurian AM, Tretbar DR *et al.* 2003. Evaluation of radioisotope dating of Carlin-type deposits in the Great Basin, western North America, and implications for deposit genesis. *Economic Geology*, 98: 235 - 248
- Carlos EJ, Gilley LD, Harrison TM. 2002. Interpretation of monazite ages obtained via in situ analysis. *Chem. Geol.* 188: 193 - 215
- Chakurian AM, Arehart GB, Donelick RA *et al.* 2003. Timing constraints of gold mineralization along the Carlin trend utilizing apatite fission-track, $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$, and apatite (U/Th) He dating. *Economic Geology*, 98: 1159 - 1171
- Chen YJ, Sui YH, Pirajno F. 2003. Exclusive evidences for CMF model and a case of orogenic silver deposits: Isotope geochemistry of the Tieluping silver deposit, east Qinling orogen. *Acta Petrologica Sinica*, 19: 551 - 568 (in Chinese with English abstract)
- Chen YJ, Zhang J, Zhang FX *et al.* 2004. Carlin and Carlin-Like gold deposits in Western Qinling Mountains and their metallogenic time, tectonic setting and model. *Geological Review*, 50: 134 - 152 (in Chinese with English abstract)
- Chen YJ, Chen HY, Zaw K *et al.* 2006. Geodynamic settings and tectonic model of skarn gold deposits in China: an overview. *Ore Geology Review*, doi:10.1016/j.oregeorev.2005.01.001
- Chen YJ, Pirajno F, Qi JP. 2005. Origin of gold metallogeny and sources of ore-forming fluids in the Jiaodong province, eastern China. *International Geology Review*, 47: 530 - 554
- Cherniak DJ, Watson EB, Grove M *et al.* 2004. Pb diffusion in monazite: A combined RBS/SIMS study. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 68: 829 - 840
- Cocherie A, Be Mezeme E, Legendre O *et al.* 2005. Electron-microprobe dating as a tool for determining the closure of Th-U-Pb systems in migmatitic monazites. *American Mineralogist*, 90: 607 - 618
- Dahl PS, Hamilton MA, Jercinovic MJ *et al.* 2005. Comparative isotopic and chemical geochronometry of monazite, with implications for U-Th-Pb dating by electron microprobe: An example from metamorphic rocks of the eastern Wyoming Craton (U. S. A.). *American Mineralogist*, 90: 619 - 638
- Ding ZJ, Liu CQ, Yao SZ *et al.* 1999. The metallogenic time of copper deposit in Bikou Terrane. *Geotectonica et Metallogenia*, 23: 368 - 372
- Du ZT, Wu GC. 1998. *Tectonic Dynamics and Tectono-Metallogenic Dynamics of Gold Deposits in West Qinling*. Beijing: Geological Publishing House, 145p. (in Chinese)
- Fernandez A, Schreurs G, Villa IM *et al.* 2003. Age constraints on the tectonic evolution of the Itremo region in Central Madagascar. *Precambrian Research*, 123: 87 - 110
- Foster G, Gibson HD, Parrish R *et al.* 2002. Textural, chemical and isotopic insights into the nature and behaviour of metamorphic monazite. *Chemical Geology*, 191: 183 - 207
- Geisler T, Schleicher H. 2000. Improved U Th total Pb dating of zircons by electron microprobe using a simple new background modeling procedure and Ca as a chemical criterion of fluid-induced U Th Pb discordance in zircon. *Chemical Geology*, 163: 269 - 285
- Goncalves P, Williams ML, Jercinovic MJ. 2005. Electron-microprobe age mapping of monazite. *American Mineralogist*, 90: 578 - 585
- Guild PW. 1972. Metallogeny and the new global tectonics. 24th Intern. Geol. Congr. Proc., 4: 17 - 24
- Guo JH, Qi JZ, Sun B *et al.* 2002. Geological features and origin of Yangshan super large gold deposit, Gansu. *Gold Geology*, 8: 15 - 19
- Hofstra AH, Snee LW, Rye RO *et al.* 1999. Age constraints on Jerritt Canyon and other Carlin-type gold deposits in the western United States. B. Relationship to mid-Tertiary extension and magmatism. *Economic Geology*, 94: 769 - 802
- Hofstra AH, Cline JS. 2000. Characteristics and models for Carlin-type gold deposits. *Reviews in Economic Geology*, 13: 163 - 220
- Hong WX, Zhu XK. 2000. A microanalysis study on monazite composition distribution. *Geological Journal of China Universities*, 6: 167 - 172 (in Chinese with English abstract)
- Jiang SY, Slack JF, Palmer MR. 2000. Sm-Nd dating of the giant Sullivan Pb-Zn-Ag deposit, British Columbia. *Geology*, 28: 751 - 754
- Lai SC, Zhang GW, Yang RY. 2000. Identification of the island-arc magmatic zone in the Lianghe-Raofeng-Wuliba area, south Qinling and its tectonic significance. *Science in China Series D*, 43 (Suppl.): 69 - 81
- Li C, Chen YJ, He SD. 2001. East Qinling-Dabieshan lithosphere delaminating age, mechanism and direction: petrological evidences and stipulation. *Chinese Journal of Geochemistry*, 20: 59 - 72
- Li JY, Wang ZQ, Zhao M. 1999. $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$ Ar thermochronological constrains on the timing of collisional orogeny in the Mian-Lue collision belt, southern Qinling Mountains. *Acta Geologica Sinica*, 73: 208 - 215
- Li SC, Sun WD, Zhang GW *et al.* 1996. Chronology and geochemistry of metavolcanic rocks from Heigouxia Valley in the Mian-Lue tectonic zone, south Qinling-evidence for a Paleozoic oceanic basin and its close time. *Science in China(Ser. D)*, 39: 300 - 310
- Liu SW, Shu GM, Pan YM *et al.* 2004. Electron microprobe dating and metamorphic age of Wutai Group, Wutai Mountains. *Geological Journal of China Universities*, 10: 356 - 363 (in Chinese with English abstract)
- Liu SW, Zhao GC, Wilde SA *et al.* 2006. Th-U-Pb monazite geochronology of the Lüliang and Wutai Complexes: constraints on the tectonothermal evolution of the Trans-North China Orogen. *Precambrian Research*, 148: 205 - 224
- Liu W, Fan YX, Qi JZ *et al.* 2003. Fluid inclusion geochemistry characteristics of the Yangshan Gold Deposit in Wen County, Gansu Province, China. *Geoscience*, 17: 444 - 452
- Luo XM, Qi JZ, Yuan SS *et al.* 2004. Geological and microelement geochemical study of Yangshan Gold Deposit, Gansu Province. *Geoscience*, 18: 203 - 209
- McNaughton NJ, Rasmussen B, Fletcher IR. 1999. SHRIMP uranium-lead dating of diagenetic xenotime in siliciclastic rocks: *Science*, 285: 78 - 80
- Mezeme E Be, Cocherie A, Faure M *et al.* 2006. Electron microprobe monazite geochronology of magmatic events; Examples from Variscan migmatites and granitoids, Massif Central, France. *Lithos*, 87: 276 - 288
- Montel JM, Foret S, Veschambre M. 1996. Electron microprobe dating of monazite. *Chemical Geology*, 131: 37 - 53
- Parrish RR. 1990. U-Pb dating of monazite and its application to geological problem. *Canadian Journal of Earth Sciences*, 27: 1431 - 1450
- Poitrasson F, Chenery S, Shepherd TJ. 2000. Electron microprobe and LA-ICP-MS study of monazite hydrothermal alteration: implications

- for U-Th-Pb geochronology and nuclear ceramics. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 64: 3283–3297
- Qi JZ, Yuan SS, Li L *et al.* 2003. Geological features and ore controlling factors of Yangshan superlarge gold deposit. *Geological Review*, 49: 85–92 (in Chinese with English abstract)
- Qi JZ, Li L, Yuan SS *et al.* 2005. A SHRIMP U-Pb chronological study of zircons from quartz veins of Yangshan gold deposit, Gansu Province. *Mineral Deposits*, 24: 141–150
- Rasmussen B, Stephen S, Fletcher IR. 2006. Testing ore deposit models using in situ U-Pb geochronology of hydrothermal monazite: Paleoproterozoic gold mineralization in northern Australia. *Geology*, 34(2): 77–80
- Santosh M, Collins AS, Morimoto T *et al.* 2005. Depositional constraints and age of metamorphism in southern India; U-Pb chemical (EMPA) and isotopic (SIMS) ages from the Trivandrum Block. *Geological Magazine*, 142: 255–268
- Schandl ES, Gorton MP. 1991. Postore mobilization of rare earth elements at Kidd Creek and other Archean massive sulfide deposits. *Economic Geology*, 86: 1546–1553
- Sun WD, Li SG, Chen YD *et al.* 2002. Timing of synorogenic granitoids in the South Qinling, Central China: Constraints on the evolution of the Qinling-Dabie orogenic belt. *Journal of Geology*, 110: 457–468
- Suzuki K, Adachi M. 1991. The chemical Th-U-Total Pb isochron ages of zircon and monazite from the gray granite of the Hida Terrane, Japan. *Journal of Earth Sciences of Nagoya University*, 38: 11–37
- Suzuki K, Adachi M. 1998. Denudation history of the high T/P Ryoike metamorphic belt, southwest Japan: constraints from CHIME monazite ages of gneisses and granitoids. *J. Metamorphic Geol.*, 16: 23–37
- Tretbar DR, Arehart GB, Christensen JN. 2000. Dating gold deposition in a Carlin-type gold deposit using Rb/Sr methods on the mineral galena. *Geology*, 28: 947–950
- Vielreicher NM, Groves DI, Fletcher IR *et al.* 2003. Hydrothermal monazite and xenotime geochronology: A new direction for precise dating of orogenic gold mineralization. *Society of Economic Geologists Newsletter*, 53(1): 10–16
- Wang J, Tatsumoto M, Li X *et al.* 1994. A precise ^{232}Th - ^{208}Pb chronology of fine-grained monazite: age of the Bayan Obo REE-Fe-Nb ore deposit, China. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 58: 3155–3169
- Wang PA, Chen YC, Pei RF. 1998. Regional Metallogenic Series and Tectono-Metallogenic Cycles and Evolution of the Qinling Orogen. Geological Publishing House, Beijing, 161p. (in Chinese with English abstract)
- Williams M, Jercinovic M, Terry M. 1999. Age mapping and dating of monazite on the electron microprobe: Deconvoluting multistage tectonic histories. *Geology*, 27: 1023–1026
- Wing BA, Ferry JM, Harrison TM. 2003. Prograde destruction and formation of monazite and allanite during contact and regional metamorphism of pelites: petrology and geochronology. *Contribution to Mineralogy and Petrology*, 145: 228–250
- Yang J, Robinson PT, Jiang D. 1996. Ophiolites of Kunlun Mountains, China and their tectonic implications. *Tectonophysics*, 258: 215–231
- Yuan SS, Zhang CJ, Qi JZ *et al.* 2004. Structural-control model of the Yangshan gold deposit, Gansu. *Gold Geology*, 10(4): 23–27
- Yuan XC. 1996. Velocity structure of the Qinling lithosphere and mushroom cloud model. *Science in China (Ser. D)*, 39: 235–243
- Zhang GW, Meng QR, Yu ZP *et al.* 1996. Orogenesis and Dynamics of the Qinling Orogen. *Science in China (Ser. D)*, 39: 225–234
- Zhang GW, Zhang BR, Yuan XC *et al.* 2001. Qinling Orogenic Belt and Continental Dynamics. Beijing: Science Press. 1–855 (in Chinese)
- Zhang GW, Cheng SY, Guo AL *et al.* 2004. Mianlue paleo-suture on the southern margin of the central orogenic system in Qinling-Dabie with a discussion of assembly of the main part of the continent of China. *Geological Bulletin of China*. 23(9–10): 846–853 (in Chinese with English Abstract)
- Zhang J, Chen YJ, Zhang FX *et al.* 2006. Ore fluid geochemistry of the Jinlongshan Carlin-type gold deposit ore belt in Shaanxi Province, China. *Chinese Journal of Geochemistry*, 25: 23–32
- Zhang J, Chen YJ, Shu GM *et al.* 2002a. Compositional study of minerals within the Qinlingiang granite, southwestern Shaanxi Province and discussions on the related problems. *Science in China (Ser. D)*, 45: 662–672
- Zhang ZQ, Zhang GW, Tang SH *et al.* 2002b. Age of Anzishan granulites in the Mianxian-Lueyang suture zone of Qinling orogen: With a discussion of the timing of final assembly of Yangtze and North China blocks. *Chinese Science Bulletin*, 47: 1925–1930
- Zhu XK, O'Nions. 1999. Zonation of monazite in metamorphic rocks and its implications for high temperature thermochronology: a case study from the Lewisian terrain. *Earth and Planetary Science Letters*, 171: 209–220
- Zhu RX, Yang ZY, Wu HN *et al.* 1998. Palaeomagnetic constraints on the tectonic history of the major blocks of China during the Phanerozoic. *Science in China (Ser. D)*, 41(Suppl.): 1–19

附中文参考文献

- 陈衍景, 隋颖慧, F Pirajno. 2003. CMF 模式的排他性证据和造山型银矿的实例: 铁炉坪银矿同位素地球化学. *岩石学报*, 19: 551–568
- 陈衍景, 张静, 张复新, F Pirajno, 李超. 2004. 西秦岭地区卡林-类卡林型金矿床及其成矿时间、构造背景和模式. *地质论评*, 50: 134–152
- 丁振举, 刘从强, 姚书振, 周宗桂. 1999. 碧口群铜矿床的成矿时限及其意义. *大地构造与成矿学*, 23: 368–372
- 杜子图, 吴淦国. 1998. 西秦岭地区构造体系及金成矿构造动力学. 地质出版社, 145
- 郭俊华, 齐金忠, 孙彬, 余金元, 袁士松. 2002. 甘肃阳山特大型金矿床地质特征及成因. *黄金地质*, 8(2): 15–19
- 洪文兴, 朱祥坤. 2000. 独居石微粒微区成分分布的研究. *高校地质学报*, 6: 167–172
- 刘树文, 舒桂明, 潘元明, 党青宁. 2004. 电子探针独居石定年法及五台群的变质时代. *高校地质学报*, 10: 356–363
- 刘伟, 范永香, 齐金忠, 余金元. 2003. 甘肃文县阳山金矿床流体包裹体的地球化学特征. *现代地质*, 17: 444–452
- 罗锡明, 齐金忠, 袁士松, 李志宏. 2004. 甘肃阳山金矿床微量元素及稳定同位素的地球化学研究. *现代地质*, 18: 203–209
- 齐金忠, 袁士松, 李莉, 孙彬, 郭俊华, 李志宏, 范永香, 刘伟, 高秋斌. 2003. 甘肃省文县阳山金矿床地质特征及控矿因素研究. *地质论评*, 49: 85–92
- 齐金忠, 李莉, 袁士松, 刘志杰, 刘敦一, 王彦斌, 李志宏. 2005. 甘肃阳山金矿床石英英脉中锆石 SHRIMP U-Pb 年代学研究. *矿床地质*, 24: 141–150
- 张国伟, 张本仁, 袁学诚, 肖庆辉. 2001. 秦岭造山带与大陆动力学. 北京: 科学出版社, 1–855
- 张国伟, 程顺有, 郭安林, 董云鹏, 赖少聪, 姚安平. 2004. 秦岭-大别中央造山系南缘勉略古缝合带的再认识—兼论中国大陆主体的拼合. *地质通报*, 23(9–10): 846–853
- 王平安, 陈毓川, 裴荣富. 1998. 秦岭造山带区域矿床成矿系列、构造-成矿旋回与演化. 北京: 地质出版社, 161
- 袁士松, 张继武, 齐金忠, 刘志杰, 金宝义. 2004. 甘肃阳山金矿构造控矿模式. *黄金地质*, 10(4): 23–27