

文章编号: 0379 - 1726(2004)01 - 0094 - 05

# 川西北马脑壳金矿床流体包裹体 Rb-Sr 同位素组成: 对矿床成因的制约

付绍洪<sup>1,2</sup>, 顾雪祥<sup>2</sup>, 王 莘<sup>3</sup>

(1. 成都理工大学 地球科学学院, 四川 成都 610059; 2. 中国科学院 地球化学研究所 矿床地球化学开放实验室, 贵州 贵阳 550002; 3. 中国地质大学 资源学院, 湖北 武汉 430074)

**摘 要:** 位于四川西北部的马脑壳金矿床为陕甘川金三角区内一重要矿床, 许多学者对其进行过大量的研究, 对其地质地球化学特征有了较为全面的认识, 同时对矿床的成因也做了多方面的探讨。为了确定矿床的成矿时代, 从层状矿体中采集了富含流体包裹体的石英矿物。通过测定包裹体的 Rb-Sr 同位素组成, 应用 ISOPLOT 程序计算获得  $(210 \pm 35)$  Ma 的成矿年龄, 该年龄与容矿地层的形成时代相近。流体包裹体的锶同位素初始比值与三叠纪时期海水的锶同位素比值相一致。综合矿体产出特征、矿石组构及区域构造演化历史, 认为作为矿床主体的层状矿体是共生沉积的产物, 脉状网状矿体则是由后期造山运动体制下所产生的成矿热流体沿裂隙构造交代充填所形成。

**关键词:** 金矿床; 包裹体; Rb-Sr 同位素; 矿床成因论; 马脑壳; 四川省

**中图分类号:** P597; P611

**文献标识码:** A

## 0 引 言

马脑壳金矿床以其规模大、埋藏浅、氧化程度高、矿物组合具有代表性、易于开发利用而成为陕甘川金三角区内一典型微细浸染型金矿床, 许多研究课题均将其作为重点矿床加以剖析, 对矿床的地质地球化学特征、形成条件和成矿规律进行研究。

关于矿床的成因, 前人从不同的角度进行过研究和论述。郑明华等<sup>[1]</sup>用层控矿床原理认识矿床的成因, 认为矿床的形成经历了沉积预富集期和热液改造期两个成矿期。即在沉积预富集期形成了一套富含金的碎屑岩和碳酸盐岩, 作为后期热液成矿的矿源层。热液成矿期则表现为在地下热卤水的作用下, 将矿源层中的 Au、Fe、As 和 S 等成矿物质萃取出, 当热液循环至构造岩性有利部位, 含矿热液系统的物理化学条件发生突变时, 矿质从溶液中沉淀出来, 形成具有工业价值的金矿体。近年来, 王可勇等<sup>[2,3]</sup>基于赋矿层位变形和成矿流体性状的研究, 将构造变形、流体演化和成矿作用作为一个整体加以认识, 进而总结出矿床形成的构造 - 流体 - 金成矿

模式。该观点是以构造变形为主线加以构建的, 并将流体物理化学条件的变化和金的成矿富集作用置于构造演化背景之中。其要点是将容矿地层的变形划分为早期韧性构造变形、中期韧 - 脆性构造变形和晚期脆性构造变形, 各期变形的时限分别对应于印支运动早期、中期和晚期。据此认为构造变形机制转变引起的流体混合和相分离作用导致金的沉淀富集。但是, 作为赋矿层位的扎尕山组, 沉积时代为中三叠世, 应不早于印支运动早期。通常, 韧性变形发生在地下 10 ~ 15 km 深的部位, 形成于中三叠世的容矿地层在印支运动早期就难以发生韧性变形。因此, 该模式中所提出的构造演化时空格架与区域地质背景有不甚协调之处。季宏兵等<sup>[4]</sup>通过测定热液成矿期所形成的石英中流体包裹体的 Rb、Sr 同位素组成, 获得 46 Ma 的等时线年龄, 并认为该年龄与特提斯洋的关闭及印度板块和欧亚板块的碰撞时间相一致。

近年来, 通过测定流体包裹体的 Rb、Sr 同位素比值来确定金矿床的形成年代的工作已取得了良好效果<sup>[5,6]</sup>。马脑壳矿床的层状矿体中富含大量脉石矿物石英, 本文拟采集其中具有代表性的石英样品

收稿日期: 2002 - 12 - 19; 接受日期: 2003 - 05 - 23

基金项目: 国家自然科学基金(49872038); 中国科学院“百人计划”资助项目; 国土资源部资源环境攻关项目(95-02-002)

作者简介: 付绍洪(1963 -), 男, 博士研究生, 矿床地球化学专业。E-mail: sh-fu@263.net

进行流体包裹体的 Rb-Sr 同位素组成测定, 以确定矿床形成的时代和示踪成矿流体。并结合矿床地质特征、矿石组构和区域构造演化史, 探讨矿床成因。

## 1 矿床地质特征

马脑壳金矿床位于扬子地台西缘秦岭地槽褶皱系和巴颜喀拉褶皱系的结合部位, 阿坝地块的东部<sup>[1]</sup>。矿区出露地层有石炭系、二叠系灰岩及三叠系碎屑岩、碳酸盐岩。矿体即赋存于中三叠统扎尕山组富含钙质的细碎屑岩和碳酸盐岩之中(图 1)。

通过普查工作, 已发现大小矿体 100 余个, 探明矿床的金储量大于 30 t, 主要矿体长数百米至上千米, 斜深通常大于 200 m, 平均厚 2~7 m, 平均品位多在 3~7 g/t 之间。其中马脑壳矿段最大矿体金储量大于 6 t, 两河口矿段最大矿体储量约 4.5 t<sup>[1,2]</sup>。

矿床的主要矿体呈层状、似层状, 部分为脉状、网脉状和透镜状。层状似层状矿体与围岩产状相一致, 走向 NWW—SEE, 倾向 NNE, 倾角在 25°~40°之间, 随着矿体埋深的增加, 倾角有逐渐变陡的趋势。

矿床的主要有用元素为金。另外, 在矿床中还发现有大量与金矿共生的白钨矿, 呈层状产出。据郑明华等<sup>[7]</sup>的研究, 马脑壳矿床的钨矿储量已达中

型规模。

主要原生载金矿物有黄铁矿、毒砂、辉锑矿和雄黄, 次生载金矿物则以褐铁矿为主。载金矿物主要以浸染状分布, 少量呈团块状。原生矿物中金以超显微形式存在, 次生矿物中金则为游离状态的次微米至微米级自然金。因此可将矿床归为微细浸染型金矿床。围岩蚀变主要有方解石化、铁白云石化、硅化和绿泥石化等。其中, 方解石和铁白云石在矿区内分布广, 与金矿化在空间上无明显的对应关系。而石英多发育于矿化作用强烈的部位, 可认为石英与载金矿物具有相近的形成时间和形成条件。

对石英包裹体所做的均一温度测定获得的成矿温度为 120~255 °C, 峰值为 170~200 °C<sup>[8]</sup>, 矿床属中低温矿床。

## 2 采样及加工测试

矿体的产出形式有两种, 即层状矿体和脉状矿体。两类矿体中均伴生有大量的石英矿物。本次测试的石英样品均采自层状矿体之中。由于地表及浅部次生蚀变严重, 因此主要利用钻探岩芯和探矿坑道采集样品, 以保证石英矿物新鲜, 未受后期蚀变作用的影响。为了使样品具有代表性, 样品采集于

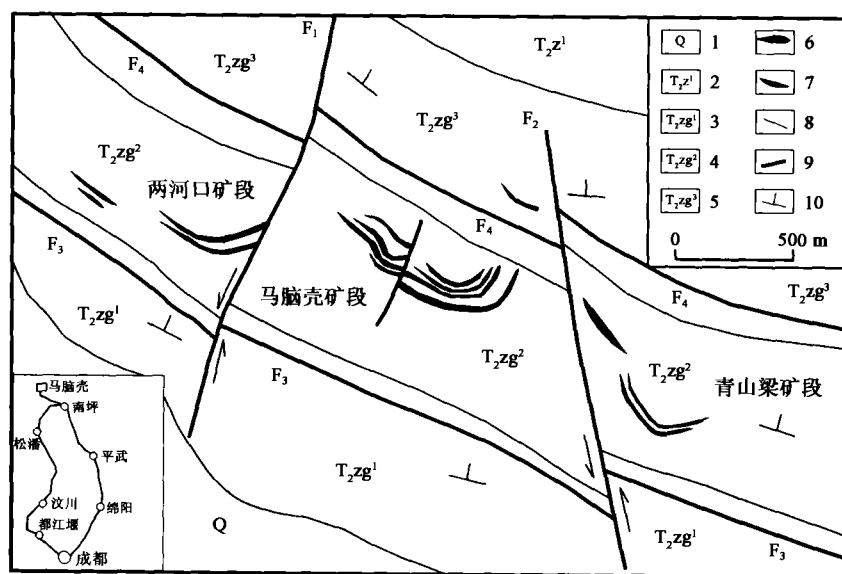


图 1 马脑壳金矿床地质简图

Fig. 1 Geological sketch map of the Manaoko gold deposit

1. 第四系; 2. 中三叠统杂谷脑组一段; 3. 中三叠统扎尕山组一段; 4. 中三叠统扎尕山组二段; 5. 中三叠统扎尕山组三段; 6. 富矿体; 7. 贫矿体; 8. 地层界限; 9. 断裂; 10. 地层产状。

1) 刘启伟等, 四川省南坪县马脑壳矿区金矿普查地质报告, 1994。

2) 熊剑铭等, 四川省南坪县两河口矿区金矿普查地质报告, 1998。

多个矿体内。

总计采集 20 余件样品,先磨制包裹体片进行岩相学研究,鉴定包裹体的类型和特征。镜下观察表明,包裹体以群状分布为主,显示为原生包裹体。包裹体组分为气液二相,并以富液相为主,充填度 0.80~0.95;仅有少量富气相包裹体,充填度 0.20~0.30。在镜下鉴定的基础上,挑选出 5 件包裹体分布密集并具有代表性的样品进行加工处理。

将石英捣碎至 40~80 目,在双目镜下挑纯(纯度大于 99%),置入 1:1 HCl 溶液中煮沸约 60 min,除去铁质及碳酸盐矿物组分。再用去离子水冲洗数次后加入 1:1 HNO<sub>3</sub> 煮沸约 60 min,除去所污染的硫化物,最后用去离子水冲洗数次至中性。由于均为原生包裹体,不再进行去次生包裹体的处理。

称取 0.5 g 处理好的石英样品,放入聚四氟乙烯封闭容器中,加入适量的 <sup>87</sup>Rb 与 <sup>84</sup>Sr 混合稀释剂。用 HF + HClO<sub>4</sub> 在微波炉中分解样品并使其完全转化成过氯酸盐,用阳离子交换法分离 Rb 和 Sr。同位素分析由中国地质调查局宜昌地质矿产研究所完成,使用 MAT 261 可调多接受质谱仪。标样 NBS 987 的测定精度 <sup>87</sup>Sr/<sup>86</sup>Sr 为 0.710 254 ± 0.000 060(2σ),<sup>87</sup>Rb/<sup>86</sup>Sr 误差在 1%~2% 之间。整个流程均在净化实验室中进行,化学流程的本底污染 Rb 和 Sr 为 2 × 10<sup>-10</sup>g,对所测结果均作本底校正。

### 3 结果与讨论

所测样品(石英中的流体包裹体)的 Rb、Sr 含量及 <sup>87</sup>Rb/<sup>86</sup>Sr 和 <sup>87</sup>Sr/<sup>86</sup>Sr 比值见表 1。表中数据反映出各样品的 <sup>87</sup>Rb/<sup>86</sup>Sr 和 <sup>87</sup>Sr/<sup>86</sup>Sr 比值差异大,其变化范围分别在 0.466~1.765 和 0.710 10~0.713 87 之间,且两个参数间具有良好的正相关性,相关系数为 0.996。将数据投于图上,显示出各组数据间具有明显的跨度,等时线拟合度高。用 ISOPLOT 程序计算获得的等时线年龄为 (210 ± 35) Ma(信度 95%),

表 1 石英流体包裹体 Rb-Sr 同位素分析结果

Table 1 Compositions of Rb-Sr isotopes of fluid inclusions in quartz

样品	Rb (μg/g)	Sr (μg/g)	<sup>87</sup> Rb/ <sup>86</sup> Sr	<sup>87</sup> Sr/ <sup>86</sup> Sr (±1σ)
MPD-5	1.459	2.951	1.426	0.712 76 ± 0.000 07
MMC-1	2.702	16.700	0.466	0.710 10 ± 0.000 05
MMC-3	2.184	7.436	0.847	0.711 02 ± 0.000 06
MID14-4	0.731	2.823	0.747	0.710 56 ± 0.000 01
MID8-3	1.585	2.590	1.765	0.713 87 ± 0.000 04

注:由中国地质调查局宜昌地质矿产研究所同位素地质研究与测试中心分析。

流体包裹体的 <sup>87</sup>Sr/<sup>86</sup>Sr 初始比值为 0.708 52 ± 0.000 18(图 2)。

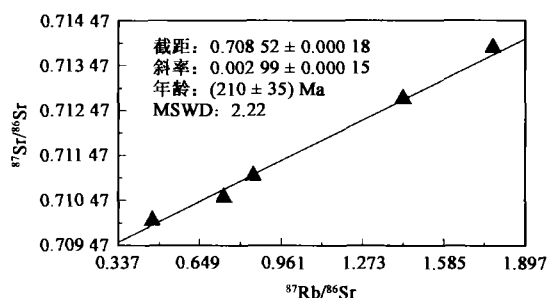


图 2 马脑壳金矿床石英流体包裹体 Rb-Sr 等时线图  
Fig. 2 Rb-Sr isochron of fluid inclusions in quartz from the Manaoko gold deposit

该等时线年龄与容矿地层的沉积时代中三叠世相近,表明矿石与容矿地层同时形成。成矿流体包裹体锶同位素(<sup>87</sup>Sr/<sup>86</sup>Sr)初始比值与同期海水一致<sup>[9]</sup>,流体为富含氯化钠的水盐体系<sup>[8]</sup>,表明矿床形成于三叠纪时期的海水环境。

矿床的主矿体产状均与地层的总体产状一致,矿体在走向和倾向上均表现出比较稳定的延伸。特别是在一些部位见有由不同的矿石组分所构成的韵律,尤以富雄黄的矿石层和富辉锑矿的矿石层所构成的韵律最为特征,在约 1 m 厚的层位交替产出有十余层成分不同的矿石纹层,纹层的产状与近围岩的产状相一致,认为这种韵律构造是沉积作用所形成的。

矿体总体上呈层状产出,但局部受后期构造作用的影响而发生变形,矿区内常能见到矿层与容矿地层发生一致的揉皱或挠曲作用,即两者具有同构造变形特征。

顾雪祥等<sup>[10,11]</sup>对马脑壳金矿床辉锑矿残余组构进行了研究,发现由辉锑矿和自生石英交替互层所显示的方向与辉锑矿的粒内变形作用以及晶体粒度变化所显示的方向一致,代表了残存的原始沉积层理方向。虽然后期构造变形使原始组构复杂化,但仍清楚地显示出原始沉积层理的方向。

因此,从不同的尺度上,即从矿床的宏观产出特征到矿石的显微组构均反映出矿床具有同生沉积的属性。

从矿床形成的区域构造背景及演化分析,矿区所处的构造位置属巴颜喀拉-松潘褶皱系,位于扬子地块和特提斯构

造域的结合部位。两大构造系的发展演化及相互作用对该区的沉积发展和构造变迁及其成矿作用起着直接控制作用。早三叠世时期特提斯海槽向东扩展致使扬子地块西缘发生裂解,南坪海槽即于早-中三叠世开始发育,并持续发展至晚三叠世,海槽于诺利期最终关闭<sup>[12,13]</sup>。在海槽发育阶段,一方面接受陆源碎屑沉积,形成碳酸盐岩和细碎屑岩。另一方面,由于区域构造应力处于拉张状态,海槽(沉积盆地)内易发育可作为热液通道的同生断裂,将成矿物质带入沉积盆地,从而在碳酸盐岩和细碎屑岩中形成层状矿体。

结合层状矿体的形成时代、流体包裹体的锶同位素初始比值、矿床地质特征和区域构造演化,可初步总结出矿床成因:早三叠世,南坪海槽开始发育,接受了大量来自北西部摩天岭台隆的陆源碎屑沉积。进入中三叠世,拉张构造体制下迅速沉积沉降的早期沉积物随着埋深的增大和温度增高,致使封存于岩层中的海水活动性增强,进而从岩石孔隙及矿物晶体中释放出,同时将地层中的成矿物质一同带出。在盆地构造动力和热动力驱动下,携带有成矿物质的流体沿着同生断裂进入海底,与海水混合导致含矿流体的物理化学条件发生突变,进而沉淀出矿质,形成了与容矿地层产状相一致的层状矿体。其后,在区域构造运动及热流体作用下,部分成矿物质发生活化迁移,并沿裂隙构造充填或交代形成脉状和网脉状矿体。Emsbo *et al.*<sup>[14]</sup>近年来在美国内华达州发现有同生沉积作用形成的“卡林型”金矿床,反映出卡林型(微细浸染型)金矿床可能具有多种成矿机制。

## 4 结 论

(1) 矿床主体的形成时间与容矿地层的沉积时代相近,流体包裹体的锶同位素初始比值与三叠纪时期海水的一致。结合矿床地质特征和三叠纪盆地发育史,认为层状矿体是同生沉积作用的产物,可能与海底喷流沉积成矿作用有关。

(2) 脉状网脉状矿体是在特提斯洋关闭,区域构造隆升背景下通过后期热液活动形成的,其矿化强度和规模明显弱于沉积期。

(3) 马脑壳金矿床作为陕甘川金三角区的典型矿床,对矿床喷流沉积成矿的认识为研究该区域赋存于三叠纪地层中的同类型金矿床提供了一种新的研究思路。

野外工作得到重庆地勘局 205 地质队熊剑铭、汪静等同志的大力支持;审稿专家提出了宝贵意见,对提高论文质量起到了重要作用,在此致谢。

## 参考文献(References):

- [1] 郑明华,周渝峰,刘建明,等. 喷流型与浊流型层控金矿床[M]. 成都:四川科学技术出版社,1994. 1~273.  
Zheng Ming-hua, Zhou Yu-feng, Liu Jian-ming, *et al.* Stratabound Gold Deposits of Exhalation Type and Turbidity Type [M]. Chengdu: Sichuan Science and Technology Press, 1994. 1~273 (in Chinese).
- [2] 王可勇,姚书振,吕新彪. 川西北马脑壳金矿床构造-流体-金成矿作用系统演化模式[J]. 地质科学,2001,36(2): 164~175.  
Wang Ke-yong, Yao Shu-zhen, Lü Xin-biao. A systematic evolution model of structure-fluid-gold mineralization from Manaoke gold deposit, Northwest Sichuan [J]. Chinese J Geol, 2001, 36(2): 164~175 (in Chinese with English abstract).
- [3] 王可勇,姚书振,吕新彪. 川西北马脑壳金矿床成矿流体地球化学特征与性质[J]. 地球化学,2001,30(3): 273~281.  
Wang Ke-yong, Yao Shu-zhen, Lü Xin-biao. Geochemistry of ore-forming fluids of Manaoke gold deposit, northwestern Sichuan Province [J]. Geochimica, 2001, 30(3): 273~281 (in Chinese with English abstract).
- [4] 季宏兵,王世杰,文锦明. 川西北地区马脑壳金矿床的成矿年代学[J]. 矿物岩石地球化学通报,1999,18(2): 95~98.  
Ji Hong-bing, Wang Shi-jie, Wen Jin-ming. The metallogenic chronology for the Manaoke gold deposit in the Northwestern Sichuan Province [J]. Bull Mineral Petrol Geochem, 1999, 18(2): 95~98 (in Chinese with English abstract).
- [5] 莫渊辉,王秀璋,程景平,等. 冀西北东坪金矿床含金石英脉石英流体包裹体 Rb-Sr 等时线及其地质意义[J]. 地球化学,1997,26(3): 20~27.  
Mo Ce-hui, Wang Xiu-zhang, Cheng Jing-ping, *et al.* Rb-Sr isochron determination for fluid inclusions within quartz vein from Dongping gold deposit, NW Hebei Province and its implications for metallogeny [J]. Geochimica, 1997, 26(3): 20~27 (in Chinese with English abstract).
- [6] 梁华英,王秀璋,程景平,等. 广东长坑-富湾超大型独立银矿床 Rb-Sr 定年及形成分析[J]. 地质科学,2000,35(1): 47~54.  
Liang Hua-ying, Wang Xiu-zhang, Cheng Jing-ping, *et al.* Rb-Sr dating and genesis of Changkeng-Fuwan superlarge silver deposit in west Guangdong [J]. Sci Geol Sinica, 2000, 35(1): 47~54 (in Chinese with English abstract).
- [7] 郑明华,张斌,刘建明,等. 四川马脑壳金矿床中白钨矿矿体的发现及其意义[J]. 成都地质学院学报,1993,20(1): 1~8.  
Zheng Ming-hua, Zhang Bin, Liu Jian-ming, *et al.* Significance of the discovery of scheelite ore-bodies in a gold deposit in Sichuan [J]. J Chengdu College Geol, 1993, 20(1): 1~8 (in Chinese with English abstract).

- [8] 付绍洪. 四川省南坪县马脑壳金矿床载金矿物及成矿作用研究[D]. 武汉: 中国地质大学, 2000.  
Fu Shao-hong. The study of gold-bearing minerals and mineralization of the Manaoke gold deposit in Nanping county, Sichuan Province[D]. Wuhan: China University of Geosciences, 2000 (in Chinese with English abstract).
- [9] Peterman Z E, Hedge C E, Tourtelot H A. Isotopic composition of strontium in sea water throughout Phanerozoic time[J]. *Geochim Cosmochim Acta*, 1970, 34(1): 105 ~ 120.
- [10] 顾雪祥, 何彬彬, Schulz O. 等. 四川马脑壳层控金矿床中辉锑矿残余沉积组结构的发现及其成因意义[J]. *成都理工学院学报*, 2000, 27(4): 331 ~ 334.  
Gu Xue-xiang, He Bin-bin, Schulz O, *et al.* Relict sedimentary fine-laminated fabrics of stibnite and its significance in the Manaoke stratabound gold deposit, Sichuan, China[J]. *J Chengdu Univ Technol*, 2000, 27(4): 331 ~ 334 (in Chinese with English abstract).
- [11] Gu X X, Liu J M, Schulz O, *et al.* Syngenetic origin for the sediment-hosted disseminated gold deposits in NW Sichuan, China: Ore fabric evidence [J]. *Ore Geol Rev*, 2002, 22(1-2): 91 ~ 116.
- [12] 杨恒书, 张凤岭, 殷鸿福, 等. 西秦岭造山带演化与成矿[J]. *四川地质学报*, 1996, 16(1): 73 ~ 79.  
Yang Heng-shu, Zhang Feng-ling, Yin Hong-fu, *et al.* Evolution and metallogenesis of the west Qinling orogenic belt[J]. *Acta Geol Sichuan*, 1996, 16(1): 73 ~ 79 (in Chinese with English abstract).
- [13] 赖旭龙, 杨逢清, 杜远生, 等. 川西北若尔盖一带三叠系层序及沉积环境分析 [J]. *中国区域地质*, 1997, 16(2): 193 ~ 199; 204.  
Lai Xu-long, Yang Feng-qing, Du Yuan-sheng, *et al.* Triassic stratigraphic sequence and depositional environment in the Nanping-Zoige area North Western Sichuan [J]. *Reg Geol China*, 1997, 16(2): 193 ~ 199; 204 (in Chinese with English abstract).
- [14] Emsbo P, Hutchinson R W, Hofstra A H, *et al.* Syngenetic Au on the Carlin trend: Implications for Carlin-type deposits[J]. *Geology*, 1999, 27: 59 ~ 62.

## Rb-Sr isotopic compositions of fluid inclusions in the Manaoke gold deposit, Northwest Sichuan Province: Constraint for the ore genesis

FU Shao-hong<sup>1,2</sup>, GU Xue-xiang<sup>2</sup>, WANG Ping<sup>3</sup>

(1. College of Earth Geosciences, Chengdu University of Technology, Chengdu 610059, China; 2. Open Laboratory of Ore Deposit Geochemistry, Institute of Geochemistry, Chinese Academy of Sciences, Guiyang 550002, China; 3. Faculty of Earth Resources, China University of Geosciences, Wuhan 430074, China)

**Abstract:** The Manaoke gold ore deposit, located in Northwest Sichuan Province, is one of the important ore deposits in the triangle area of Shaanxi-Gansu-Sichuan provinces. Much work has been taken by a great number of researchers to recognize the geological and geochemical characteristics of the deposit and discuss the ore genesis from different aspects. To determine the mineralization time of the deposit using the method of Rb-Sr isotopes, the quartz containing fluid inclusions was chosen from the sheetlike ore bodies. The compositions of Rb-Sr isotopes of the fluid inclusions were measured. Through the calculation of ISOPLOT program the ore-forming age of (210 ± 35) Ma was obtained, which is close to the sedimentary age of the host rock. The initial <sup>87</sup>Sr/<sup>86</sup>Sr ratio of the fluid inclusions is consistent with that of coeval seawater. Combining the ore body feature, ore fabric, and the region tectonic environment, it is suggested that the main ore bodies occurred as layers were formed by the syn-sedimentation. On the other hand, the vein and network ore bodies were formed through the hydrothermal system caused by orogeny.

**Key words:** gold deposit; inclusion; Rb-Sr isotope; metallogeny; Manaoke; Sichuan Province

**CLC number:** P597; P611

**Document code:** A