

广东长坑金银矿床氧同位素组成特征 及矿床成因讨论

庄文明, 陈国能, 林小明, 彭卓伦, 马浩明

中山大学 地球科学系, 广州 510275

摘要:通过对长坑金银矿床16线部分钻孔进行较系统的氧同位素分析,发现岩石的 $\delta^{18}\text{O}$ 值有自矿体下部(银矿体)向浅部(金矿体)、自矿体中心向围岩逐渐增大的趋势。全岩 $\delta^{18}\text{O}$ 值的这种变化,与围岩蚀变强度减弱的方向一致。据此以及本区成矿元素的分带特征,结合近年提出的花岗岩原地重熔说所阐明的成矿元素分带规律,提出长坑金银矿床应为岩浆热液矿床、成矿热液流体应来自深部隐伏花岗岩的见解,并指出在银矿体的下部有寻找铅锌铜矿床的可能性。

关键词:长坑金银矿床; 氧同位素; 围岩蚀变; 成矿流体; 花岗岩原地重熔模型

中图分类号:P618.51 **文献标识码:**A **文章编号:**1671-5888(2006)04-0521-06

Composition of Oxygen Isotopes and Discussion on the Formation of Changkeng Au - Ag Deposit, Guangdong Province

ZHUANG Wen-ming, CHEN Guo-neng, LIN Xiao-ming, PENG Zhuo-lun, MA Hao-ming

Department of Earth Sciences, Sun Yat-sen University, Guangzhou 510275, China

Abstract: Oxygen isotope analyses of the samples collected systemically from six bores of the 16th prospecting line of Changkeng gold-silver deposit indicate that the $\delta^{18}\text{O}$ values of rock increase from the deeper silver ore body to the shallower gold ore body and from the center of ore body to the wall rock, which consistent with the decreasing of alteration intensity of the wall rocks. Combining with the zoning characteristics of the ore-forming elements clarified by the in-situ melting hypothesis of granite formation in recent years, it is suggested that the Changkeng deposit should be a hydrothermal deposit, the hydrothermal fluids likely came from the concealed granite in the southern part of the region, and it is possible to find out lead, zinc and copper deposits below the silver ore body.

Key words: Changkeng gold-silver deposit; oxygen isotopes; wall rock alteration; ore-forming fluid; in-situ melting model of granite

Taylor 系统研究了各类岩石、矿床及不同纬度大气降水的氢氧同位素组成后,据其间的差异将流体划分为原始岩浆水、变质水、海水、地下热水等^[1~3]。Taylor 的工作对同位素地球化学在成矿学上的应用无疑是奠基性的,但同时又导致后来的众

多研究逐渐走向模式化,即用简单的数据比较代替了复杂的成矿过程研究。事实上,不但不同成因类型矿床的氧同位素组成有很大差异,分布于不同地区同一成因类型的矿床,其氧同位素组成也有很大差异^[1~4]。本文的研究表明,即使是同一矿体,其不

收稿日期:2005-12-01

基金项目:高等学校博士点专项科研项目(2001024411706,20030558005)

作者简介:庄文明(1966-),男,浙江金华人,博士研究生,教授级高级工程师,主要从事区域地质和区域成矿研究, Tel: 020-84112547, E-mail: ee28@zsu.edu.cn.

同部位的氧同位素组成也差异甚大,而且呈规律性变化。这种变化规律(而不是过去常用的同位素绝对值),可能才是研究成矿物质或成矿流体来源真正有意义的信息。

1 长坑金银矿床的地质特征

长坑金银矿床是一个大型金矿与超大型银矿共生的浸染型矿床。金富集于矿体的中上部,下部则以银为主。平面上,以金为主的矿体中上部分布于长坑地区,而深部银矿体则向南延伸至富湾地区,因而该矿又分别称为长坑金矿和富湾银矿(图1)。

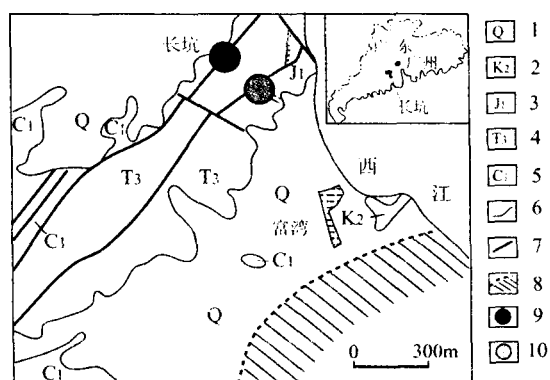


图1 研究区区域地质简图^①

Fig. 1 Geological map of research area

1. 第四系;2. 上白垩统;3. 下侏罗统;4. 上三叠统;5. 下石炭统;6. 地层界线;7. 断裂;8. 物探推测深部隐伏花岗岩体分布区;9. 金矿床;10. 银矿床

金、银矿体呈似层状或大型扁透镜状产于断裂破碎带中。下石炭统(C_1)与上三叠统小坪组(T_{3x})之间的层间滑动断裂以及与其平行的次级断裂破碎带为主要控矿构造。矿体总体走向北东东,倾向南,倾角一般为 $0^\circ \sim 15^\circ$,但局部变陡甚至出现反倾向。金呈自然金产出,粒度极细,一般为 $0.05 \sim 0.075 \mu\text{m}$ 。矿石中的矿物主要为石英及伊利石、黄铁矿、辉锑矿、雄黄等,见少量重晶石、方解石、萤石以及极少量的闪锌矿、方铅矿和毒砂。深部银矿体的矿石矿物主要有深红银矿、辉锑银矿、硫锑铅银矿、黝锑银矿、银黝铜矿、硫锑铜银矿、银毛矿、黄铁矿、闪锌矿、方铅矿等,脉石矿物主要为石英,次为方解石以及少量绢云母、水云母和重晶石。矿体围岩为含炭泥岩、泥灰岩、生物碎屑灰岩、泥质粉砂岩以

及少量砂砾岩。岩石蚀变显著,以硅化为主,次为粘土化和重晶石化^[5~8]。根据野外和钻孔岩心观察,硅化后的岩石呈浅灰—深灰色,质地坚硬;交代残留的灰岩呈树枝状、孤岛状或斑点状产于硅化岩中;硅化岩与正常岩石的界线极不规则,且硅化强度随着与矿体距离的增大而逐渐降低。上述现象表明,硅化岩应是后期蚀变的产物,而不是部分学者^[9,10]认为的沉积成因的硅岩。

2 氧同位素变化特征及其对成矿流体来源的指示

已有不少研究者对长坑矿床的同位素组成作过不同程度的研究^[6~13],但分析数据缺乏系统性且没有给出样品的空间位置。作者在详细研究了长坑—富湾矿区16线8个钻孔的岩心之后,选择了岩心较完整的5个孔,即ZK1601、ZK1602、ZK1603、ZK1604和ZK1606,在矿体及其上、下不同部位采集全岩样品(图2)。

氧同位素分析由中国地质调查局同位素地球化学开放研究实验室(宜昌)完成,获得了各样品的 $\delta^{18}\text{O}_{\text{PDB}}$ 值。为与前人获得的 $\delta^{18}\text{O}_{\text{SMOW}}$ 值对比,据通用换算公式($\delta^{18}\text{O}_{\text{SMOW}} = 1.03091\delta^{18}\text{O}_{\text{PDB}} + 30.91$)将 $\delta^{18}\text{O}_{\text{PDB}}$ 值换算为 $\delta^{18}\text{O}_{\text{SMOW}}$ 值,测试及换算结果见表1。

将表1中的分析数据与样品的空间位置相结合,并据内插法原理,即可得到图3所示的氧同位素等值线剖面。从中可见:①从矿体下部(银矿体)向上(金矿体), $\delta^{18}\text{O}$ 值逐渐升高;②自矿体向两侧围岩, $\delta^{18}\text{O}$ 值逐渐升高(图3)。

表1中样品除CZK1604—7号样蚀变不明显外,其它样品均有不同程度的硅化。矿体形成和围岩蚀变,以及岩石与流体间的同位素交换,应为同一过程的不同侧面。图3所示的等值线变化有序,无突变跳跃的特征,表明很大程度上应是矿床形成过程中岩石与流体间的同位素交换所致,没有理由认为是反映岩石蚀变前的氧同位素组成。这与Taylor对美国Bohemia地区岩体及蚀变围岩,以及其它众多岩体及其围岩氧同位素等值线的研究结果所反映的规律^[1~3]是一致的。事实上, $\delta^{18}\text{O}$ 值自矿体向两侧围岩逐渐升高,或从矿体的下部向地表方向有升高的现象,早已在不少矿床中发现,如美国的Tonopah金矿^[2],我国内蒙白乃庙金矿^[4]、广东莲花

^① 据广东省757地质大队《广东省高要县长坑金矿普查报告改编》,图2同此。

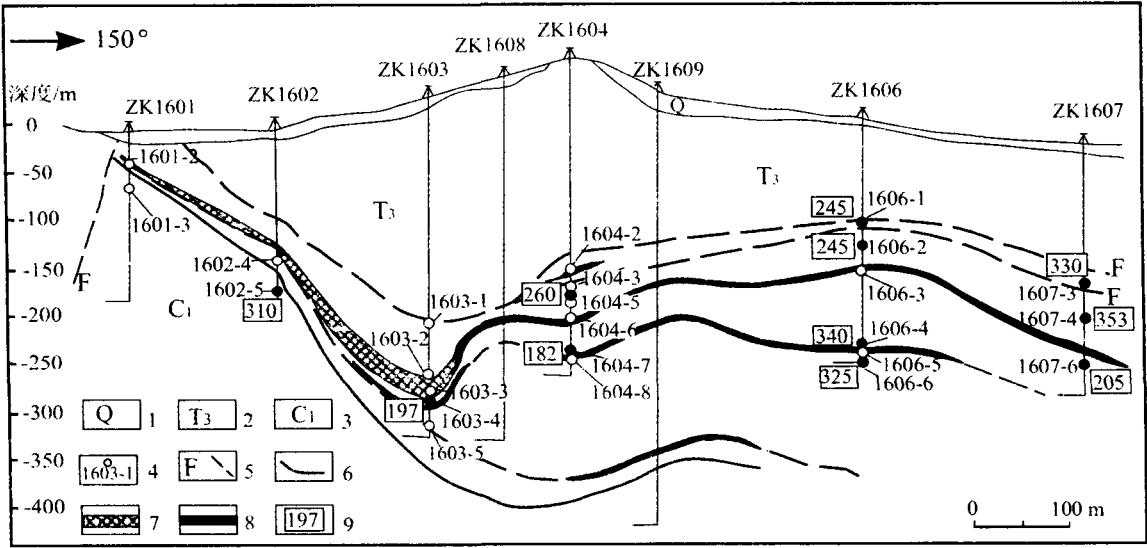


图 2 长坑金银矿床 16 号线地质剖面及氧同位素和包裹体测温样品采样位置图

Fig. 2 Geological section of the 16th prospecting line of Changkeng gold-silver deposit, showing the sampling positions of Oxygen isotopes and of inclusion temperature testing

1. 第四系;2. 上三叠统;3. 下石炭统;4. 样品位置及编号(黑点是同时或仅仅作包裹体测温的样品);5. 断裂;6. 地层界线;7. 金矿体;8. 银矿体;9. 流体包裹体均一化温度

表 1 广东长坑金银矿床钻孔岩心氧同位素分析结果

Table 1 Analysis results of oxygen isotopes from the boreholes of 16th prospecting line

序号	样品编号	样品名称	取样深度/m	$\delta^{18}\text{O}_{\text{PDB}}/\text{‰}$	$\delta^{18}\text{O}_{\text{SMOW}}/\text{‰}$
1	CZK1601-2	硅化构造角砾岩(金矿石)	38.5	-8.92	21.71
2	CZK1601-3	弱硅化碎裂灰岩	63.0	-9.09	21.54
3	CZK1602-4	金矿化构造角砾岩	129.4	-12.08	18.46
4	CZK1602-5	碎裂灰岩	151.6	-13.34	17.16
5	CZK1603-1	碳酸盐化砂砾岩	208.6	-17.32	13.05
6	CZK1603-2	黄铁矿辉锑矿化角砾状硅化岩(金矿石)	273.0	-17.51	12.86
7	CZK1603-3	硅化构造角砾岩(金矿石)	290.8	-20.92	9.34
8	CZK1603-4	硅化构造角砾岩(金矿石)	297.3	-17.92	12.44
9	CZK1603-5	碳酸盐化构造角砾岩	308.4	-18.84	11.49
10	CZK1604-2	金、银矿化碳酸盐化角砾岩	199.0	-22.45	7.77
11	CZK1604-3	硅化岩	203.9	-21.55	8.69
12	CZK1604-5	硅化灰岩(银矿石)	233.6	-17.35	13.02
13	CZK1604-6	硅化构造角砾岩(银矿石)	252.5	-17.17	13.21
14	CZK1604-7	灰岩	283.2	-14.29	15.66
15	CZK1604-8	硅化碎裂灰岩(银矿石)	288.8	-15.50	14.92
16	CZK1606-1	硅化构造角砾岩(银矿化)	93.0	-14.57	15.89
17	CZK1606-2	硅化构造角砾岩(银矿化)	121.3	-19.52	10.79
18	CZK1606-3	硅化构造角砾岩(银矿化)	141.8	-17.88	12.48
19	CZK1606-4	硅化构造角砾岩(银矿化)	225.9	-20.85	9.42
20	CZK1606-5	硅化构造角砾岩(银矿石)	226.3	-18.01	12.28

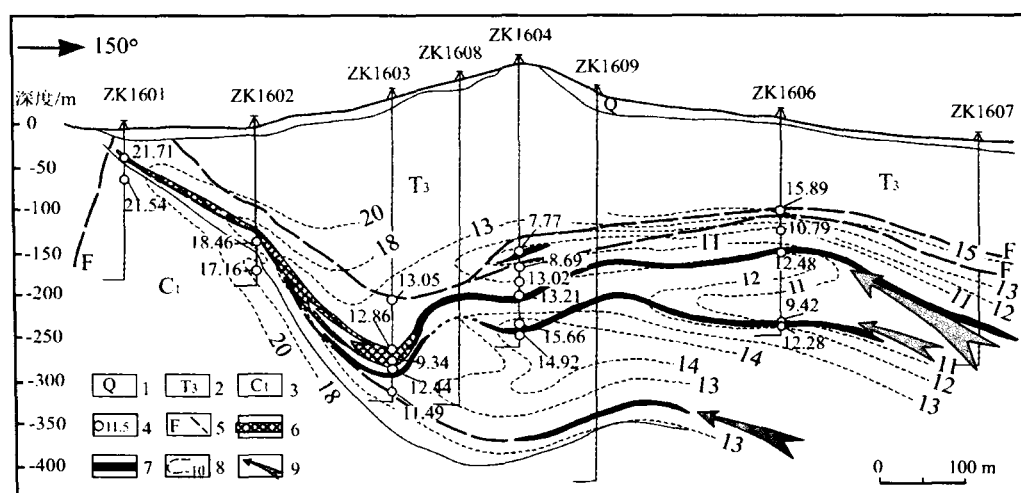


图3 长坑金银矿床16号线剖面 $\delta^{18}\text{O}_{\text{SMOW}}$ 值的变化特征及其对成矿流体来源的指示

Fig. 3 Variation of $\delta^{18}\text{O}_{\text{SMOW}}$ values of the 16th prospecting section and its implication for the source of ore-forming fluids

1. 第四系; 2. 上三叠统; 3. 下石炭统; 4. 样品 $\delta^{18}\text{O}_{\text{SMOW}}$ 值; 5. 断裂; 6. 金矿体; 7. 银矿体; 8. $\delta^{18}\text{O}_{\text{SMOW}}$ 等值线; 9. 成矿流体的可能运移方向

山钨矿^[4]以及华北的焦家式金矿^[14]等,表明“低 $\delta^{18}\text{O}$ 中心即为成矿活动中心”^[15,16]。所以,图2反映的氧同位素变化趋势,应指示成矿流体来自矿体下方的源区,而且应是沿着容矿裂隙向上运移的线状(剖面上)流体。

3 矿床成因讨论

已有不少学者从不同的角度探讨过长坑金银矿床的成因^[5~13]。对于成矿流体的来源,目前至少有三种不同的认识:①热液^[5~7];②热水(大气降水加热)^[8~11];③建造水^[17]。对于前两者,姚淑梅已做过较为详细的总结^[16]。张文淮等据流体包裹体方面的研究资料,提出成矿流体主要来自盆地建造水的认识,认为盆地的建造水受加温和挤压后不断排出,同时沉积物中的有机质不断裂解和释放,从而形成富含有机质的热流体,使得岩石中的金属元素活化、迁移和沉淀^[17]。据张文淮等的估算,该区盆地沉积物的厚度,下构造层约为2 000 m,上构造层600 m,而包裹体的均一化温度,金矿体平均为211℃,银矿体为235℃,这意味着当时盆地的地温梯度接近100℃/km。果若如此的话,岩石的蚀变作用不应该限于矿体两侧围岩,而应自盆地上部向下逐渐增强。此外,有机包裹体的存在也不能证明成矿流体一定为建造水,因为现有的研究表明,典型的岩浆热液矿床,例如江西大吉山钨矿^[18]、广东下庄铀矿^[19]等,也含有众多的有机包裹体。

结合前述氧同位素分析,对部分样品方解石中

的流体包裹体进行了测温。实验在本系的英产Linkam-1500热台上进行。各样品的均一化温度如图2所示。相对于以往获得的数据,图2中部分样品的温度显然有所偏高,但据杜均恩等、张文淮等的报道,350~400℃的气/液两相包裹体普遍存在,部分还达到400~500℃。且不论这种现象产生的原因,图2反映的温度变化趋势与以往研究是一致的,即银矿体成矿温度较高,金矿体较低^[5,17],证实成矿流体在向上运移过程中温度逐渐降低。

对于矿床的 $\delta^{18}\text{O}$ 值自矿体向围岩或自下而上升高的现象, Taylor认为深部的岩浆体起着热机的作用,它使下渗的大气降水被加热,并与岩石发生同位素交换,同时从岩浆或围岩中带出成矿物质,形成循环流动的成矿流体^[2]。另一种认识来自近年来提出的花岗岩原地重熔说^[20~22]。该假说认为,在壳内熔融(重熔)层固结过程中,一旦熔体可以分离出气相, ^{16}O 应比 ^{18}O 优先迁移到气相。因此,重熔岩浆产生的成矿流体应富含 ^{16}O ^[21]。另外,随着岩浆结晶过程进入到尾声,未能进入硅酸盐晶格的元素,尤其是硫及亲硫元素,也必同时进入气相,并在压力差和温度差的驱动下在岩浆房顶部(重熔界面突起部位)汇聚。一旦条件许可,这些富含 ^{16}O 的成矿流体即被排出系统。在向上运移过程中,成矿流体中不同的成矿元素,随着温度降低或其他物理化学条件的变化,在不同的温度区间沉淀析出(周期表第四、第五周期的副族成矿元素,一般按照 $\text{Mo} \rightarrow \text{W} \rightarrow \text{Cu} \rightarrow \text{Zn} \rightarrow \text{Pb} \rightarrow \text{Ag} \rightarrow \text{Au} \rightarrow \text{Hg}$ 的顺序析出)^[21]。据此

并结合本区的资料,长坑金银矿床的成矿流体极有可能是来自深部重熔花岗岩的岩浆热液。其理由是:(1)野外和镜下观察表明,矿体围岩的硅化现象是后期热液蚀变所致。剖面中岩石的硅化强度,总体自深部向浅部和自矿体向两侧围岩减弱,表明流体确实来自深部,而且是沿断裂向上运移的高温流体,这与流体包裹体测温资料可以相互印证;(2)富 ^{16}O 的含矿热液流体进入断裂通道,在压力驱动下向围岩渗透,在加热围岩(和造成围岩蚀变)的同时,与围岩发生同位素交换。随着向上和向外温度的降低以及流体中 ^{16}O 浓度的降低(水/岩作用过程导致流体中 ^{16}O 的耗损和 ^{18}O 的增加),流体对围岩同位素置换的能力减弱。因此,岩石的 $\delta^{18}\text{O}$ 值自深部向浅部,以及自矿体向外逐渐升高。这与岩石硅化蚀变强度衰减的方向一致;(3)矿床具有明显的岩浆热液成矿过程造成的元素分带规律:浅部为金,向下为银。与浅部金矿体相比,银矿体中Pb, Zn, Cu 3个元素的含量均显著升高,数倍甚至数十倍于金矿体(表2)。事实上,铅、锌、铜矿在富湾南侧的横江一带已经出露,且经钻探证实,从浅部向深部,依次出现锌铅矿体、铅锌矿体、铅锌铜矿体。换言之,整个区域平面上从北西向南东,剖面上从浅部向深部,呈现出 $\text{Au} \rightarrow \text{Ag} \rightarrow \text{Pb} \rightarrow \text{Zn} \rightarrow \text{Cu}$ 的规律性分带,与前述花岗岩原地重熔模型阐明的成矿元素分带规律吻合;(4)物探资料证实,隐伏花岗岩体存在于本区南部(图1),目前尚不知道隐伏岩体的形成时代,但据长坑金银矿床的成矿年龄(全岩K-Ar法年龄为 $(132.2 \pm 2.5) \text{ Ma}$ 和 $(136.8 \pm 11.8) \text{ Ma}$ ^[6,23]),初步推测隐伏岩体可能形成于燕山中期。

表2 长坑金银矿床矿石部分特征元素含量

Table 2 Abundance of same elements in Au and Ag ore body

矿种	矿石类型	Au	Ag	Pb	Zn	Cu
金矿体	硅质矿石	11.74	10.50	0.003	0.015	0.004
	钙硅质矿石	3.56	6.5	0.001	0.008	0.002
银矿体	硅质矿石	0.32	174	0.07	0.15	0.02
	钙硅质矿石	0.42	209	0.15	0.20	0.04

Au, Ag 质量分数单位为 10^{-6} ,其余为%;据文献[6]简化

综上所述,长坑金银矿床应为岩浆热液矿床,成矿热液可能来自于深部的隐伏岩体。

4 总结与建议

单纯从矿床的 $\delta^{18}\text{O}$ 值的变化范围探讨成矿流体的来源(即所谓岩浆水、变质水、大气降水等),复

杂的成矿地质过程有可能被过分简单化。长坑金银矿床 $\delta^{18}\text{O}$ 值自深部向浅部、自矿体向围岩升高,成矿温度自下而上降低,围岩蚀变(硅化)强度自深部向浅部、自矿体向围岩减弱等现象,均指示成矿流体应是沿断裂向上运移的深部流体。矿床 $\delta^{18}\text{O}$ 值的变化规律以及成矿元素分带特点,可在近年来提出的花岗岩原地重熔理论^[22~22]中得到较为令人满意的解释。一个重要的认识是,根据原地重熔的成矿理论,结合本项研究的结果,在银矿体的下部(已知银矿体的最大埋深为345.6 m),有可能存在铅锌和铜矿体,建议进一步研究和进行深部的勘查工作。

本项研究在资料搜集和钻孔采样过程中,得到广东省地质勘查局757地质队魏琳高级工程师的大力支持与帮助,特此致谢!

参考文献(References):

- [1] Taylor H P Jr. The oxygen isotope geochemistry of igneous rocks[J]. Contrib Mineral Petrol, 1968, **19**(1): 1-17.
- [2] Taylor H P Jr. The application of oxygen and hydrogen isotope studies to problems of hydrothermal alteration and ore deposition[J]. Econ Geol, 1974, **69**: 843-883.
- [3] Taylor H P Jr. Water/rock interactions and the origin of H_2O in granitic batholiths[J]. J Geol Soc London, 1977, **133**: 509-558.
- [4] 张理刚. 稳定同位素在地质科学中的应用[M]. 西安: 陕西科学技术出版社, 1985.
ZHANG Li-gang. The application of the stable isotope to geology[M]. Xi'an: Shaanxi Science and Technology Publishing House, 1985.
- [5] 杜均恩, 马超槐, 张国恒. 长坑金、银矿成矿特征[J]. 广东地质, 1993, **8**(3): 1-8.
DU Jun-en, MA Chao-huai, ZHANG Guo-heng. Mineralization characteristics of Changkeng Gold-silver deposit Guangdong Province[J]. Guangdong Geology, 1993, **8**(3): 1-8.
- [6] 杜均恩, 马超槐, 魏琳. 广东长坑金银矿地球化学特征[J]. 广东地质, 1996, **11**(1): 49-59.
DU Jun-en, MA Chao-huai, WEI Lin. Geochemical characteristics of the Changkeng gold-silver deposit of Guangdong[J]. Guangdong Geology, 1996, **11**(1): 49-59.
- [7] 张生, 李统锦, 王联魁. 广东长坑大型-超大型金银矿床的地球化学与成因[J]. 矿床地质, 1998, **17**(2): 125-134.

- ZHANG Sheng, LI Tong-jin, WANG Lian-kui. Geochemistry and genesis of the Changkeng large gold-silver deposit, Guangdong Province[J]. Mineral Deposits, 1998, **17**(2):125-134.
- [8] 关康, 裘有守, 颜竹筠. 长坑金矿床地质特征与成因探讨[J]. 贵金属地质, 1997, **6**(1):28-37.
- GUAN Kang, QIU You-shou, YAN Zhu-jun. Geological characteristics and genesis of Changkeng gold deposit in Guangdong[J]. Journal of Precious Metallic Geology, 1997, **6**(1):28-37.
- [9] 夏萍, 张湖, 王秀璋, 等. 粤西长坑金银矿区硅质岩的地球化学特征及成因探讨[J]. 地球化学, 1996, **25**(2):129-139.
- XIA Ping, ZHANG Hu, WANG Xiu-zhang, et al. Geology-geochemistry and genesis of silicites from Changkeng Au-Ag deposit, West Guangdong, China[J]. Geochimica, 1996, **25**(2):129-139.
- [10] 孙晓明, 孙凯, 陈敬德, 等. 长坑金、银矿赋矿硅质岩的硅-氧同位素地球化学特征及其成因意义[J]. 矿物岩石地球化学通报, 1998, **17**(2):110-113.
- SUN Xiao-ming, SUN Kai, CHEN Jing-de, et al. $\delta^{30}\text{Si}$, $\delta^{18}\text{O}$ of ore-bearing chert in Changkeng large-scale Au-Ag deposit, and its genetic significances[J]. Bulletin of Mineralogy, Petrology and Geochemistry, 1998, **17**(2):110-113.
- [11] 梁华英, 夏萍, 王秀璋, 等. 长坑矿田金银矿床地球化学特征及形成差异分析[J]. 地质论评, 1998, **44**(2):194-199.
- LIANG Hua-ying, XIA Ping, WANG Xiu-zhang, et al. The geochemical and genetical differences of gold and silver orebodies in the Changkeng deposit Guangdong[J]. Geological Review, 1998, **44**(2):194-199.
- [12] 郭新生, 杜均恩. 广东长坑金银矿流体包裹体及同位素地球化学研究[J]. 矿产与地质, 1996, **13**(3):187-193.
- GUO Xin-sheng, DU Jun-en. Fluid inclusion and isotopes geochemical study of Changkeng gold-silver deposit, Guangdong Province[J]. Mineral Resources and Geology, 1996, **13**(3):187-193.
- [13] 张理刚. 成岩成矿理论与找矿[M]. 北京: 北京工业大学出版社, 1989.
- ZHANG Li-gang. Petrogenetic and minerogenetic theories and it's prospecting[M]. Beijing: Press of Beijing University of Technology, 1989.
- [14] Sheppard S M F. Characterization and isotopic variations in natural waters[J]. Reviews in Mineralogy, 1986, **16**:165-185.
- [15] Criss R E, Taylor H P Jr. Meteoric-hydrothermal systems[J]. Reviews in Mineralogy, 1986, **16**:373-422.
- [16] 姚淑梅. 广东长坑金银矿床成因探讨[J]. 世界地质, 2000, **19**(2):155-159.
- YAO Shu-mei. Discussion on the genesis of Changkeng gold-silver deposit, Guangdong Province[J]. World Geology, 2000, **19**(2):155-159.
- [17] 张文淮, 吕万军, 焦养泉, 等. 广东长坑金银矿床成矿流体成分及来源探讨[J]. 岩石学报, 2000, **16**(4):521-527.
- ZHANG Wen-huai, LÜ Wan-jun, JIAO Yang-quan, et al. Composition and source study of ore-forming fluid in Changkeng gold-silver deposit, Guangdong Province[J]. Acta Petrologica Sinica, 2000, **16**(4):521-527.
- [18] Zhang Wen-lan, Ni Pei, Hua Re-min, et al. The geochemical characteristics of ore-forming fluid of Dajishan tungsten deposit in south China[C]//Goldschmidt Conference (Stockholm), Hydrothermal Geochemistry Abstracts, 2005, A851.
- [19] Sun Zhan-xue. Gas geochemistry of ore-forming solution in the Xiazhuang U-ore-field, north Guangdong, China[C]//Goldschmidt Conference (Stockholm), Hydrothermal Geochemistry Abstracts, 2005, A850.
- [20] 陈国能, 曹建劲, 张珂. 原地重熔与元素地球化学场——论花岗岩的成因与成矿及大陆内生过程的物质旋回[M]. 北京: 地质出版社, 1996:51-62.
- CHEN Guo-neng, CAO Jian-jin, ZHANG Ke. In-situ melting and the geochemical field of elements[M]. Beijing: Geological Publishing House, 1996:51-62.
- [21] Chen Guo-neng, Grapes R, Zhang Ke. A model for mesozoic crustal melting and tectonic deformation in southeast China[J]. International Geology Review, 2003, **45**:948-957.
- [22] Chen Guo-neng, Grapes R. An in-situ melting model of granite formation: Geological evidence from South-east China[J]. International Geology Review, 2003, **45**:611-622.
- [23] 刘培森. 高明西安隐伏花岗岩体的圈定及意义[J]. 广东地质, 1994, **9**(2):77-80.
- LIU Pei-sen. The delineation of Xi'an hidden granite pluton and its significance[J]. Guangdong Geology, 1994, **9**(2):77-80.