

赣南淘锡坑钨矿床硫化物铅同位素组成及其地质意义

宋生琼^{1,2}, 魏文凤³

1. 安顺学院, 贵州 安顺 561001; 2. 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, 贵阳 550081;
3. 成都理工大学, 成都 610059

摘要: 为研究赣南崇义县淘锡坑钨矿床的成矿物质来源, 对矿区隐伏花岗岩进行了主量元素成分分析, 并挑选与黑钨矿紧密共生的32件黄铜矿、黄铁矿、毒砂样品进行铅同位素测试分析。结果显示, 淘锡坑深部隐伏花岗岩体具有A型花岗岩特征; 5件样品的铅同位素组成数值相对较小但变化范围较大, 具有壳幔混合特点; 其余27件样品的铅同位素组成相对稳定, 显示上地壳铅特征。研究表明, 隐伏花岗岩主要为上地壳物质重熔成因, 但其上地壳重熔源区中包含少量壳幔混合成因的岩浆岩; 矿床中钨等成矿元素, 主要来自这种含少量壳幔混合成因岩浆岩的上地壳物质经重熔而形成的花岗岩浆。

关键词: 淘锡坑钨矿床; 花岗岩; 铅同位素; 成矿物质来源

中图分类号: P597 文章编号: 1007-2802(2024)03-0654-12 doi: 10.3724/j.issn.1007-2802.20240035

Lead isotopic compositions of sulfides in the Taoxikeng tungsten deposit, southern Jiangxi and their geological significance

SONG Sheng-qiong^{1,2}, WEI Wen-feng³

1. Anshun University, Anshun Guizhou 561001, China;

2. State Key Laboratory of Ore Deposit Geochemistry, Institute of Geochemistry, Chinese Academy of Sciences, Guiyang 550081, China;

3. Chengdu University of Technology, Chengdu 610059, China

Abstract: In order to study the source of ore-forming materials of the Taoxikeng tungsten deposit in Chongyi County of the southern Jiangxi, in this paper, we have analyzed major element compositions of the concealed granite in the deposit, and have selected 32 samples of sulfides including pyrite, chalcopyrite and arsenopyrite which are closely associated with wolframite in the deposit for Pb isotope analysis. The results show that the concealed granite in the Taoxikeng deposit has the characteristics of A-type granite. The Pb isotopic compositions of five sulfide samples have relatively small values but a wide range of variation, showing the characteristics of crust-mantle mixed materials. The Pb isotopic compositions of other 27 sulfide samples are relatively stable, showing the characteristics of upper crustal lead. The study shows that the concealed granite was mainly formed by the remelting of the upper crustal materials which contain a small amount of the crust-mantle mixing sourced magmatic rock. The ore-forming elements such as tungsten in the deposit were mainly sourced from the granitic magma formed by the remelting of the upper crust materials containing a small amount of the crust-mantle mixing sourced magmatic rock.

Key words: Taoxikeng tungsten deposit; granite; Pb isotope; source of ore-forming materials

收稿编号: 2023-025, 2023-2-27 收到, 2023-12-15 改回

基金项目: 矿床地球化学国家重点实验室开放基金资助项目(202003)

第一作者简介: 宋生琼(1983—), 女, 博士, 研究方向: 地球化学. E-mail: 156160493@qq.com.

引用此文:

宋生琼, 魏文凤. 2024. 赣南淘锡坑钨矿床硫化物铅同位素组成及其地质意义. 矿物岩石地球化学通报, 43(3): 654-665. doi: 10.3724/j.issn.1007-2802.20240035

Song S Q, Wei W F. 2024. Lead isotopic compositions of sulfides in the Taoxikeng tungsten deposit, southern Jiangxi and their geological significance. Bulletin of Mineralogy, Petrology and Geochemistry, 43(3): 654-665. doi: 10.3724/j.issn.1007-2802.20240035

0 引言

钨矿床中成矿物质的来源是矿床成因研究的关键问题之一,目前主要有4种认识:来自地层或层状沉积变质岩(Beran et al., 1985; Plimer, 1994),来自花岗岩浆(Singh and Snigh, 2001; 翟裕生, 2002; 席斌斌等, 2008),来自地幔(聂荣锋和王旭东, 2007)和来自花岗岩体和地层的混合(李洪茂等, 2006; 李水如等, 2007)。因此,选择典型的钨矿床研究成矿物质来源对于丰富这一问题具有重要的理论意义。

矿石Pb同位素组成是示踪成矿物质来源的重要手段,受源区初始Pb、U/Pb、Th/U值及形成时间等因素的制约,但基本不受形成后所处地球化学环境的影响(杜玉雕等, 2013),而被广泛应用于矿床成因研究中(Zhang et al., 2008; 向云燕等, 2020; Fernandes, 2021; 蔡应雄等, 2021; Chugaeva, 2022; Dai et al., 2022)。

传统的观点认为,赣南钨矿床与碰撞环境中形成的陆壳改造型花岗岩(S型花岗岩)有关。但邹欣(2006)研究认为,赣南淘锡坑钨矿床的花岗岩并非典型的S型花岗岩,而是S型钙碱性花岗岩。蔡运花和蔡永丰(2016)认为与A型花岗岩的地球化学特征具有相似性,郭春丽(2010)认为属于高钾钙碱性花岗岩,袁莹等(2014)认为具有碱长花岗岩的特征。因此,该区花岗岩性质、成矿物质来源和与S型花岗岩的关系仍需深入研究。

本文以淘锡坑钨矿床为研究对象,对其深部隐伏花岗岩的主量元素成分进行分析,深入探讨钨矿床深部花岗岩的岩石类型。同时,重点开展矿床中与矿石矿物黑钨矿紧密共生的黄铁矿、黄铜矿和毒砂的Pb同位素研究,探讨淘锡坑钨矿床的成矿物质来源,以期深化隐伏花岗岩与钨矿床成因关系的认识。

1 地质背景

扬子地块和华夏地块碰撞拼贴形成华南陆块(Zhang and Zheng, 2013; Wu and Zheng, 2013)。华夏地块的基底为前寒武纪变质岩,盖层为显生宙沉积地层(Yu et al., 2005),其中,中生代230~200 Ma、160~150 Ma和100~80 Ma三个时期的花岗岩浆活动与W-Sn多金属的形成密切相关(Hu et al., 2012; Mao et al., 2013; 胡瑞忠等, 2015; Yuan et al., 2015; 宋生琼等, 2019)。华南钨矿在时间和空间上分布极不均匀,矿化时代集中于中生代,区域上主要分布在南岭地区和江南造山带(张清清等, 2020)。赣南地区位于南岭东段,是我国重要的钨锡矿集中区,属于滨太平洋构造

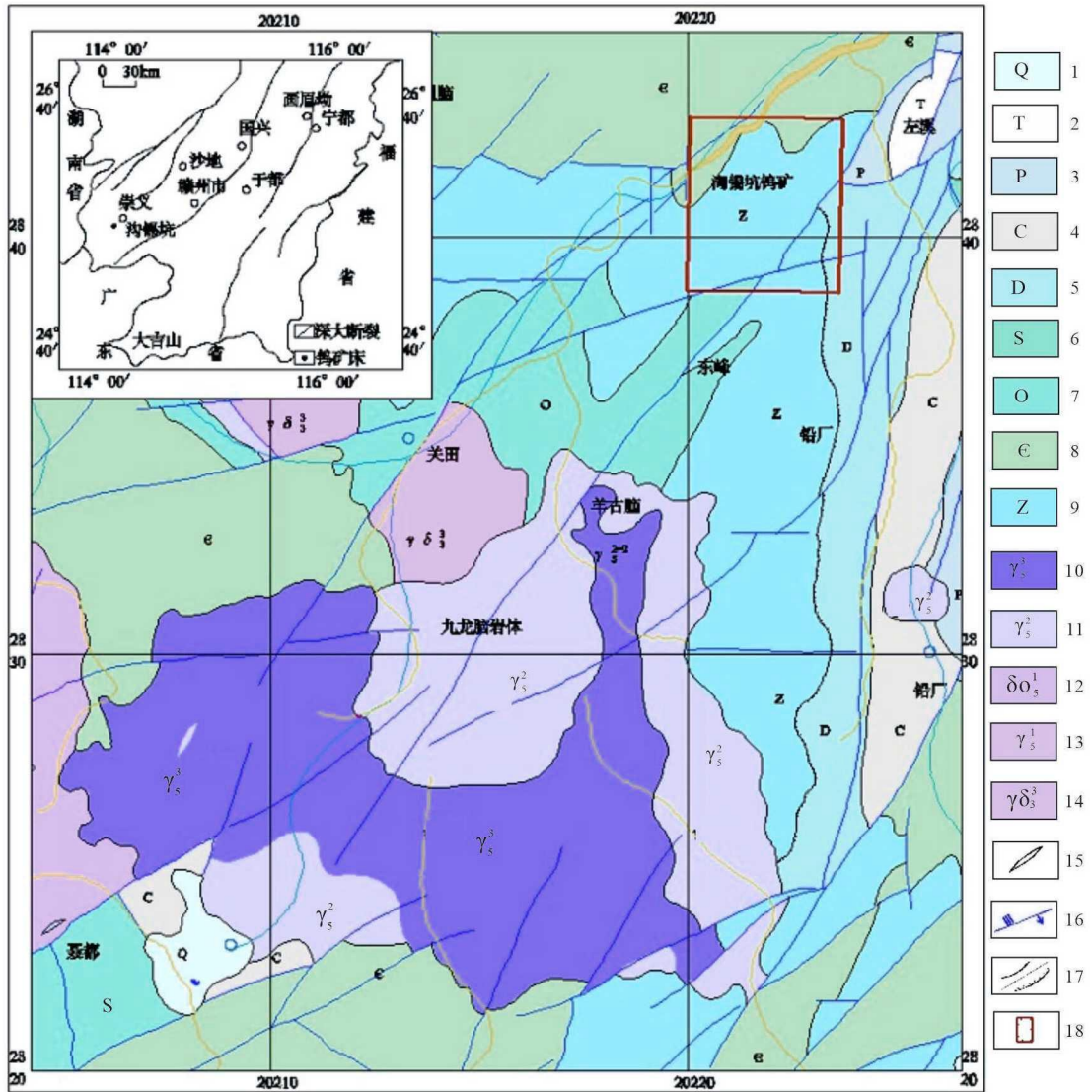
域中生代构造带的南东部,南岭东西向构造带东段与武夷山北东—北北东向构造带南段的复合部位(朱焱龄, 1981)。

淘锡坑钨矿床位于江西省崇义县境内,大地构造位置属于华夏地块南岭地区,东临武夷隆起,横跨武夷—罗霄—钦杭结合带(蔡运花和蔡永丰, 2016)。区内经历了多期次构造-岩浆事件,岩浆活动频繁,构造变形强烈(图1),强烈的构造事件导致区内发生较多的复合构造和次级构造,为花岗岩体及钨矿床的形成提供了有利的条件。

淘锡坑钨矿床位于九龙岗岩体北部的中远接触带,地表未见花岗岩出露,但深部有隐伏花岗岩体,其形成时代为加里东期和燕山期,以燕山期为主。燕山期岩体主要为黑云母花岗岩、二云母花岗岩和白云母花岗岩,锆石U-Pb年龄为(158.7±3.9)Ma和(157.6±3.5)Ma(郭春丽等, 2007, 2008)。淘锡坑钨矿床产于细粒白云母花岗岩和中细粒黑云母花岗岩的内外接触带(吴至军等, 2009; 邹欣, 2006; 宋生琼等, 2019)。区内出露地层有震旦系、奥陶系、泥盆系、石炭系、二叠系、侏罗系、白垩系和古近系。

淘锡坑钨矿床属于石英脉型黑钨矿矿床。按石英脉组的空间展布位置,可分为宝山、棋洞(西山)、烂埂子、枫岭坑和牛角湾5个矿脉组及岩体内接触带石英脉型钨矿脉组(图2)。其中宝山、棋洞(西山)、烂埂子三个脉组位于矿化区北西部,是矿山历年的主采对象;枫岭坑脉组在矿化区东南部。矿体形态呈向上发散向下收敛状,地表脉体细小密集、向下脉体变厚变少,部分单脉形态呈透镜状,上下小、中间大,从地表至156 m标高矿脉逐渐增大,向下至岩体内逐渐尖灭,部分单脉呈楔形,上小下大。矿石的WO₃品位由浅部向深部也有变富的趋势,平均达3.24%(江西省地矿局赣南地质调查大队, 2018)。垂向上矿化主要富集于岩体顶面往上100~400m范围内,花岗岩体顶面附近的矿化较弱,矿床探明的WO₃金属量为7.16万t(江西省地矿局赣南地质调查大队, 2018)。

淘锡坑钨矿床的矿石矿物有黑钨矿、锡石、白钨矿、黄铜矿、闪锌矿、辉钼矿、毒砂、黄铁矿、辉铋矿、石英、黄玉、萤石、白云母、铁锂云母、电气石、方解石、叶蜡石、绿泥石和绢云母等。从显微照片来看,毒砂为自形晶,常被闪锌矿、黄铜矿从边部蚕食;黄铜矿呈块状或乳滴状被包裹在闪锌矿中,或沿毒砂裂隙充填;黑钨矿常与黄铁矿、黄铜矿、闪锌矿等硫化物紧密共生,黄铁矿和毒砂晶型较好。白云母常与萤石共生,呈不规则团块或细脉。总的来讲,白云母、绿柱石、毒砂、辉钼矿和锡石等为较早期矿物,其次是黑钨矿、黄铁矿、黄



1—第四系;2—三叠系;3—二叠系;4—石炭系;5—泥盆系;6—志留系;7—奥陶系;8—寒武系;9—震旦系;10—燕山晚期第三期侵入岩;11—燕山晚期第二期侵入岩;12—海西印支期石英闪长岩;13—海西印支期侵入岩;14—加里东晚期侵入岩;15—脉岩;16—断裂;17—地质界线/不整合界线;18—淘锡坑矿区范围

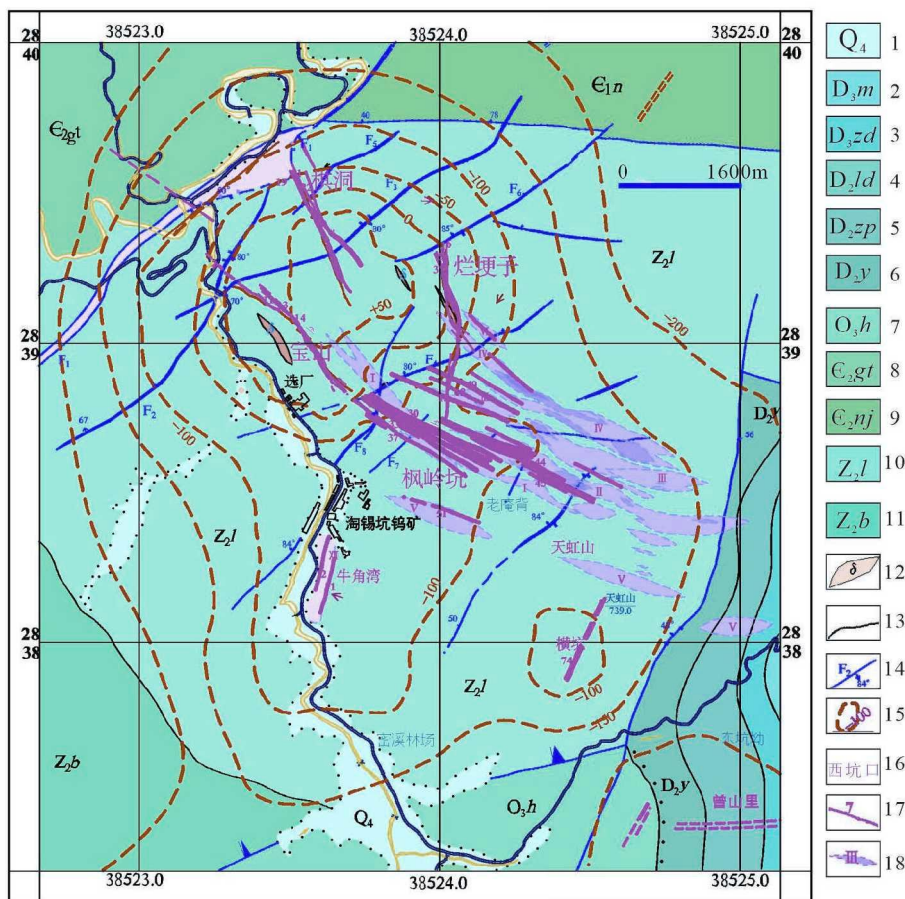
图1 淘锡坑钨矿床外围区域地质简图(据江西省地质矿产勘查开发局赣南地质调查大队,2018修改)

Fig.1 The regional geological sketch map of the Taosikeng tungsten deposit and its periphery (modified from Jiangxi Geology and Mining Bureau Gannan Geological Survey Brigade, 2018)

铜矿、闪锌矿等,最晚是方解石、萤石、层解石和绢云母等,但石英、萤石、黄铁矿等的生成几乎贯穿整个成矿过程,有用矿物结晶程度较好。根据矿物共生组合和矿物生成顺序矿物组合理出的矿物大致的生成顺序从早到晚为:硅酸盐-氧化物组合→黑钨矿-硫化物-石英组合→碳酸盐-萤石-石英组合(宋生琼,2011)。矿体在垂向上呈现出分带特征,近地表或矿体上部为黑钨矿-锡石带,中部为黑钨矿-黄铜矿带,下部为黑钨矿-辉钼矿带。辉钼矿的Re-Os等时线年龄变化于(156.4±3.5)~(153.5±2.2)Ma(陈郑辉等,2006;Guo et al.,2011),与隐伏花岗岩体的锆石U-Pb年龄基本一致(宋生琼等,2019)。

2 样品采集

本次Pb同位素测试样品均来自淘锡坑钨矿床坑道新鲜工作面上与黑钨矿紧密共生的黄铁矿、黄铜矿与毒砂(图3a、3b、3c),是主成矿期黑钨矿-硫化物阶段的主要矿石,主要为块状结构。具体采样位置为:枫岭坑356中段30与33号脉,306中段7号与30号脉;宝山056中段的17与18号脉,106中段10号与11号脉,156中段17号脉;烂梗子156中段23号脉,206中段3号脉,256中段5号脉,棋洞156中段23号脉,206中段18号脉,256中段18号脉。共采集11条主成矿期的石英脉体,从056~356不同中段均有采集。用于Pb同位素测试的金



1—第四系全新统;2—泥盆系上犹麻山组;3—泥盆系上犹嶂东组;4—泥盆系中统罗段组;5—泥盆系中统中棚组;6—泥盆系中统云山组;7—奥陶系黄竹洞组;8—寒武系中统高滩组;9—寒武系下统牛角河组;10—震旦系中统老虎塘组;11—震旦系中统坝里组;12—闪长岩脉;13—地质界线;14—断裂产状及编号;15—隐伏花岗岩体灯板等值线;16—矿化区段;17—矿体及编号;18—矿化标志带

图2 淘锡坑矿床地质简图(据江西省地质矿产勘查开发局赣南地质调查大队,2018)

Fig.2 The geological sketch map of the Taoxikeng tungsten deposit (modified from Jiangxi Geology and Mining Bureau Gannan Geological Survey Brigade, 2018)

属硫化物样品首先在中国科学院地球化学研究所选矿实验室进行碎样,碎样时尽量不破坏黄铁矿、黄铜矿及毒砂的晶型,然后进行筛分、清洗、脱水与干燥,最后在显微镜下挑选出晶型较好且没有杂质的硫化物样品研磨成粉末状。

本次用于花岗岩组分分析样品采自淘锡坑钨矿床006、056中段的坑道(图3d、3e),均为新鲜中细粒黑云母花岗岩(图3f、3g、3h),主要采自宝山006中段11号脉和25号脉体旁边,以及056中段Vn7号和18号脉体边上。样品在中国科学院地球化学研究所选矿实验室进行碎样、清洗、脱水与干燥,最后研磨成粉末状。

3 测试方法

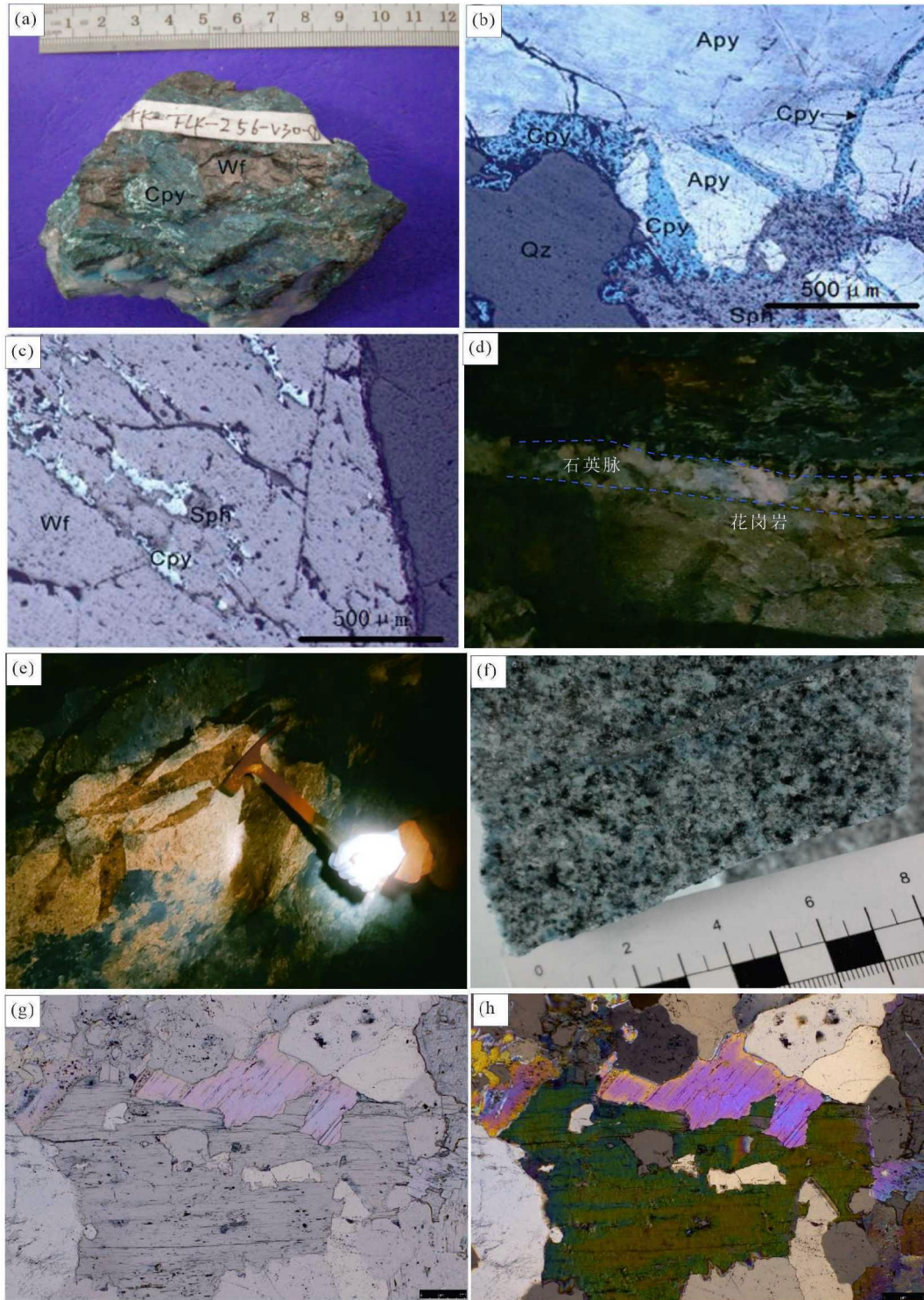
花岗岩样品的主量元素组成在澳实矿物实验室采用硼酸锂-硝酸锂熔融法,利用X射线荧光光谱(XRF)分析测试,检测方法主要依据GB/T14506.28-2010《硅酸盐岩石化学分析方法第28部分:16个主次

分量测定》,具体参考Xu等(2022)。 Pb 同位素样品由北京核工业地质分析测试研究中心分析,测试仪器为ISOPROBE-T热电离质谱仪。分析流程为:称取适量样品放入聚四氟乙稀坩埚中,加入氢氟酸、高氯酸溶样(宋生琼,2011)。样品分解后将其蒸干,再加入盐酸溶解蒸干,加入0.5 mol/L HBr溶液溶解样品进行Pb的分离;将溶解样品倒入预先处理好的强碱性阴离子交换树脂中进行Pb分离,用0.5 mol/L HBr溶液淋洗树脂,然后上机进行Pb同位素测量(宋生琼,2011)。1 μg Pb的 $^{208}Pb/^{206}Pb$ 测量精度 $\leq 0.005\%$,误差以 2σ 计。检测方法主要依据GB/T17672-1999《岩石中铅铋钨同位素测定方法》。

4 测试结果

4.1 花岗岩主量元素组成

通过测试获得BS-006-V11、BS-006-V25、QT-056-V18和QT-056-Vn7四件样品中细粒黑云母花岗岩



(a)黑钨矿-黄铁矿-黄铜矿-石英组合矿石标本;(b)黑钨矿-毒砂-石英显微照片;(c)黑钨矿-黄铜矿显微照片;(d)花岗岩-石英脉与变质岩的接触关系;(e)坑道中细粒黑云母花岗岩;(f)中细粒黑云母花岗岩手标本;(g)中细粒黑云母花岗岩单偏光照片;(h)中细粒黑云母花岗岩正交偏光照片。
矿物符号:Wf—黑钨矿;Py—黄铁矿;Cpy—黄铜矿;Apy—毒砂;Qz—石英;Ms—白云母;Bt—黑云母;Ga—石榴子石

图3 淘锡坑钨矿床部分样品标本、显微照片及坑道照片

Fig.3 Photos and micrographs of some samples of the granite intrusion from the Taoxikeng tungsten deposit

的化学成分(表1)。由表1可见,样品的SiO₂含量为73.29%~75.97%,Al₂O₃为12.78%~13.31%,TFe₂O₃为0.68%~2.40%,MgO为0.02%~0.19%,CaO为0.45%~0.73%,K₂O为4.08%~4.72%,Na₂O为2.21%~3.93%。

4.2 硫化物Pb同位素组成

本次测试的32件硫化物样品(毒砂4件,黄铁矿20件,黄铜矿8件)的Pb同位素组成见表2。其中,5件样品(TF-356-30-1,TL-206-3-1,TL-256-5-2,TF-306-30-

表1 隐伏花岗岩岩石化学成分分析结果

Table 1 The analytical results of major elements of samples from the concealed granite intrusion (%)													
样品编号	SiO ₂	TiO ₂	Al ₂ O ₃	TFe ₂ O ₃	MnO	MgO	CaO	Na ₂ O	K ₂ O	P ₂ O ₅	烧失量	总量	来源
BS-006-V11	73.29	0.03	12.91	1.93	0.15	0.06	0.58	2.94	4.47	0.01	1.97	73.29	本文
BS-006-V25	75.31	0.03	12.78	2.15	0.13	0.13	0.65	2.44	4.72	<0.01	1.12	75.31	
QT-056-V18	75.84	0.01	13.11	1.39	0.1	0.02	0.45	3.35	4.65	<0.01	0.9	75.84	
QT-056-Vn7	75.52	0.02	12.95	2.40	0.15	0.19	0.73	2.21	4.08	<0.01	1.49	75.52	
ZK401-3	75.97	0.02	13.08	0.68	0.06	0.02	0.57	3.89	4.45	0.01	0.85	75.97	郭春丽, 2010
ZK401-4	75.65	0.03	13.31	0.86	0.07	0.03	0.62	3.69	4.62	0.02	0.85	75.65	
ZK401-5	75.95	0.02	13.25	0.76	0.08	0.03	0.64	3.81	4.45	0.01	0.85	75.95	
ZK401-6	75.50	0.05	13.26	1.39	0.12	0.06	0.53	3.09	4.63	0.02	1.15	75.50	

1, TB-056-18)的²⁰⁶Pb/²⁰⁴Pb值为17.545~18.473, ²⁰⁷Pb/²⁰⁴Pb为15.500~15.670, ²⁰⁸Pb/²⁰⁴Pb为38.291~39.177, 数值较小但变化范围较大; 其余27件样品的²⁰⁶Pb/²⁰⁴Pb值为18.560~18.689, ²⁰⁷Pb/²⁰⁴Pb为15.703~15.746, ²⁰⁸Pb/²⁰⁴Pb为38.935~39.089, Pb同位素组成相对稳定。

5 成矿物质来源

5.1 花岗岩源区性质

本次测试隐伏花岗岩主要为中细粒黑云母花岗岩, 结合郭春丽(2010)对淘锡坑花岗岩体的测试数据来看, 其MgO、CaO含量很低, 均小于1%, K₂O/Na₂O值为1.14~1.93, 大于1, K₂O含量为4.08%~4.72%, 平均4.54%, 具有高钾特征。7.16% < (K₂O+Na₂O) < 8.48%, 富碱。前人研究认为, 赣南钨矿床与碰撞环境中形成的陆壳改造型(S型)花岗岩有关。S型花岗岩一般富含富铝矿物, 且具有较高的P₂O₅含量(King et al, 1997), 而淘锡坑隐伏花岗岩的P₂O₅含量较低, 大都低于0.01%; 在FeO/(FeO+MgO)-SiO₂图解中(图4), 显示为A型花岗岩; 在花岗岩SiO₂-K₂O图解中, 落入高钾钙碱性系列范围(图5)。袁莹等(2014)对区内致矿花岗岩进行了矿物组合研究, 显示矿物为石英、钾长石、钠长石和云母, 同时利用前人测得的花岗岩化学成分换算CIPW标准矿物投影于QAP图解中, 6个样品均落入碱长花岗岩与花岗岩的交界区域或花岗岩区内。综合以上研究结果, 可认为该区隐伏花岗岩并不具有典型S型花岗岩的特征。

关于A型花岗岩的成因, 前人争论较多, 其中, Yang等(2005)和Zhong等(2007)认为A型花岗岩的成因主要有在幔源挥发分的加入下导致地壳的部分熔融、残余麻粒岩低程度的熔融和存在或不存在地壳混染的幔源岩浆的结晶分异三种。He-Ar同位素研究显示, 淘锡坑矿床的成矿流体有地幔流体的加入(宋生琼

等, 2019)。由此看来, 淘锡坑隐伏花岗岩可能是由于幔源挥发分的加入导致地壳的部分熔融所形成的高钾钙碱性A型花岗岩。

5.2 成矿物质来源

Pb同位素在除放射性衰变以外的物理、化学及生物过程中均不会发生较大分馏, 在成矿物质运移和沉淀过程中能保持相对稳定, 是示踪成矿物质来源最直接而有效的方法之一(Zhu, 1995; Canals and Cardellach, 1997; Mirnejad et al., 2011; 宋生琼, 2011; 陈智明等, 2018)。多数金属矿物的U、Th含量低, 形成后的放射成因Pb几乎可以忽略不计, 其Pb同位素组成与其物质来源区的Pb同位素组成接近(陈智明等, 2018)。本次研究样品均采自地下坑道主成矿期, 样品新鲜, 获得的Pb同位素能够示踪其成因信息。Zartman(1974)首次阐明了矿床Pb同位素组成与大陆地壳地球化学特征之间的相关性, 并得到Bouse等(1999)、Huston等(2016)及Chugaev等(2020)先后证实。Zartman和Doe于1981年提出的Pb构造模式图给出了不同源区Pb同位素随时间演化的趋势和范围。在²⁰⁶Pb/²⁰⁴Pb-²⁰⁷Pb/²⁰⁴Pb图解与²⁰⁸Pb/²⁰⁴Pb-²⁰⁷Pb/²⁰⁴Pb构造模式图解中, 研究样品的Pb同位素组成以分布在上地壳Pb演化线上方为主, 仅有2个样品落在上地壳与造山带之间, 1个样品落在造山带增长线上, 可见矿石Pb的来源应是以上地壳为主, 同时上地壳Pb与造山带Pb可能发生了部分混合作用; 此外, 在²⁰⁸Pb/²⁰⁴Pb-²⁰⁷Pb/²⁰⁴Pb构造模式图解中, 地幔增长线附近有2个样品投在这个区域, 反映可能有部分地幔物质的参与成矿作用。

朱炳泉等(1998)认为, 构造模式图中造山带Pb的成因来源为高μ值的整合Pb、海底热水作用Pb、俯冲带的壳幔混合Pb和部分沉积与变质作用Pb几种, 并制作了不同成因类型矿石矿物的Δβ-Δγ变化范围图解, 这一图解消除了时间因素的影响, 示踪意义更好(郑明华等, 2001)。在Δβ-Δγ图解中(图7), 本次研究样品点

表2 淘锡坑钨矿床硫化物Pb同位素组成

Table 2 The lead isotopic compositions of sulfides in the Taoxikeng tungsten deposit

样品编号	矿石名称	$^{208}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$	$^{207}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$	$^{206}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$	$^{207}\text{Pb}/^{206}\text{Pb}$	$\Delta\alpha$	$\Delta\beta$	$\Delta\gamma$	$\delta^{34}\text{S}_{\text{CDT}}/\text{‰}$
TF-356-30-1	毒砂	38.48	15.5	17.698	0.876	30.82	11.45	33.5	-1.5
TF-356-30-2	毒砂	38.989	15.725	18.659	0.843	86.79	26.13	47.17	-1.4
TF-356-30-3	毒砂	39.027	15.728	18.593	0.846	82.94	26.33	48.19	-1.8
TF-356-30-4	毒砂	38.967	15.721	18.663	0.842	87.02	25.87	46.58	-1.5
TB-156-17-3	黄铁矿	39.067	15.746	18.676	0.843	87.78	27.5	49.26	-0.4
TB-106-11	黄铁矿	38.971	15.725	18.663	0.843	87.02	26.13	46.69	-2.1
TB-156-17-1	黄铁矿	38.997	15.729	18.668	0.843	87.31	26.39	47.38	-1.4
TB-106-10	黄铁矿	38.99	15.73	18.663	0.843	87.02	26.46	47.2	-1.4
TXK-XC-1	黄铁矿	38.935	15.705	18.56	0.846	81.02	24.83	45.72	-1.3
TXK-XC-4	黄铁矿	38.978	15.72	18.622	0.844	84.63	25.81	46.87	-1
TQ-256-23	黄铁矿	39.016	15.735	18.67	0.843	87.43	26.78	47.89	-1.6
TQ-256-18-1	黄铁矿	38.95	15.721	18.65	0.843	86.26	25.87	46.12	-1.9
TQ-256-18-2	黄铁矿	38.953	15.711	18.613	0.844	84.11	25.22	46.2	-2.1
TQ-206-18	黄铁矿	38.968	15.722	18.659	0.843	86.79	25.94	46.6	-1.5
TQ-156-23	黄铁矿	39.022	15.735	18.675	0.843	87.72	26.78	48.05	-0.8
TL-206-2	黄铁矿	38.963	15.723	18.631	0.844	85.16	26	46.47	-1.1
TL-206-3-1	黄铁矿	38.291	15.518	17.545	0.884	21.9	12.62	28.42	-0.8
TL-206-3-2	黄铁矿	39.031	15.738	18.678	0.843	87.9	26.98	48.3	-0.5
TL-256-5-1	黄铁矿	38.975	15.74	18.689	0.842	88.54	27.11	46.79	0.1
TL-256-5-2	黄铁矿	38.713	15.624	18.158	0.860	57.61	19.54	39.76	-1.6
TF-306-30-1	黄铁矿	39.015	15.735	18.681	0.842	88.07	26.78	47.87	0
TF-306-7-2	黄铁矿	38.994	15.727	18.646	0.843	86.03	26.26	47.3	-1.6
TF-356-33-1	黄铁矿	39.023	15.727	18.651	0.843	86.32	26.26	48.08	-1.4
TF-306-30-2	黄铁矿	39.177	15.64	18.473	0.847	75.96	20.59	52.22	-1.7
TF-306-37	黄铜矿	39.014	15.734	18.689	0.842	88.54	26.72	47.84	-2.3
TB-106-11	黄铜矿	39.089	15.703	18.634	0.843	85.33	24.7	49.85	-1.7
TQ-156-23	黄铜矿	39.045	15.736	18.684	0.842	88.25	26.85	48.67	-1.6
TB-156-17	黄铜矿	39.02	15.732	18.68	0.842	88.01	26.59	48	-1.6
TB-156-14-2	黄铜矿	39.07	15.732	18.664	0.843	87.08	26.59	49.34	-2
TQ-256-18	黄铜矿	39.036	15.727	18.673	0.842	87.6	26.26	48.43	-1.4
TB-056-17	黄铜矿	39.028	15.739	18.681	0.843	88.07	27.05	48.22	-1.3
TB-056-18	黄铜矿	38.803	15.67	18.353	0.854	68.97	22.54	42.17	-2.1

注: S同位素数据引自宋生琼等(2011)。

有30个落在上地壳Pb范围样品,有2个落在造山带Pb范围(TF-356-30-1与TL-206-3-1),有2个样品(TB-056-18与TL-256-5-2)落在岩浆作用靠近上地壳与地幔混合的俯冲带Pb位置。由此看来,淘锡坑矿床中的矿石Pb主要来源于上地壳,部分形成上地壳和地幔混合的造山带Pb。这种具有壳源与幔源Pb,以壳源Pb为主的特征,说明淘锡坑钨矿床的Pb应主要为上地壳物质重熔成因,但上地壳重熔物质中包含有少量壳幔混合成因的岩浆岩。

参考其他同位素地球化学特征进行矿床成矿物质的综合分析,可以更加准确地了解Pb的来源。从Pb同位素组成来看,5个样品(TF-356-30-1, TL-206-3-1, TL-256-5-2, TF-306-30-2, TB-056-18)的 $^{206}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$ 、 $^{207}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$ 、 $^{208}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$ 数值较小但变化范围较大,在图6和图7中它们更接近造山带Pb或地幔Pb。作者对淘锡坑同样品的He-Ar同位素研究发现,TF-356-30-1毒砂样品的 $^3\text{He}/^4\text{He}=1.86\text{Ra}$ (Ra为空气的 $^3\text{He}/^4\text{He}$ 值, $1\text{Ra}=1.39\times 10^{-6}$),TF-306-30-2毒砂样品的

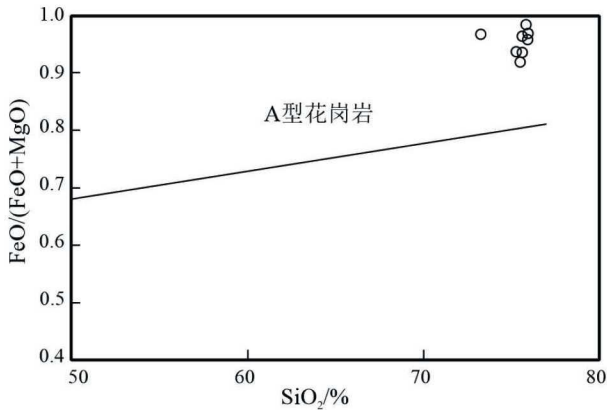


图4 花岗岩的FeO/(FeO+MgO)-SiO₂的组成图
(底图据Frost et al.,2001)

Fig.4 The diagram of FeO/(FeO+MgO) vs. SiO₂ of granite samples (modified after Frost et al.,2001)

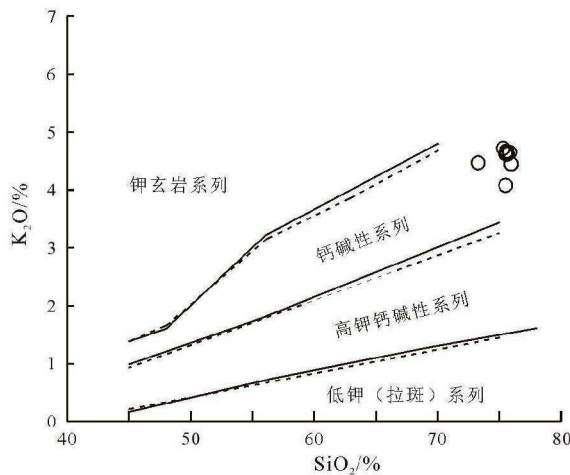
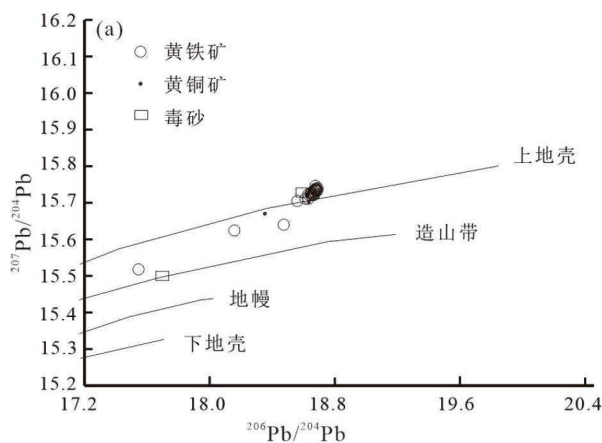


图5 花岗岩SiO₂-K₂O图解(底图据Peccerillo and Taylor,1976)

Fig.5 The SiO₂-K₂O diagram of granite samples (modified after Peccerillo and Taylor,1976)



³He/⁴He=2.09Ra, TL-256-5-2黄铁矿样品的³He/⁴He=0.67Ra(宋生琼等,2019)。根据流体中³He/⁴He>0.1 Ra就表明成矿流体中含幔源流体的研究结果(Ballentine et al.,2002),说明这几个样品均受到了来自地幔物质的混合作用。一般而言,对于具有明显不同组成的两个来源的混合,其Pb-S同位素图解中往往会表现出明显的线性关系(祝新友等,2012,2017)。将本文所有Pb同位素样品测试结果(表2)与S同位素研究结果(宋生琼等,2011)结合起来研究,淘锡坑钨矿床各硫化物样品的Pb-S同位素图解(图8)显示其Pb-S同位素组成有两个方向的线性关系:R1方向,5个样品的He-Ar同位素显示有地幔物质参与成矿作用,因此R1应为地幔与地壳的混合,涉及样品的Pb同位素组成主要代表造山带Pb; R2方向,涉及样品的Pb同位素组成在图6和图7中均为地壳Pb。综上所述,笔者认为与淘锡坑钨矿床相关的中细粒黑云母花岗岩主要为上地壳物质重熔成因,但其上地壳源区可能含有造山过程中侵入的少量壳幔混合成因岩浆岩。由于花岗岩与钨矿床成岩成矿时代一致,H-O同位素组成显示其成矿流体主要来自花岗岩浆(宋生琼等,2011),结合Pb同位素研究结果,笔者认为成矿流体中W和Pb等成矿金属元素,应主要来自含少量壳幔混合成因岩浆岩的上地壳物质重熔而形成的花岗岩浆。

6 成矿背景

有研究获得淘锡坑钨矿床隐伏花岗岩体中锆石的U-Pb年龄为(158.7±3.9)Ma和(157.6±3.5)Ma(郭春丽等,2007),矿石中白云母的Ar-Ar年龄为(155±1.4)~(152.7±1.5)Ma(郭春丽等,2008;Guo et al.,2011),辉钨矿的Re-Os等时线年龄为(156.4±3.5)~(153.5±2.2)Ma(陈郑辉等,2006;Guo et al.,2011),黑钨矿的

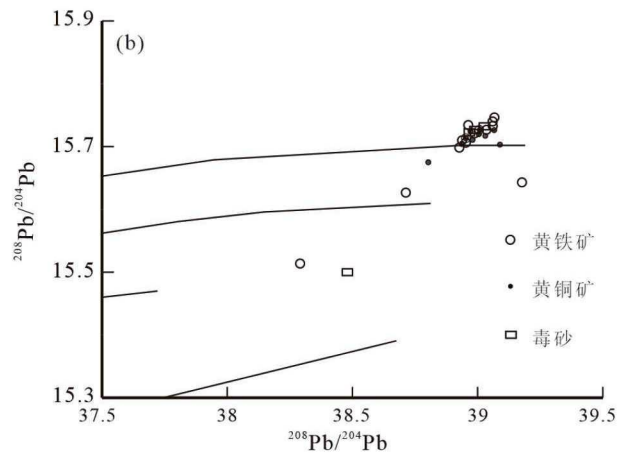
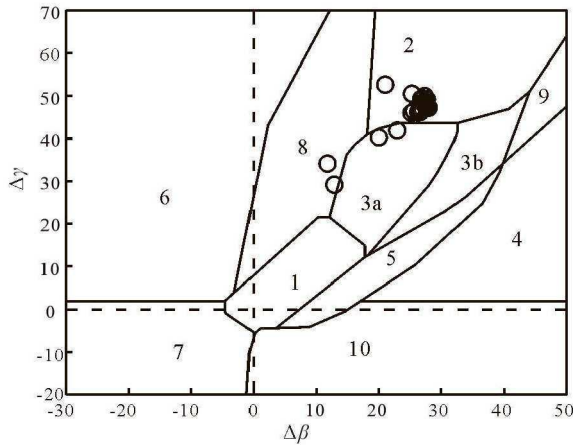


图6 淘锡坑钨矿床硫化物Pb同位素组成(底图据Zartman and Doe,1981)

Fig.6 Diagrams of lead isotopic compositions of sulfides in the Taoxikeng tungsten deposit (modified after Zartman and Doe,1981)



1—地幔源铅;2—上地壳源铅;3—上地壳与地幔混合的俯冲带铅(3a—岩浆作用;3b—沉积作用);4—化学沉积型铅;5—海底热水作用铅;6—中深变质作用铅;7—深变质下地壳铅;8—造山带铅;9—古老页岩上地壳铅;10—退变质铅

图7 淘锡坑钨矿床矿石Pb同位素 $\Delta\beta$ - $\Delta\gamma$ 成因判别图解
(底图据朱炳泉等,1998)

Fig.7 The diagram of $\Delta\beta$ - $\Delta\gamma$ values of sulfide lead isotopes for discriminating genesis of the ore-forming materials in the Taoxikeng tungsten deposit (modified after Zhu et al., 1998)

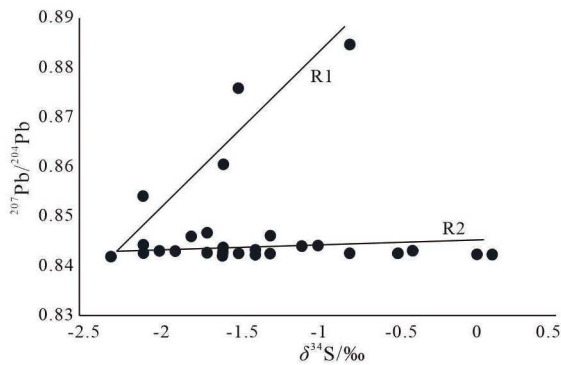


图8 淘锡坑钨矿床硫化物Pb-S同位素图解

Fig.8 Plot of Pb isotopes vs. S isotopes of sulfide minerals in the Taoxikeng tungsten deposit

U-Pb等时线年龄为 $(153.8 \pm 4) \text{Ma}$ (Liu et al., 2022)。由此指示花岗岩的成岩年龄与淘锡坑钨矿床的成矿时代基本一致。前人研究表明,华南在中生代发生了大规模的成岩成矿事件,地球动力学背景与软流圈上涌、岩石圈减薄、地壳伸展等有关(Xu et al., 1999; 韦龙明等, 2014; 徐义刚和樊祺诚, 2015)。结合Hu等(2012)的研究结果,笔者认为软流圈上涌、岩石圈减薄、地壳伸展等有关动力背景为深部地幔流体提供了向上侵入的构造通道,由此带来的热引起含有部分壳幔混合物质的上地壳进行重熔,形成致矿花岗岩浆。花岗岩浆沿着有利的构造通道侵入发生分异演化,形成富含钨等成矿物质的高温成矿流体,流体向岩体周围的构造

裂隙运移,后因与低温大气降水混合导致条件变化而造成钨等成矿元素析出而成矿。

7 结论

(1)与淘锡坑钨矿床相关的隐伏中细粒黑云母花岗岩并非典型的S型花岗岩,而是高钾钙碱性系列的A型花岗岩。

(2)淘锡坑钨矿床硫化物矿物的Pb同位素组成主要显示上地壳Pb特征,少量样品显示造山带或地幔Pb特征,指示花岗岩主要为上地壳物质重熔成因,但其上地壳重熔源区中包含少量壳幔混合成因的岩浆岩。

(3)淘锡坑钨矿床成矿流体中钨和Pb等成矿金属元素,主要来自含少量壳幔混合成因岩浆岩的上地壳物质经重熔而形成的花岗岩浆。

作者贡献声明: 宋生琼, 样品采集、数据分析、文章撰写; 魏文凤, 样品采集。

利益冲突声明: 作者保证本文无利益冲突。

致谢: 研究工作得到中国科学院地球化学研究所胡瑞忠院士的指导,并得到章源钨业股份有限公司地质总工程师郭淑庆、大余石雷钨矿副矿长骆晓毅以及淘锡坑钨矿地质科科长刘小林、贵州建材总队谭健工程师等的大力帮助,在此一并致谢。

参考文献 (References):

- Ballentine C J, Burgess R, Marty B. 2002. Tracing fluid origin, transport and interaction in the crust. *Reviews in Mineralogy and Geochemistry*, 47(1): 539-614
- Beran A, Göd R, Göttinger M, Zemann J. 1985. A scheelite mineralization in calc-silicate rocks of the Moldanubicum (Bohemian Massif) in Austria. *Mineralium Deposita*, 20(1): 16-22
- Bouse R M, Ruiz J, Tittle S R, Tosdal R M, Wooden J L. 1999. Lead isotope compositions of Late Cretaceous and early Tertiary igneous rocks and sulfide minerals in Arizona; implications for the sources of plutons and metals in porphyry copper deposits. *Economic Geology*, 94(2): 211-244
- 蔡运花, 蔡永丰. 2016. 赣南淘锡坑花岗岩地球化学特征及其对钨成矿作用的意义. *地质与资源*, 25(3): 275-280 [Cai Y H, Cai Y F. 2016. Geochemical characteristics and mineralization significance of the taoxikeng granite in southern Jiangxi Province, China. *Geology and Resources*, 25(3): 275-280 (in Chinese with English abstract)]
- 蔡应雄, 杨红梅, 卢山松, 曾飞, 杨文武, 刘重凡, 童喜润, 张利国, 何波. 2021. 黔西南紫木沱金矿床成矿物质来源: S-C-O-Pb-Sr 同位素制约. *地球科学*, 46(12): 4316-4333 [Cai Y X, Yang H M, Lu S S, Zeng F, Yang W W, Liu C P, Tong X R, Zhang L G, He B. 2021. Source of mineralization in the Zimu cesspit gold deposit, Qianxinan: S-C-O-Pb-Sr isotope constraints. *Earth Science*, 46(12): 4316-4333 (in Chinese with English abstract)]
- Canals A, Cardellach E. 1997. Ore lead and sulphur isotope pattern from the low-temperature veins of the Catalan Coastal Ranges (NE Spain).

- Mineralium Deposita, 32(3): 243–249
- 陈郑辉, 王登红, 屈文俊, 陈毓川, 王平安, 许建祥, 张家菁, 许敏林. 2006. 赣南崇义地区淘锡坑钨矿的地质特征与成矿时代. 地质通报, 25(4): 496–501 [Chen Z H, Wang D H, Qu W J, Chen Y C, Wang P A, Xu J X, Zhang J J, Xu M L. 2006. Geological characteristics and mineralization age of the Taoxikeng tungsten deposit in Chongyi County, southern Jiangxi Province, China. Geological Bulletin of China, 25(4): 496–501 (in Chinese with English abstract)]
- 陈智明, 王大鹏, 李山志. 2018. 滇东南南捞铜钨矿床S-Pb同位素特征. 矿物学报, 38(2): 196–204 [Chen Z M, Wang D P, Li S Z. 2018. Sulfur and lead isotopic geochemistry of Nanlao Cu-W deposit in southeastern Yunnan Province, China. Acta Mineralogica Sinica, 38(2): 196–204 (in Chinese with English abstract)]
- Chugaev A V, Dubinina E O, Chernyshev I V, Travin A V, Kossova S A, Larionova Y O, Nosova A A, Plotinskaya O Y, Oleinikova T I, Sadasuyk A S. 2020. Sources and age of the gold mineralization of the irokinda deposit, northern transbaikalia: Evidence from Pb, S, Sr, and Nd isotope-geochemical and ^{39}Ar – ^{40}Ar geochronological data. Geochemistry International, 58(11): 1208–1227
- Chugaev A V, Vanin V A, Chernyshev I V, Shatagin K N, Rassokhina I V, Sadasuyk A S. 2022. Lead isotope systematics of the orogenic gold deposits of the baikal-muya belt (northern transbaikalia): Contribution of the subcontinental lithospheric mantle in their genesis. Geochemistry International, 60(13): 1352–1379
- Dai J F, Xu D R, Chi G X, Li Z H, Deng T, Zhang J, Li B. 2022. Origin of the Woxi orogenic Au-Sb-W deposit in the West Jiangnan Orogen of South China: Constraints from apatite and wolframite U-Pb dating and pyrite *in situ* S-Pb isotopic signatures. Ore Geology Reviews, 150: 105134
- 杜玉雕, 刘家军, 余心起, 周翔, 杨赫鸣, 杨隆勃, 黄永海. 2013. 安徽逍遥钨多金属矿床成矿物质来源与成矿: 碳、硫和铅同位素证据. 中国地质, 40(2): 566–579 [Du Y D, Liu J J, Yu X Q, Zhou X, Yang H M, Yang L B, Huang Y H. 2013. The sources of metallogenic materials and mineralization of the Xiaoyao Wpolymetallic deposit in Anhui Province: Evidence from carbon, sulfur and lead isotopes. Geology in China, 40(2): 566–579 (in Chinese with English abstract)]
- Fernandes N A, Olivo G R, Layton-Matthews D, Voinot A, Chipley D, Leybourne M, Reith W, Leduc E, Diniz-Oliveira G, Kyser T K. 2021. Metal sources in the Proterozoic Vazante-Paracatu sediment-hosted Zn District, Brazil: Constraints from Pb isotope compositions of meta-siliciclastic units. The Canadian Mineralogist, 59(5): 1187–1205
- Frost B R, Barnes C G, Collins W J, Arculus R J, Ellis D J, Frost C D. 2001. A geochemical classification for granitic rocks. Journal of Petrology, 42(11): 2033–2048
- 郭春丽, 蔺志永, 王登红, 陈文, 张彦, 丰成友, 陈郑辉, 曾载淋, 蔡汝青. 2008. 赣南淘锡坑钨多金属矿床花岗岩和云英岩岩石特征及云英岩中白云母 ^{40}Ar / ^{39}Ar 定年. 地质学报, 82(9): 1274–1284 [Guo C L, Lin Z Y, Wang D H, Chen W, Zhang Y, Feng C Y, Chen Z H, Zeng Z L, Cai R Q. 2008. Petrologic characteristics of the granites and greisens and muscovite ^{40}Ar / ^{39}Ar dating in the taoxikeng tungsten polymetallic deposit, southern Jiangxi Province. Acta Geologica Sinica, 82(9): 1274–1284 (in Chinese with English abstract)]
- Guo C L, Mao J W, Bierlein F, Chen Z H, Chen Y C, Li C B, Zeng Z L. 2011. SHRIMP U-Pb (zircon), Ar-Ar (muscovite) and Re-Os (molybdenite) isotopic dating of the Taoxikeng tungsten deposit, South China Block. Ore Geology Reviews, 43(1): 26–39
- 郭春丽, 王登红, 陈毓川, 王彦斌, 陈郑辉, 刘善宝. 2007. 赣南中生代淘锡坑钨矿区花岗岩锆石SHRIMP年龄及石英脉Rb-Sr年龄测定. 矿床地质, 26(4): 432–442 [Guo C L, Wang D H, Chen Y C, Wang Y B, Chen Z H, Liu S B. 2007. Precise zircon SHRIMP U-Pb and quartz vein Rb-Sr dating of Mesozoic Taoxikeng tungsten polymetallic deposit in southern Jiangxi. Mineral Deposits, 26(4): 432–442 (in Chinese with English abstract)]
- 郭春丽. 2010. 赣南崇义—上犹地区与成矿有关中生代花岗岩类的研究及对南岭地区中生代成矿花岗岩的探讨(博士学位论文). 北京: 中国地质科学院 [Guo C L. 2010. Study on Mesozoic granitoids related to mineralization in Chongyi and Shangyu areas of Gannan and discussion on Mesozoic mineralized granitoids in Nanling area (Doctoral dissertation, Chinese Academy of Geological Sciences). Beijing: Chinese Academy of Geological Sciences (in Chinese with English abstract)]
- Hu R Z, Bi X W, Jiang G H, Chen H W, Peng J T, Qi Y Q, Wu L Y, Wei W F. 2012. Mantle-derived noble gases in ore-forming fluids of the granite-related Yaogangxian tungsten deposit, Southeastern China. Mineralium Deposita, 47(6): 623–632
- 胡瑞忠, 毛景文, 华仁民, 范蔚茗. 2015. 华南陆块陆内成矿作用. 北京: 科学出版社 [Hu R Z, Mao J W, Hua R M, Fan W M. 2015. Intracontinental Mineralization of South China Landmass. Beijing: Science Press (in Chinese)]
- Huston D L, Mernagh T P, Hagemann S G, Doublier M P, Fiorentini M, Champion D C, Lynton Jaques A, Czarnota K, Cayley R, Skirrow R, Bastrakov E. 2016. Tectono-metallogenic systems—The place of mineral systems within tectonic evolution, with an emphasis on Australian examples. Ore Geology Reviews, 76: 168–210
- 江西省地质矿产勘查开发局赣南地质调查大队. 2018. 江西省崇义县淘锡坑矿区钨矿资源储量核实报告. 江西: 崇义章源钨业股份有限公司 [Jiangxi Geology and Mining Bureau Gannan Geological Survey Brigade. 2018. Verification Report of Tungsten Ore Reserves in Taoxikeng Mining Area, Chongyi County, Jiangxi Province. Jiangxi: Chongyi Zhangyuan Tungsten Industry Co., Ltd (in Chinese)]
- King P L, White A J R, Chappell B W, Allen C M. 1997. Characterization and origin of aluminous A-type granites from the Lachlan fold belt, southeastern Australia. Journal of Petrology, 38(3): 371–391
- 李洪茂, 时友东, 刘忠, 王宝山, 王泽利, 邱希萍. 2006. 东昆仑山若羌地区白干湖钨锡矿床地质特征及成因. 地质通报, 25(S1): 277–281 [Li H M, Shi Y D, Liu Z, Wang B J, Wang Z L, Qiu X P. 2006. Geological characteristics and genesis of Baiganhu tungsten-tin deposit in Ruoqiang area of East Kunlun Mountain. Geological Bulletin of China, 25(S1): 277–281 (in Chinese)]
- 李水如, 魏俊浩, 邓军, 谭俊. 2007. 广西大明山矿集区钨多金属矿床类型及控矿因素与找矿标志. 中国钨业, 22(6): 19–24 [Li S R, Wei J H, Deng J, Tan J. 2007. Ore types of tungsten poly-metallic deposits and prospecting indications. China Tungsten Industry, 22(6): 19–24 (in Chinese with English abstract)]
- Liu X X, Zhang J, Huang F, Cheng J W, Lu K X, Yang J F, Wang M, Wang Y X, Qiu J W, Zhang X Y. 2022. Tungsten deposits in southern Jiangxi Province: Constraints on the origin of wolframite from *in situ* U-Pb isotope dating. Ore Geology Reviews, 143: 104774

- Mao J W, Cheng Y B, Chen M H, Pirajno F. 2013. Major types and time-space distribution of Mesozoic ore deposits in South China and their geodynamic settings. *Mineralium Deposita*, 48(3): 267-294
- Mirnejad H, Simonetti A, Molasalehi F. 2011. Pb isotopic compositions of some Zn-Pb deposits and occurrences from Urumieh-Dokhtar and Sanandaj-Sirjan zones in Iran. *Ore Geology Reviews*, 39(4): 181-187
- 聂荣峰, 王旭东. 2007. 赣南钨矿研究进展. *中国钨业*, 22(3): 1-5 [Nie R F, Wang X D. 2007. On research advancement of southern Jiangxi's tungsten deposits. *China Tungsten Industry*, 22(3): 1-5 (in Chinese with English abstract)]
- Peccerillo A, Taylor S R. 1976. Geochemistry of Eocene calc-alkaline volcanic rocks from the Kastamonu area, Northern Turkey. *Contributions to Mineralogy and Petrology*, 58(1): 63-81
- Plimer I R. 1994. Strata-bound scheelite in meta-evaporites, broken hill, Australia. *Economic Geology*, 89(3): 423-437
- Singh S K, Singh S. 2001. Geochemistry and tungsten metallogeny of the balda granite, Rajasthan, India. *Gondwana Research*, 4(3): 487-495
- 宋生琼, 胡瑞忠, 毕献武, 魏文凤, 石少华. 2011. 赣南崇义钨锡坑钨矿床氢、氧、硫同位素地球化学研究. *矿床地质*, 30(1): 1-10 [Song S Q, Hu R Z, Bi X W, Wei W F, Shi S H. 2011. Hydrogen, oxygen and sulfur isotope geochemical characteristics of Taoxikeng tungsten deposit in Chongyi County, Southern Jiangxi Province. *Mineral Deposits*, 30(1): 1-10 (in Chinese with English abstract)]
- 宋生琼, 潘力川, 魏文凤. 2019. 赣南钨锡坑钨矿床He-Ar同位素地球化学研究. *岩石学报*, 35(1): 243-251 [Song S Q, Pan L C, Wei W F. 2019. He and Ar isotopes of ore-forming fluids in the Taoxikeng tungsten deposit, southern Jiangxi Province, China. *Acta Petrologica Sinica*, 35(1): 243-251 (in Chinese with English abstract)]
- 宋生琼. 2011. 赣南钨锡坑钨矿床成矿流体地球化学和成矿机理研究(博士学位论文). 北京: 中国科学院研究生院 [Song S Q. 2011. Study on Geochemistry of Ore-Forming Fluid and Metallogenic Mechanism of Taoxikeng Tungsten Deposit in Southern Jiangxi Province(Dissertation). Graduate University of Chinese Academy of Sciences, Beijing (in Chinese with English abstract)]
- 韦龙明, 孔凡乾, 黄朝柱, 孙宁, 翁海蛟. 2014. 南岭石英脉型钨矿“五层楼”矿化模式简述. *矿床地质*, 33(S1): 755-756 [Wei L M, Kong F Q, Huang C Z, Sun N, Weng H J. 2014. Brief introduction of “five floors” mineralization model of Nanling Shi Ying vein tungsten deposit. *Mineral Deposits*, 33(S1): 755-756(in Chinese)]
- Wu Y B, Zheng Y F. 2013. Tectonic evolution of a composite collision orogen: An overview on the Qinling-Tongbai-Hong'an-Dabie-Sulu orogenic belt in central China. *Gondwana Research*, 23(4): 1402-1428
- 吴至军, 徐敏林, 赵磊, 罗仙华, 鄢思涛. 2009. 江西钨锡坑大型钨矿构造控矿机制探讨. *中国钨业*, 24(1): 16-20, 39 [Wu Z J, Xu M L, Zhao L, Luo X H, Wu S T. 2009. The structural ore-controlled mechanism of the large-scaled taoxikeng tungsten ore. *China Tungsten Industry*, 24(1): 16-20, 39 (in Chinese with English abstract)]
- 席斌斌, 张德会, 周利敏, 张文淮, 王成. 2008. 江西省全南县大吉山钨矿成矿流体演化特征. *地质学报*, 82(7): 956-966 [Xi B B, Zhang D H, Zhou L M, Zhang W H, Wang C. 2008. Characteristics of ore-forming fluid evolution in dajishan tungsten deposit, Quannan County, Jiangxi. *Acta Geologica Sinica*, 82(7): 956-966 (in Chinese with English abstract)]
- 向云燕, 严冰, 魏文凤, 梁伟安. 2020. 赣南西华山钨矿床成矿金属来源的铅同位素示踪. *矿物岩石地球化学通报*, 39(6): 1232-1239 [Xiang Y Y, Yan B, Wei W F, Liang W A. 2020. Lead isotopes for tracing metallogenic metal sources of the Xihuashan tungsten deposit in the southern Jiangxi, China. *Bulletin of Mineralogy, Petrology and Geochemistry*, 39(6): 1232-1239 (in Chinese with English abstract)]
- Xu K, Chen S J, Lu J G, Li Y, Zhu X C, Liu J H, Wu X T, Li C. 2022. Palaeosedimentary environment and formation mechanism of high-quality Xujiaba source rocks, Sichuan Basin, South China. *Lithosphere*, 2022(Special 13): 7185107
- 徐敏林, 冯卫东, 张凤荣, 李江东, 罗仙华. 2006. 崇义钨锡坑钨矿成矿地质特征. *资源调查与环境*, 27(2): 159-163 [Xu M L, Feng W D, Zhang F R, Li J D, Luo X H. 2006. Metallogenic characteristics of Taoxikeng wolfram deposit, Chongyi. *Resources Survey & Environment*, 27(2): 159-163 (in Chinese with English abstract)]
- Xu X S, Dong C W, Li W X, Zhou X M. 1999. Late Mesozoic intrusive complexes in the coastal area of Fujian, SE China: The significance of the gabbro-diorite-granite association. *Lithos*, 46(2): 299-315
- 徐义刚, 樊祺诚. 2015. 中国东部新生代火山岩研究回顾与展望. *矿物岩石地球化学通报*, 34(4): 682-689, 673 [Xu Y G, Fan Q C. 2015. Cenozoic volcanism in eastern China: Review and perspectives. *Bulletin of Mineralogy, Petrology and Geochemistry*, 34(4): 682-689, 673 (in Chinese with English abstract)]
- Yang J H, Chung S L, Wilde S A, Wu F Y, Chu M F, Lo C H, Fan H R. 2005. Petrogenesis of post-orogenic syenites in the Sulu Orogenic Belt, East China: Geochronological, geochemical and Nd-Sr isotopic evidence. *Chemical Geology*, 214(1-2): 99-125
- Yu J H, Zhou X M, O'Reilly Y S, Zhao L, Griffin W L, Wang R C, Wang L J, Chen X M. 2005. Formation history and protolith characteristics of granulite facies metamorphic rock in Central Cathaysia deduced from U-Pb and Lu-Hf isotopic studies of single zircon grains. *Chinese Science Bulletin*, 50(18): 2080-2089
- Yuan S D, Mao J W, Cook N J, Wang X D, Liu X F, Yuan Y B. 2015. A Late Cretaceous tin metallogenic event in Nanling W-Sn metallogenic province: Constraints from U-Pb, Ar-Ar geochronology at the Jiepailling Sn-Be-F deposit, Hunan, China. *Ore Geology Reviews*, 65: 283-293
- 袁莹, 祝新友, 李顺庭, 程细音. 2014. 赣南钨锡坑钨矿碱长花岗岩厘定及意义. *矿产勘查*, 5(5): 767-772 [Yuan Y, Zhu X Y, Li S T, Cheng X Y. 2014. Delineation and signification of the alkali feldspar granite in Taoxikeng tungsten deposit, southern Jiangxi. *Mineral Exploration*, 5(5): 767-772 (in Chinese with English abstract)]
- Zartman R E, Doe B R. 1981. Plumbotectonics—The model. *Tectonophysics*, 75(1-2): 135-162
- Zartman R E. 1974. Lead Isotopic Provinces in the Cordillera of the Western United States and their Geologic Significance. *Economic Geology*, 69(6): 792-805
- 翟裕生. 2002. 中国区域成矿特征探讨. *地质与勘探*, 38(5): 1-4 [Zhai Y S. 2002. Some features of regional metallogeny of China. *Geology and Prospecting*, 38(5): 1-4 (in Chinese with English abstract)]
- Zhang L, Zhong Z Q, Wang L S, Zhang B R. 2008. Pb isotope mapping in the tongbai-dabie orogenic belt, central China. *Acta Geologica Sinica - English Edition*, 82(1): 126-133
- 张清清, 高剑峰, 唐燕文, 闵康. 2020. 福建行洛坑钨矿床黑钨矿LA-ICP-MS U-Pb年龄和微量元素地球化学特征. *矿物岩石地球化学通报*, 39(6):

1278–1291, 1311 [Zhang Q Q, Gao J F, Tang Y W, Min K. 2020. *In-situ* LA-ICP-MS U-Pb dating and trace element analyses of wolframites from the xingluokeng tungsten deposit in Fujian Province, China. *Bulletin of Mineralogy, Petrology and Geochemistry*, 39(6): 1278–1291, 1311 (in Chinese with English abstract)]

Zhang S B, Zheng Y F. 2013. Formation and evolution of Precambrian continental lithosphere in South China. *Gondwana Research*, 23(4): 1241–1260

郑明华等著. 2001. 西南天山穆龙套型金矿床产出地质背景与成矿机制. 北京: 地质出版社 [Zheng M H, et al. 2001. *Geological Setting and Metallogenic Mechanism of Mulongtao Type Gold Deposit in Southwest Tianshan Mountains*. Beijing: Geological Publishing House (in Chinese)]

Zhong H, Zhu W G, Chu Z Y, He D F, Song X Y. 2007. Shrimp U-Pb zircon geochronology, geochemistry, and Nd-Sr isotopic study of contrasting granites in the Emeishan large igneous province, SW China. *Chemical Geology*, 236(1–2): 112–133

Zhu B Q. 1995. The mapping of geochemical provinces in China based on Pb isotopes. *Journal of Geochemical Exploration*, 55(1–3): 171–181

朱炳泉等著. 1998. 地球科学中同位素体系理论与应用: 兼论中国大陆壳幔演化. 北京: 科学出版社 [Zhu B Q, et al. 1998. *Theory and Application of Isotope System in Earth Science: Also on the Evolution of Crust and Mantle in Chinese Mainland*. Beijing: Science Press (in Chinese)]

祝新友, 王京彬, 王艳丽, 程细音, 傅其斌. 2012. 湖南黄沙坪W-Mo-Bi-Pb-Zn多金属矿床硫铅同位素地球化学研究. *岩石学报*, 28(12): 3809–3822 [Zhu X Y, Wang J B, Wang Y L, Cheng X Y, Fu Q B. 2012. Sulfur and lead isotope constraints on ore formation of the Huangshaping W-Mo-Bi-Pb-Zn polymetallic ore deposit, Hunan Province, South China. *Acta Petrologica Sinica*, 28(12): 3809–3822 (in Chinese with English abstract)]

祝新友, 甄世民, 程细音, 原桂强, 杨汉壮, 韩英, 王艳丽. 2017. 华南地区泥盆系MVT铅锌矿床S、Pb同位素特征. *地质学报*, 91(1): 213–231 [Zhu X Y, Zhen S M, Cheng X Y, Yuan G Q, Yang H Z, Han Y, Wang Y L. 2017. The sulfur-lead isotope geochemistry of MVT Pb-Zn deposits in Devonian system in South China. *Acta Geologica Sinica*, 91(1): 213–231 (in Chinese with English abstract)]

朱焱龄. 1981. 赣南钨矿地质. 南昌: 江西人民出版社 [Zhu Y L. 1981. *Geology of Tungsten Deposits in Southern Jiangxi*. Nanchang: Jiangxi People's Publishing House (in Chinese)]

邹欣. 2006. 江西淘锡坑钨矿地球化学特征及成因研究(硕士学位论文). 北京: 中国地质大学(北京)[Zou X. 2006. *Geochemical Characteristics and Genesis of Taosikeng Tungsten Mine in Jiangxi Province*(Dissertation). China University of Geosciences, Beijing (in Chinese with English abstract)]

(本文责任编辑: 龚超颖; 英文审校: 张兴春)

·招聘信息·

【 编者的话 】为丰富本刊信息量,体现学会为广大会员和科技工作者服务的宗旨,本刊特设“招聘信息”栏目。该栏目将辑近期国内主要地学科研单位、高校人才需求的有关信息,方便广大会员和有流动需求的科技工作者查询。同时欢迎我会会员和广大科技人员为本刊提供信息。

博士后招聘信息:

1. 中国地质调查局自然资源综合调查指挥中心2024年度公开招收博士后研究人员公告,详情请参阅:
<https://www.chinapostdoctor.org.cn/zhaopin?id=f6213f4b-ff7a-49ce-9014-b8db091e317b>
2. 广州大学2024年博士后研究人员招聘公告。详见:
<http://rsc.gzhu.edu.cn/info/1053/3008.htm>
3. 中国科学院兰州化学物理研究所2024年博士后招收公告,详情请参阅:
<http://licp.cas.cn/sy2018/yjdw/zszp/rczp/>
4. 南方科技大学2024年博士后招收公告,详情请参阅:
<https://talent.sustech.edu.cn/rsfw/sys/zpplx/extranet/index.do#/home>

教学/科研岗位招聘信息:

1. 哈尔滨石油学院2024年教学/科研人员招聘启事,详情请参阅:
<https://www.hip.edu.cn/rs/info/1102/1291.htm>
2. 临沂大学2024年教学/科研人员招聘启事,详情请参阅:
<https://rsc.lyu.edu.cn/2023/1230/c10704a223393/page.htm>
3. 广东省科学院广州地理研究所2024年高层次人才招聘启事,详情请参阅:
<http://www.gig.gdas.ac.cn/xxgk/zpwx/t40454.html>
4. 中国地质调查局青岛海洋地质研究所2024年度公开招聘工作人员启事,详情请参阅:
http://www.qimg.cgs.gov.cn/tzgg/202405/t20240516_761030.html

(杨志军 辑)