



中国地质大学 (北京) 科学研究院

# 求真研究群体年度研究报告

( 2018 年 )



群体名称：岩浆 - 热液演化与金属成矿

群体成员：张招崇      刘家军      杨立强

王庆飞      翟德高      舒启海

张静      侯通      王银宏      王长明

2018 年 11 月 20 日

# 求真研究群体 2018 年度研究报告

## 一、群体名称

岩浆-热液演化与金属成矿

## 二、群体定位

围绕岩浆-热液系统形成和演化过程中金属元素的巨量堆积和超常富集机制等重大科学问题，开展持续性科研合作，在 1-2 个聘期后，在岩浆-热液型金属矿床形成机制研究领域形成在国际上具有一定影响力的研究群体。

## 三、群体成员

群体首席：张招崇、刘家军

群体骨干：杨立强、王庆飞、翟德高、舒启海、张静、侯通、王银宏、王长明

重点培养对象：侯通、翟德高、舒启海

群体博士后：程志国、赵睿、谢秋红

## 四、2018 年度聚焦的科学问题

- | 壳-幔结构和深部地质过程对金属元素巨量堆积的控制机理
- | 岩浆形成和演化与金属元素富集的内在联系
- | 流体出溶过程中金属元素在岩浆-流体的分配与控制因素
- | 热液流体演化及其对金属元素富集的控制机理

## 五、2018 年度标志性研究成果

【每个群体限 3—5 项，每项应都包括科学问题、科学发现和科学意义、支撑材料等内容】

### 标志性成果 1：俯冲板片-地幔柱相互作用的地表响应与大火成岩省岩石多样性

#### 1) 再循环洋壳对峨眉山地幔柱地表响应的影响

大火成岩省 (Large igneous province, LIP) 一般被认为与地幔柱的活动的产物。经典地幔柱模型预测高温地幔柱头产生的巨大热浮力会导致大规模火山喷发

前的千米级规模地表隆升，所以多数学者将此作为大火成岩省是否是地幔柱成因的一个关键指标。峨眉山大火成岩省曾经被认为是地幔柱诱导千米级地表隆升的经典例子。然而，最近广泛的野外地质证据显示，在大规模火山喷发之前峨眉山大火成岩省不存在千米级地表隆升，甚至呈现出地表下沉的迹象。除此之外，很多大火成岩省也缺乏支持经典地幔柱模型的地质证据。近来的热化学地幔柱数值模拟认为由于地幔柱中含有大量高密度的再循环洋壳（榴辉岩）极大地降低其浮力，从而导致在火山喷发之前大火成岩省的地表没有隆升或隆升幅度不明显。然而，热化学地幔柱模型一直未同时得到详细的地质和地球化学证据的支持。

前人的研究已经表明峨眉山大火成岩省出露的地层记录了完整的火山喷发前夕及喷发同期的古环境信息。首先，我们对峨眉山大火成岩省出露的火山岩中沉积岩夹层（图 1）开展了广泛和系统的野外调查研究。基于详细的野外观察，我们重建了峨眉山大火成岩省的地表地幔演化过程：(i) 在火山喷发前的很长一段时间（~ 20Ma），峨眉山大火成岩省长期处于稳定的碳酸盐岩台地，没有发生明显的地表地貌变化；(ii) 在大规模火山喷发前夕，峨眉山大火成岩省的碳酸盐岩台地转变成滨海泻湖环境，暗示了地表隆升最大高度为~ 200 m；(iii) 在火山同喷发期，早期火山熔岩中夹有大量的碳酸盐岩夹层和枕状玄武岩，暗示了在火山喷发早期峨眉山大火成岩省地表发生下沉；而晚期火山喷发产物包含了大量的凝灰质岩石和凝灰岩，在其中见有大量陆相的紫红色泥岩夹层，暗示在火山喷发晚期峨眉山大火成岩省地表发生隆升。其次，基于已发表的苦橄岩中橄榄石斑晶电子探针数据，我们估算了峨眉山地幔柱中再循环洋壳（榴辉岩）含有~10%-20%的再循环成分（榴辉岩）。

基于上述结果，我们取得了以下认识：(i) 在 660 km 不连续面的深度，再循环洋壳（榴辉岩）的密度比地幔橄榄岩的小，补偿了再循环洋壳（榴辉岩）产生的负浮力，从而导致火山喷发前地表变化不显著。(ii) 基于热化学地幔柱模型，在大规模火山喷发之前峨眉山地幔柱产生的热浮力只能导致小幅度地表隆升（约 200 m）（图 2），这一预测结果与地质观察的结果是一致的；(iii) 当大规模火山喷发时，峨眉山地幔柱会释放大量热量，从而导致其热浮力明显减小；但地幔柱中大量再循环洋壳产生的负浮力仍然存在，这会导致地表显著地下沉。除此之外，在大规模火山喷发早期，由于巨量的高密度玄武质熔岩迅速地加载到地表，其会导致强烈的岩石圈挠曲，从而诱导地表快速且持续的大幅度下沉。(iv) 在火山喷发晚期，火山活动产生了大量的低密度火山岩（如凝灰质火山岩、凝灰岩），其会缓解岩石圈挠曲，从而阻止了地表的进一步下沉。这些低密度的火山岩持续堆积，可能会导致地表地貌的隆升。



图 1 峨眉山大火成岩省火山岩夹层中的沉积物

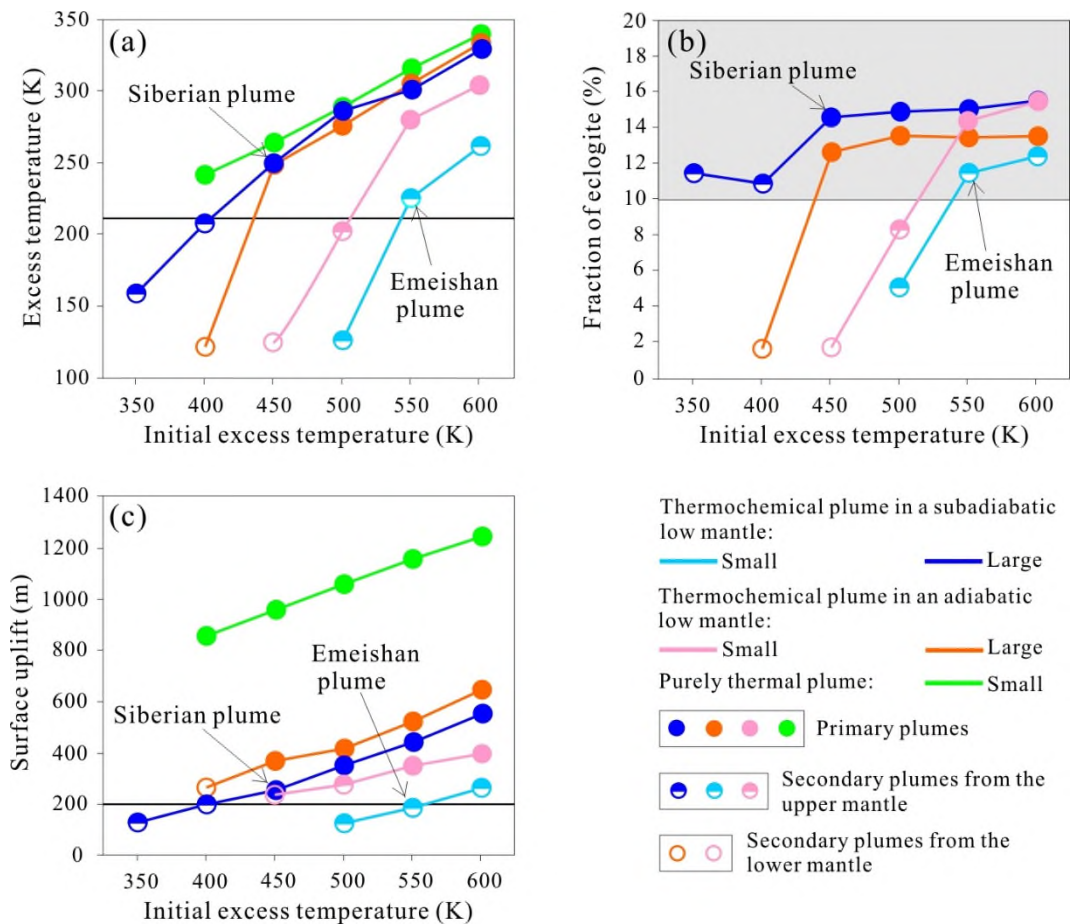


图 2 大火成岩省地表隆升幅度与地幔柱过剩温度、体积及其再循环洋壳（榴辉岩）含量之间的对应关系图

2) 多元同位素体系研究揭示出俯冲板片-岩石圈地幔-地幔柱之间的相互作用是导致塔里木大火成岩省复杂岩石组合的主要控制因素

绝大多数大火成岩省虽然也包含有少量的其他岩石，但主体以拉斑玄武岩为主，通常认为是地幔柱上升到岩石圈底部发生部分熔融或者诱发岩石圈地幔中的富集组分发生部分熔融形成的。然而，塔里木大火成岩省不仅包含有拉斑玄武岩、流纹岩、镁铁-超镁铁质侵入岩以及辉绿岩岩墙，而且也包含有一般大火成岩省罕见的一些岩石类型，如金伯利岩、碳酸岩、霓霞正长岩、霞石岩和煌斑岩等，是迄今为止岩石组合最为复杂的大火成岩省。如此复杂的岩石组合是如何形成的？显然，阐明不同岩石类型之间的成因关系对于丰富和发展地幔柱理论具有重要的意义。针对塔里木大火成岩省北缘的主要岩石单元如玄武岩、镁铁-超镁铁岩体、辉绿岩脉和金伯利质岩石中的镁铁质包体开展系统的 Sr-Nd-Mg-O 多元同位素体系研究，发现：1) 塔里木大火成岩省玄武岩、镁铁-超镁铁岩体、辉绿岩和金伯利质岩石中的辉石岩包体的镁同位素 ( $\delta^{26}\text{Mg}$ ) 变化范围分别为  $-0.29\text{‰} \sim -0.45\text{‰}$ ， $-0.31 \sim -0.42\text{‰}$ ， $-0.28 \sim -0.31\text{‰}$ 和  $-0.29 \sim -0.44\text{‰}$ ，比正常地幔值要低，指示了它们的源区具有沉积型再循环碳酸盐岩的加入；2) 铁质玄武岩指示源区存在着辉石岩组分，从 290Ma 的玄武岩经 280Ma 的镁铁-超镁铁岩体至 270Ma 的辉绿岩，岩石的  $\epsilon_{\text{Nd}(t)}$  和  $\delta^{26}\text{Mg}$  值增高， $(^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr})_i$  和  $\delta^{18}\text{O}_{\text{V-SMOW}}$  值降低 (图 3)，说明随着熔融的进行，源区中的易熔组分 (如辉石岩和碳酸盐组分) 呈现出逐渐被消耗的趋势。

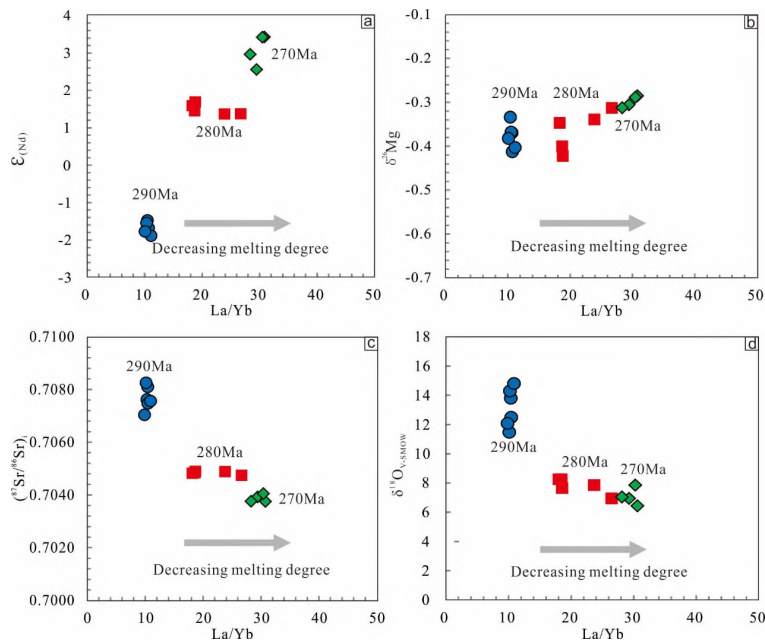


图 3. 塔里木大火成岩省玄武岩、镁铁超镁铁岩体、辉绿岩的 Sr-Nd-Mg-O 同位素组成随时间的演变关系

上述现象暗示了塔里木大火成岩省主要岩石单元存在着两个截然不同的源区：一种是玄武岩、镁铁-超镁铁岩体、辉绿岩为代表，其起源于受方解石/白云石和富硅熔体（与俯冲板片有关）交代的岩石圈地幔；第二种是碱性岩石，以碳酸岩、霞石岩、金伯利质岩石为代表，主要起源于受菱镁矿或者方镁石/镁钙钛矿交代的地幔柱源区。多元同位素体系研究表明在深俯冲过程中，碳酸盐矿物由方解石、白云石向菱镁矿并最终向方镁石/镁钙钛矿转变，而地幔柱的参与可有效提高地幔热梯度并促进矿物相的转变。由此，我们提出俯冲板片-岩石圈地幔-地幔柱存在着广泛的相互作用（图4），不同部位相互作用、不同程度的部分熔融是导致塔里木大火成岩省复杂岩石组合的主要控制因素。

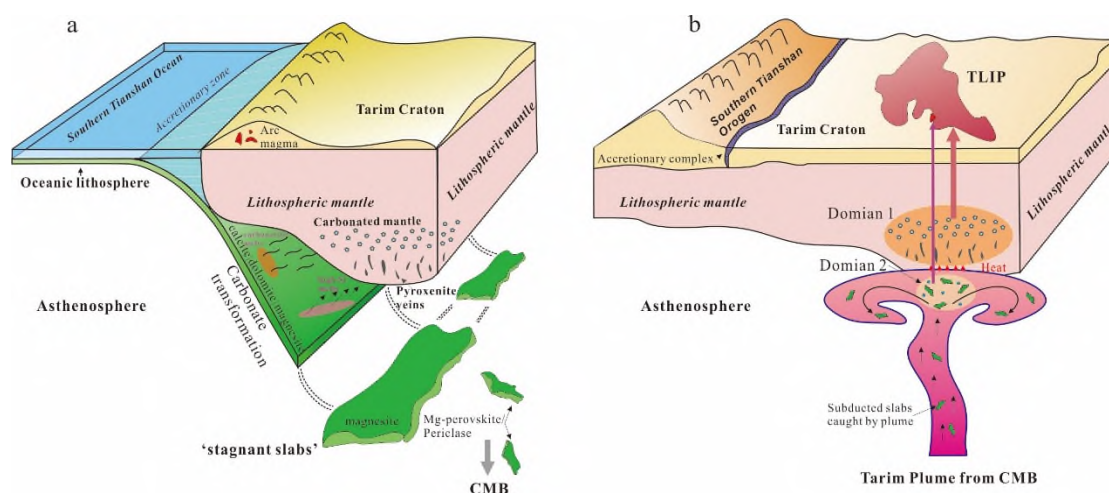


图4 俯冲板片-岩石圈地幔-地幔柱相互作用模型

很显然，无论是峨眉山大火成岩省还是塔里木大火成岩省的研究都揭示出源区存在榴辉岩（或辉石岩）可以很好地解释两个大火成岩省的许多现象。为了进一步验证地幔橄榄岩源区是否存在榴辉岩（或辉石岩），本研究群体进一步开展了高温高压试验。

实验分为常压（大气压）和高压两个部分，常压部分由常压电炉完成，温度为 1354-1094°C，氧逸度条件为 QFM；高压实验由活塞圆筒完成，压力从 1-1.5GPa，温度为 1350-1150°C，氧逸度为 QFM-1.5 到 QFM-3。

实验结果表明：在 1GPa 附近，随着温度的升高，液相线矿物从橄榄石转变为斜方辉石，说明高钛苦橄质岩浆在最后离开地幔时是与辉石岩平衡的（图5）。

假定地幔熔融是瑞利分离熔融，同时结合前人对于辉石岩/橄榄岩部分熔融作用的研究，高钛苦橄质岩浆熔融应起始于 65-100km 附近，部分熔融程度约为 15-30%，产生此高程度部分熔融需要地幔潜温 1480-1530°C。全岩地球化学以及橄榄石微量元素与实验结果相吻合，亦证实源区广泛存在辉石岩组分。

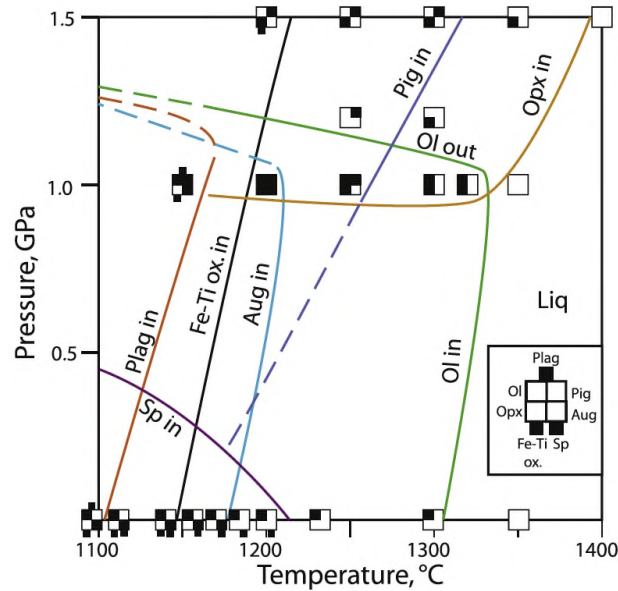


图 5 高钛苦橄岩高温高压相图。Liq=熔体；Ol=橄榄石；Opx=斜方辉石；Pig=易变辉石；Aug=普通辉石；Plag=斜长石；Sp=尖晶石；Fe-Ti ox.=铁钛氧化物。

### 【支撑论文】

- 1) Zhu, J., Zhang, Z.C., Reichow, M.K., Li, H.B., Cai, W.C. and Pan, R.H., 2018. Weak vertical surface movement caused by the ascent of the Emeishan mantle anomaly. *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*, 123: 1018-1034.
- 2) Cheng, Z.G., Zhang, Z.C., Xie, Q.H., Hou, T. and Ke, S., 2018. Subducted slab-plume interaction traced by magnesium isotopes in the northern margin of the Tarim Large Igneous Province. *Earth and Planetary Science Letters*, 489: 100-110.
- 3) Zhang, Y.S., Hou, T., Veksler, I.V., Leshner, C.E. and Namur, O., 2018. Phase equilibria and geochemical constraints on the petrogenesis of high-Ti picrite from the Paleogene East Greenland flood basalt province. *Lithos*, 300-301: 20-32.

### 标志性成果 2: 揭示了壳幔结构以及深部地质过程对岩浆-热液成矿系统的控制机理

- 1) 论证了地壳结构样式对岩浆-热液成矿系统具有关键的控制作用

华北克拉通东南缘是我国重要的金多金属矿集区。尽管早期的研究胶东和鲁西在成矿上有明显的差异，但是对于导致成矿差异的原因尚不清楚，从而使得华北克拉通东南缘金多金属成矿机制的认识存在分歧。

本研究群体针对上述科学问题对华北克拉通东南缘地区进行了详细研究（图6），获得了重要创新性认识：（1）研究为华北克拉通东南部地壳结构提供了重要约束。郯庐断裂是鲁西地体、胶北地体和苏鲁造山带的重要构造边界，对中生代-新生代岩浆活动和矿化具有一级控制作用。岩浆岩的模式年龄胶东地区主要为太古代-古元古代，鲁西地区主要为古元古代-中元古代；（2）研究深入解析了华北克拉通东南缘地区矿床成因。胶东型 Au 矿床和斑岩-矽卡岩 Mo(-W-Cu)矿床，具有较负的  $\epsilon_{Nd}$  和  $\epsilon_{Hf}$  值，表现为古老地壳基底组成。鲁西地区的斑岩型-矽卡岩型 Cu(-Au-Mo)矿床，具有变化的  $\epsilon_{Nd}$  和  $\epsilon_{Hf}$  值，表现为古老地壳和较年轻的地体地壳组成，有幔源物质对成矿的贡献；（3）研究不但可以为其他岩石圈结构与成矿提供范例，为完善克拉通环境下的金多金属成矿理论提供关键依据，而且可指导华北克拉通东南缘找矿勘查工作。

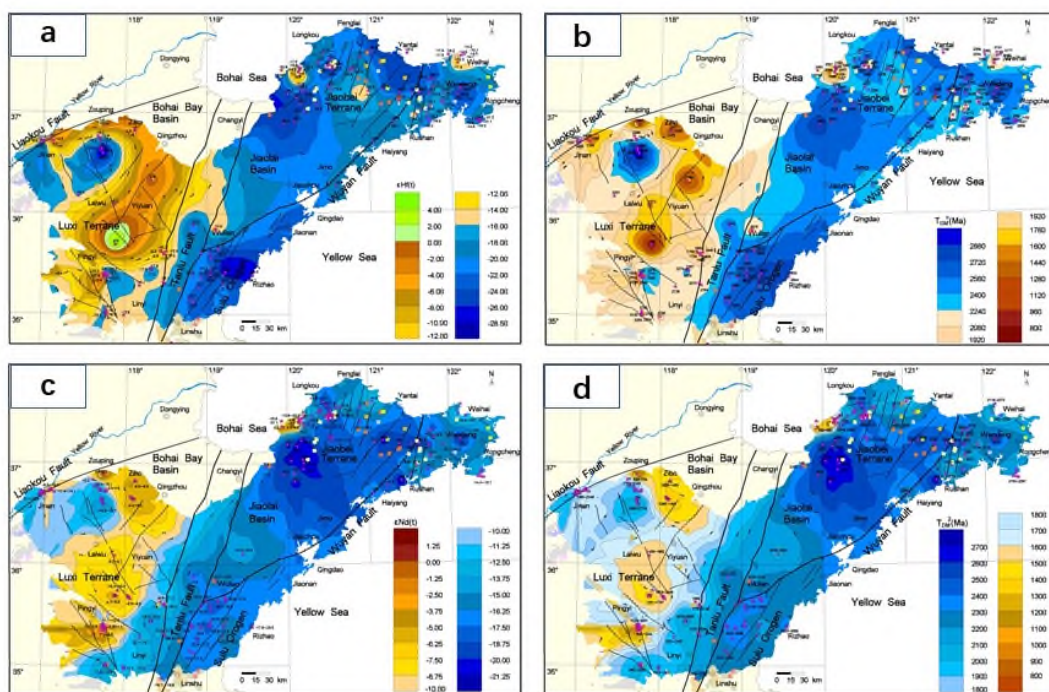


图6 华北克拉通东南缘同位素等值线图。a-Hf 同位素；b-Hf 同位素模式年龄；c-Nd 同位素；d-Nd 同位素模式年龄

该成果的科学价值在于精细探测岩石圈结构和演化、解剖壳-幔相互作用、岩浆-热液成矿与岩石圈结构耦合关系，为深部动力学机制研究提供了重要参考。



2) 揭示了三江特提斯东缘义敦地体俯冲与陆内斑岩成矿系统的成因联系：  
三叠纪岛弧新生地壳中残留硫化物相为晚白垩世陆内斑岩成矿系统奠定了 Cu 和 S 等成矿物质基础

有关陆内环境斑岩矿床的金属物质和挥发分的来源虽然一直存在争议，但普遍认为先前的俯冲事件对同一地区陆内环境斑岩矿床的形成起到重要作用，俯冲改造的岩石圈地幔或俯冲改造的下地壳或新生岛弧下地壳都是陆内环境斑岩矿床金属元素和挥发分的可能源区。义敦地体南段近南北向展布的晚白垩世斑岩-矽卡岩型 Cu-Mo 多金属矿床复合于北西向展布的晚三叠世斑岩-矽卡岩型 Cu 多金属矿床之上。晚三叠世 Cu 多金属矿床形成于甘孜-理塘洋西向俯冲背景下，含矿岩浆及成矿所需的金属和 S 等来自含水岛弧地幔楔的部分熔融。对比晚白垩世花岗斑岩和晚三叠世含矿石英二长斑岩，前者继承了~215Ma 弧岩浆的特征（LILEs 富集，HFSEs 亏损，较平坦的 HREE，Nb-Ta 亏损），且其 Sr-Nd-Hf 同位素特征也表明晚白垩世岩浆源区为~215Ma 的新生地壳物质（巴塘玄武岩）和古老地壳物质的混合（图 7）。因此，三叠纪岛弧新生地壳中残留硫化物相的重熔可能提供了晚白垩世含矿斑岩岩浆中 Cu 和 S 等成矿物质；而 Mo 主要来自古老下地壳的部分熔融。

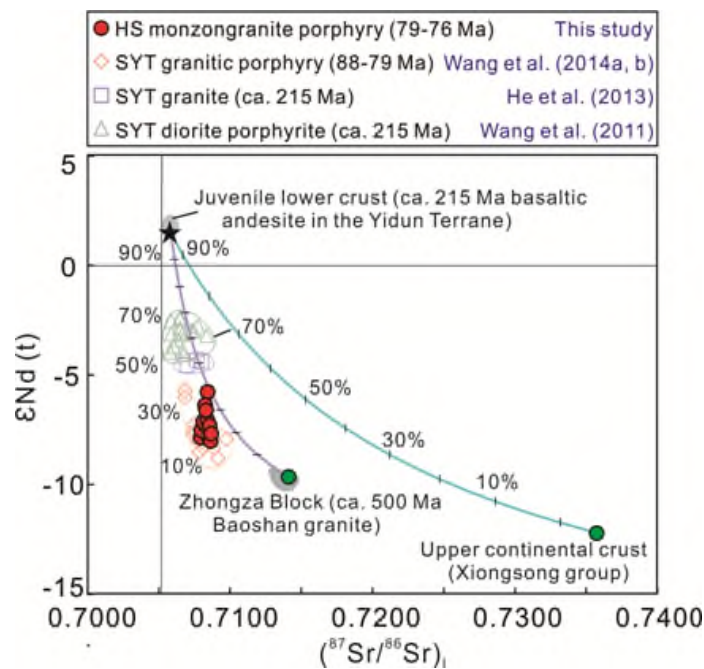


图 7 义敦地体晚白垩世花岗斑岩 Sr-Nd 同位素

### 【支撑论文】

- 1) 邓军, 李文昌, 周云满, 范玉华, 王立全, 和中华, 许继峰, 杨立强, 王庆飞, 余海军. 三江特提斯复合造山成矿作用与找矿突破. 国家科学技术进步奖二等奖
- 2) Yang, L.Q., He, W.Y., Gao, X., Xie S.X. and Yang, Z., 2018. Mesozoic multiple magmatism and porphyry-skarn Cu-polymetallic systems of the Yidun Terrane, Eastern Tethys: Implications for subduction- and transtension-related metallogeny. *Gondwana Research*, 62: 112-126.
- 3) Gao, X., Yang, L.Q. and Evan, O., 2018. The lithospheric architecture of two subterranees in the eastern Yidun Terrane, East Tethys: Insights from Hf-Nd isotopic mapping. *Gondwana Research*, 62: 127-143.
- 4) He, W.Y., Yang, L.Q., Lu, Y.J., Jeon, H., Xie, S.X. and Gao, X., 2018. Zircon U-Pb dating, geochemistry and Sr-Nd-Hf-O isotopes for the Baimaxueshan granodiorites and mafic microgranulars enclaves in the Sanjiang Orogen: Evidence for westward subduction of Paleo-Tethys. *Gondwana Research*, 62: 144-162.
- 5) Bao, X.S., Yang, L.Q., He, W.Y. and Gao, X., 2018. Importance of Magmatic Water Content and Oxidation State for Porphyry-Style Au Mineralization: An Example from the Giant Beiya Au Deposit, SW China. *Minerals*, 8: 441.
- 6) Wang, C.M., Leon, B., Deng, J. and Dong, M.M., 2018. Crustal architecture and its controls on mineralisation in the North China Craton. *Ore Geology Reviews*, 98: 109-125.

### 标志性成果 3: 岩浆性质对金属元素富集的控制机理

1) 论证了东天山富 Cu 岩浆来源于俯冲板片部分熔融和地幔楔交代, 而富 Mo 岩浆不仅可以来源于古老地壳, 也可以来源于年轻地壳

传统斑岩矿床成矿理论总体是西方学者基于环太平洋成矿带的研究而建立。然而, 基于环太平洋成矿带建立的斑岩矿床成矿理论能否适用于碰撞环境, 或适用于其他构造带中的斑岩成矿作用? 岩浆弧体制与碰撞体制的斑岩矿床在地质地球化学特征、找矿标志等方面是否一致? 产出于不同构造环境的含矿斑岩, 是具有统一的岩浆起源演化模式, 还是具有各具特色的起源演化过程? 显然, 解决这些争议性问题, 是我们理解斑岩矿床成因机制的重要前提。研究群体通过对东天山造山带斑岩铜钼矿区典型矿床研究的基础上, 利用锆石原位

Hf-O 同位素开展了岩浆弧和碰撞体制不同含矿斑岩体源区性质的研究：(1) 因传统同位素方法很难区分不同性质岩体的岩浆源区，利用锆石原位 Hf-O 同位素（图 8）分析结合锆石 U-Pb 定年结果，系统揭示了东天山富 Cu 岩体与富 Mo 岩体的成因差异及其演化过程与不同时空矿化作用的关系。认为前者属低钾钙碱性系列，具较轻的锆石 O 同位素组成 ( $\delta^{18}\text{O}=4.4\sim 5.8\text{‰}$ ) 及高  $\epsilon_{\text{Hf}}(t)$  值，主要来源于洋壳板片物质的部分熔融并有地幔物质的混入；后者属高钾钙碱性-高分异系列，具较重的锆石 O 同位素组成 ( $\delta^{18}\text{O}=6.1\sim 8.6\text{‰}$ ) 及低  $\epsilon_{\text{Hf}}(t)$  值，来源于年轻地壳物质的部分熔融并含有少量古老地壳组份。(2) 指出东天山中生代三叠纪时期的斑岩铜成矿为中亚造山带中非常重要的一期成矿作用，与本区古生代石炭纪大规模的斑岩铜成矿作用有着本质差异，而且与邻区新生代时期的斑岩铜床在成矿背景、成矿岩体性质及成矿物质来源等方面均存在较大区别，这为研究东天山以及中亚造山带斑岩成矿系统和铜钼矿床的找矿勘探提供了新思路。

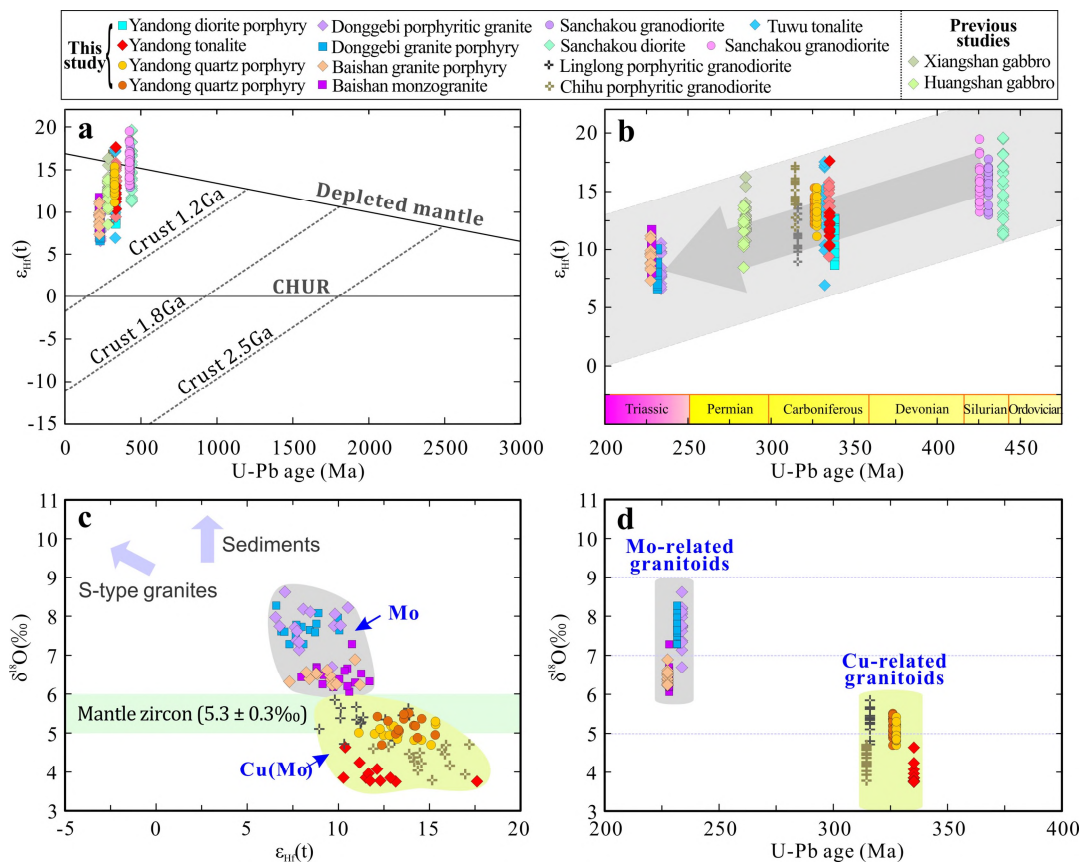


图 8 东天山造山带侵入岩 Hf-O 同位素组成与锆石 U-Pb 年龄分布

## 2) 论证了岩浆-热液演化是导致矽卡岩型多金属矿床形成的主控因素

过去的研究表明,不同类型的花岗岩,往往与不同的金属矿床类型密切相关,即存在所谓成矿的专属性。但近年研究发现,矽卡岩矿床的形成,并不是简简单单由其相关的花岗岩的类型所决定,还与岩浆的过程如岩浆的部分熔融程度、分离结晶过程、围岩的同化混染以及后期流体的形成与演化有关,由此导致了具有相似地球化学性质的金属元素共生形成了多金属矽卡岩矿床,如 W, Mo 以及 Pb, Zn 矿床等。但是,后来的找矿勘查成果显示,由地球化学性质相差很大的金属元素也在同一个矽卡岩矿床中出现,如黑龙江翠宏山 W-Mo-Pb-Zn-Fe-Cu 矿床、新疆于沟子铁多金属矿床、西藏龙玛拉 Fe-Pb-Zn 矿床、浙江余杭闲林埠 Fe-Mo 矿床、四川冕宁县大顶山 Fe-Sn 矿床、白石崖 Fe-Pb-Zn 矿床、内蒙古黄岗梁 Fe-Sn 矿床等。为什么地球化学性质截然不同的金属元素能出现在一个矿床中?阐明其形成机理不仅对于丰富和发展矽卡岩成矿理论具有重要意义,同时对于该类型找矿也具有指示作用。

目前对于上述问题,主要存在如下两种不同的认识:1) 不同期次岩浆在同一地点分别成矿,所以不同地球化学性质的金属元素“共生”只是空间上“巧合”;2) 它们是同一岩浆-热液系统演化过程中不同成矿阶段形成的。针对上述问题,本研究群体对黑龙江翠宏山斑岩-矽卡岩型 Fe-W-Mo-Pb-Zn-Cu 多金属矿床开展了广泛和系统的野外调查和岩相学-矿相学研究,运用锆石和锡石 U-Pb 同位素测年、锆石 Hf 同位素、全岩地球化学对此类多金属矿床的形成机制进行了研究,取得了以下主要成果:

(1) 根据空间分布特征、斑岩 Mo 矿体赋存特征、矽卡岩 W-Mo 矿体走向以及与磁铁矿共生的锡石年龄,证明翠宏山 W-Mo-Pb-Zn-Fe-Cu 矿床形成于一个成矿事件,与晚期斑状花岗岩密切相关;(2) 斑状花岗岩侵入于寒武系碳酸盐岩质围岩,在接触带形成了矽卡岩,在氧逸度、温度相对较高的条件下,白钨矿于干矽卡岩阶段最先沉淀;随着温度和氧逸度的降低,磁铁矿和锡石在退化蚀变阶段发生沉淀;随着成矿作用的进行,温度降低的同时氧化物的沉淀也导致了流体氧逸度降低,此时辉钼矿、黄铜矿、闪锌矿、方铅矿发生沉淀,形成了 Mo 矿和 Cu-Pb-Zn 矿。(3) 整体而言,翠宏山矿区存在金属矿物由氧化物—硫化物,从高温—低温、从高氧逸度-低氧逸度的演化序列,说明随着同一岩浆-热液系统演化,W、Fe、Mo、Cu、Pb、Zn 等具有不同金属元素可以随外界条件如温度、氧逸度的变化而依次沉淀形成多金属矿床。因此,具有不同地球化学性质的多金

属元素矿床是可以由同一岩浆-热液系统演化过程中不同成矿阶段形成的。至于高硅低铁的翠宏山花岗岩体能形成中型富铁矿，我们将其归因于热液萃取矿区古老地层中先存的 BIF 的结果。

#### 【支撑论文】

- 1) Wang, Y.H., Zhang, F.F., Liu, J.J., Xue, C.J., Li, B.C. and Xian, X.C., 2018. Ore Genesis and Hydrothermal Evolution of the Donggebi Porphyry Mo Deposit, Xinjiang, Northwest China: Evidence from Isotopes (C, H, O, S, Pb), Fluid Inclusions and Molybdenite Re-Os Dating. *Economic Geology*, 113(2): 463–488.
- 2) Wang, Y.H., Xue, C.J., Liu, J.J. and Zhang, F.F., 2018. Origin of the subduction-related Carboniferous intrusions associated with the Yandong porphyry Cu deposit in eastern Tianshan, NW China: Constraints from geology, geochronology, geochemistry, and Sr-Nd-Pb-Hf-O isotopes. *Mineralium Deposita*, 53(5): 629–647.
- 3) Fei, X.H., Zhang, Z.C., Cheng, Z.G., Santosh, M., Jin, Z.L., Wen, B.B., Li, Z.X. and Xu, L.J., 2018. Highly differentiated magmas linked with polymetallic mineralization: A case study from the Cuihongshan granitic intrusions, Lesser Xing'an Range, NE China, *Lithos*, 302-303: 158-177.

### 标志性成果 4: 岩浆-热液演化对金属元素巨量堆积和富集的控制机理

#### 1) 特提斯造山带岛弧背景岩浆铜镍硫化物矿床成因机制：富 Os 有机质沉积物的混染是导致硫化物熔体熔离的关键因素

与镁铁-超镁铁质岩侵入体密切相关的岩浆 Ni-Cu 硫化物矿床主要产于板内环境，只有少数产于岛弧环境。目前对于板内环境的铜镍硫化物矿床的形成机制已基本上达成共识，但是对于岛弧内的该类矿床是如何形成的，需要什么条件目前尚不清楚。本研究群体以巨型东特提斯造山带东段颠缅泰马地块北端保山地块北部的大雪山岩浆硫化物型矿床为研究对象，开展了详细的年代学、岩石学和地球化学工作，得出如下结论：（1）大雪山基性-超基性侵入岩体形成时间为  $300 \pm 1.6$  Ma，代表其是古特提斯阶段东南亚陆块群内一期重要岩浆事件的产物；（2）通过大雪山岩体母岩浆氧逸度在  $QFM + 0.2 \sim QFM + 1.2$ （图 9），与夏日哈木、冷水箐和黑山等弧环境下的岩浆硫化物矿床相似；（3）橄榄石矿物化学、锆石 Hf 同位素、全岩 Sr-Nd-Os 同位素及硫化物的  $\delta^{34}S$  和  $\gamma Os$  结果表明分离结晶和地壳物质混染共同导致了大雪山岩浆中硫化物的饱和熔离，混染物质可能为富 Os

有机质的沉积物；（4）大雪山 Ni-Cu 矿床具有较低的 PGE 金属含量极低，暗示深部发生的硫化物抽取事件导致了母岩浆 PGE 的亏损（图 10），同时弧下地壳形成了富集 Cu-PGE 的堆晶产物，这些含硫化物堆晶产物可能对于陆块增生以及斑岩矿床的形成具有重要意义。

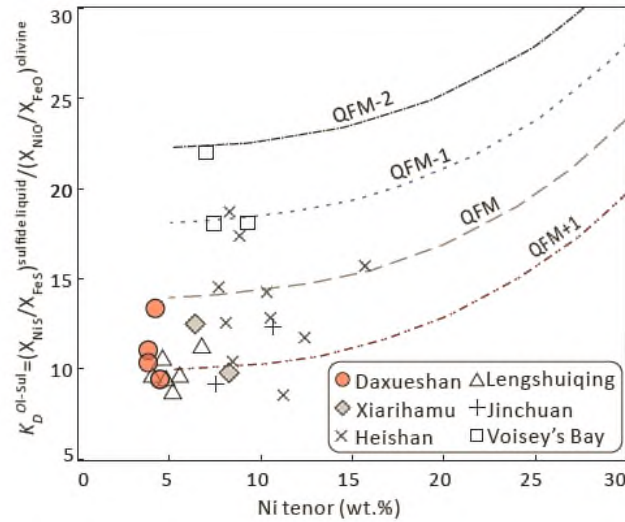


图 9 大雪山矿床氧逸度图解

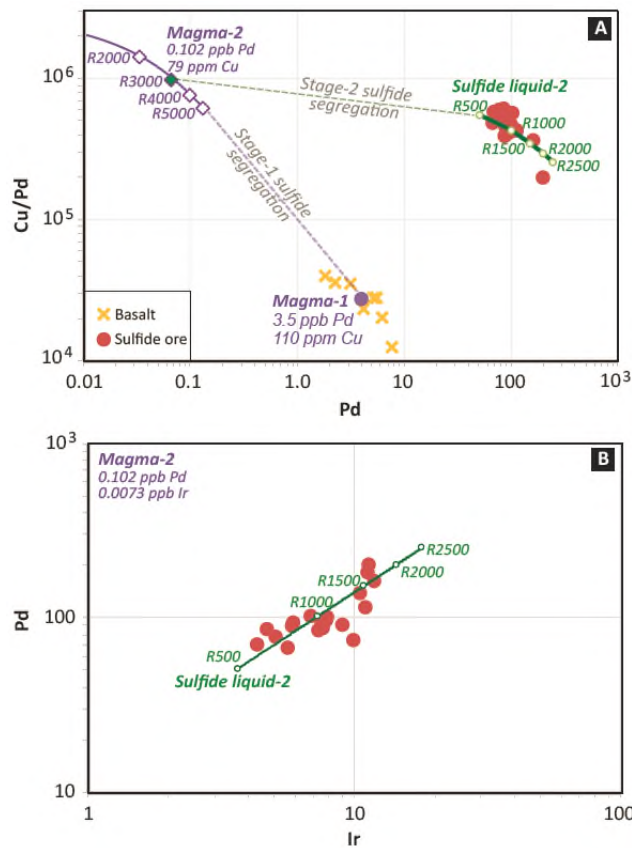


图 10 大雪山矿床二阶段硫化物熔离模拟图解

2) 揭示出东天山碰撞体制大规模斑岩钼矿化的关键因素是流体沸腾/相分离、温度降低及水岩反应作用，突破了斑岩矿床中“盐度变化为主控因素”的传统观点。

斑岩矿床的成矿流体特征及演化、成矿金属来源和金属富集机制等方面的研究是揭示斑岩成矿模式的关键。前人研究认为斑岩矿床中流体包裹体类型主要为富气相、富液相、和富  $\text{CO}_2$  包裹体；对于铜或钼等金属组分具体物质背景来源问题目前仍有不同的认识，而且多集中于对单一矿种的个例研究，缺乏对不同体制下斑岩铜矿和钼矿的对比分析。通过东天山造山带典型斑岩矿床详细对比研究，并结合传统斑岩成矿模式认识，(1) 发现岩浆弧体制斑岩矿床的成矿流体中存在高盐度、含  $\text{CO}_2$  及大量不透明子矿物的包裹体（或同时含石盐和不透明硫化物等子矿物），突破了斑岩型等岩浆热液矿床中常见“富  $\text{CO}_2$  流体盐度低”的传统观点；(2) 提出碰撞体制斑岩钼矿床成矿深度较浅（~1km），流体沸腾/相分离、温度降低及水岩反应作用是制约大规模钼矿化的关键因素，突破了斑岩矿床中“盐度变化是铜钼矿化关键因素”的传统观点；(3) 提出岩浆弧环境斑岩铜（钼）矿的成矿流体具高温、高盐度、含  $\text{CO}_2$  及相对高氧逸度的流体特征，属于  $\text{H}_2\text{O}-\text{NaCl}\pm\text{CO}_2$  系统，成矿流体主要来源于演化的岩浆水及晚期的大气降水，硫及金属元素来源于初始的深部岩浆源区（产生于俯冲板片部分熔融并且有部分地幔楔物质加入；而碰撞体制伸展环境斑岩钼矿的成矿流体具高温、中高盐度、含  $\text{CO}_2/\text{CH}_4$  及高氧逸度的流体特征，属于  $\text{H}_2\text{O}-\text{NaCl}\pm\text{CO}_2\pm\text{CH}_4$  系统，成矿流体主要来源于演化的岩浆水，与晚期大气降水无关（图 11），硫及金属元素来源于下地壳并有上地壳物质的混染。

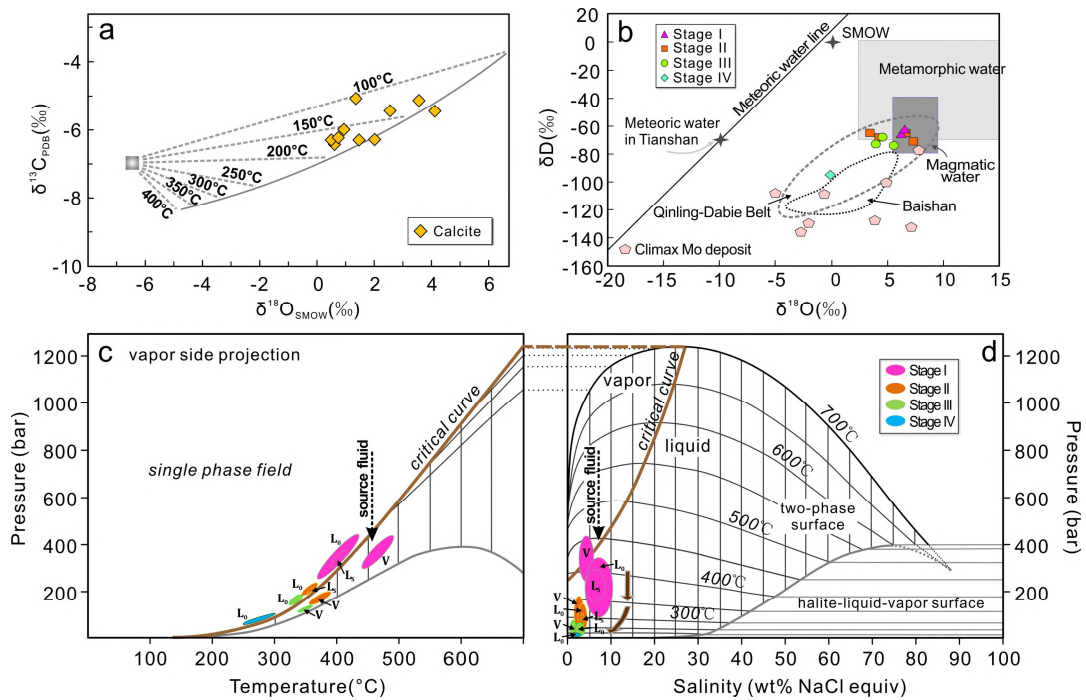


图 11 东天山东戈壁钼矿 C-H-O 同位素组成(a,b)及流体演化模式图(c,d)

### 3) 论证了岩浆气体组分与成矿流体混合及围岩硫化作用主导高品位浅成低温热液型金矿床的形成

浅成低温热液型金矿床一般金产出的规模较大，常形成超高品位的金矿石，且矿体埋藏很浅，因此该类矿床蕴含极大的经济价值，是国内外大型矿业公司竞相勘查的目标。大量的野外观察、分析测试和实验模拟研究结果显示，浅成低温热液系统中金的形成与流体的沸腾作用密切相关。因此，已有的大量研究提出流体沸腾作用是导致浅成低温热液金矿床形成的最主要机制，该过程也常常用来解释矿床中或矿体中某一部位超高品位金矿石的成因。虽然在浅成条件下成矿流体很容易发生沸腾作用，但该过程可否用来解释绝大多数金矿床的形成有待进一步研究。

针对上述科学问题，本研究群体选择位于我国东北地区的三道湾子浅成低温热液金矿床为研究解剖对象，该矿床中产出超高品位的金矿石。根据系统的矿物学、多元同位素、流体包裹体和热力学计算与模拟等研究工作（图 12，图 13），取得以下主要认识：1) 虽然在三道湾子浅成低温热液体系发生了显著的流体沸腾作用，但精细的热力学模拟和计算发现流体沸腾作用过程并不能导致金的沉淀，反而可促使其发生进一步的溶解，很显然，该机制不能解释矿床中大量金和银碲化物的形成；2) 提出导致金发生沉淀的主要机制为：(a) 从碱性岩浆中形成的含  $H_2Te$  的气体组分通过凝结作用与大气降水为主导的成矿流体混合 ( $\alpha_{HTe}(aq)$ )



升高), 可直接导致热液体系中大量的金和银呈碲化物的形式沉淀; (b) 围岩发生的大量硫化作用 (黄铁矿的形成) ( $\alpha_{\text{HS}^-}(\text{aq})$ 降低) 可以破坏金和银的硫络合物迁移, 进而促使其发生大量沉淀 (图 13)。

该研究很好地结合了矿物学和热力学模拟的研究手段, 能够从量化的角度精细探讨流体演化过程中金和银的富集过程。该研究结果有别于以往主导的认识, 对丰富和提高浅成低温热液型金矿床的成因模型有新的启发。

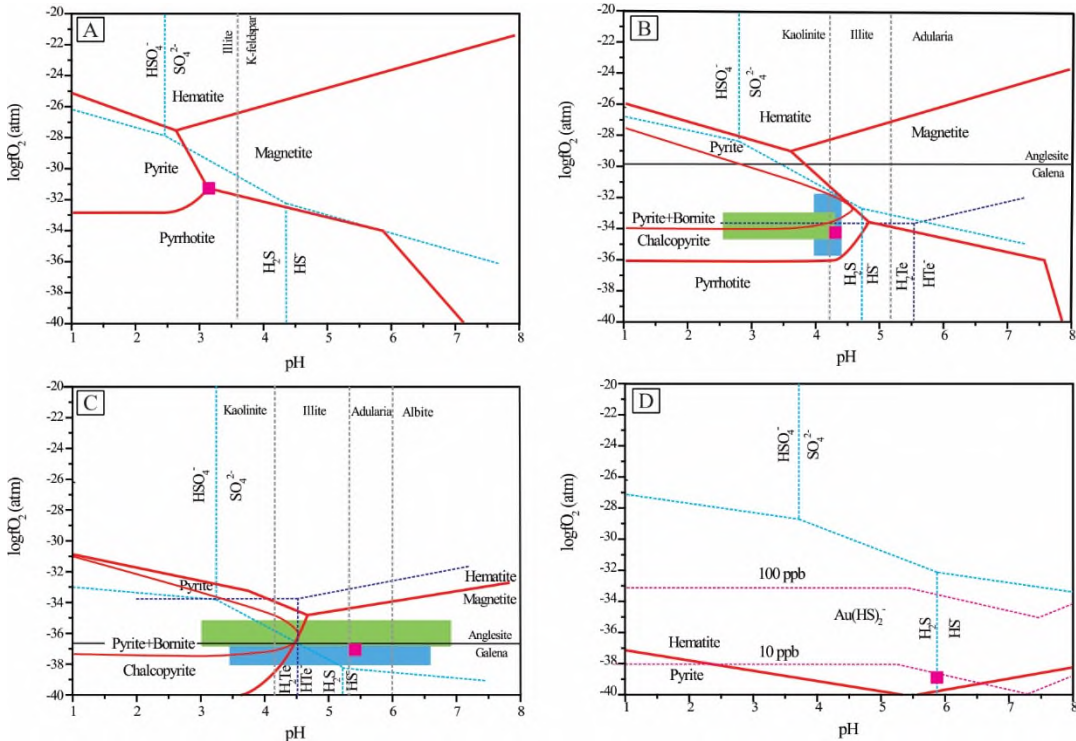


图 12 矿床不同成矿阶段流体的 pH 和  $f\text{O}_2$  相图

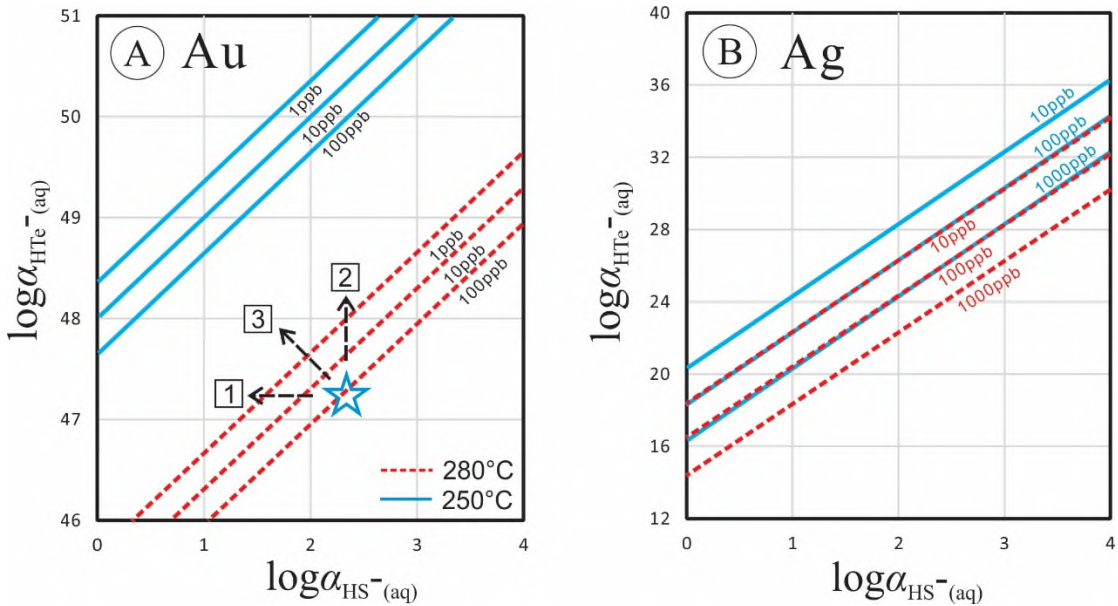


图 13 不同温度、 $\alpha_{\text{HS}^-}(\text{aq})$  和  $\alpha_{\text{HTe}^-}(\text{aq})$  条件下金 (碲金矿) 和银 (碲银矿) 的溶解度

## 计算结果

### 【支撑论文】

- 1) Wang, Q.F., Deng, J., Li, G.J., Liu, J.Y., Li, C. and Ripley, E.M., 2018. Geochronological, Petrological, and Geochemical Studies of the Daxueshan Magmatic Ni-Cu Sulfide Deposit in the Tethyan Orogenic Belt, Southwest China. *Economic Geology*, 113: 1307-1332.
- 2) Wang, Y.H., Zhang, F.F., Liu, J.J., Xue, C.J., Li, B.C. and Xian, X.C., 2018. Ore Genesis and Hydrothermal Evolution of the Donggebi Porphyry Mo Deposit, Xinjiang, Northwest China: Evidence from Isotopes (C, H, O, S, Pb), Fluid Inclusions and Molybdenite Re-Os Dating. *Economic Geology*, 113(2): 463– 488.
- 3) Wang, Y.H., Xue, C.J., Liu, J.J. and Zhang, F.F., 2018. Origin of the subduction-related Carboniferous intrusions associated with the Yandong porphyry Cu deposit in eastern Tianshan, NW China: Constraints from geology, geochronology, geochemistry, and Sr-Nd-Pb-Hf-O isotopes. *Mineralium Deposita*, 53(5): 629–647.
- 4) Wang, Y.H., Zhang, F.F., Liu, J.J., Xue, C.J. and Zhang, Z.C., 2018. Genesis of the Wurinitu W-Mo deposit, Inner Mongolia, Northeast China: constraints from geology, fluid inclusions and isotope systematics. *Ore Geology Reviews*, 94: 367–382.
- 5) Zhang, F.F., Wang, Y.H., Liu, J.J. and Wang, J.C., 2018. Ore genesis and hydrothermal evolution of the Wulandele Mo deposit, Inner Mongolia, Northeast China: Evidence from geology, fluid inclusions and H–O–S–Pb isotopes. *Ore Geology Reviews*, 93: 181–199.
- 6) Zhai, D., Williams-Jones, A.E., Liu, J., Tombros, S.F. and Cook, N.J., 2018. Mineralogical, Fluid Inclusion and Multiple Isotope (H-O-S-Pb) Constraints on the Genesis of the Sandaowanzi Epithermal Au-Ag-Te Deposit, NE China. *Economic Geology*, 113 (6): 1359–1382.

## 六、2018 年度发表的全部第一作者或通讯作者国际 SCI 论文

【请用\*标注通讯作者，同时注明第一作者身份，只列出有页码的论文】

1. Wang, Y.H. \*, Zhang, F.F., Liu, J.J., Xue, C.J., Li, B.C. and Xian, X.C., 2018. Ore Genesis and Hydrothermal Evolution of the Donggebi Porphyry Mo Deposit, Xinjiang, Northwest China: Evidence from Isotopes (C, H, O, S, Pb), Fluid Inclusions and Molybdenite Re-Os Dating. *Economic Geology*, 113(2): 463–488. (第一作者为群体成员)
2. Wang, Q.F., Deng, J.\*, Li, G.J., Liu, J.Y., Li, C. and Ripley, E.M., 2018. Geochronological, Petrological, and Geochemical Studies of the Daxueshan Magmatic Ni-Cu Sulfide Deposit in the Tethyan Orogenic Belt, Southwest China. *Economic Geology*, 113: 1307-1332. (第一作者为群体成员)
3. Zhai, D., Williams-Jones, A.E., Liu, J., Tombros, S.F. and Cook, N.J., 2018. Mineralogical, Fluid Inclusion and Multiple Isotope (H-O-S-Pb) Constraints on the Genesis of the Sandaowanzi Epithermal Au-Ag-Te Deposit, NE China. *Economic Geology*, 113 (6): 1359–1382.
4. Zhu, J., Zhang, Z.C.\*, Reichow, M.K., Li, H.B., Cai, W.C. and Pan, R.H., 2018. Weak vertical surface movement caused by the ascent of the Emeishan mantle anomaly. *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*, 123: 1018-1034. (第一作者为博士生)
5. Cheng, Z.G., Zhang, Z.C.\*, Xie, Q.H., Hou, T. and Ke, S., 2018. Subducted slab-plume interaction traced by magnesium isotopes in the northern margin of the Tarim Large Igneous Province. *Earth and Planetary Science Letters*, 489: 100-110. (第一作者为博士后)
6. Zhai, D., Liu, J., Tombros, S. and Williams-Jones, A.E., 2018. The genesis of the Hashitu porphyry molybdenum deposit, Inner Mongolia, NE China: constraints from mineralogical, fluid inclusion, and multiple isotope (H, O, S, Mo, Pb) studies. *Mineralium Deposita*, 53: 377-397(第一作者为群体成员)
7. Wang, Y.H.\*, Xue, C.J., Liu, J.J. and Zhang, F.F., 2018. Origin of the subduction-related Carboniferous intrusions associated with the Yandong porphyry Cu deposit in eastern Tianshan, NW China: Constraints from geology, geochronology, geochemistry, and Sr-Nd-Pb-Hf-O isotopes. *Mineralium Deposita*, 53(5): 629–647. (第一作者为群体成员)
8. Wang, Q.F.\*, Groves, D.I., 2018 Carlin-style gold deposits, Youjiang Basin, China: tectono-thermal and structural analogues of the Carlin-type gold

- deposits, Nevada, USA. *Mineralium Deposita*, 53: 909–918. (第一作者为群体成员)
9. Wang, Y.H.\*, Zhang, F.F., Liu, J.J., Xue, C.J. and Zhang, Z.C., 2018. Genesis of the Wurinitu W-Mo deposit, Inner Mongolia, Northeast China: constraints from geology, fluid inclusions and isotope systematics. *Ore Geology Reviews*, 94: 367–382. (第一作者为群体成员)
  10. Zhang, F.F., Wang, Y.H.\*, Liu, J.J. and Wang, J.C., 2018. Ore genesis and hydrothermal evolution of the Wulandele Mo deposit, Inner Mongolia, Northeast China: Evidence from geology, fluid inclusions and H–O–S–Pb isotopes. *Ore Geology Reviews*, 93: 181–199. (第一作者为群体成员研究生)
  11. Zhao, R., Wang, Q.F.\*, Deng, J., Santosh, M., Liu, X.F. and Cheng, H.Y., 2018. Late Mesozoic magmatism and sedimentation in the Jiaodong Peninsula: New constraints on lithospheric thinning of the North China Craton. *Lithos*, 322: 312–324. (第一作者为博士生)
  12. Gao, L., Wang, Q.F.\*, Deng, J., Zhang, S.H. and Yang, Z.Y., 2018. Relationship between Orogenic Gold Mineralization and Crustal Shearing along Ailaoshan-Red River Belt, Southeastern Tibetan Plateau: New Constraint from Paleomagnetism. *Geochemistry Geophysics Geosystems*, 19: 1–18. (第一作者为博士后)
  13. Yang, L., Zhao, R., Wang, Q.F.\*, Liu, X.F. and Carranza, E.J.M., 2018. Fault geometry and fluid-rock reaction: Combined controls on mineralization in the Xinli gold deposit, Jiaodong Peninsula, China. *Journal of Structural Geology*, 111: 14–26. (第一作者为博士生)
  14. Chen, F.G., Wang, Q.F.\*, Yang, S.H., Zhang, Q.Z., Liu, X.F., Chen, J.H. and Carranza, E.J.M., 2018. Space-time distribution of manganese ore deposits along the southern margin of the South China Block, in the context of Palaeo-Tethyan evolution. *International Geology Review*, 60: 72–86. (第一作者为博士生)
  15. Lin, Y., Wang, Q.F.\*, Wang, Y.N. and Li, G.J., 2018. Proto- to Paleo-Tethyan evolution of the eastern margin of Simao block. *Gondwana Research*, 62: 61–74. (第一作者为博士生)
  16. Chen, J.H., Wang, Q.F.\*, Zhang, Q.Z., Emmanuel, J.M.C. and Wang J.Q., 2018. Mineralogical and geochemical investigations on the iron-rich gibbsitic bauxite in Yongjiang basin, SW China. *Journal of Geochemical Exploration*, 188:413–426. (第一作者为博士生)

17. Chai, H, Wang Q.F.\*, Tao, J.X., Santosh, M., Ma T.F. and Zhao, R., 2018. Late Carboniferous to Early Permian magmatic pulses in the Uliastai continental margin linked to slab rollback: Implications for evolution of the Central Asian Orogenic Belt. *Lithos*, 4592: 1-53. (第一作者为博士生)
18. Zhang, Q.W., Wang, Q.F.\*, Li, G.J. and Cui, X.L., 2018. Fractionation process of high-silica magmas through the lens of zircon crystallization: A case study from the Tengchong Block, SW China. *Chemical Geology*, 496: 34-42. (第一作者为博士生)
19. Zhang, Y.S., Hou, T.\*, Veksler, I.V., Leshner, C.E. and Namur, O., 2018. Phase equilibria and geochemical constraints on the petrogenesis of high-Ti picrite from the Paleogene East Greenland flood basalt province. *Lithos*, 300-301:20-32 (第一作者为博士生) .
20. Cheng, Z.G., Zhang, Z.C.\*, Chai, F.M., Hou, T., Santosh, M., Turesebekov, M. and Nurtaev B.S., 2018. Carboniferous porphyry Cu-Au deposits in the Almalyk orefield, Uzbekistan: the Sarycheku and Kalmakyr examples. *International Geology Review*, 60: 1-20. (第一作者为博士后)
21. Zhang, D.Y., Zhang, Z.C.\*, Huang, H., Cheng, Z.G. and Charlier, B., 2018. Petrogenesis and metallogenesis of the Wajilitag and Puchang Fe-Ti oxide-rich intrusive complexes, northwestern Tarim Large Igneous Province. *Lithos*, 304-307: 412-435. (第一作者为前博士生)
22. Cheng, Z.G., Zhang, Z.C.\*, Aibai A., Kong, W.L. and Holtz, F., 2018. The role of magmatic and post-magmatic hydrothermal processes on rare-earth element mineralization: A study of the Bachu carbonatites from the Tarim Large Igneous Province, NW China. *Lithos*, 314-315: 71-87. (第一作者为博士后)
23. Cheng, Z.G., Zhang, Z.C.\*, Turesebekov, A., Nurtaev B.S., Xu, L.J. and Santosh, M., 2018. Petrogenesis of gabbroic intrusions in the Valerianov-Beltau-Kurama magmatic arc, Uzbekistan: The role of arc maturity controlling the generation of giant porphyry Cu—Au deposits. *Lithos*, 320-321: 75-92. (第一作者为博士后)
24. Jin, Z.L., Zhang, Z.C.\*, Santosh, M. and Han, L., 2018. Occurrence and chemical compositions of amphiboles in altered dioritic rocks of Laiwu skarn-type iron deposit in West Shandong Area, China. *Resource Geology*, 68(4): 425-445. (第一作者为前博士生)
25. Xie, Q.H., Zhang, Z.C.\*, Campos, E., Cheng, Z.G., Fei, X.H., Liu, B.X., Qiu, Y.R., Santosh, M., Ke, S. and Xu, L.J., 2018. Magnesium isotopic composition of continental arc andesites and the implications: A case study

- from the El Laco volcanic complex, Chile. *Lithos*, 318– 319: 91– 103.(第一作者为博士后).
26. Fei, X.H., Zhang, Z.C.\*, Cheng, Z.G., Santosh, M., Jin, Z.L., Wen, B.B., Li, Z.X. and Xu, L.J., 2018. Highly differentiated magmas linked with polymetallic mineralization: A case study from the Cuihongshan granitic intrusions, Lesser Xing'an Range, NE China, *Lithos*, 302-303: 158-177. (第一作者为博士生).
  27. Yang, L.Q.\*, He, W.Y., Gao, X., Xie, S.X. and Yang, Z., 2018. Mesozoic multiple magmatism and porphyry–skarn Cu–polymetallic systems of the Yidun Terrane, Eastern Tethys: Implications for subduction- and transtension-related metallogeny. *Gondwana Research*, 62: 112-126 (第一作者为群体成员) .
  28. Gao, X, Yang, L.Q.\* and Evan, O., 2018. The lithospheric architecture of two subterranea in the eastern Yidun Terrane, East Tethys: Insights from Hf–Nd isotopic mapping. *Gondwana Research*, 62: 127-143 (第一作者为博士后) .
  29. Bao, X.S., Yang, L.Q.\*, He, W.Y. and Gao, X., 2018. Importance of Magmatic Water Content and Oxidation State for Porphyry-Style Au Mineralization: An Example from the Giant Beiya Au Deposit, SW China. *Minerals*, 8(10): 441 (第一作者为博士生) .
  30. Wang, C.M.\*, Leon, B., Chen, J.Y., Yang, L.F., Zhang, D., Du, B. and Shi, K.X., 2018. The genesis of the Liancheng Cu–Mo deposit in the Lanping Basin of SW China: Constraints from geology, fluid inclusions, and Cu–S–H–O isotopes. *Ore Geology Reviews*, 92: 113–128.(第一作者为群体成员).
  31. Wang, C.M.\*, Leon, B., Deng, J. and Dong M.M., 2018. Crustal architecture and its controls on mineralisation in the North China Craton. *Ore Geology Reviews*, 98: 109-125(第一作者为群体成员).
  32. Wang, C.M.\*, Yang, L.F., Leon, B., Evans, N., Chen, J.Y. and Du, B., 2018. Mineralization processes at the giant Jinding Zn–Pb deposit, Lanping Basin, Sanjiang Tethys Orogen: Evidence from in-situ trace element analysis of pyrite and marcasite. *Geological Journal*, 53: 1279-1294.(第一作者为群体成员).
  33. Yuan, F., Liu, J.J.\*, Emmanuel, J.M.C., Zhai, D.G., Wang Y.H., Zhang, S., Sha, Y.Z., Liu, G. and Wu, J., 2018. The Guangshigou uranium deposit, northern Qinling Orogen, China: a product of assimilation-fractional

crystallization of pegmatitic magma. *Ore Geology Reviews*, 99(1): 17-41.(第一作者为博士生)

34. Yuan, F., Liu, J.J.\*, Emmanuel, J.M.C., Zhang, S., Zhai, D.G., Liu, G., Wang, G.W., Zhang, H.Y., Sha, Y.Z. and Yang, S.S., 2018. Zircon trace element and isotopic (Sr, Nd, Hf, Pb) effects of assimilation-fractional crystallization of pegmatite magma: a case study of the Guangshigou biotite pegmatites from the North Qinling Orogen, central China. *Lithos*, 302-303(1): 20-36(第一作者为博士生).
35. Zhai, D\*, Liu, J., Zhang, H., Tombros, S. and Zhang, A., 2018. A magmatic-hydrothermal origin for Ag-Pb-Zn vein formation at the Bianjiadayuan deposit, Inner Mongolia, NE China: Evidences from fluid inclusion, stable (C-H-O) and noble gas isotope studies. *Ore Geology Reviews*, 101: 1-16 (第一作者为群体成员).
36. He WY, Yang LQ\*, Lu YJ, Jeon H, Xie SX and Gao X. 2018. Zircon U-Pb dating, geochemistry and Sr-Nd-Hf-O isotopes for the Baimaxueshan granodiorites and mafic microgranulars enclaves in the Sanjiang Orogen: Evidence for westward subduction of Paleo-Tethys. *Gondwana Research* 62(SI): 144-162 (第一作者为地学院教师) .
37. Yang, S.J., Wang, QF\*, Zhang, QZ., Chen, JH., Huang, YX. 2018 Terrestrial deposition processes of quaternary gibbsite nodules in the Yongjiang Basin, southeastern margin of Tibet, and implication for the genesis of ancient karst bauxite. *Sedimentary Geology* 373:292-306 (第一作者为地学院教师) .