

# 斑岩型矿床母岩浆中水的来源及其成矿机理

鲍新尚, 杨立强, 和文言

(中国地质大学(北京)地质过程与矿产资源国家重点实验室, 北京 100083)

**摘要:**母岩浆富水( $H_2O$  质量分数高于 4%)被认为是斑岩体中 Cu、Au 等成矿元素富集成矿的关键因素,是形成岩浆-热液成矿系统的必要条件之一,主要表征为成矿斑岩中角闪石斑晶发育,轻稀土元素富集而中稀土元素亏损, $w(Sr)/w(Y)$  和  $w(La)_N/w(Yb)_N$  值高( $w(Sr)/w(Y) > 40$ ,  $w(La)_N/w(Yb)_N > 20$ )等特征。弧环境下形成的斑岩成矿系统中的水主要来源于俯冲洋壳或交代岩石圈的脱水作用;而后碰撞环境下形成的斑岩成矿系统中的水可能主要源自矿区内同时代、共空间产出的镁铁质岩浆的混合注入,或含矿岩浆自身的分异结晶。尽管不同地球动力学背景下形成的斑岩成矿系统母岩浆中水的来源和富集机制不同,然而它们仍然被认为具有统一的成矿机理:母岩浆在地幔源区或地壳岩石部分熔融过程中,水的加入可以降低其熔点,促进源区含 Cu、Au 硫化物重熔,或萃取岩石中 Cu、Au 成矿元素,或聚集岩浆中分散分布的金属元素,形成富金属的岩浆;含矿岩浆就位后,富水岩浆很快达到水饱和,大量流体出溶,岩浆水会与各类卤化物一起以独立流体相形式从熔体中分离出来,这种富含挥发分和高盐度的流体具有很强的金属携带能力,为随后发生的斑岩矿化提供热液和金属来源,提高母岩浆的成矿潜力。

**关键词:**岩浆水含量;岩浆水来源;板块脱水作用;混合作用;结晶分异作用;成矿机理;斑岩型矿床  
**中图分类号:**P58 **文献标志码:**A

## Origin and Mineralization Mechanism of the Water in Parent Magma of Porphyry Deposit

BAO Xin-shang, YANG Li-qiang, HE Wen-yan

(State Key Laboratory of Geological Processes and Mineral Resources, China University of Geosciences,  
Beijing 100083, China)

**Abstract:** The parent magma rich in water (mass fraction of water is more than 4%) is the critical factor for the enrichment and mineralization of ore-forming elements (Cu, Au, etc.), and one of the key to the formation of magma-hydrothermal systems. The main characteristics include that the occurrence of amphibole phenocrysts, enriched light rare earth elements, depleted middle rare earth elements, and  $w(Sr)/w(Y) > 40$  and  $w(La)_N/w(Yb)_N > 40$ . The water of porphyry metallogenic system in arc settings is derived from the dehydration melting of oceanic plate or metasomatized lithospheric mantle; however, the water of porphyry metallogenic system in post-collisional settings, which is lack of direct subduction source, is likely to be derived from mixing of water-rich mafic magma with melt at lower and/or upper-crustal depths, or from crystallization

收稿日期:2016-03-22

基金项目:国家重点基础研究发展计划(“九七三”计划)项目(2015CB452605, 2015CB452606);

北京市优秀博士学位论文指导老师科研项目(20111141501);中国地质调查局地质大调查项目(12120114013501);

中国博士后科学基金项目(2015M581143);高等学校学科创新引智计划项目(B07011)

作者简介:鲍新尚(1991-),女,河北肃宁人,理学硕士研究生, E-mail:2687190085@qq.com。

通讯作者:杨立强(1971-),男,湖南湘潭人,教授,博士研究生导师,理学博士, E-mail:lqyang@cugb.edu.cn。

differentiation of ore-related magmas themselves. Although the geodynamic background of porphyry metallogenic system and the enrichment mechanism of magmatic water in ore-related parent magma are different, they are still considered as the uniform mineralization mechanism. The higher magmatic water is the necessary conditions of forming magmatic hydrothermal mineralization system. During the process of partial melting, the addition of  $H_2O$  can reduce the melting point of magma, promote the re-melting of the source containing Cu, Au sulfide, or the extraction of Cu, Au ore-forming elements from rock, or the aggregation of the scattered distribution of metal elements in magma, forming metal-rich magma; after the emplacement of ore-related magma, the water-rich magma will quickly reach saturation, making abundant fluids exsolve from magma and magmatic water with all kinds of halide separate from the melt in the form of independent fluid phase. The high-salinity fluid, which is rich in volatile possessing strong capacity of carrying metals, can prompt copper and gold clathrates, and other metal fractions enriched in the fluid, and provide main ore-forming fluids and metal source for the porphyry mineralization, and generate (or improve) the metallogenic potential of parent magma.

**Key words:** content of magmatic water; origin of magmatic water; plate dehydration; mixing; crystallization differentiation; mineralization mechanism; porphyry deposit

## 0 引言

斑岩型矿床作为金属 Cu 的最主要来源和 Mo、Au 等金属的重要来源,构成从斑岩型 Cu、Mo、Au 矿床到斑岩型 Cu-Mo、Cu-Au 和 Pb-Zn 矿床的连续成矿谱系<sup>[1-10]</sup>。97% 的大型—超大型斑岩 Cu(Mo、Au)矿床产于岛弧和陆缘弧环境<sup>[11-12]</sup>,且与洋壳流体交代的地幔楔部分熔融形成的富水钙碱性弧岩浆密切相关<sup>[13-15]</sup>。近年来大量研究表明,与俯冲无关的大陆碰撞造山带环境和陆内环境同样也是大型—巨型斑岩型矿床的重要产出环境<sup>[1]</sup>,如东特提斯成矿带<sup>[16-18]</sup>、中国东部<sup>[12,19]</sup>和中亚—蒙古(古亚洲)斑岩成矿带<sup>[20-22]</sup>。尽管这些后碰撞斑岩铜矿与岛弧及陆缘弧斑岩矿床有相似的蚀变和矿化特征<sup>[23]</sup>,但其含矿岩浆起源及成矿机理却很难用经典的斑岩成矿模式来解释<sup>[15]</sup>。

大量研究表明,母岩浆富水( $H_2O$  含量(质量分数,下同)超过 4%)是形成斑岩型矿床的关键<sup>[13,24-25]</sup>。在岩浆环境下,水的加入可以降低岩浆的熔点,促进源区含 Cu、Au 硫化物重熔<sup>[26-27]</sup>,或萃取岩石中 Cu、Au 成矿元素,或聚集岩浆中分散分布的金属元素<sup>[28]</sup>,从而有利于斑岩侵入体富集 Cu、Au 等成矿元素<sup>[24]</sup>,形成富金属的岩浆。当熔体中岩浆水含量大于岩浆中水的溶解度时,发生水的出溶。水在硅酸盐熔体中的溶解度是压力的函数,在几千巴(1 bar 为 105 Pa)或更低的压力下,熔体中饱和水的含量随压力降低而减小<sup>[1]</sup>,且初始岩浆水含量越高,岩浆越容

易达到水饱和<sup>[15]</sup>。因此,岩浆中较高的水含量能够促使含矿岩浆就位后很快达到水饱和,大量流体出溶使得不相容的金属元素(如 Cu、Au、Mo)优先向流体中分配<sup>[29]</sup>,起到富集金属的作用<sup>[15]</sup>。含水岩浆具有出溶流体的前提条件,而岩浆能否出溶热液是其成矿的必要前提条件<sup>[30]</sup>,因此,高含量的岩浆水被认为是形成岩浆-热液成矿系统的必要条件<sup>[15,31]</sup>。

与俯冲环境有关的斑岩型矿床中母岩浆具有较高的水含量,多被归因于俯冲大洋板块的脱水作用<sup>[11,32]</sup>。但越来越多的证据显示,中—上地壳尺度的分异结晶也能提高弧环境含矿岩浆中的水含量<sup>[24,33]</sup>,且与俯冲无关的大陆碰撞造山带环境和陆内环境下形成的斑岩矿床母岩浆水的来源及富集机制目前尚无定论<sup>[34-35]</sup>,而母岩浆水的来源和富集机制对于明确斑岩型矿床的成矿机理具有重要意义<sup>[13-14,36]</sup>。为此,本文在厘定岩浆水含量定义与富水岩浆特征及其估算方法的基础上,深入剖析斑岩成矿系统母岩浆水的来源和富集机制,进而探讨斑岩矿床富水岩浆的成矿机理。

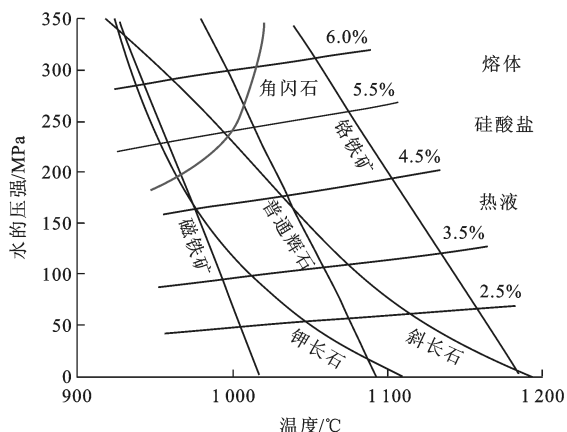
## 1 岩浆水含量

### 1.1 富水岩浆定义及特征

岩浆水是指岩浆呈熔融状态存在时含有的水,不是全岩地球化学分析中  $H_2O^+$  或烧失量<sup>[37]</sup>,岩浆富水是指岩浆中  $H_2O$  含量超过 4%<sup>[27,31]</sup>。

岩浆水含量的差异会影响硅酸盐熔体中矿物冷却结晶的顺序。在基性岩浆系统中,在水的压强为

0 Pa(干性体系)的条件下矿物晶出的顺序是斜长石、橄榄石、斜方辉石、普通辉石;而在水的压强超过 360 MPa 和熔体中  $\text{H}_2\text{O}$  含量超过 6.5%(富水体系)条件下,角闪石最先晶出,斜长石则最晚晶出(图 1)<sup>[32,37]</sup>。同时,在恒定温度和压力的条件下,角闪石结晶温度随着岩浆中水含量的升高而升高;与此相反,斜长石结晶温度则随岩浆中水含量的升高而下降<sup>[37-38]</sup>。因此,在岩浆富水的情况( $\text{H}_2\text{O}$  含量超过 4%)下,随着水含量的升高,富水矿物角闪石会大量晶出,且会抑制或减弱无水矿物斜长石的晶出<sup>[32,37]</sup>。稀土元素在斜长石/熔体和角闪石/熔体分配中存在差异,导致在富水岩浆分异过程中角闪石大量晶出并抑制或减弱斜长石结晶的情况下,由于中稀土元素在角闪石/硅酸盐熔体之间存在较高的分配系数,所以角闪石的分异结晶会导致残余岩浆中稀土元素(如 Gd、Dy)的亏损,最终呈现犁状稀土元素(REE)标准化图解,以及高 Sr、弱或无明显的 Eu 负异常的岩石地球化学特征<sup>[27-28]</sup>。



百分数为  $\text{H}_2\text{O}$  含量;图件引自文献<sup>[37]</sup>

图 1 长英质熔体中  $\text{H}_2\text{O}$  含量与矿物从熔体中晶出顺序的关系

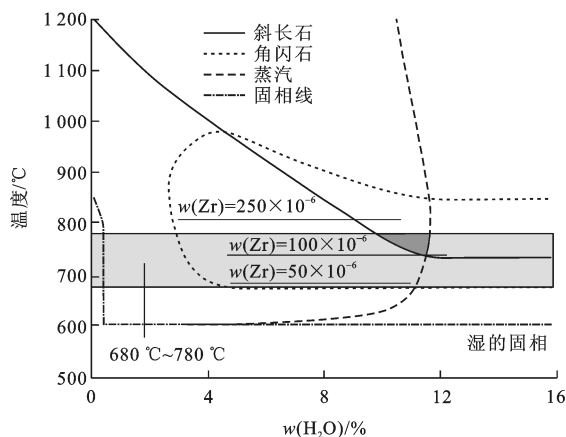
Fig. 1 Contents of  $\text{H}_2\text{O}$  Dissolved in Silicate Melt Strongly Affecting the Order of Mineral Crystallization from the Melt

Wang 等研究冈底斯成矿带内古新世—始新世和渐新世—中新世时期岩浆岩的岩相学与岩石地球化学特征,发现古新世—始新世时期的岩浆岩具有极少的角闪石和云母、低  $w(\text{Sr})/w(\text{Yb})$  值(低于 40)和负 Eu 异常( $0.76 \pm 0.19$ );相反,渐新世—中新世时期的岩浆岩可见角闪石斑晶、高  $w(\text{Sr})/w(\text{Y})$  值(高于 40)和弱或无明显的 Eu 负异常(渐新世为  $0.99 \pm 0.27$ ,中新世为  $0.95 \pm 0.13$ );古新世—始新世的岩浆贫水( $\text{H}_2\text{O}$  含量低于 4%),渐新世—中新世的岩浆富水( $\text{H}_2\text{O}$  含量超过 4%)<sup>[27]</sup>。

## 1.2 岩浆水含量的估算方法

当前,对岩浆水含量进行估算的方法归纳起来有以下 4 种:

(1)在岩相学及全岩主、微量元素数据估算矿物生成顺序的基础上,利用 LA-ICP-MS 获得含矿斑岩锆石中微量元素数据计算锆石饱和温度,并结合温度-水相图(富钾钙碱性英安岩结晶试验得出的水-温度平衡相图<sup>[39]</sup>)估算含矿岩浆水含量<sup>[13]</sup>。Lu 等利用此方法得出藏南中新世后碰撞斑岩铜矿带的成矿斑岩中锆石的饱和温度为  $680^\circ\text{C} \sim 780^\circ\text{C}$ ,并以此估算成矿岩浆的水含量为 10%~12%(图 2)<sup>[13]</sup>。该结果不仅与美国加利福尼亚州 Mount Shasta 复式火山岩中具有高  $w(\text{Sr})/w(\text{Y})$  值的安山岩和英安岩熔融包裹体中  $\text{H}_2\text{O}$  含量超过 10%的结果吻合<sup>[40]</sup>,也与 Prouteau 等提出岩浆形成无斜长石、含角闪石斑晶相的条件是在  $750^\circ\text{C} \sim 800^\circ\text{C}$  时熔体出溶超过 10%的  $\text{H}_2\text{O}$ <sup>[41]</sup> 相一致。



$w(\cdot)$  为元素或化合物含量;图件引自文献<sup>[13]</sup>和<sup>[39]</sup>

图 2 0.8 GPa 下温度-水平衡相

Fig. 2 Phase Equilibrium Diagram of Temperature- $\text{H}_2\text{O}$  Under the Pressure of 0.8 GPa

(2)富镁角闪石中  $\text{Al}^{\text{VI}}$  ( $\text{Al}$  的六次配位)含量对岩浆中水含量的变化很敏感,可使用电子探针系统获得角闪石主量元素组成,利用  $w(\text{H}_2\text{O}) = 5.215 \cdot w(\text{Al}^{\text{VI}}) + 12.280$ <sup>[42]</sup> 估算的斑岩体、暗色包体及煌斑岩中岩浆水含量;使用电子探针获得斜长石组分特征,可通过其  $\text{Al}^*$  值的分布特征计算岩浆水含量,高岩浆水含量可促使  $\text{AlAl}_3\text{SiO}_8$  和  $[\ ]\text{Si}_4\text{O}_8$  ( $[ ]$  代表斜长石阳离子位置)发生置换作用,导致  $\text{Al}$  置换斜长石中  $\text{Na}^+$ 、 $\text{Ca}^{2+}$  等阳离子,进而引起  $\text{Al}^*$  值大于 1,故而同心圆环状暗示含水流体或富水岩浆进入到岩浆房<sup>[43]</sup>。

(3)利用前期工作获得的全岩主、微量元素数据进行评估,基性岩浆在不同水含量条件下矿物

的晶出顺序不同,富水体系角闪石先结晶,而干的体系斜长石先结晶<sup>[32,37]</sup>。岩浆中 Sr、Eu 等元素主要赋存于斜长石中,而中—重稀土元素主要赋存于角闪石中,因而可利用主、微量元素数据变化情况来定性了解岩浆的含水情况。前人研究显示,在钙碱性富水熔体中, Sr 元素的斜长石/熔体分配系数是 3~5,但 Y 元素的角闪石/熔体分配系数是 2~6<sup>[44]</sup>,因此,抑制斜长石结晶引起岩浆富集 Sr,但大量晶出角闪石会引起岩浆亏损 Y<sup>[24]</sup>,故而早期母岩浆  $w(\text{Sr})/w(\text{Y})$  值逐渐升高的趋势暗示岩浆中岩浆水的含量在逐渐增加<sup>[16]</sup>。或者在高岩浆水条件下,角闪石比磁铁矿晶出早(图 1),因为  $\text{V}^{4+}$  在磁铁矿/熔体分配系数是角闪石/熔体分配系数的 10 倍,且 Ti、Sc、Y 等元素优先分配进入到角闪石中,从而  $w(\text{V})/w(\text{Sc})$  与  $w(\text{SiO}_2)$  呈正相关关系可以暗示岩浆富水<sup>[37]</sup>。

(4) 岩浆结晶过程中矿物捕获原始岩浆而形成熔融包裹体。使用激光剥蚀电感耦合等离子体质谱仪(LA-ICP-MS)、电子探针(ECMP)<sup>[45]</sup>和傅立叶变换红外光谱仪(FTIR)<sup>[30]</sup>分析成矿前斑岩体中熔融包裹体的主、微量元素和挥发分含量,从而估算原始岩浆中水含量。这种方法相对于上述 3 种确定岩浆中水含量的定量方法更为准确<sup>[30]</sup>。但熔融包裹体在岩浆演化过程中会部分或全部结晶,或被后期热液改造,因而需要确保用于测试分析的熔融包裹体捕获单一、均质的熔体;后期结晶的均一玻璃相可以用于分析主、微量元素和挥发分含量<sup>[45]</sup>。Student 等利用矿物电子探针分析 Red Mountain 安山岩中石英斑晶熔融包裹体的组分为  $\text{Qtz}_{40}\text{Or}_{20}\text{Ab}_{40}$ <sup>[45]</sup>,与

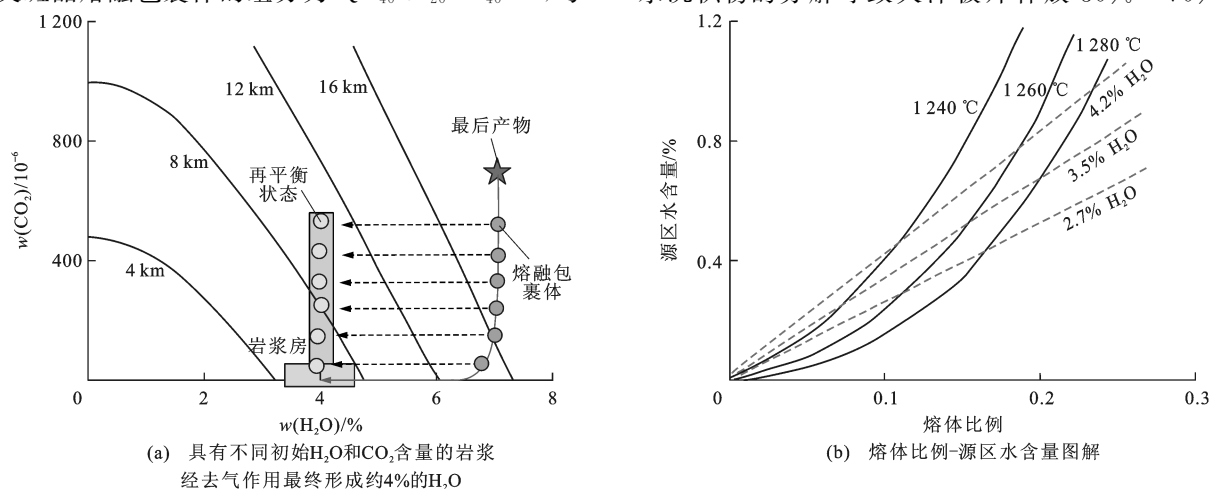
Burnham 提出的熔体组分<sup>[14]</sup>相似,因此,该熔融包裹体的岩浆水含量(4.7%)能代表初始熔体中岩浆水含量。Lowenstern 使用傅立叶变换红外光谱仪分析得到美国犹他州某火山岩石英斑晶熔融包裹体中水含量为 6%~8%,比热液矿床相关的英安岩和流纹岩中水含量(3%~7%)偏高<sup>[46]</sup>。如果岩浆体系不出现不混溶流体,该数据可以代表火山喷发前岩浆中水含量。

## 2 母岩浆水来源及富集机制

### 2.1 大洋板块的脱水作用

Defant 等研究表明,除少数具有埃达克质亲和性的钙碱性岩浆为年轻大洋板片直接熔融的产物<sup>[47]</sup>,绝大多数钙碱性岩浆都是俯冲板片释放流体交代地幔楔部分熔融的产物<sup>[11,32]</sup>。Plank 等研究显示,俯冲环境下斑岩型矿床中几乎所有镁铁质母岩浆中水含量都在 2%~6%之间,平均为 4%<sup>[48]</sup>。不同火山弧的弧岩浆具有相似岩浆水含量,主要原因可能是:①富水岩浆( $\text{H}_2\text{O}$  含量超过 4%)在上升过程中达到气体饱和并持续“去气”,以挥发分形式去除多余的岩浆水[图 3(a)],因为在 6~8 km 深度的岩浆房内岩浆水的溶解度约为 4%;②或是在恒定温度和压力条件下,源区高水含量引起高熔融程度产生的熔体或低水含量引起低熔融程度形成的熔体可以具有相似岩浆水含量(约 4%)[图 3(b)],即初始岩浆在地幔时已具有相似水含量<sup>[48]</sup>。

源区岩浆在地幔时已具有较高的岩浆水含量被归因于大洋板块的脱水作用<sup>[31-32]</sup>。初始俯冲时,含水沉积物的分解导致大洋板片释放 30%~70%的



图件引自文献<sup>[48]</sup>;图(b)中,实线代表不同温度下熔体比例和源区水含量的线性关系,虚线代表熔体中水含量

图 3  $\text{H}_2\text{O}-\text{CO}_2$  图解以及熔体比例-源区水含量图解

Fig. 3 Diagrams of  $\text{H}_2\text{O}-\text{CO}_2$  and Melt Fraction-content of Mantle  $\text{H}_2\text{O}$

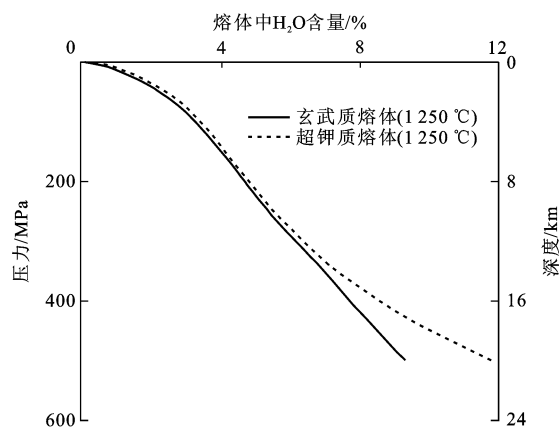


水<sup>[49]</sup>;随着大洋板块继续俯冲,压力增加(由早期1.2~1.8 GPa区间增加到1.4~2.0 GPa区间)<sup>[50]</sup>,俯冲的大洋板片从蓝片岩相向榴辉岩相过渡(约100 km)<sup>[1]</sup>,使得俯冲大洋板片上玄武岩和含水沉积物中含结构水的矿物(如角闪石、黑云母、蛇纹石等)继续分解、脱水<sup>[11,49,51]</sup>,最终析出高温的含水熔体/流体<sup>[1]</sup>。当压力高于2 GPa(约60 km深度)时大洋岩石圈脱水熔融析出的含水熔体/流体在浮力作用下上升,交代上覆的深部低温地幔楔,通过降低地幔橄榄岩固相线温度导致深部地幔楔发生部分熔融。深部低温地幔楔熔融形成的含水流体/熔体在上升过程中与上覆更浅、更热的地幔(岛弧岩浆的地幔源区)发生交代作用,加水导致固相点降低,诱发地幔楔发生部分熔融,产生富水弧岩浆<sup>[40]</sup>。弧岩浆在整个岩浆形成过程中获得高水含量<sup>[40]</sup>。大洋板块的脱水作用过程会把大量的水、硫、卤素、亲流体的大离子亲石元素(LILE)以及少量的亲铁元素(Cu、Au、PGE)和亲铜元素<sup>[32]</sup>输送到地幔楔<sup>[11]</sup>;同时,水的大量存在使得俯冲洋壳所释放出的流体或熔融所产生的岩浆携带大量的 $\text{Fe}^{3+}$ <sup>[51]</sup>,这种熔体进入地幔楔将导致地幔氧逸度增高,使地幔中的金属硫化物被氧化,从而有利于地幔中亲铜元素以硫酸盐的形式进入熔体<sup>[51]</sup>。这种富水、富金属的岩浆在下地壳下部经历MASH过程(熔融、同化、存储、均一)<sup>[52-53]</sup>,并在浅部地壳内发育长期稳定的岩浆房,形成初始岛弧岩浆<sup>[54]</sup>。

## 2.2 岩浆混合作用

周涛发等研究指出,源自富集岩石圈地幔的富含成矿物质、矿化剂及水的基性岩浆上升侵入到深部岩浆房中,并发生岩浆混合作用,促使母岩浆富水<sup>[12]</sup>。镁铁质超钾质岩浆具有较高的水溶解度(在500 MPa压力下约为10.7%),且其溶解度随压力的增大而增加(图4)<sup>[55]</sup>。富水的超钾质岩浆上涌到深部地壳发生底侵作用,富水的超钾质岩浆作为一种新生组分注入到下地壳底部。一方面其释放热<sup>[56]</sup>和水促使年轻的加厚下地壳部分熔融,形成埃达克质含矿岩浆<sup>[57-58]</sup>;另一方面,富水超钾质岩浆上升过程中压力骤降导致水的溶解度急剧下降<sup>[14,36]</sup>,从而将其出溶的流体注入到混合岩浆中,提高陆内斑岩型矿床母岩浆的水含量<sup>[14,58]</sup>,并为含矿岩浆贡献部分成矿金属组分<sup>[57]</sup>。

形成冈底斯含矿岩浆的下地壳不是普通的下地壳,而是一种俯冲改造的下地壳<sup>[59]</sup>或新生下地壳<sup>[16]</sup>,其主要成矿的渐新世—中新世岩浆水含量远高于古



图件引自文献[55]

图4 超钾质岩浆中高水溶解度-压力(深度)图解

Fig. 4 Diagram of High  $\text{H}_2\text{O}$  Solubility of Ultrapotassic Magma and Pressure (Depth)

新世—始新世岩浆水含量<sup>[27]</sup>。Hou等分别将这些含矿岩浆的富水性归结为早期弧岩浆在下地壳的富水堆积体(如角闪岩)发生熔融<sup>[34]</sup>或下地壳熔融过程中的角闪石发生分解<sup>[16]</sup>。但是充分水化了的角闪岩水含量低于1.2%<sup>[60]</sup>,因此,含角闪岩相下地壳的部分熔融产生的埃达克质熔体不可能具有形成斑岩型铜金矿所需的高水含量(高于9%)<sup>[13-14,36]</sup>。因此,必须有大量额外的水加入到由角闪石-榴辉岩相或石榴石-角闪岩相下地壳部分熔融形成的成矿岩浆中,才可能为成矿提供足够的水<sup>[14]</sup>。Yang等在西藏驱龙斑岩型铜矿开展研究时,发现该矿床成矿期除发育含矿斑岩外,还发育大量同时期的超钾质岩脉,以及发现同时具有类埃达克质和超钾质特征的高镁闪长斑岩,从而认为这些超钾质岩脉可能是形成斑岩型铜矿所需水的重要载体,是成矿岩浆中水的主要来源,而且岩浆混合作用提高了西藏驱龙母岩浆的水含量<sup>[14]</sup>。此外,周涛发等对中国东部重要的陆内成矿带之一的长江中下游成矿带内含矿斑岩进行岩石地球化学和Sr-Nd同位素研究,也提出这些含矿斑岩可能是源自富集地幔的岩浆和加厚下地壳部分熔融形成岩浆混合的产物,且镁铁质岩浆的混入使得混合岩浆富水、硫和金属(Cu、Au)等<sup>[12]</sup>。

## 2.3 岩浆结晶分异作用

岩浆在深部结晶<sup>[61]</sup>可能提高母岩浆水含量<sup>[32]</sup>。在相对干的体系下,岩浆晶出长石或石英等无水矿物,水作为不相容组分在熔体中不断增加<sup>[62]</sup>,从而逐渐提高残余岩浆中水含量,使得岩浆相对富水( $\text{H}_2\text{O}$ 含量为3%~4%)<sup>[45]</sup>。Lowenstern通过红外波谱方法分析美国犹他州Pine Grove地区年龄

为 23 Ma 的火山凝灰岩石英斑晶玻璃包体中  $\text{H}_2\text{O}$  与  $\text{CO}_2$  含量时发现,被捕获的硅酸盐熔体中  $\text{H}_2\text{O}$  含量较高,为 6%~8%<sup>[46]</sup>。

Loucks 研究显示,源自地幔的镁铁质岩浆在莫霍面(Moho)附近受高压影响冷却缓慢,在镁铁质—超镁铁质岩浆持续分离结晶(晶出镁铁质—超镁铁质堆晶杂岩)过程中岩浆房有足够的时间间歇性补给岩浆<sup>[37]</sup>。随着岩浆补给和岩浆持续结晶分异过程的不断循环,水作为不相容组分持续积累<sup>[31,38]</sup>,使得岩浆房内残余岩浆中岩浆水逐渐升高<sup>[63]</sup>,而随着岩浆上涌过程中持续结晶导致酸性增强,岩浆逐渐演化为长英质岩浆<sup>[37,63-65]</sup>。

Lu 等研究西藏南部的高  $w(\text{Sr})/w(\text{Y})$  流纹质英安岩成矿斑岩体时,发现下地壳加水熔融虽可以形成富水、高  $w(\text{Sr})/w(\text{Y})$  的熔体,但该熔体无法达到母岩浆的高  $\text{Mg}^\#$  值;相反,源自地幔的镁铁质包体具有高  $\text{Mg}^\#$  值,足以达到母岩浆的高  $\text{Mg}^\#$  值<sup>[13]</sup>。因此,冈底斯成矿带富硅、富水的长英质岩浆可能源自地幔部分熔融形成的富水镁铁质岩浆,且成矿的长英质岩浆可能属于镁铁质岩浆在地壳尺度经过岩浆结晶分异和同化作用形成的岩浆演化产物。

### 3 富水岩浆成矿机理

在源区地幔或地壳岩石部分熔融过程中,富水岩浆一方面通过降低地幔或地壳岩石的熔融温度,提高其熔融程度,形成的高温岩浆会降低硫化物的稳定性,而引起源区以残余物形式存在的含 Cu(Au)硫化物再活化<sup>[27]</sup>,向岩浆中释放 Au、Cu 等元素<sup>[18]</sup>;另一方面,水的大量存在使得源区母岩浆常具有较高的氧逸度<sup>[11]</sup>,在高氧逸度条件下 S 元素主要以硫酸盐的形式溶解于岩浆之中<sup>[31]</sup>,导致优先向硫化物分配的 Cu、Au 等不相容元素向硅酸盐熔浆中富集<sup>[1]</sup>,最终形成富金属的岩浆。在此阶段,熔融态岩浆出溶流体,形成能够可靠记录岩浆初始流体的单向固结结构<sup>[66]</sup>。

含矿的富水岩浆就位后,其通过压力的降低(岩浆房脆性破裂或岩浆向上侵位)来降低水的溶解度,或通过岩浆持续结晶(在等压条件下晶出无水矿物)<sup>[37]</sup>逐渐提高岩浆水含量,促使熔体中水含量大于水在熔体中溶解度,从而导致岩浆水达到饱和,发生流体出溶现象<sup>[64]</sup>。大量的岩浆挥发分发生出溶引起岩浆中金属的聚集<sup>[64,67]</sup>,同时因岩浆减压(初次沸腾)与岩浆持续结晶(二次沸腾),从熔体中直接出溶的高盐度流体<sup>[68-70]</sup>(或超临界流体<sup>[32]</sup>)通常被

认为是 Au 和 Cu 等元素富集的最重要载体,该过程中 Au 与 Cu 一般以 Cl 的络合物形式迁移<sup>[71]</sup>,富集系数在 20~400 之间<sup>[67]</sup>,为随后发生的矽卡岩和(或)斑岩矿化提供热液和金属来源<sup>[72]</sup>。

在岩浆结晶过程中,岩浆中水含量大于水在岩浆中的溶解度时,岩浆会发生水的出溶,水出溶的时间是制约斑岩型矿床矿种的关键因素之一<sup>[25]</sup>。岩浆水饱和后会出溶流体,成矿元素将在流体相甚至气相之间分配,而成矿元素在熔体、晶体、流体之间分配系数的差异导致出溶流体中富集金属的种类存在差异<sup>[26]</sup>。初始熔体中大部分成矿元素(如 Fe、Cu、Au 等相容元素)可以作为微量成分进入早期结晶的硅酸盐和氯化物相(如 Cu 和 Au 是相容元素,较高的岩浆结晶程度导致 Cu 和 Au 被黑云母等铁镁质矿物消耗从而贫化)<sup>[73]</sup>,故而为保证 Cu(Au)等成矿元素进入流体以形成富 Cu(Au)的斑岩型矿床,水需要早出溶<sup>[29,73]</sup>;岩浆在结晶晚阶段演化出蒸气相和流体相,将造成许多不相容元素(如 W、Mo)在残余熔体中富集,形成相对贫 Cu(Au)、富 Mo(W)的斑岩型矿床。这可以解释富 Cu(Au)的斑岩型矿床形成深度较小(低于 5 km),斑岩型钼矿形成深度大(大于 5 km)的地质事实<sup>[26,62]</sup>。而岩浆水含量越高并非越有利于成矿,高岩浆水含量意味着低的岩浆固相点,这种岩浆很容易在较深的地壳中发生固结<sup>[15]</sup>,导致水从岩浆中出溶时几乎没有能量形成裂隙,流体很难发生对金属富集有重要影响的不混溶作用,形成无矿岩浆<sup>[29]</sup>。

### 4 结 语

(1)富水岩浆是指  $\text{H}_2\text{O}$  质量分数超过 4% 的一类岩浆,主要表征为成矿斑岩中角闪石斑晶发育,轻稀土元素富集而中稀土元素亏损, $w(\text{Sr})/w(\text{Y})$  和  $w(\text{La})_N/w(\text{Yb})_N$  值高( $w(\text{Sr})/w(\text{Y}) > 41$ 、 $w(\text{La})_N/w(\text{Yb})_N > 20$ )等特征。

(2)与俯冲环境有关的斑岩矿床中含矿岩浆具有较高的水含量被归因于大洋板块的脱水作用,板片或者俯冲交代岩石圈(包括下地壳富水的弧堆晶岩)的脱水熔融释放大量的水进入岩浆。与碰撞或后碰撞环境有关的斑岩型矿床富水岩浆中高水含量可能源自外来高水含量的镁铁质岩浆与地壳岩浆房内地壳熔体发生岩浆混合作用,或者岩浆房内岩浆在演化过程中通过晶出无水矿物来提高残余岩浆中水含量。

(3)母岩浆富水( $\text{H}_2\text{O}$  质量分数超过 4%)被认

为是斑岩体中 Cu、Au 等成矿元素富集成矿的必要条件之一。在源区地幔或地壳岩石部分熔融过程中,水的加入促使源区含 Cu(Au)硫化物重熔,或萃取岩石中 Cu、Au 成矿元素,或聚集岩浆中分散分布的金属元素,形成富金属的岩浆。含矿岩浆就位后,富水岩浆很快达到水饱和,导致大量流体出溶,岩浆水会与各类卤化物一起以独立流体相形式从熔体中分离出来,这种富含挥发分和高盐度的流体具有很强的金属携带能力,为随后发生的斑岩矿化提供热液和金属来源,提高母岩浆的成矿潜力。

#### 参考文献:

#### References:

- [1] 侯增谦,杨志明. 中国大陆环境斑岩型矿床:基本地质特征、岩浆热液系统和成矿概念模型[J]. 地质学报, 2009,83(12):1779-1817.  
HOU Zeng-qian, YANG Zhi-ming. Porphyry Deposits in Continental Settings of China: Geological Characteristics, Magmatic-hydrothermal Systems, and Metallogenic Model [J]. Acta Geologica Sinica, 2009, 83 (12):1779-1817.
- [2] 肖荣,李晓峰,王翠云,等. 江西德兴地区朱砂红斑岩铜矿成岩成矿年代学特征及其地质意义[J]. 地球科学与环境学报, 2016,38(1):55-65.  
XIAO Rong, LI Xiao-feng, WANG Cui-yun, et al. Diagenetic and Metallogenic Geochronological Characteristics of Zhushahong Porphyry Copper Deposit in Dexing Area of Jiangxi and Its Implications [J]. Journal of Earth Sciences and Environment, 2016, 38(1):55-65.
- [3] 段留安,杨晓勇,汪方跃. 长江中下游成矿带抛刀岭大型斑岩型金矿特征及找矿前景[J]. 地球科学与环境学报, 2014,36(1):161-170.  
DUAN Liu-an, YANG Xiao-yong, WANG Fang-yue. Characteristics and Prospects of Paodaoling Large Porphyry Gold Deposit in the Middle-lower Yangtze River Metallogenic Belt [J]. Journal of Earth Sciences and Environment, 2014, 36(1):161-170.
- [4] 毛景文,张建东,郭春丽. 斑岩铜矿-浅成低温热液银铅锌-远接触带热液金矿床模型:一个新的矿床模型——以德兴地区为例[J]. 地球科学与环境学报, 2010,32(1):1-14.  
MAO Jing-wen, ZHANG Jian-dong, GUO Chun-li. Porphyry Cu, Epithermal Ag-Pb-Zn, Distal Hydrothermal Au Deposits: A New Model of Mineral Deposit—Taking the Dexing Area as an Example [J]. Journal of Earth Sciences and Environment, 2010, 32 (1):1-14.
- [5] 毛景文,罗茂澄,谢桂青,等. 斑岩铜矿床的基本特征和研究勘查新进展[J]. 地质学报, 2014, 88(12): 2153-2175.  
MAO Jing-wen, LUO Mao-cheng, XIE Gui-qing, et al. Basic Characteristics and New Advances in Research and Exploration on Porphyry Copper Deposits [J]. Acta Geologica Sinica, 2014, 88(12):2153-2175.
- [6] 杨超,唐菊兴,王艺云,等. 西藏铁格隆南浅成低温热液型-斑岩型 Cu-Au 矿床流体及地质特征研究[J]. 矿床地质, 2014,33(6):1287-1305.  
YANG Chao, TANG Ju-xing, WANG Yi-yun, et al. Fluid and Geological Characteristics Researches of Southern Tiegelong Epithermal Porphyry Cu-Au Deposit in Tibet [J]. Mineral Deposits, 2014, 33 (6): 1287-1305.
- [7] 李壮,王立强,张忠,等. 西藏邦铺斑岩铜(钼)多金属矿床侵入岩锆石微量元素特征及其地质意义[J]. 地球科学与环境学报, 2015,37(6):59-71.  
LI Zhuang, WANG Li-qiang, ZHANG Zhong, et al. Zircon Trace Element Characteristics of Intrusions in Bangpu Porphyry Mo (Cu) Polymetallic Deposit of Tibet and Their Geological Significance [J]. Journal of Earth Sciences and Environment, 2015, 37(6):59-71.
- [8] 唐攀,唐菊兴,郑文宝,等. 西藏甲玛斑岩矿床系统地质、蚀变、矿化的三维地质模型[J]. 地质与勘探, 2016,52(1):115-127.  
TANG Pan, TANG Ju-xing, ZHENG Wen-bao, et al. The Interpretation of Three-dimensional Model of Geology, Alteration and Mineralization in Jiama Porphyry Deposit System, Tibet [J]. Geology and Exploration, 2016, 52(1):115-127.
- [9] 杨立强,高雪,和文言. 义敦岛弧晚白垩世斑岩成矿系统[J]. 岩石学报, 2015,31(11):3155-3170.  
YANG Li-qiang, GAO Xue, HE Wen-yan. Late Cretaceous Porphyry Metallogenic System of the Yidun Arc, SW China [J]. Acta Petrologica Sinica, 2015, 31 (11):3155-3170.
- [10] 顾雪祥,董连慧,彭义伟,等. 新疆西天山吐拉苏火山岩盆地浅成低温热液-斑岩型金多金属成矿系统的形成与演化[J]. 岩石学报, 2016,32(5):1283-1300.  
GU Xue-xiang, DONG Lian-hui, PENG Yi-wei, et al. Formation and Evolution of the Epithermal-porphyry Au Polymetallic Mineralization System in the Tulasu Volcanic Basin of the West Tianshan, Xinjiang [J]. Acta Petrologica Sinica, 2016, 32(5):1283-1300.
- [11] RICHARDS J P. Tectono-magmatic Precursors for Porphyry Cu-(Mo-Au) Deposit Formation [J]. Economic Geology, 2003, 98(8):1515-1533.



- [12] 周涛发,王世伟,袁 峰,等. 长江中下游成矿带陆内斑岩型矿床的成岩成矿作用[J]. 岩石学报, 2016, 32(2): 271-288.
- ZHOU Tao-fa, WANG Shi-wei, YUAN Feng, et al. Magmatism and Related Mineralization of the Intracontinental Porphyry Deposits in the Middle-lower Yangtze River Valley Metallogenic Belt[J]. *Acta Petrologica Sinica*, 2016, 32(2): 271-288.
- [13] LU Y J, MCCUAIG T C, LI Z X, et al. Paleogene Post-collisional Lamprophyres in Western Yunnan, Western Yangtze Craton: Mantle Source and Tectonic Implications[J]. *Lithos*, 2015, 233(9): 139-161.
- [14] YANG Z M, LU Y J, HOU Z Q, et al. High-Mg Diorite from Qulong in Southern Tibet: Implications for the Genesis of Adakite-like Intrusions and Associated Porphyry Cu Deposits in Collisional Orogens[J]. *Journal of Petrology*, 2015, 56(2): 227-254.
- [15] ROBB L. *Introduction to Ore-forming Processes*[M]. Oxford: Blackwell Publishing Ltd., 2005.
- [16] HOU Z Q, YANG Z M, QU X M, et al. The Miocene Gangdese Porphyry Copper Belt Generated During Post-collisional Extension in the Tibetan Orogen[J]. *Ore Geology Reviews*, 2009, 36(1/2/3): 25-51.
- [17] 邓 军, 杨立强, 王长明. 三江特提斯复合造山与成矿作用研究进展[J]. 岩石学报, 2011, 27(9): 2501-2509.
- DENG Jun, YANG Li-qiang, WANG Chang-ming. Research Advances of Superimposed Orogenesis and Metallogenesis in the Sanjiang Tethys[J]. *Acta Petrologica Sinica*, 2011, 27(9): 2501-2509.
- [18] LU Y J, KERRICH R, KEMP A I S, et al. Intracontinental Eocene-Oligocene Porphyry Cu Mineral Systems of Yunnan, Western Yangtze Craton, China: Compositional Characteristics, Sources, and Implications for Continental Collision Metallogeny[J]. *Economic Geology*, 2013, 108(7): 1541-1576.
- [19] ZHOU T F, WANG S W, FAN Y, et al. A Review of the Intracontinental Porphyry Deposits in the Middle-lower Yangtze River Valley Metallogenic Belt, Eastern China[J]. *Ore Geology Reviews*, 2015, 65: 433-456.
- [20] HASCHKE M, AHMADIAN J, MURATA M, et al. Copper Mineralization Prevented by Arc-root Delamination During Alpine-Himalayan Collision in Central Iran[J]. *Economic Geology*, 2010, 105(4): 855-865.
- [21] 潘鸿迪, 申 萍. 新疆包古图斑岩铜矿中性复式岩体的同化混染作用[J]. 地球科学与环境学报, 2014, 36(1): 80-97.
- PAN Hong-di, SHEN Ping. Contamination and Assimilation of the Intermediate Complex in the Baogutu Porphyry Cu Deposit, Xinjiang[J]. *Journal of Earth Sciences and Environment*, 2014, 36(1): 80-97.
- [22] 申 萍, 潘鸿迪, SEITMURATOVA E. 中亚成矿域斑岩铜矿床基本特征[J]. 岩石学报, 2015, 31(2): 315-332.
- SHEN Ping, PAN Hong-di, SEITMURATOVA E. Characteristics of the Porphyry Cu Deposits in the Central Asia Metallogenic Domain[J]. *Acta Petrologica Sinica*, 2015, 31(2): 315-332.
- [23] 杨志明, 侯增谦. 初论碰撞造山环境斑岩铜矿成矿模型[J]. 矿床地质, 2009, 28(5): 515-538.
- YANG Zhi-ming, HOU Zeng-qian. Porphyry Cu Deposits in Collisional Orogen Setting: A Preliminary Genetic Model[J]. *Mineral Deposits*, 2009, 28(5): 515-538.
- [24] ROHRLACH B D, LOUCKS R R. Multi-million-year Cyclic Ramp-up of Volatiles in a Lower Crustal Magma Reservoir Trapped Below the Tampakan Copper-gold Deposit by Mio-Pliocene Crustal Compression in the Southern Philippines[M]// PORTER T M. *Super Porphyry Copper and Gold Deposits: A Global Perspective*. Adelaide: PGC Publishing, 2005: 369-407.
- [25] BURNHAM C W. *Magma and Hydrothermal Fluids* [M]// BARNES H L. *Geochemistry of Hydrothermal Ore Deposits*. New York: John Wiley and Sons, 1997: 63-124.
- [26] HOU Z Q, YANG Z M, LU Y J. A Genetic Linkage Between Subduction- and Collision-related Porphyry Cu Deposits in Continental Collision Zones[J]. *Geology*, 2015, 43(3): 247-250.
- [27] WANG R, RICHARDS J P, HOU Z Q, et al. Increased Magmatic Water Content: The Key to Oligo-Miocene Porphyry Cu-Mo±Au Formation in the Eastern Gangdese Belt, Tibet[J]. *Economic Geology*, 2014, 109(5): 1315-1339.
- [28] 韩吟文, 马振东, 张宏飞, 等. 地球化学[M]. 北京: 地质出版社, 2012.
- HAN Yin-wen, MA Zhen-dong, ZHANG Hong-fei, et al. *Geochemistry* [M]. Beijing: Geological Publishing House, 2012.
- [29] 张德会, 张文淮, 许国建. 岩浆热液出溶和演化对斑岩成矿系统金属成矿的制约[J]. 地学前缘, 2001, 8(3): 193-202.
- ZHANG De-hui, ZHANG Wen-huai, XU Guo-jian. Exsolution and Evolution of Magmatic Hydrothermal Fluids and Their Constraints on the Porphyry Ore-forming System[J]. *Earth Science Frontier*, 2001, 8



- (3):193-202.
- [30] 张德会. 成矿作用地球化学[M]. 北京:地质出版社, 2015.  
ZHANG De-hui, Geochemistry of Ore-forming Processes [M]. Beijing: Geological Publishing House, 2015.
- [31] RICHARDS J P. The Oxidation State, and Sulfur and Cu Contents of Arc Magmas; Implications for Metallogeny[J]. *Lithos*, 2015, 233(9): 27-45.
- [32] RICHARDS J P. High Sr/Y Arc Magmas and Porphyry Cu-Mo-Au Deposits: Just Add Water[J]. *Economic Geology*, 2011, 106(7): 1075-1081.
- [33] CHIARADIA M, MUNTENER O, BEATE B, et al. Adakite-like Volcanism of Ecuador; Lower Crust Magmatic Evolution and Recycling[J]. *Contributions to Mineralogy and Petrology*, 2009, 158(5): 563-588.
- [34] RICHARDS J P. Postsubduction Porphyry Cu-Au and Epithermal Au Deposits: Products of Remelting of Subduction-modified Lithosphere[J]. *Geology*, 2009, 37(3): 247-250.
- [35] HOU Z Q, PAN X F, LI Q Y, et al. The Giant Dexing Porphyry Cu-Mo-Au Deposit in East China; Product of Melting of Juvenile Lower Crust in an Intracontinental Setting[J]. *Mineralium Deposita*, 2013, 48(8): 1019-1045.
- [36] YANG Z M, HOU Z Q, XU J F, et al. Geology and Origin of the Post-collisional Narigongma Porphyry Cu-Mo Deposit, Southern Qinghai, Tibet[J]. *Gondwana Research*, 2014, 26(2): 536-556.
- [37] LOUCKS R R. Distinctive Composition of Copper-ore-forming Arc Magmas[J]. *Australian Journal of Earth Sciences*, 2014, 61(1): 5-16.
- [38] RUTHERFORD M J, DEVINE J D. The May 18, 1980, Eruption of Mount St. Helens; 3. Stability and Chemistry of Amphibole in the Magma Chamber[J]. *Journal of Geophysical Research*, 1993, 93 (B10): 11949-11959.
- [39] NANEY M T. Phase Equilibria of Rock-forming Ferromagnesian Silicates in Granitic Systems[J]. *American Journal of Science*, 1983, 283(10): 993-1033.
- [40] GROVE T L, ELKINS-TANTON L T, PARMAN S W, et al. Fractional Crystallization and Mantle-melting Controls on Calc-alkaline Differentiation Trends[J]. *Contributions to Mineralogy and Petrology*, 2003, 145 (5): 515-533.
- [41] PROUTEAU G, SCAILLET B. Experimental Constraints on the Origin of the 1991 Pinatubo Dacite[J]. *Journal of Petrology*, 2003, 44(12): 2203-2241.
- [42] RIDOLFI F, RENZULLI A, PUERINI M. Stability and Chemical Equilibrium of Amphibole in Calc-alkaline Magmas; An Overview, New Thermobarometric Formulations and Application to Subduction-related Volcanoes[J]. *Contributions to Mineralogy and Petrology*, 2010, 160(1): 45-66.
- [43] WILLIAMSON B J, HERRINGTON R J, MORRIS A. Porphyry Copper Enrichment Linked to Excess Aluminium in Plagioclase[J]. *Nature Geoscience*, 2016, 9: 237-241.
- [44] BLUNDY J D, WOOD B J. Crystal-chemical Controls on the Partitioning of Sr and Ba Between Plagioclase Feldspar, Silicate Melts, and Hydrothermal Solutions [J]. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 1991, 55(1): 193-209.
- [45] STUDENT J J, BODNAR R. Silicate Melt Inclusions in Porphyry Copper Deposits: Identification and Homogenization Behavior [J]. *The Canadian Mineralogist*, 2004, 42(5): 1583-1599.
- [46] LOWENSTERN J B. Dissolved Volatile Concentrations in an Ore-forming Magma[J]. *Geology*, 1994, 22(10): 893-896.
- [47] DEFANT M J, DRUMMOND M S. Derivation of Some Modern Arc Magmas by Melting of Young Subducted Lithosphere[J]. *Nature*, 1990, 347: 662-665.
- [48] PLANK T, KELLEY K A, ZIMMER M M, et al. Why Do Mafic Arc Magmas Contain ~4 wt% Water on Average? [J]. *Earth and Planetary Science Letters*, 2013, 364: 168-179.
- [49] STERN R J. Subduction Zones[J]. *Reviews of Geophysics*, 2002, 40(4), doi: 10.1029/2001RG000108.
- [50] GROVE T L, CHATTERJEE N, PARMAN S W, et al. The Influence of H<sub>2</sub>O on Mantle Wedge Melting[J]. *Earth and Planetary Science Letters*, 2006, 249(1/2): 74-89.
- [51] KELLEY K A, COTTRELL E. Water and the Oxidation State of Subduction Zone Magmas[J]. *Science*, 2009, 325: 605-607.
- [52] HILDRETH W, MOORBATH S. Crustal Contributions to Arc Magmatism in the Andes of Central Chile[J]. *Contributions to Mineralogy and Petrology*, 1988, 98 (4): 455-489.
- [53] 南卡俄吾, 贾群子, 李文渊, 等. 东昆仑地区中生代熔融、同化、存储和均一(MASH)过程及壳幔岩浆混合[J]. *地球科学与环境学报*, 2015, 37(1): 37-45.  
NAMKHA Norbu, JIA Qun-zi, LI Wen-yuan, et al. Melting, Assimilation, Storage and Homogenization (MASH) Process and Crust-mantle Magma Mixing of Mesozoic in East Kunlun Region [J]. *Journal of*

- Earth Sciences and Environment, 2015, 37(1): 37-45.
- [54] PEACOCK S M. Large-scale Hydration of the Lithosphere Above Subducting Slabs[J]. *Chemical Geology*, 1993, 108(1/2/3/4): 49-59.
- [55] BEHRENS H, MISITI V, FRED A C, et al. Solubility of H<sub>2</sub>O and CO<sub>2</sub> in Ultrapotassic Melts at 1 200 and 1 250 °C and Pressure from 50 to 500 MPa[J]. *American Mineralogist*, 2009, 94(1): 105-120.
- [56] YANG L Q, DENG J, QIU K F, et al. Magma Mixing and Crust-mantle Interaction in the Triassic Monzogranites of Bikou Terrane, Central China: Constraints from Petrology, Geochemistry, and Zircon U-Pb-Hf Isotopic Systematics[J]. *Journal of Asian Earth Sciences*, 2015, 98: 320-341.
- [57] 侯增谦. 斑岩 Cu-Mo-Au 矿床: 新认识与新进展[J]. *地学前缘*, 2004, 11(1): 131-143.  
HOU Zeng-qian. Porphyry Cu-Mo-Au Deposits: Some New Insights and Advances[J]. *Earth Science Frontiers*, 2004, 11(1): 131-143.
- [58] HE W Y, MO X X, HE Z H, et al. The Geology and Mineralogy of the Beiya Skarn Gold Deposit in Yunnan, Southwest China[J]. *Economic Geology*, 2015, 110(6): 1625-1641.
- [59] GUO Z F, WILSON M, LIU J Q. Post-collisional Adakites in South Tibet: Products of Partial Melting of Subduction-modified Lower Crust[J]. *Lithos*, 2007, 96(1/2): 205-224.
- [60] LEECH M L. Arrested Orogenic Development: Eclogitization, Delamination, and Tectonic Collapse[J]. *Earth and Planetary Science Letters*, 2001, 185(1/2): 149-159.
- [61] MACPHERSON C G, DREHER S T, THIRLWALL M F. Adakites Without Slab Melting: High Pressure Differentiation of Island Arc Magma, Mindanao, the Philippines[J]. *Earth and Planetary Science Letters*, 2006, 243(3/4): 581-593.
- [62] CANDELA P A, HOLLAND H D. A Mass Transfer Model for Copper and Molybdenum in Magmatic Hydrothermal Systems: the Origin of Porphyry-type Ore Deposits[J]. *Economic Geology*, 1986, 81(1): 1-19.
- [63] HEDENQUIST J W, ARRIBAS A, REYNOLDS T J. Evolution of an Intrusion-centred Hydrothermal Systems: Far Southeast-Iepanto Porphyry and Epithermal Cu-Au Deposits, Philippines[J]. *Economic Geology*, 1998, 93(4): 373-404.
- [64] YANG L Q, DENG J, DILEK Y, et al. Melt Source and Evolution of I-type Granitoids in the SE Tibetan Plateau: Late Cretaceous Magmatism and Mineralization Driven by Collision-induced Transtensional Tectonics[J]. *Lithos*, 2016, 245: 258-273.
- [65] YANG L Q, DENG J, WANG Z L, et al. Thermochronologic Constraints on Evolution of the Linglong Metamorphic Core Complex and Implications for Gold Mineralization: A Case Study from the Xiadian Gold Deposit, Jiaodong Peninsula, Eastern China[J]. *Ore Geology Reviews*, 2016, 72: 165-178.
- [66] 杨志明, 侯增谦, 宋玉财, 等. 西藏驱龙超大型斑岩铜矿床: 地质、蚀变与成矿[J]. *矿床地质*, 2008, 27(3): 279-318.  
YANG Zhi-ming, HOU Zeng-qian, SONG Yu-cai, et al. Qulong Superlarge Porphyry Cu Deposit in Tibet: Geology, Alteration and Mineralization[J]. *Mineral Deposits*, 2008, 27(3): 279-318.
- [67] YANG L Q, DENG J, GUO L N, et al. Origin and Evolution of Ore Fluid, and Gold-deposition Processes at the Giant Taishang Gold Deposit, Jiaodong Peninsula, Eastern China[J]. *Ore Geology Reviews*, 2016, 72: 582-602.
- [68] WANG Z L, YANG L Q, GUO L N, et al. Fluid Immiscibility and Gold Deposition in the Xincheng Deposit, Jiaodong Peninsula, China: A Fluid Inclusion Study[J]. *Ore Geology Reviews*, 2015, 65: 701-717.
- [69] ULRICH T, GUNTHER D, HEINRICH C A. Gold Concentrations of Magmatic Brines and the Metal Budget of Porphyry Copper Deposits[J]. *Nature*, 1999, 399: 676-679.
- [70] YANG L Q, DENG J, GUO R P, et al. World-class Xincheng Gold Deposit: An Example from the Giant Jiaodong Gold Province[J]. *Geoscience Frontiers*, 2016, 7(3): 419-430.
- [71] HAYASHI K, OHMOTO H. Solubility of Gold in NaCl- and H<sub>2</sub>S-bearing Aqueous Solutions at 250-350 °C[J]. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 1991, 55(8): 2111-2126.
- [72] MEINERT L D, HEDENQUIST J W, SATOH H, et al. Formation of Anhydrous and Hydrated Skarn in Cu-Au Ore Deposits by Magmatic Fluids[J]. *Economic Geology*, 2003, 98(1): 147-156.
- [73] CANDELA P A, HOLLAND H D. The Partitioning of Copper and Molybdenum Between Silicate Melts and Aqueous Fluids[J]. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 1984, 48(2): 373-380.