

DOI:10.16788/j.hddz.32-1865/P.2021.03.001

引用格式:杨晓勇,蔡逸涛,徐敏成. 西环太平洋菲律宾群岛中酸性岩浆活动与斑岩型铜金成矿:兼论埃达克岩与斑岩型铜金成矿[J]. 华东地质,2021,42(3):247-259.

西环太平洋菲律宾群岛中酸性岩浆活动与 斑岩型铜金成矿:兼论埃达克岩与斑岩型铜金成矿

杨晓勇¹,蔡逸涛^{2,3},徐敏成^{2,3}

(1.中国科学技术大学地球和空间科学学院,安徽 合肥 230001;

2.中国地质调查局南京地质调查中心,江苏 南京 210016;

3.环太平洋战略矿产资源联合研究中心,江苏 南京 210016)

摘要:以菲律宾岛弧构造岩浆作用和斑岩型铜金成矿作用为例,以与板块俯冲相关的深部物质循环和斑岩型铜金成矿为研究对象,综述了铜金在弧岩浆中复杂的地球化学过程和行为。通过对中酸性岩浆活动与区域斑岩铜金成矿响应进行系统综述,根据以往对菲律宾群岛中新代岛弧岩浆岩和斑岩型铜金成矿开展的地质-地球化学研究,提出有利于成矿的地球化学指标,探讨了西环太平洋菲律宾群岛中酸性岩浆活动对区域铜金等多金属矿床的贡献,总结区域成矿规律,建立成矿动力学模式。通过研究菲律宾群岛周缘中新代板块俯冲洋壳重熔岩浆作用及矿床形成机理,进一步揭示板块俯冲过程中以流体为纽带的物质和能量交换及斑岩型铜金成矿效应。

关键词:菲律宾岛弧;中酸性岩浆活动;斑岩型铜金成矿;区域成矿规律;西太平洋板块构造演化

中图分类号:P612

文献标识码:A

文章编号:2096-1871(2021)03-247-13

成矿作用的实质是元素的迁移、富集和保存,而流体和岩浆是元素迁移、富集最重要的载体。板块俯冲带是全球最重要的元素分异、富集、成矿场所,是近年来固体地球科学和成矿作用地球动力学研究的热点。一般认为,在板块俯冲过程中,俯冲板片变质脱水产生大量富集 H_2O 、S、Cl、 CO_2 的流体^[1-2]。这些流体不仅通过助熔产生大量的岛弧岩浆,而且流体在上升过程中可以活化、萃取成矿元素形成成矿热液^[3-4],促进铜、金、铁、钼、钨、铅、锌和铀等元素的富集成矿。

斑岩型铜矿是世界上最重要的铜矿资源,目前普遍认为这类矿床往往产在与大洋板块消减有关的汇聚板块边缘^[5],主要受俯冲带氧逸度和流体性质等因素控制^[6-10]。但是,俯冲洋壳如何影响斑岩

型铜金成矿?影响程度和方式如何?这些问题都值得进一步研究。另外,通过研究中酸性岩浆活动与斑岩型铜金成矿响应,对西太平洋板块构造演化进行约束,特别是研究中新生代岛弧岩浆岩和斑岩型铜金矿床进行详细的地质-地球化学特征,可对西太平洋板块构造演化提供重要的科学判据。菲律宾岛弧南北中新代成岩成矿作用的时代差异明显,二者在成矿模式上是否也存在差异?这个问题值得进一步探讨。埃达克岩对斑岩型铜金矿床的制约作用是当前国际上研究的热点,但也存在着激烈的争议^[11-12],争议焦点是太平洋板块的俯冲作用仅仅在动力学机制上(板内),还是同时在能量和物质上(活动大陆边缘)主导着岛弧的成岩成矿作用?菲律宾岛弧属于环太平洋成矿带的重要组成部分,

* 收稿日期:2021-05-01 修订日期:2021-07-10 责任编辑:谭桂丽

基金项目:国家自然科学基金“陆内 Cu-Au 和 W-Mo 成矿机制:以下扬子成矿带为例(编号:42030801)”和自然科学基金“皖南茶亭早白垩世中酸性岩浆岩与斑岩型铜金成矿研究(编号:42011540384)”项目联合资助。

第一作者简介:杨晓勇,1964 年生,男,教授,博士生导师,主要从事矿床地质、地球化学研究。Email:xyyang@ustc.edu.cn。

通信作者简介:蔡逸涛,1982 年生,男,高级工程师,主要从事矿床地质、成矿流体研究。Email:cyitao@cgs.cn。

区内大部分矿床形成于新生代,与中酸性岩浆岩在成因上密切相关,主体是受太平洋板块俯冲、改造和影响的结果。菲律宾岛弧中新生代岩浆作用和多金属成矿集中爆发,且从南到北,岩浆岩和成矿作用存在明显差异,这为深入开展相关研究提供了条件。因此,本文对上述问题进行深入研究和探讨,以期能深入探讨国际学术界长期争议的关键科学问题。

1 区域构造背景及岛弧岩浆岩

菲律宾群岛位于东南亚地区最东侧,由大陆岛弧及大洋岛弧合并拼贴而成,四周被现今仍活动的俯冲带环绕,俯冲板块包括菲律宾海板块、南海板块、苏禄海板块和西里伯斯海板块,它们分别从菲律宾群岛东、西两侧进行俯冲(图 1)。西里伯斯海、南海以及苏禄海 3 个边缘海盆地均形成于特提斯构造域,分别于中始新世(47 Ma)^[13]、渐新世(33~15 Ma)^[14-15]及早中新世(18 Ma)^[16]相继打开,其构造演化历史与新特提斯洋的关闭及印度板块沿巽他海沟向大陆俯冲—碰撞过程紧密相关。45~25 Ma,因受澳大利亚板块向北运动的影响,在菲律宾群岛—哈马黑拉岛弧一带形成了向北的俯冲带^[17-18],直到约 25 Ma,澳大利亚板块与菲律宾—哈马黑拉岛弧在新几内亚发生弧—陆碰撞,澳大利亚北部大洋岩石圈向北俯冲才结束^[19]。白垩纪以来,该区岩浆作用一直很活跃,在新生代达到岩浆活动峰值,形成了一系列岩浆岩带,时代包括白垩纪、始新世、渐新世、中新世、上新世、第四纪等,绝大多数岩浆活动均与俯冲事件有关^[20]。

大地构造位置上,菲律宾群岛位于欧亚大陆和西菲律宾海板块交界处,是一个由海洋、大陆和岛弧组成的地体^[21]。这里地震活动剧烈,发育众多活火山^[22-23]。除了源自欧亚板块的巴拉望岛、民都洛岛、朗布隆岛、棉兰老岛西部(三宝颜)、班乃岛部分地区、吕宋岛西北部等地区大陆基底岩石外,菲律宾群岛及周边块体常被学术界称为“菲律宾活动带”,形成于菲律宾海/太平洋板块的洋内岛弧^[24]。一般认为,该活动带在菲律宾板块和太平洋板块形成了洋内岛弧^[24-26]。菲律宾活动带东部和西部分别被几个俯冲带包围(图 1),其中位于吕宋岛东部海槽—菲律宾海沟的东部岛弧^[27],与远洋沉积物向西俯冲有关。位于马尼拉、苏禄—内格罗斯、哥打

巴托海沟之间的西部岛弧(图 1),与覆盖陆源沉积物的南海(早渐新世—早中新世)、苏禄海(早中新世)、西里伯斯海(始新世)海盆向东俯冲有关^[27-29]。有学者^[30]提出,菲律宾南部棉兰老岛不仅有棉兰老中部岛弧,可能还存在桑义赫岛弧北部延伸部分。菲律宾岩浆活动带是一个以外来地体为主的复杂组合体,其主要构造源自南太平洋,可能是新第三纪从印度—澳大利亚板块断裂,进而合并为现今的构造格局。菲律宾活动带被上新世菲律宾断裂带纵向切割(图 1),该断层是左旋走滑断层^[20,31]。

菲律宾活动带最古老的变质基底来自于大洋岩石圈碎块,岩性包括角闪岩、石英—钠长石—云母片岩及蛇纹岩等,原岩形成时代为侏罗纪—白垩纪^[20],其构造属性大多数具有特提斯型特征^[23,32]。此外,一部分活动带来自于印度—澳大利亚板块^[33],但目前并未发现早于侏罗纪(类似于澳大利亚板块)的古老变质基底。因此,研究菲律宾活动带各个地区可能存在的古老变质基底的年代及其属性具有重要意义,可以对反演其初始构造属性(仅是太平洋洋内岛弧,还是来源于古老的澳大利亚板块)提供直观的地质证据。

菲律宾群岛北部吕宋岛弧北部巴丹地区已发现埃达克质安山岩^[34],在群岛北部曼卡延、碧瑶等地区 and 群岛中部东、西两侧分布的火山岛链也表现为埃达克岩或埃达克质岩石的地球化学特征^[11,35-37],这些埃达克(质)岩均被认为是南海海盆沿马尼拉海沟向吕宋岛深部发生俯冲的产物^[38]。中部内格罗斯岛内格罗斯山地区发现的埃达克岩与苏禄海盆沿内格罗斯海沟俯冲有关^[34,39]。南部棉兰老地区埃达克岩稍显复杂,因为该区东、西两侧均为俯冲带,菲律宾海板块沿菲律宾海沟向西俯冲,西里伯斯海海盆沿哥打巴托海沟向东北方向俯冲^[40-41]。此外,该区哥打巴托断裂带以南部分地区(包括现今的南哥打巴托矿集区,图 1)在约 10 Ma 以来仍受摩鹿加海盆沿桑义赫海沟向西俯冲影响^[42]。

上述区域岩浆—成矿活动分别受控于新特提斯构造域背景下形成的西里伯斯海、南海、苏禄海以及摩鹿加海等海盆俯冲,前人研究集中在各区域单个矿床及含矿岩石的地质特征、年代学及成因等方面^[43-49],而对岩浆—成矿物质来源却鲜有报道。前人关于岩石年代学研究大多数基于全岩或含钾矿物的 K-Ar 法,由于该定年体系封闭温度较低,测得

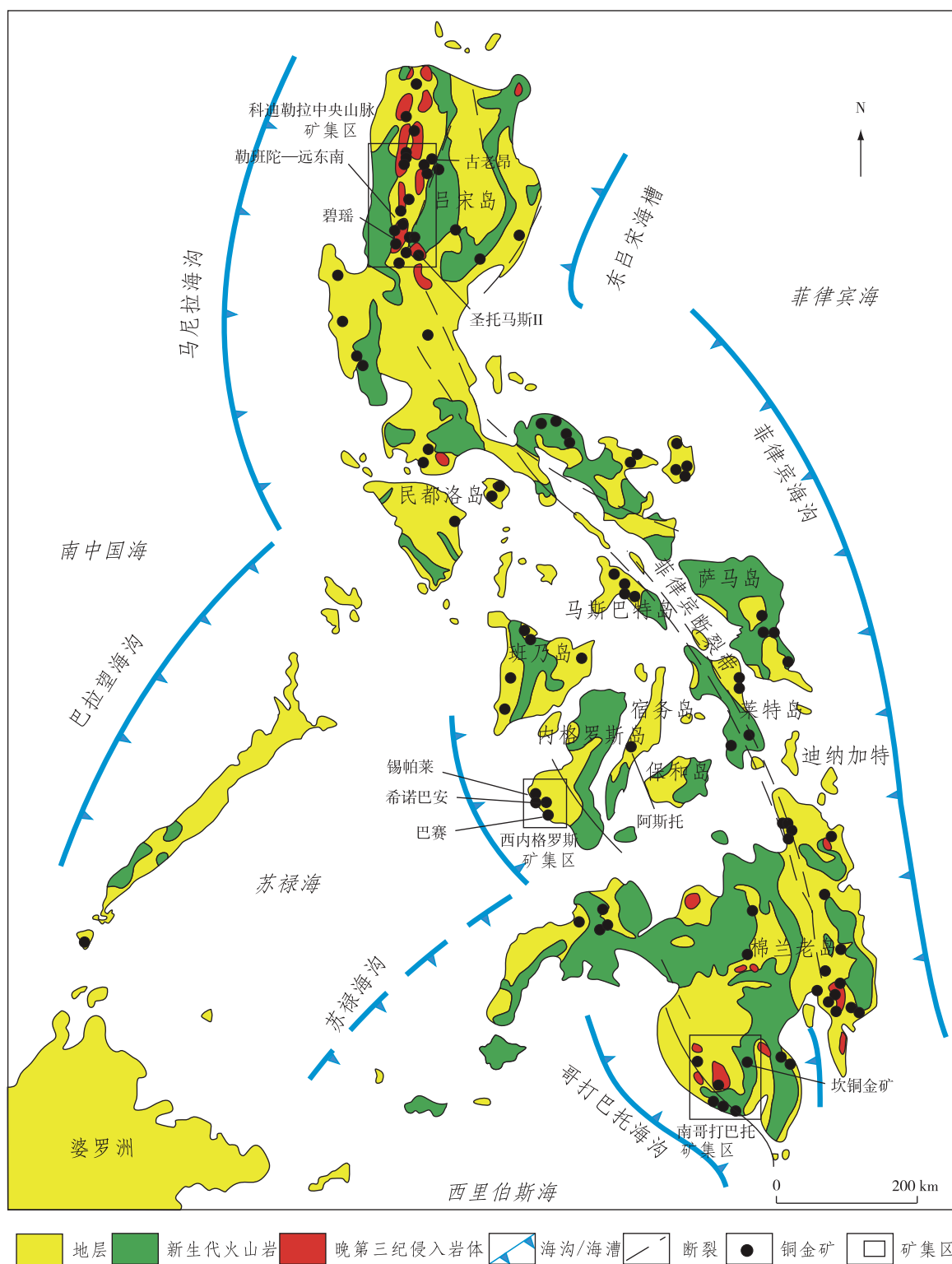


图 1 菲律宾构造岩浆活动与主要斑岩型铜金矿床分布图^[43,52]

Fig. 1 Tectonic-magmatic activities and distributions of porphyry copper-gold deposits in the Philippines^[43,52]

的年龄可能低于实际年龄,因此,运用锆石 U-Pb 定年技术更有利于精确厘定各类 Cu-Au 成矿相关岩

浆岩的形成时代。此外,吕宋岛埃达克岩的形成,究竟与南海海盆俯冲洋壳部分熔融相关,还是与黄

岩海山链的洋脊俯冲相关^[50-51]? 这些问题也值得进一步研究和探讨。

内格罗斯岛西南矿集区出露与苏禄海俯冲无关的渐新世斑岩铜矿及含矿岛弧岩石,其中部内格罗斯山地区又发现一些与苏禄海俯冲相关的全新世埃达克岩,二者在成因和物质来源上有何区别? 对应何种性质的俯冲大洋岩石圈? 这些问题同样值得探讨,深入开展相关对比研究,有助于理解菲律宾活动带西侧及南部不同边缘海盆的壳幔组成差异和演化历史。

2 埃达克岩与斑岩型铜金成矿作用

埃达克岩的原始定义指形成于岛弧环境的高铝高铈贫重稀土的中酸性岩浆岩,具有铜金矿床的成矿潜力^[6,53]。大多数埃达克岩都与斑岩型铜矿床有关^[6,12,53-54],但也有例外,如苏鲁一大别山造山带的埃达克岩则无铜矿化。增厚的榴辉岩下陆壳部分熔融^[55-56]、石榴石^[57]或角闪石^[58]的分离结晶也可能形成高 Sr/Y 岩浆。与俯冲板片相比,下陆壳熔体的铜含量及氧逸度低得多,不利于形成斑岩型铜矿床^[59]。通过板片熔融形成的埃达克岩确实有利于斑岩铜矿化^[10,12,53,59]。目前,关于埃达克岩的成矿潜力主要有以下认识。

2.1 氧化作用

由于氧化海床蚀变引起高 Fe^{3+} 含量,所以板片熔体可能被异常氧化并富含硫^[54]。升高的氧逸度导致地幔楔中含亲硫金属的硫化物被氧化,将金属释放到硅酸盐熔体相中^[10]。然而,尽管氧化对于斑岩矿化至关重要,但与普通弧岩浆相比,埃达克岩的系统性氧化并不强^[6,29,59-60],正常弧熔体的系统性铜含量没有大洋中脊玄武岩(MORB)高^[61]。

2.2 水的参与

有学者^[11]提出板片熔体可能通常富含水。岩浆中的高水含量抑制斜长石的结晶,并促进闪石的形成,从而导致高 Sr/Y 特征^[62]。但问题在于,目前没有研究表明埃达克岩比普通弧岩浆含水量更高。此外,闪石的结晶在铜矿化中无任何作用。铜与大多数主要硅酸盐矿物不相容,但在闪石中可能相容,这取决于岩浆和闪石的成分^[6]。因此,关于水丰度的论据不能合理解释埃达克岩和斑岩矿床之间的关系。由于存在不确定性,因此,有学者^[63]认为没有明显理由说明板片熔体具有异常高的形成斑

岩型矿床的潜力。

2.3 长英质组分加入

埃达克岩由玄武岩的部分熔融形成,因此,逻辑上它们应该比橄榄岩熔体显示长英质的特征^[53]。有学者^[53]认为由于长英质具有黏性,埃达克岩作为侵入深成岩体可能更易结晶,从而产生更有效的地壳岩浆-热液系统。实际上,与斑岩型铜矿床相关的埃达克岩的成分大多数为中间体,而不是长英质。

2.4 构造挤压

埃达克岩通常由年轻洋壳的平面俯冲产生,与上盘压应力相关。这样的环境应有利于捕获非喷发的封闭系统岩浆,在该岩浆中,硫可能以热液型硫化物和硫酸根的形式沉淀,而不是以 SO_2 的形式脱气^[54]。另外,挤压还导致隆起和剥蚀,有利于斑岩型矿床的出露。

2.5 高铜物质对成矿作用的控制

洋壳的铜含量(约 100×10^{-6})远高于地幔(30×10^{-6})^[64]或陆壳(约 27×10^{-6})^[65]。有学者^[59]认为,俯冲洋壳部分熔融会形成具有较高初始铜含量的埃达克岩,有利于斑岩型铜矿化。目前,氧逸度对普通弧岩浆的影响已建立了相关模型^[61]。普通弧岩浆岩是由地幔楔中橄榄岩部分熔融形成的,原始地幔 S 含量约 250×10^{-6} ^[64],而亏损地幔橄榄岩 S 含量约 150×10^{-6} ^[66]。即使在还原条件下,地幔橄榄岩部分熔融也可消除残留的硫化物,例如,在 $\Delta\text{FMQ}=0$ 时,约 20% 的地幔橄榄岩发生部分熔融^[61]。相反,洋壳的硫含量 $> 1\,000 \times 10^{-6}$ ^[66],比原始地幔的硫含量高约 4 倍^[64]。如前所述,高于 $\Delta\text{FMQ}=+2$ 的氧逸度对于消除板片熔融过程中的残留硫化物至关重要。但是,在氧逸度高于 $\Delta\text{FMQ}=+2$ 的情况下,5%~10% 的部分熔融足以消除俯冲洋壳中残留的硫化物。当然,岩浆高 Cu 含量、高 S 含量与含矿斑岩高 Cu 含量、高 S 含量一致。

3 铜在弧岩浆中的地球化学行为

铜在弧岩浆中具有复杂的地球化学行为。大陆弧和岛弧中原始弧岩浆($\text{MgO}>6\%$)的铜含量不仅相似,且与大洋玄武岩(如洋中脊玄武岩)的铜含量也相似^[61],表明俯冲板块对铜的贡献最小。这些相似之处也表明,弧下地幔的氧化还原条件与洋中

脊扩张中心的氧化还原条件不存在显著差异。如果弧下地幔氧化作用更强,硫化物在熔化过程中会被消耗,导致岩浆中的铜含量增加。这些氧化还原条件的相似性令人困惑,因为几乎所有喷发的弧熔岩^[67]和斑岩型铜矿^[68]比典型的大洋玄武岩更容易被氧化。斑岩型铜矿的母岩浆是一开始就被氧化了还是在分异过程中被氧化?

另一个值得关注的问题是弧岩浆的分异和演化^[61,69]。大陆弧岩浆的铜含量减少,而大多数岛弧的含铜量增加。因此,斑岩型铜矿与耗尽铜元素的岩浆有关(即贫铜岩浆),铜含量较高的岛弧岩浆一般没有形成斑岩型铜矿。铜在分异过程中的行为差异是由于硫的行为差异造成的:在铜的脱溶过程中硫化物饱和,在铜的富集过程中硫化物饱和被抑制^[70]。压力、温度、氧逸度、岩浆水和铁含量控制了硫化物的饱和时间。虽然初始氧逸度可能存在差异,但差异太小,无法发挥主导作用^[71-72],对提升硫化物在高压下的稳定性也具有一定作用^[73-74]。然而,由于硫化物的溶解度与岩浆的 FeO 含量密切相关,最重要的因素可能是铁的演化^[66,75]。目前,铁的行为与地壳厚度之间的关系尚不清楚。

4 菲律宾群岛铜金矿床

菲律宾群岛以世界级铜金矿床闻名于世,包括斑岩型铜金矿床及浅成热液型金矿床^[52,76-77],矿床成因为与群岛周围的现今板块或古板块的俯冲作用有关。这些斑岩型铜金矿床大多数与浅成闪长岩、石英闪长斑岩在时空上存在亲缘关系,其中一些斑岩与火山岩-次火山岩有一定的亲缘关系,值得注意的是,这些斑岩大多数具有埃达克岩的地球化学特征^[11,22,37,43,78-81]。此外,还有少量斑岩型铜金矿床与碱性二长岩-正长岩相关。这些长英质斑岩大多数表现出埃达克岩的地球化学特征^[11,37,43,79-80],即 Sr 含量高、Sr/Y 值高、Y 和 Yb 含量低^[30,82-83]。菲律宾活动带火山活动大多数与白垩纪以来的俯冲有关,其中岩浆活动峰值出现在始新世、中新世和上新世—第四纪^[20]。如今仍在活跃的新生代俯冲造成了弧状火山岩、富铌玄武岩、埃达克岩和大型铜金矿床广泛发育^[11,28,30,34,79]。斑岩型铜金矿床及浅成热液型金矿广泛分布在菲律宾群岛^[49,52,76-77]。(图 1),尤以吕宋岛、内格罗斯岛、宿雾岛和棉兰老岛为主,其形成原因是菲律宾群岛周边的当代俯冲

(吕宋岛和棉兰老岛)或古代俯冲(内格罗斯岛和宿雾岛)作用。

菲律宾铜金矿产资源世界一流,闻名遐迩,其中大型斑岩型铜金矿床及浅成热液型金矿在菲律宾群岛广泛发育^[49,52,76-77],其形成原因是群岛周围现代俯冲或古代俯冲作用。这些斑岩型铜金矿床大多数与浅成闪长玢岩、石英闪长玢岩存在时空亲缘关系,其中一些还与火山一次火山斑岩(如安山玢岩、英安斑岩)有亲缘关系。此外,还有少量斑岩型铜金矿床与碱性二长—正长岩相关。有趣的是,这些长英质斑岩大多数表现出埃达克岩的地球化学特征^[11,37,43,79-80],即 Sr 含量高, Sr/Y 比值高, Y 和 Yb 含量低^[30,82-83]。

埃达克岩成因模型主要有:① 俯冲洋壳部分熔融后,地震脊或海山链俯冲^[78,84-86]或板片回撤形成^[78,81];② 含石榴石角闪岩下部岛弧地壳部分熔融形成^[87];③ 幔源玄武质钙碱性岛弧岩浆在地壳层(角闪石、磷灰石、钛铁矿,吕宋岛西部和棉兰老岛南部)^[48,58,88]或地幔层(石榴石,棉兰老岛东部)分离结晶形成^[57,89];④ 由板片埃达克质熔体与幔源镁铁质熔体的岩浆混合形成^[34,79]。菲律宾群岛埃达克质岩石的多种生成模型,使探究斑岩铜金矿床及伴生含矿斑岩的成因和源岩遇到挑战。

菲律宾群岛埃达克岩的不同成因认识给斑岩铜金矿床及其伴生含矿斑岩的成因和来源认识带来困难。例如,在吕宋岛北部勒班陀—远东南地区的斑岩-高硫化热液矿床中^[90-91],自渐新世晚期—上新世—更新世,斑岩和超热成矿达到高峰,但含矿斑岩或侵入体的成因仍有待阐明。此外,这些矿床内部或附近还存在早期或几乎同期的辉长岩脉或辉绿岩脉,这些基性岩脉具有弧地球化学特征,并与埃达克质斑岩紧密共存。然而,这些基性岩脉与含矿斑岩的成因联系长期被忽视。

4.1 菲律宾北部吕宋岛碧瑶斑岩铜矿

位于吕宋岛西侧科迪勒拉中央山脉的碧瑶矿区及其周边发育一套早中新世—上新世—更新世钙碱性和埃达克质侵入体,同时伴随斑岩铜矿及低温热液型矿床(图 1)。该区已发现的最古老基底为形成于岛弧—边缘海盆地环境的晚白垩世 SSZ(supra-subduction zone)型蛇绿岩套^[92-93],其上被始新世弧后特征的拉斑质普哥变火山岩覆盖,早渐新世—早中新世日格乍哥组深海相沉积地层不整合

覆盖于普哥变火山岩之上,日格乍哥组火山岩之上又被厚层的早中新世科隆礁灰岩(约16 Ma)整合覆盖。碧瑶地区东部安布克劳坝地区出露早中新世钙碱性花岗闪长杂岩侵入体,被称为阿尼奥岩基或中央科迪勒拉闪长杂岩(简称CCDC)^[94],侵入于普哥/日格乍哥地层中,其形成时代早于科隆礁灰岩,前人研究发现其时代为21.2~18.7 Ma^[46,94],与西菲律宾海盆向西俯冲相关,矿化作用较弱。该区第二期岩浆活动集中在15.3~8.0 Ma,形成了一系列钙碱性和埃达克质火山岩-侵入岩及斑岩铜金矿床,该期岩浆活动与南海形成后开始向吕宋岛的动向俯冲相关。位于碧瑶矿区北侧的罗博-博纳斑岩铜矿床中赋矿石英闪长玢岩(10.5±0.4 Ma)^[43]是该期岩浆活动的产物。该区第三期岩浆活动集中于上新世—更新世,伴随钙碱性—埃达克质的闪长质和英安质侵入体及铜金成矿作用^[36,43,94],与南海(黄岩海山链)洋脊俯冲背景下板片撕裂作用相关^[46,95],代表性矿床为勒班陀—远东南斑岩型铜金矿床。

4.2 菲律宾中部内格罗斯岛西南部 Cu-Au 矿集区

位于菲律宾中部内格罗斯岛西南部的 Cu-Au 矿集区从西北部锡帕莱一直延伸 60 km 到东南部安哨地区,该矿集区发育一系列著名的斑岩型矿床,如锡帕莱,希诺巴安和巴赛等(图 1),矿体大多数侵入闪长杂岩体中,形成时代为渐新世(38.4~34.4 Ma)^[44],早于苏禄海盆打开的时间(19~15 Ma)^[16],与苏禄海盆的俯冲无关。值得注意的是,这些斑岩铜矿以及相关的岛弧岩石可能与渐新世新特提斯洋闭合过程中印—澳板块向北俯冲相关^[17]。该区矿床除了通过 K-Ar 法对含矿岩石的形成时代进行了限定以外^[44],系统的地球化学研究还相当匮乏。选取该区渐新世斑岩铜矿及相关的岩石开展地球化学研究,厘清岩石属性、岩石成因、源区性质等,同时对比上新世—全新世形成的与苏禄海俯冲相关的岛弧火山岩-埃达克质岩等(如坎拉翁和柯尔诺地区)^[48],对于反演新特提斯洋俯冲及随后的新特提斯洋俯冲背景下边缘海盆地形成中的物质循环具有重要意义。

4.3 菲律宾中部宿务岛阿特拉斯 Cu-Au 矿集区

阿特拉斯 Cu-Au 矿集区位于菲律宾中部宿务岛中部^[52],矿区包括早白垩世火山岩组合以及 Cu-Au 成矿相关的埃达克质闪长岩^[80-81]。

菲律宾中部宿务岛坎西地区火山岩组合主要包括玄武岩、辉绿岩、玄武安山质火山碎屑岩及安山玢岩,安山玢岩年龄为(126.2±2.4) Ma,火山碎屑岩年龄为(118.5±1.2) Ma,与 Cu-Au 成矿相关的闪长岩及闪长玢岩年龄为(112.5±1.5) Ma,均显示其形成于早白垩世^[80]。宿务地区早白垩世火山岩与西菲律宾盆地北部及南部边缘奄美高原以及印度尼西亚哈马黑拉岛地区早白垩世岛弧玄武岩具有相似的微量元素特征^[80]。宿务火山岩组合中火山碎屑岩的锆石 Hf 同位素组成接近亏损地幔,与奄美高原玄武岩接近,指示其源区可能为俯冲的太平洋型 MORB^[80]。相比火山碎屑岩及 MORB,安山玢岩锆石 Hf 同位素组成更富集,指示其源区除了俯冲大洋壳以外,还有少量俯冲沉积物。坎西地区中部发现的闪长岩位于 Atlas 铜矿外围,侵入于早期火山碎屑岩中,并在接触带部位伴随铜矿化,具有高 Sr/Y 值、La/Yb 值及低 Y、Yb 含量,高 MgO 含量及 Mg# 值特征,具有典型的高镁埃达克岩特征。

菲律宾阿特拉斯斑岩铜矿含矿闪长岩体形成时代为 109~107 Ma,具有典型的埃达克质岩地球化学特征,形成于俯冲的古太平洋板块部分熔融,反应了古太平洋板块的俯冲-后撤作用。该闪长岩体具有高的氧逸度,是形成该区大型斑岩型铜矿床的有利因素。结合该区新生代以前的构造演化史,认为宿务地区普通岛弧岩石与埃达克岩组合形成于古太平洋板块向古菲律宾板块俯冲及后撤过程,区内阿特拉斯等斑岩型铜金可能是构造岩浆事件的产物。锆石 U-Pb 定年结果^[81]显示,岩浆结晶时形成的锆石极少,大多数为新元古代—古元古代的古老锆石或继承核,暗示吕宋岛基底存在类似于澳大利亚或华南的古老基底。

4.4 菲律宾南部棉兰老岛哥打巴托矿集区

位于菲律宾南部棉兰老南哥打巴托矿集区(图 1),地处复杂的地体增生—弧弧碰撞相关的同碰撞—后碰撞构造环境,属于中新世—上新世桑义赫火山弧的北缘,与摩鹿加海板块向西俯冲相关^[17,88]。这些洋壳俯冲及弧-弧碰撞形成的岩浆提供了成矿物质,使该区发育一系列斑岩型铜金矿床。该区地壳挤压以及相应的构造变形从约 7 Ma 一直持续到现今,在 4~2 Ma 达到高峰,斑岩铜矿以及高硫型热液矿床成矿作用在这期间最活跃^[88]。坎铜金矿床

是该区叠加在深部斑岩型铜金矿床上的高硫型热液矿床,估计矿石总量 2 500 Mt(Cu 0.48%, Au 0.2 g/t),是东南亚地区现今尚未开采的最大的铜金矿床^[88,96]。矿体赋存在 Tampakan 安山岩序列上新世层状火山岩中,与下地壳岩浆房中的闪长质岩浆及成矿物质的不断释放(7 Ma 开始)密切相关,形成角闪闪长玢岩岩株和岩脉,并伴随斑岩型及高硫热液型 Cu-Au 矿化作用。该区角闪闪长玢岩的地球化学特征、源区性质、岩浆氧逸度条件等研究还较欠缺,进一步开展研究工作对了解该区金属元素富集机制,限定 Molucca 海板块中新世以后的俯冲及弧—弧碰撞过程具有重要意义。

5 值得关注的几个关键科学问题

菲律宾岛弧埃达克岩成矿金属元素(如 Cu、Au 等)的初始富集机制存在争议,主要观点包括:① 具有相对高 Cu 含量的俯冲洋壳部分熔融,形成具有高初始 Cu 含量的含水富硫埃达克质岩浆,高的氧逸度使岩浆中的硫以硫酸盐的形式存在,进而确保亲硫金属元素(Cu、Au 等)可在熔体中搬运至浅地表并最终成矿^[6,61];② 尽管含水幔源岛弧岩浆具有初始较低的亲硫元素含量(或具有高的亲硫元素含量),但在高氧逸度条件下,经 AFC 过程也可以逐渐富集亲硫元素并最终成矿^[62]。也有学者^[6]认为,后期的 AFC 过程对 Cu 富集矿化并没有作用,只有初始富铜且具有高氧逸度的埃达克质岩浆才可能在后期的岩浆热液演化过程中形成斑岩铜矿。

世界上大部分经济型铜资源都赋存在斑岩型铜矿床中,这些浅层岩浆侵入体多数与厚(>45 km)的岩浆弧有关,如成熟的岛弧和大陆弧。然而,尚未解决的问题是:对于穿过厚地壳的弧岩浆,特别是大陆弧,通常铜元素被耗尽,而在岛弧中,斑岩型铜矿床较少,岩浆中铜元素含量增加。有学者^[97]认为从下地壳到上地壳,斑岩型铜矿床的形成需要复杂的地壳岩浆作用序列。当地壳变得足够厚(>45 km),能使石榴石结晶时,可形成斑岩型铜矿床。安第斯山脉中部斑岩型铜矿床研究^[97]表明,当大陆弧达到最大厚度(>60 km)时,岩浆活动终止之前就会成矿。

当前研究^[8,10,43,68,98]普遍认为,大多数斑岩型铜矿是通过注入富含 S 和金属的、水流体饱和的氧化性埃达克岩浆而形成,即母岩浆必须富水和被氧

化。但是,有争议的是:为什么高氧逸度有利于斑岩型矿床的矿化?岩浆是如何被氧化的?埃达克质岩浆在斑岩矿化中是否不可或缺?斑岩型矿床是否与普通弧岩浆岩相关?为什么纯斑岩型钼矿床也与高度氧化的岩浆密切相关?

铜是一种亲硫元素,易于形成硫化物矿物^[99-100]。铜在大多数硅酸盐相中不相容^[61,101-102]。在高度氧化条件下,硫的主要形态是硫酸盐(S^{6+}),硫化物不稳定,且铜被有效地输送到熔体或流体相中^[61,79,103]。在外界条件下降到足以使硫化物种类稳定时,如果体系中硫化物达到饱和,铜将被保留在硫化物矿物中。从含硫化物的物质中提取铜,需要高到足以耗尽硫化物的熔融程度或高到足以破坏硫化物的稳定状态^[61,104]。同样,当岩浆达到硫化物饱和时,熔体中的铜被有效地提取,导致富铜堆积。当然,由于诸多复杂因素,上述均为概括特征。例如,在不考虑氧逸度时,高熔点会耗尽硫化物,使铜不相容,对其物质来源会造成一定影响。目前,压力、温度、水含量和熔体成分对溶解度和物质形成的控制方式尚未得到完全解决。

实验表明,硫酸根比硫化物在岩浆中的溶解度更高^[105-106]。因此,在更高的氧逸度条件下,多数硫以硫酸根的形式被去除^[6,8,61]。在氧化性岩浆的演化进程中,硫化物处于不饱和状态,不会发生硫化物熔离^[98]。因此,作为中度不相容元素的 Cu、Mo 和 Au^[64],在岩浆演化早期富集,并在磁铁矿结晶的还原作用下^[107],或其他还原过程中溶解到岩浆流体中。问题是,大多数弧深成岩体都是水饱和和高度氧化的,为什么在弧环境中只有极少数特殊岩浆(主要以高 Sr/Y 和高 Sr 为特征的埃达克岩)形成斑岩矿床呢?这是值得深入探索的科学问题。据此,我们将主要前缘科学问题归纳如下。

(1)为什么大多数与氧化性岩浆有关的斑岩型矿床都分布在汇聚板块边缘?重点研究与构造活动密切相关的成岩—成矿作用的耦合机制,关注中新生成岩—成矿作用是否存在差异?成岩—成矿构造机制是否存在转化?研究白垩纪成矿和第三纪成矿作用起始和持续时间差异的动因,是否反映了两者的基本处在统一的构造动力学背景之下?这种构造背景是古太平洋板块俯冲还是现今太平洋板块提供的物质与动力?

(2)斑岩矿化最有利的氧逸度范围是多少?识别有利于成矿的地球化学指标,研究中新代板块

俯冲洋壳重熔岩浆作用形成机理,探讨其对区域铜金等多金属矿床的贡献。探讨在源区部分熔融、岩浆演化和熔流体相互作用等过程中,哪些内在条件(岩浆物质端元,结晶分异,氧逸度, H_2O 含量, F、Cl 含量, 温度)是控制成矿物质迁移与富集的关键因素? 这些控制因素与什么样的深部过程和构造背景相对应?

(3)探索铜在弧中具有复杂行为。大陆弧和岛弧中原始弧岩浆 ($MgO > 6\%$) 的铜含量不仅相似,且与大洋玄武岩(如洋中脊玄武岩)的铜含量也相似^[61],表明俯冲板块对铜的贡献最小。因此,查明不同成因及物质来源的斑岩铜矿金属富集机制,是一个重要的科学问题,是初始埃达克质熔体就已经富集成矿金属元素? 还是岩浆在后期 AFC 过程中才逐渐富集成矿元素? 岩浆演化过程中 Cu、Au 等成矿金属元素是何种变化趋势? 这些问题均需要进一步深入研究。这些相似之处也表明,弧下地幔的氧化还原条件与洋中脊扩张的氧化还原条件并不存在显著差异。如果弧下地幔的氧化作用更强,硫化物在熔化过程中会被更有效地消耗,导致岩浆中铜含量增加。这些氧化还原条件的相似性令人困惑,因为几乎所有喷发的弧熔岩^[108-109]和斑岩型铜矿^[68]比典型的大洋玄武岩更容易被氧化。与斑岩型铜矿成矿有关的岩浆是一开始就被氧化了还是在分异过程中被氧化?

(4)建议从中新生代板块俯冲洋壳重熔岩浆作用及矿床形成机理入手,揭示板块俯冲过程中以流体为纽带的跨圈层(海洋—地壳—地幔)物质和能量交换及其资源环境效应,深入研究菲律宾全岛斑岩型铜金矿床区域成矿规律和控矿因素,建立其成矿和找矿模式。

参考文献

- [1] KAMENETSKY V S, BINNS R A, GEMMELL J B, et al. Parental Basaltic Melts and Fluids in Eastern Manus Backarc Basin: Implications for Hydrothermal Mineralisation [J]. *Earth and Planetary Science Letters*, 2001, 184:685-702.
- [2] KENT A J, PEATE D W, NEWMAN S, et al. Chlorine in Submarine Glasses From the Lau Basin: Seawater Contamination and Constraints On the Composition of Slab-Derived Fluids[J]. *Earth and Planetary Science Letters*, 2002, 202:361-377.
- [3] HEINRICH C A, DRIESNER T, STEFÁNSSON A, et al. Magmatic Vapor Contraction and the Transport of Gold From the Porphyry Environment to Epithermal Ore Deposits [J]. *Geology*, 2004, 32: 761-764.
- [4] HEINRICH C A, GUNTHER D, AUDÉTAT A, et al. Metal Fractionation Between Magmatic Brine and Vapor, Determined by Microanalysis of Fluid Inclusions[J]. *Geology*, 1999, 27:755-758.
- [5] SILLITOE R H. Characteristics and Controls of the Largest Porphyry Copper-Gold and Epithermal Gold Deposits in the Circum-Pacific Region[J]. *Australian Journal of Earth Sciences*, 1997, 44:373-388.
- [6] SUN W, HUANG R, LI H, et al. Porphyry Deposits and Oxidized Magmas [J]. *Ore Geology Reviews*, 2015, 65:97-131.
- [7] CHIARADIA M. Adakite-Like Magmas From Fractional Crystallization and Melting-Assimilation of Mafic Lower Crust (Eocene Macuchi Arc, Western Cordillera, Ecuador) [J]. *Chemical Geology*, 2009, 265:468-487.
- [8] LIANG H, CAMPBELL I H, ALLEN C, et al. Zircon Ce^{4+}/Ce^{3+} Ratios and Ages for Yulong Ore-Bearing Porphyries in Eastern Tibet [J]. *Mineralium Deposita*, 2006, 41:152-159.
- [9] BORISOVA O, SIDORCHUK A, PANIN A. Palaeohydrology of the Seim River Basin, Mid-Russian Upland, Based On Palaeochannel Morphology and Palynological Data[J]. *Catena*, 2006, 66:53-73.
- [10] MUNGALL J E. Roasting the Mantle: Slab Melting and the Genesis of Major Au and Au-rich Cu Deposits[J]. *Geology*, 2002, 30:915-918.
- [11] SAJONA F G, MAURY R C. Association of Adakites with Gold and Copper Mineralization in the Philippines[J]. *Comptes Rendus de l'Académie des Sciences-Series IIA-Earth and Planetary Science*, 1998, 326: 27-34.
- [12] THIÉBLEMONT D, PASCUAL E, STEIN G. Magmatism in the Iberian Pyrite Belt: Petrological Constraints On a Metallogenic Model[J]. *Mineralium Deposita*, 1997, 33:98-110.
- [13] WEISSEL J K. Evidence for Eocene Oceanic Crust in the Celebes Basin[J]. *The Tectonic and Geologic Evolution of Southeast Asian Seas and Islands*, 1980, 23: 37-47.
- [14] BRIAIS A, TAPPONNIER P, PATRIAT P, et al. The Tertiary Opening of the South China Sea and

- Other Extensional Basins of the Sunda Shelf: A Consequence of the Collision Between India and Asia[C]. Paris: International symposium on geodynamic evolution of Eastern Eurasian Margin, 1988: 13-20.
- [15] TAYLOR B, HAYES D E. Origin and History of the South China Sea Basin[J]. The tectonic and geologic evolution of Southeast Asian seas and islands, 1983, 27:23-56.
- [16] RANGIN C. The Sulu Sea, a Back-Arc Basin Setting within a Neogene Collision Zone[J]. Tectonophysics, 1989, 161:119-141.
- [17] HALL R. Reconstructing Cenozoic SE Asia[J]. Geological Society, 1996, 106:153-184.
- [18] HALL R. Late Jurassic-Cenozoic Reconstructions of the Indonesian Region and the Indian Ocean[J]. Tectonophysics, 2012, 570:1-41.
- [19] HALL R, FULLER M, ALI J R, et al. The Philippine Sea Plate: Magnetism and Reconstructions[J]. Active margins and marginal basins of the Western Pacific, 1995, 88:371-404.
- [20] AURELIO M A, PEÑA R E, TAGUIBAO K J L. Sculpting the Philippine Archipelago Since the Cretaceous through Rifting, Oceanic Spreading, Subduction, Obduction, Collision and Strike-Slip Faulting: Contribution to IGMA 5000[J]. Journal of Asian Earth Sciences, 2013, 72:102-107.
- [21] DESCHAMPS A, LALLEMAND S. The West Philippine Basin: An Eocene to Early Oligocene Back Arc Basin Opened Between Two Opposed Subduction Zones[J]. Journal of Geophysical Research: Solid Earth, 2002, 107:1.
- [22] YUMUL J R. Westward Younging Disposition of Philippine Ophiolites and its Implication for Arc Evolution[J]. Island Arc, 2007, 16:306-317.
- [23] YUMUL G P, DIMALANTA C B, MAGLAMBAYAN V B, et al. Tectonic Setting of a Composite Terrane: A Review of the Philippine Island Arc System[J]. Island Arc, 2008, 12:7.
- [24] RANGIN C, JOLIVET L, PUBELLIER M. A Simple Model for the Tectonic Evolution of Southeast Asia and Indonesia Region for the Past 43 My[J]. Bulletin de la Société géologique de France, 1990, 6:889-905.
- [25] FAURE M, MARCHADIER Y, RANGIN C. Pre-Eocene Synmetamorphic Structure in the Mindoro-Romblon-Palawan Area, West Philippines, and Implications for the History of Southeast Asia[J]. Tectonics, 1989, 8:963-979.
- [26] WALIA M, KNITTEL U, SUZUKI S, et al. No Paleozoic Metamorphics in Palawan (The Philippines)? Evidence From Single Grain U-Pb Dating of Detrital Zircons[J]. Journal of Asian Earth Sciences, 2012, 52:134-145.
- [27] OZAWA A, TAGAMI T, LISTANCO E L, et al. Initiation and Propagation of Subduction Along the Philippine Trench: Evidence From the Temporal and Spatial Distribution of Volcanoes[J]. Journal of Asian Earth Sciences, 2004, 23:105-111.
- [28] CASTILLO P R, RIGBY S J, SOLIDUM R U. Origin of High Field Strength Element Enrichment in Volcanic Arcs: Geochemical Evidence From the Sulu Arc, Southern Philippines [J]. Lithos, 2007, 97: 271-288.
- [29] SUN W. Initiation and Evolution of the South China Sea: An Overview[J]. Acta Geochimica, 2016, 35: 215-225.
- [30] CASTILLO P R. An Overview of Adakite Petrogenesis[J]. Chinese science bulletin, 2006, 51: 257-268.
- [31] QUEBRAL R D, PUBELLIER M, RANGIN C. The Onset of Movement On the Philippine Fault in Eastern Mindanao: A Transition From a Collision to a Strike-Slip Environment[J]. Tectonics, 1996, 15:713-726.
- [32] MOORES E M. Origin and Emplacement of Ophiolites [J]. Reviews of Geophysics, 1982, 20:735-760.
- [33] PUBELLIER M, ALI J, MONNIER C. Cenozoic Plate Interaction of the Australia and Philippine Sea Plates: "Hit-And-Run" Tectonics[J]. Tectonophysics, 2003, 363:181-199.
- [34] SAJONA F G, MAURY R C, PUBELLIER M, et al. Magmatic Source Enrichment by Slab-Derived Melts in a Young Post-Collision Setting, Central Mindanao (Philippines)[J]. Lithos, 2000, 54:173-206.
- [35] YUMUL J R, DIMALANTA C B, TAMAYO J R, et al. Collision, Subduction and Accretion Events in the Philippines: A Synthesis[J]. Island Arc, 2003, 12: 77-91.
- [36] BELLON H, YUMUL J R. Mio-Pliocene Magmatism in the Baguio Mining District (Luzon, Philippines): Age Clues to its Geodynamic Setting [J]. Comptes Rendus de l'Académie des Sciences-Series IIA-Earth and Planetary Science, 2000, 331:295-302.
- [37] BELLON H, YUMUL J R. Miocene to Quaternary Adakites and Related Rocks in Western Philippine Arc Sequences[J]. Comptes Rendus de l'Académie des Sci-

- ences-Series IIA-Earth and Planetary Science, 2001, 333:343-350.
- [38] DEFANT M J, JACQUES D, MAURY R C, et al. Geochemistry and Tectonic Setting of the Luzon Arc, Philippines[J]. Geological Society of America Bulletin, 1989, 101:663-672.
- [39] RAE A J, COOKE D R, PHILLIPS D, et al. The Nature of Magmatism at Palinpinon Geothermal Field, Negros Island, Philippines: Implications for Geothermal Activity and Regional Tectonics [J]. Journal of Volcanology and Geothermal Research, 2004, 129:321-342.
- [40] PUBELLIER M, QUEBRAL R, AURELIO M, et al. Docking and Post-Docking Escape Tectonics in the Southern Philippines [J]. Geological Society, 1996, 106:511-523.
- [41] PUBELLIER M, SPADEA P, POUCLLET A, et al. Correlations of Tephra in Celebes and Sulu Sea Basins: Constraints On Geodynamics [C]. Proceedings of the Ocean Drilling Program: Scientific results, 1991, 124: 459-465.
- [42] LALLEMAND S E, POPOFF M, CADET J P, et al. Genetic Relations Between the Central and Southern Philippine Trench and the Sangihe Trench[J]. Journal of Geophysical Research: Solid Earth, 1998, 103: 933-950.
- [43] IMAI A. Metallogenesis of Porphyry Cu Deposits of the Western Luzon Arc, Philippines: K-Ar Ages, SO_3 Contents of Microphenocrystic Apatite and Significance of Intrusive Rocks[J]. Resource Geology, 2002, 52: 147-161.
- [44] BURTON C K. Observations On the Geology of the Porphyry Copper Sub-Province of Southwest Negros, Philippines [J]. Geological Society of Malaysia (GSM), 1983, 16:215-239.
- [45] IMAI A, SUERTE L O, NISHIHARA S. Origin of Bornite Pods in Intrusive Rocks at the Kingking Porphyry Copper-Gold Deposit, Southeastern Mindanao, Philippines[J]. Resource Geology, 2009, 59:307-313.
- [46] POLVE M, MAURY R C, JEGO S, et al. Temporal Geochemical Evolution of Neogene Magmatism in the Baguio Gold-Copper Mining District (Northern Luzon, Philippines) [J]. Resource Geology, 2007, 57: 197-218.
- [47] SHINOHARA H, HEDENQUIST J W. Constraints On Magma Degassing Beneath the Far Southeast Porphyry Cu-Au Deposit, Philippines[J]. Journal of Petrology, 1997, 38:1741-1752.
- [48] SOLIDUM R U, CASTILLO P R, HAWKINS J W. Geochemistry of Lavas From Negros Arc, West Central Philippines: Insights Into the Contribution From the Subducting Slab [J]. Geochemistry Geophysics Geosystems, 2013, 10(4):9008.
- [49] SUERTE L O, IMAI A, NISHIHARA S. Geochemical Characteristics of Intrusive Rocks, Southeastern Mindanao, Philippines: Implication to Metallogenesis of Porphyry Copper-gold Deposits[J]. Resource Geology, 2009, 59:244-262.
- [50] YANG T F, LEE T, CHEN C, et al. A Double Island Arc Between Taiwan and Luzon: Consequence of Ridge Subduction [J]. Tectonophysics, 1996, 258: 85-101.
- [51] 詹美珍, 孙卫东, 凌明星, 等. 黄岩海山链俯冲与吕宋岛斑岩铜金成矿[J]. 岩石学报, 2015, 31(7):2101-2114.
- [52] COOKE D R, HOLLINGS P, WALSH J L. Giant Porphyry Deposits: Characteristics, Distribution, and Tectonic Controls[J]. Economic Geology, 2005, 100: 801-818.
- [53] SAJONA F G, MAURY R C. Association of Adakites with Gold and Copper Mineralization in the Philippines[J]. Comptes Rendus de l'Académie des Sciences-Series IIA-Earth and Planetary Science, 1998, 326: 27-34.
- [54] OYARZUN R, MÁRQUEZ A, LILLO J, et al. Giant Versus Small Porphyry Copper Deposits of Cenozoic Age in Northern Chile: Adakitic Versus Normal Calc-Alkaline Magmatism[J]. Mineralium Deposita, 2001, 36:794-798.
- [55] WANG Q, WYMAN D A, XU J, et al. Early Cretaceous Adakitic Granites in the Northern Dabie Complex, Central China: Implications for Partial Melting and Delamination of Thickened Lower Crust[J]. Geochimica et Cosmochimica Acta, 2007, 71:2609-2636.
- [56] WANG Q, WYMAN D A, XU J, et al. Petrogenesis of Cretaceous Adakitic and Shoshonitic Igneous Rocks in the Luzong Area, Anhui Province (Eastern China): Implications for Geodynamics and Cu-Au Mineralization[J]. Lithos, 2006, 89:424-446.
- [57] 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, 243:581-593.

- [58] RICHARDS J P, KERRICH R. Special Paper: Adakite-Like Rocks: Their Diverse Origins and Questionable Role in Metallogenesis [J]. *Economic Geology*, 2007, 102:537-576.
- [59] SUN W, LING M, CHUNG S, et al. Geochemical Constraints On Adakites of Different Origins and Copper Mineralization[J]. *The Journal of Geology*, 2012, 120(1): 105-120.
- [60] SUN W, DING X, HU Y, et al. The Golden Transformation of the Cretaceous Plate Subduction in the West Pacific[J]. *Earth and Planetary Science Letters*, 2007, 262:533-542.
- [61] LEE C A, LUFFI P, CHIN E J, et al. Copper Systematics in Arc Magmas and Implications for Crust-Mantle Differentiation[J]. *Science*, 2012, 336:64-68.
- [62] RICHARDS J P. High Sr/Y Arc Magmas and Porphyry Cu-Mo-Au Deposits: Just Add Water[J]. *Economic Geology*, 2011, 106:1075-1081.
- [63] RICHARDS J P. Giant Ore Deposits Formed by Optimal Alignments and Combinations of Geological Processes[J]. *Nature Geoscience*, 2013, 6:911-916.
- [64] MCDONOUGH W F, SUN S. The Composition of the Earth[J]. *Chemical Geology*, 1995, 120:223-253.
- [65] RUDNICK R L, GAO S, HOLLAND H D, et al. Composition of the Continental Crust[J]. *The Crust*, 2003, 3:1-64.
- [66] ONEILL H S C, MAVROGENES J A. The Sulfide Capacity and the Sulfur Content at Sulfide Saturation of Silicate Melts at 1 400 C and 1 Bar[J]. *Journal of Petrology*, 2002, 43:1049-1087.
- [67] COTTRELL E, KELLEY K A. The Oxidation State of Fe in MORB Glasses and the Oxygen Fugacity of the Upper Mantle[J]. *Earth and Planetary Science Letters*, 2011, 305:270-282.
- [68] BALLARD J R, PALIN M J, CAMPBELL I H. Relative Oxidation States of Magmas Inferred From Ce (IV)/Ce (III) in Zircon: Application to Porphyry Copper Deposits of Northern Chile[J]. *Contributions to Mineralogy and Petrology*, 2002, 144:347-364.
- [69] CHIARADIA M. Copper Enrichment in Arc Magmas Controlled by Overriding Plate Thickness[J]. *Nature Geoscience*, 2014, 7:43-46.
- [70] DING S, DASGUPTA R. The Fate of Sulfide During Decompression Melting of Peridotite—Implications for Sulfur Inventory of the MORB-source Depleted Upper Mantle[J]. *Earth and Planetary Science Letters*, 2017, 459:183-195.
- [71] KELLEY K A, COTTRELL E. Water and the Oxidation State of Subduction Zone Magmas[J]. *Science*, 2009, 325:605-607.
- [72] AEOLUS LEE C, LEEMAN W P, CANIL D, et al. Similar V/Sc Systematics in MORB and Arc Basalts: Implications for the Oxygen Fugacities of their Mantle Source Regions[J]. *Journal of Petrology*, 2005, 46: 2313-2336.
- [73] COX D, WATT S F, JENNER F E, et al. Chalcophile Element Processing Beneath a Continental Arc Stratovolcano [J]. *Earth and Planetary Science Letters*, 2019, 522:1-11.
- [74] MATJUSCHKIN V, BLUNDY J D, BROOKER R A. The Effect of Pressure On Sulphur Speciation in Mid-To Deep-Crustal Arc Magmas and Implications for the Formation of Porphyry Copper Deposits[J]. *Contributions to Mineralogy and Petrology*, 2016, 171:1-25.
- [75] LI C, RIPLEY E M. Empirical Equations to Predict the Sulfur Content of Mafic Magmas at Sulfide Saturation and Applications to Magmatic Sulfide Deposits[J]. *Mineralium Deposita*, 2005, 40:218-230.
- [76] GARWIN S, HALL R, WATANABE, Y. Tectonic Setting, Geology, and Gold and Copper Mineralization in Cenozoic Magmatic Arcs of Southeast Asia and the West Pacific[J]. *Economic Geology 100th anniversary volume*, 2005, 891:930.
- [77] SILLITOE R H, GAPPE I M. Philippine Porphyry Copper Deposits: Geologic Settings and Characteristics[R]. CCOP Technical Report, 1984.
- [78] HOLLINGS P, COOKE D R, WATERS P J, et al. Igneous Geochemistry of Mineralized Rocks of the Baguio District, Philippines: Implications for Tectonic Evolution and the Genesis of Porphyry-Style Mineralization[J]. *Economic Geology*, 2011, 106:1317-1333.
- [79] JEGO S, MAURY R C, POLV? M, et al. Geochemistry of Adakites From the Philippines: Constraints On their Origins[J]. *Resource Geology*, 2005, 55: 163-188.
- [80] DENG J, YANG X, QI H, et al. Early Cretaceous high-Mg Adakites Associated with Cu-Au Mineralization in the Cebu Island, Central Philippines: Implication for Partial Melting of the paleo-Pacific Plate[J]. *Ore Geology Reviews*, 2017, 88:251-269.
- [81] DENG J, YANG X, QI H, et al. Early Cretaceous Adakite From the Atlas Porphyry Cu-Au Deposit in Cebu Island, Central Philippines: Partial Melting of Subducted Oceanic Crust[J]. *Ore Geology Reviews*,

- 2019, 110:102937.
- [82] DEFANT, M J, DRUMMOND, M S. Derivation of some Modern Arc Magmas by Melting of Young Subducted Lithosphere[J]. *Nature*, 1990, 347:662-665.
- [83] MARTIN H, SMITHIES R H, RAPP R, et al. An Overview of Adakite, Tonalite—Trondhjemite—Granodiorite (TTG), and Sanukitoid: Relationships and some Implications for Crustal Evolution[J]. *Lithos*, 2005, 79:1-24.
- [84] WATERS P J, COOKE D R, GONZALES R I, et al. Porphyry and Epithermal Deposits and $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$ Geochronology of the Baguio District, Philippines [J]. *Economic Geology*, 2011, 106:1335-1363.
- [85] YANG T F, LEE T, CHEN C, et al. A Double Island Arc Between Taiwan and Luzon: Consequence of Ridge Subduction [J]. *Tectonophysics*, 1996, 258: 85-101.
- [86] ZHAN M Z, SUN W D, LING M X, et al. Huangyan Ridge Subduction and Formation of Porphyry Cu-Au Deposits in Luzon[J]. *Acta Petrologica Sinica*, 2015, 31:2101-2114.
- [87] YUMUL G P, DIMALANTA C, BELLON H, et al. Adakitic Lavas in the Central Luzon Back-Arc Region, Philippines: Lower Crust Partial Melting Products? [J]. *Island Arc*, 2000, 9:499-512.
- [88] ROHRLACH B D, LOUCKS R R. Super Porphyry Copper and Gold Deposits: A Global Perspective[J]. *CCOP Tech*, 1984, 14:89.
- [89] CASTILLO P R, JANNEY P E, SOLIDUM R U. Petrology and Geochemistry of Camiguin Island, Southern Philippines: Insights to the Source of Adakites and Other Lavas in a Complex Arc Setting[J]. *Contributions to Mineralogy and Petrology*, 1999, 134:33-51.
- [90] ARRIBAS J R, A, HEDENQUIST J W, ITAYA T, et al. Contemporaneous Formation of Adjacent Porphyry and Epithermal Cu-Au Deposits Over 300 Ka in Northern Luzon, Philippines[J]. *Geology*, 1995, 23:337-340.
- [91] HEDENQUIST J W, ARRIBAS A, REYNOLDS T J. Evolution of an Intrusion-Centered Hydrothermal System; Far Southeast-Lepanto Porphyry and Epithermal Cu-Au Deposits, Philippines[J]. *Economic Geology*, 1998, 93:373-404.
- [92] YUMUL G P. Varying Mantle Sources of Supra-Subduction Zone Ophiolites: REE Evidence From the Zambales Ophiolite Complex, Luzon, Philippines[J]. *Tectonophysics*, 1996, 262:243-262.
- [93] PAYOT B D, JEGO S, MAURY R C, et al. The Oceanic Substratum of Northern Luzon: Evidence From Xenoliths within Monglo Adakite (The Philippines) [J]. *Island Arc*, 2007, 16:276-290.
- [94] WOLFE J A, JA W. Philippine Geochronology [J]. *Journal of the Geological Society of the Philippines*, 1981, 35(1):1-30.
- [95] BAUTISTA B C, BAUTISTA M L P, OIKE K, et al. A New Insight On the Geometry of Subducting Slabs in Northern Luzon, Philippines [J]. *Tectonophysics*, 2001, 339:279-310.
- [96] MIDDLETON C, BUENAVISTA A, ROHRLACH B, et al. A Geological Review of the Tampakan Copper-Gold Deposit, Southern Mindanao, Philippines [C]//*Proceedings PACRIM 2004 Congress*. 2004: 22.
- [97] LEE C A, TANG M. How to Make Porphyry Copper Deposits [J]. *Earth and Planetary Science Letters*, 2020, 529:115868.
- [98] SUN W, LIANG H, LING M, et al. The Link Between Reduced Porphyry Copper Deposits and Oxidized Magmas [J]. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 2013, 103:263-275.
- [99] KISEEVA E S, WOOD B J. A Simple Model for Chalcophile Element Partitioning Between Sulphide and Silicate Liquids with Geochemical Applications[J]. *Earth and Planetary Science Letters*, 2013, 383:68-81.
- [100] RIPLEY E M, BROPHY J G, LI C. Copper Solubility in a Basaltic Melt and Sulfide Liquid/Silicate Melt Partition Coefficients of Cu and Fe [J]. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 2002, 66: 2791-2800.
- [101] LE ROUX V, DASGUPTA R, LEE C A. Recommended Mineral-Melt Partition Coefficients for FRTEs (Cu), Ga, and Ge During Mantle Melting [J]. *American Mineralogist*, 2015, 100:2533-2544.
- [102] REEKIE C, JENNER F E, SMYTHE D J, et al. Sulfide Resorption During Crustal Ascent and Degassing of Oceanic Plateau Basalts [J]. *Nature Communications*, 2019, 10:1-11.
- [103] LIU X, XIONG X, AUDÉTAT A, et al. Partitioning of Copper Between Olivine, Orthopyroxene, Clinopyroxene, Spinel, Garnet and Silicate Melts at Upper Mantle Conditions [J]. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 2014, 125:1-22.
- [104] DING S, DASGUPTA R. The Fate of Sulfide During Decompression Melting of Peridotite—Implications for

- Sulfur Inventory of the MORB-source Depleted Upper Mantle[J]. *Earth and Planetary Science Letters*, 2017, 459:183-195.
- [105] BEERMANN O, BOTCHARNIKOV R E, HOLTZ F, et al. Temperature Dependence of Sulfide and Sulfate Solubility in Olivine-Saturated Basaltic Magmas [J]. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 2011, 75:7612-7631.
- [106] JUGO P J. Sulfur Content at Sulfide Saturation in Oxidized Magmas[J]. *Geology*, 2009, 37:415-418.
- [107] SUN W, ARCULUS R J, KAMENETSKY V S, et al. Release of Gold-Bearing Fluids in Convergent Margin Magmas Prompted by Magnetite Crystallization[J]. *Nature*, 2004, 431:975-978.
- [108] CARMICHAEL I S. The Redox States of Basic and Silicic Magmas: A Reflection of their Source Regions? [J]. *Contributions to Mineralogy and Petrology*, 1991, 106:129-141.
- [109] COTTRELL E, KELLEY K A. The Oxidation State of Fe in MORB Glasses and the Oxygen Fugacity of the Upper Mantle[J]. *Earth and Planetary Science Letters*, 2011, 305:270-282.

Intermediate-acid magmatism and porphyry Cu-Au mineralization in the Philippine Islands, western Pacific Rim: on genesis of adakite and porphyry Cu-Au mineralization

YANG Xiaoyong¹, CAI Yitao^{2,3}, XU Mincheng^{2,3}

(1. *School of Earth and Space Sciences, University of Science and Technology of China, Hefei 230001, Anhui, China;*

2. *Nanjing Center, China Geological Survey, Nanjing 210016, Jiangsu, China;*

3. *Joint Research Centre for Pacific Rim Strategic Mineral Resources, Nanjing 210016, Jiangsu, China*)

Abstract: Taking deep material circulation and porphyry copper-gold mineralization related to the subduction of the western Pacific plate as research objects, this study reviewed the complex geochemical process and behavior of copper-gold in arc magmas by focusing on the research of tectonic magmatism and porphyry copper-gold magmatism in Philippine island arc. According to systematic review on intermediate-acid magmatic activity and porphyry copper-gold mineralization in response to the constraints from the tectonic evolution of western Pacific plate, this paper conducted detailed geological-geochemical research on the key carrier of Mesozoic-Cenozoic island arc magmatic rocks and porphyry copper gold deposits, identified geochemical indicators conducive to mineralization as well as explored its contribution to the forming of regional copper-gold polymetallic deposits, and finally summarized the regional metallogenic regularity and built metallogenic dynamics model. By studying the island arc magma originated from oceanic crust remelting and the formation mechanism of mineral deposits controlled by the subduction of Mesozoic and Cenozoic plates, this paper further explore some important issues of the oceanic crust and mantle in the process of plate subduction.

Key words: Philippine island arc; intermediate-acid magmatic activity; porphyry copper-gold mineralization; regional metallogenic regularity; tectonic evolution of the western Pacific plate