

doi: 10.13745/j.esf.2014.05.002

俯冲边界成矿作用研究进展及若干问题

陈华勇, 肖 兵

中国科学院 矿物学与成矿学重点实验室; 中国科学院 广州地球化学研究所, 广东 广州 510640

CHEN Huayong, XIAO Bing

Key Laboratory of Mineralogy and Metallogeny, Chinese Academy of Sciences; Guangzhou Institute of Geochemistry, Chinese Academy of Sciences, Guangzhou 510640, China

CHEN Huayong, XIAO Bing. Metallogenesis of subduction zone: The progress and future. *Earth Science Frontiers*, 2014, 21 (5): 013-022

Abstract: Subduction is one of the major tectonic components on the Earth and commonly produced volcanic arc-back basin systems and associated ore deposits, such as arc-related porphyry Cu and back basin-related VMS deposits. These deposits usually have large size, clustering distribution and easily to be mined and thus make a significant contribution for metals production. In the past decades, remarkable progresses have been achieved, e. g., establishment of ore-forming models of porphyry and epithermal Cu-Au deposits; identification of ancient and modern seafloor VMS mineralization systems and associated deposit models; confirmation of some new-defined deposit types. However, some critical issues are still hotly argued, e. g., ore-forming mechanism of porphyry Cu deposits, particularly focusing on tectonic background, distinguishing between mineralized and barren intrusions, metal sources and processes for metals extracting and movement; mechanism for variable mineralization attitude on different subduction margins (e. g., Andes, SW Pacific, North America and Eastern China belts along the Pacific subduction margins); and overlapping and modification of ancient arc-back basin metallogenic systems. These arguments are indeed showing the major “hotspots” for the future studies of metallogenesis on the subduction margins.

Key words: subduction zone; metallogenesis; mineralization system; deposit model

摘 要: 板块俯冲作用是板块运动的重要形式,其在板块边缘产生以弧盆体系为特征的地质构造单元及相关的成矿作用,如火山弧及相关的斑岩型铜矿床、弧后盆地及相关的火山岩赋存块状硫化物矿床等。板块俯冲边界形成的矿床多具有规模大、带状聚集分布,金属种类多样和易开采等特点,对全球铜、金、铁等资源储量贡献巨大。近些年来俯冲边界成矿作用取得了很多进展,如:基本建立了斑岩及浅成低温成矿模式和勘查模型;确认了古今 VMS 型成矿系统并建立相应的成矿模式;重新确立了一些与俯冲作用相关的新矿床类型等。但是,俯冲边界成矿作用仍然存在较多的科学问题,如:斑岩铜矿的成矿机制,特别是成矿背景、成矿岩浆作用的特点、金属来源和萃取机理等方面争议较大;不同俯冲边界(如环太平洋安第斯、西南太平洋、北美西部、中国东部等成矿带)成矿差异性机制以及古弧盆体系后期改造的过程与影响等。这些尚未解决的科学问题正引领着俯冲边界成矿作用研究的前沿。

关键词: 俯冲板块边界;成矿作用;成矿系统;成矿模式

中图分类号:P541;P611 文献标志码:A 文章编号:1005-2321(2014)05-0013-10

收稿日期:2014-02-10;修回日期:2014-05-05

基金项目:国家重点基础研究计划“973”项目“新疆北部古弧盆体系成矿机理”(2014CB440802)

作者简介:陈华勇(1976—),男,研究员,主要从事板块汇聚边缘金属矿产成矿模式研究及找矿勘探应用。E-mail:huayongchen@gig.ac.cn

<http://www.earthsciencefrontiers.net.cn> 地学前缘,2014,21(5)

1 俯冲边界成矿作用研究进展

由于板块俯冲边界成矿作用的重要性,自现代矿床学诞生 100 多年来,以“俯冲边界成矿作用”为主题的科学研究始终是矿床学研究的重点。目前国际公认的较为成熟的成矿模式也多来自于俯冲边界所形成的弧盆体系,如斑岩铜矿模式、浅成低温金矿模式、VMS 成矿模式(图 1)^[1]等。自 20 世纪 70 年代以来,以美国西南及安第斯陆缘弧斑岩铜矿成矿模式提出和现代弧后盆地的确认为标志,对俯冲边界及其相关弧盆体系成矿作用的现代科学研究进入了高峰期,并持续至今。近半个世纪的科研积累已经取得丰硕的研究成果,确立了俯冲边界成岩成矿系列并建立区域及矿床成矿模式,主要进展体现在以下几个方面。

1.1 斑岩及浅成低温成矿模式和勘查模型的建立

环太平洋构造带和显生宙古弧盆体系(如中生代特提斯构造带、古生代中亚构造带)的研究表明,斑岩型及其相关的浅成低温型铜、金、钼等矿床代表了板块俯冲边界最重要、最显著和最典型的成矿作用。其中仅斑岩型铜矿占全球大型-超大型铜矿总储量近 80%^[2]。斑岩型矿床包括斑岩铜矿、斑岩铜钼矿床、斑岩铜金矿床和斑岩钼矿等^[1],其中与俯冲边界最为密切相关的是前 3 类。分别以美国西南

部、安第斯和西南太平洋为成矿代表区域。浅成低温型矿床可以大致分为高硫和低硫两种类型^[3],均与俯冲边界密切相关,而其中高硫型浅成低温金(铜)矿与深部的斑岩铜(金)成矿系统有着紧密的成因联系。

俯冲边界斑岩矿床的形成主要与侵位于浅成环境(一般<3 km)的中酸性斑岩体相关,这些斑岩体起源于洋壳俯冲所产生的钙碱性岩浆作用。斑岩矿床的成矿深度对矿化赋存形式有直接影响,成矿深度较大的矿化多产于围岩中,而深度较浅的则主要赋存在斑岩体中。在斑岩成矿系统的顶部或边部接近地表位置,则常出现以石英脉型金-铜为主的高硫型浅成低温矿化,普遍认为它们与深部斑岩成矿系统均来自于钙碱性岩浆热液作用,但浅成低温成矿作用有明显的浅部流体(如大气降水等)参与。位于俯冲边界的斑岩铜矿总体形成于由于洋壳俯冲产生的挤压环境,但有利于斑岩铜矿成矿的构造环境并不是单纯的挤压^[4]。

斑岩矿床具有非常显著的蚀变分带特征,从深部(一般位于斑岩体顶部)钾化带,到中部围岩黄铁绢英岩化带,再到外围青磐岩化带和泥岩化带,形成具有“钟罩”状的圈层结构。其中矿化主要分布于钾化带和绢英岩化带中。斑岩铜矿的蚀变和矿化分带体现了单一岩浆热液成矿过程,主要与成矿流体外移过程中温度降低导致的矿物分阶段沉淀密切相

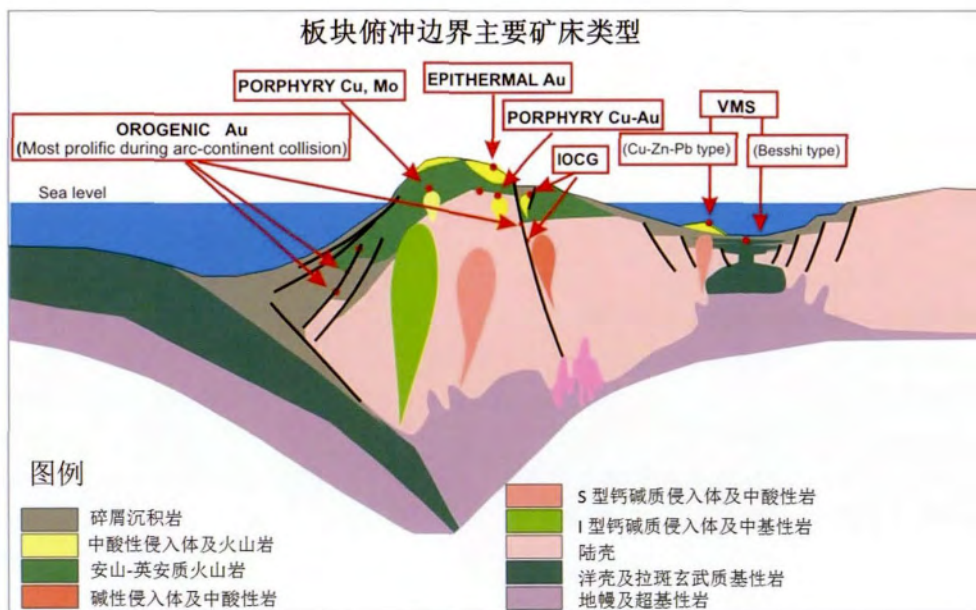


图 1 板块俯冲边界主要成矿类型 (据文献[1])

Fig. 1 Major ore deposits along the subduction margin

关^[5]。与斑岩矿床密切相关的高硫型浅成低温矿床也具有较为明显的蚀变分带,从内部到外部一般依次发育筛状残留石英带,石英-明矾石带和黏土蚀变带,这些分带主要与成矿流体外移过程中 pH 值升高相关,金(铜)矿化主要位于中部石英以及石英-明矾石带中。这些蚀变矿化模式的确认对斑岩-浅成低温矿床勘查起到至关重要的作用。

1.2 古今 VMS 型成矿系统的确认和成矿模式建立

在拉张背景下形成的弧后(或弧间)盆地是板块俯冲边界弧盆体系的重要组成部分,虽然并非所有弧盆体系都发育与岛弧并存的海相弧后盆地(如安第斯仅有陆缘弧发育)。弧间盆地的产生及闭合与洋壳俯冲作用直接相关,而弧后盆地虽然并非洋壳俯冲直接形成,但也与俯冲作用导致的弧后拉张紧密相关(图 1);因此,弧后/弧间盆地与陆缘弧或岛弧都是板块俯冲边界重要地质组成单元。弧后/弧间盆地最重要的成矿作用体现为火山岩赋存的块状硫化物铜多金属(VMS)矿床。VMS 矿床是全球重要的铜、金、银、铅、锌成矿类型。

VMS 矿床多形成于海底拉张环境,与弧后/弧间盆地火山岩喷发密切相关,属于同生型矿床。VMS 矿床也是目前唯一能在现代海底直接观测成矿过程的重要矿化类型^[6]。在西南太平洋 Lau 盆地、巴布亚新几内亚 Manus 盆地和冲绳海槽等现代弧后盆地中均已发现强烈的海底热液成矿作用。目前全球已发现的高温海底喷流中心(即“黑烟囱”)及硫化物聚集地达 300 多个。以弧后盆地为主,部分位于洋中脊和板内洋岛^[7]。热液成分以海水为主,受海底岩浆作用影响显著者含铜铁金铅锌银等大量金属元素。与大陆内部古老的同类矿床相比,海底热液成矿系统更为富集铜和锌;弧后盆地的海底硫化物比大洋中脊含有更高的铅锌砷锑钼等。陆上古弧后盆地中的矿床与现代弧后盆地成矿系统有一定相似性,如日本冲绳海槽中的成矿系统与日本 Kuroko 型(黑矿)铅锌矿相似^[8]。

VMS 矿床的形成主要与盆地裂谷期间岩浆作用相关。现代海底观测表明,弧后盆地热液活动一般具有高温特点,自大洋中脊或弧后盆地拉张中心通道口喷流出的热液温度可达 350 °C 以上。热液循环主要是由岩浆作用驱动,弧后盆地拉张中心的岩浆房一般位于海底以下 1~3 km。岩浆热活动可促使岩浆热液和海水通过同生断层等流体通道,淋滤并卸载海底地层中的金属成矿物质,从而形成 VMS

矿床。这些特征与陆地古 VMS 成矿系统研究结果基本一致^[6]。由于 VMS 成矿系统与火山围岩的同生性质,以古 VMS 成矿系统为主体的 VMS 型铜多金属矿床按赋存火山岩一般可分为双峰型和镁铁质两大类。虽然赋矿围岩种类较多,但 VMS 成矿系统的成矿模型较为类似,在蚀变和硫化物分布上均表现出较为一致的分带性,从内侧绿泥石蚀变带,过渡到外部的绢云母-绿泥石化带,顶部常有以石英-黄铁矿-赤铁矿为主的气成岩层或重晶石层;硫化物则从下部黄铜矿-黄铁矿-磁黄铁矿过渡到上部的闪锌矿-方铅矿-黄铁矿带。

1.3 其他与俯冲边界相关的成矿类型的确认

虽然斑岩-浅成低温型与 VMS 型矿床分别代表了板块俯冲边界弧及弧后(弧间)盆地最为典型的成矿类型,还有一些重要的成矿作用也发生在弧盆体系中,但这些成矿类型常以富含铜铁等多金属为特征,如夕卡岩型和近年来被逐渐认识的铁氧化物铜金(IOCG)矿床。除此之外,一些长期被认为与被动陆缘环境相关的沉积型矿床,如沉积喷流型(SEDEX)铅锌矿等,也被发现可能形成于弧后盆地的远侧外缘环境。一些产于火山沉积地层中的层状铁矿、铜-银多金属矿(Manto 型)也在弧盆体系中被发现。由此可见,板块俯冲边界的成矿作用十分复杂,其成矿环境、成矿类型、赋存金属种类等都具有明显的多样性。

在板块俯冲边界,夕卡岩型矿床多与斑岩矿床密切伴生,主要与弧环境产生的钙碱质岩浆相关(图 1),属于典型的岩浆-热液矿床。典型的夕卡岩型矿床多发生于岩体与碳酸盐地层的接触边缘,成矿元素包括铁、铜、金、银、铅、锌等,矿物蚀变和金属元素分布都具有明显的温控分带性,其中以石榴子石-辉石为代表的“干夕卡岩”高温蚀变阶段是区别于其他主要成矿类型(如斑岩型)的关键矿物组合^[9]。

IOCG 矿床类型 1992 年被正式提出^[10],经过 20 年的发展,正与斑岩型、VMS、SEDEX 等矿床类型一样被大家广为所知。IOCG 的定义比较宽泛而且饱受争议,主要是指一组含大量原生磁铁矿或赤铁矿的铜金(银-铀等)矿床,其关键鉴定特征包括以下几点:(1)含大量低钛铁氧化物;(2)为贫硫铜金成矿系统;(3)热液成因——角砾、脉体及交代结构发育;(4)受局部断裂控制,与岩体关系不明确^[11]。尽管很多研究者认为 IOCG 成矿与斑岩及夕卡岩矿床类似,均属于岩浆热液直接成矿产物^[12],也有很

多学者认识到外部流体对 IOCG 成矿系统有至关重要的作用,甚至是提供矿物质及硫的主要来源^[13]。这与很多 IOCG 矿床形成于拉张环境(如安第斯中生代弧间盆地)的地质特征是符合的。全球 IOCG 矿床的成矿构造背景较为多样,包括陆内拉张区(如奥林匹克坝)、俯冲陆缘盆地闭合区(安第斯)和非俯冲造山带盆地闭合区(澳大利亚 Cloncurry 地区)。其中形成于弧间盆地闭合期的中安第斯(智利北部—秘鲁南部)中生代 IOCG 矿床是全球显生宙俯冲边界该类型矿床最典型的代表。与安第斯中生代 IOCG 矿床在时空上具有密切联系的还有海相火山岩型铁矿(如智利铁矿带)以及 Manto 型层状铜-银矿等,这些矿床有可能与安第斯 IOCG 类似,均形成于中生代弧间盆地的闭合期^[12]。

2 俯冲边界成矿作用需解决的重要科学问题

虽然俯冲边界普遍强烈的岩浆作用和重要成矿模式已得到较深入的认识,但伴随这些科研进展不断涌现出新的科学问题,这些科学问题的解决对于准确认识俯冲边界成岩成矿特殊性和专属性,合理解释区域及局部成矿作用的差异,并为矿产勘查提供精确的科技导向具有重要意义。目前俯冲边界成矿作用研究中尚未解决的问题还很多,有一些科学问题直接影响到之前已建立的矿床成因模式。本文总结了以下几个当前亟待解决的与俯冲边界成矿作用相关的重要科学问题。这些科学问题也指明了今后俯冲边界成矿作用研究的主要趋势和方向。

2.1 斑岩铜矿成因机制

虽然斑岩铜矿是俯冲边界各种成矿作用中研究最为深入和广泛的类型,依然有很多成因机制上的科学问题存在很大争议,集中体现在成矿背景、成矿岩浆作用的特点、金属来源和萃取机理等方面。

研究表明,斑岩铜矿多在板块俯冲环境下形成。目前,对该背景下斑岩铜矿床成因的认识也最清楚。但近年来研究表明,大陆碰撞造山带也具有产出斑岩型矿床的巨大潜力^[14],冈底斯斑岩铜矿带是其典型代表^[15]。Mitchell^[16]认为,大洋板块俯冲的角度对斑岩铜矿的形成存在明显制约。Cooke 等^[17]进一步认为洋壳俯冲角度由陡变缓有利于斑岩铜矿的形成。近几年来,对安第斯和西南太平洋成矿带年轻(<20 Ma)斑岩铜矿的成矿历史与板块俯冲历史

的研究发现,大规模的成矿事件与洋壳高浮力块体的俯冲在时间上相吻合。这种“洋脊俯冲”(ridge subduction)对斑岩铜矿的特殊构造制约也在新生代以前的成矿系统中有所发现^[18]。

具备一定特征的斑岩体是形成斑岩铜矿最重要的条件之一。Sillitoe^[19]在总结斑岩铜矿的分布规律和岩浆岩地球化学特征后认为,斑岩铜矿主要与俯冲背景下产出的钙碱质中酸性火成岩有关。但是,很显然的是,并非所有的钙碱质中酸性斑岩体都可形成斑岩铜矿,含矿与无矿斑岩体在岩浆氧逸度、岩浆水含量和岩体微量元素特征等方面都有差别。研究表明,含矿岩体母岩浆的氧逸度比无矿岩体母岩浆高,而 Cu 更容易出现在氧化型中酸性侵入岩中^[20]。在氧逸度高的岩浆体系中,硫主要以 SO_4^{2-} 形式存在,结晶过程中无金属硫化物结晶分离,因而,铜可以保存在岩浆中,并在岩浆分异出的流体中富集。但最新的一些研究成果表明,斑岩铜矿化也可以形成于相对还原的岩浆环境中^[21]。岩浆含水量则影响流体形成,过低会导致对矿化不利^[22]。此外,岩浆含水量还可影响斑岩铜矿伴生金属组分的含量^[23]。近年来,有学者指出埃达克岩对斑岩型矿化的重要性,并开始对其成岩成矿机制进行研究。有人认为,在埃达克岩的源区,地壳物质与地幔的相互作用会导致 Cu 等成矿元素的活化^[24]。俯冲板片的熔融则可以导致含矿岩体同时具有埃达克岩和高氧逸度的特征^[25]。很多学者认为,埃达克岩可能与斑岩铜矿化有着直接的成因联系^[26-27]。然而,无论是南美安第斯,还是西南太平洋等重要斑岩成矿带中,都存在大量没有斑岩矿化的埃达克岩组合,这使得埃达克岩是否为斑岩铜矿化的充要条件存在很大疑问^[28]。

金属来源是斑岩铜矿成矿作用的关键问题之一。尽管部分斑岩铜矿中存在铜来源于地层的证据^[29],但岩浆来源的观点则长期以来占据着统治地位^[19,30]。近年来的流体包裹体研究作为斑岩铜矿金属来自岩浆提供了新的证据^[31]。Cu、Au 和 Mo 是斑岩铜矿中最主要的成矿元素,但其物质背景来源一直存在较多争议。Sillitoe^[19]认为,斑岩铜矿的成矿金属主要来自俯冲洋壳,地幔也可以提供少量金属,但地幔楔之上的陆壳对 Cu、Au 和 Mo 金属的贡献可以忽略不计。近年来,很多学者认为,地幔可能是 Cu、Au 和 Mo 的重要来源^[25],但仍有学者在部分地区找到了 Cu、Mo 和岩浆共同来源于下

地壳的证据^[32]。也有研究者曾提出, Mo 的来源与 Cu、Au 并不相同, 地壳混染对斑岩铜矿中 Mo 的含量起决定作用^[33]。Cu、Au 等成矿元素从岩浆中的萃取富集过程也一直是争议的焦点。气相组分对铜、金元素的优势富集虽然已被流体包裹体研究发现^[34], 但其萃取机制却一直没有定论。目前, 这些争论还在继续, 并直接影响到对斑岩铜金矿床和相关高硫型浅成低温金矿的成因认识^[35]。

2.2 不同俯冲边界成矿差异性

环太平洋构造带是全球最大的与俯冲作用相关的成矿域, 太平洋板块(及其衍生板块)沿亚欧板块、印度洋板块、美洲板块的俯冲作用分别形成了日本—中国东部、西南太平洋岛链以及北美西部和安第斯等多个巨型成矿带, 成矿作用多集中于中生代及新生代。然而, 虽然同属于环太平洋构造带, 这些不同区域的俯冲过程与相应的成矿作用却有着较为明显的差异, 造成差异的原因至今仍存在较多争议。

(1) 安第斯成矿带。该成矿带因为产出超大型斑岩铜矿而闻名于世。全球最大的 25 个斑岩铜矿有近一半分布于智利—秘鲁的中安第斯成矿带中^[17]。安第斯山属于典型的俯冲边界陆缘弧, 沿南美大陆西缘发育大量以安山质岩石为代表的钙碱性岩浆岩系列, 矿床分布与陆缘弧一致呈南北向展布, 并显示一定的金属元素分带, 从西(近海岸)向东(远海岸)呈现从 Fe-Cu 到 Cu、Cu-Au、Ag-Pb-Zn 再到 Sn-W 的变化。然而, 在安第斯成矿带存在几个重要科学问题尚未解决: ① 为何在该俯冲边界只有陆缘弧发育, 而未形成弧后盆地? 这是否与纳斯卡板块(古太平洋板块一部分)后期俯冲角度变缓相关? 研究表明, 在 180 Ma 左右, 太平洋板块呈高角度向南美西缘俯冲, 从而在中生代陆缘弧形成了海相弧间盆地, 该盆地在 110~120 Ma 左右闭合, 太平洋板块俯冲角度变缓, 使得陆缘弧东移, 但未再产生弧间或弧后拉张盆地^[36], 从而使得安第斯成矿带缺少 VMS 等弧后盆地成矿类型。② 虽然安第斯成矿带中的金属元素显示一定的分带性, 但最西侧临近海岸的 Fe(-Cu) 形成于中生代, 远早于东侧的高安第斯斑岩铜矿带(图 2), 而且西侧的 Fe(-Cu) 被认为与中生代弧间盆地形成及闭合密切相关, 与之后新生代的斑岩铜矿属于两期完全不同的成矿过程^[38]。这表明金属的分带特征可能不是由于同一俯冲过程导致。③ 安第斯斑岩型矿床多以铜钼为主, 而富金的斑岩系统仅出现于陆缘弧内侧(东侧)的智利—阿

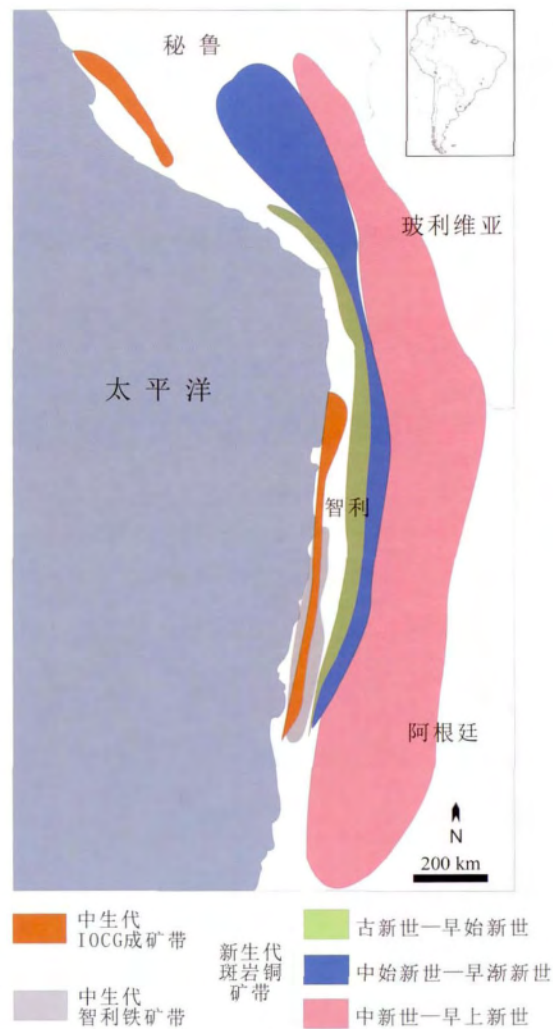


图 2 安第斯中生代铜矿带分布图

(据文献^[37]修改)

Fig. 2 Distribution of Meso-Cenozoic copper belts of the Andes

根廷以 Maricunga 成矿带为代表的狭长地带。这些富金斑岩系统的出现是否代表了深部岩浆作用的急剧变化? 如加厚地壳拆沉作用导致的地幔上涌^[39]抑或俯冲角度变缓导致下地壳直接熔融而产生的超临界流体^[40]?

(2) 西南太平洋成矿带。该成矿带的形成主要与太平洋板块与印度洋板块之间的俯冲作用密切相关, 与安第斯构造带不同, 西南太平洋俯冲边界多以洋壳弧(岛链)为主, 岩浆岩系列也比安第斯陆缘弧更偏基性, 多以玄武质-闪长质岩石为主, 成矿作用多以新生代为主^[30]。与安第斯陆缘弧不同的是, 西南太平洋地区同时发育了岛弧和弧后盆地, 很多弧后盆地正在形成, 并产出大量的金属硫化物, 如巴布亚新几内亚的 Manus 盆地, 新西兰东侧的 Lau 盆地等。岛弧的成矿作用则以富金的斑岩铜矿系统为主

要特色,部分斑岩矿床甚至形成于第四纪^[41]。该成矿带也存在一些长期争议的科学问题,如:①为何该地区同时广泛发育岛弧和弧后盆地,这是否与西南太平洋常存在的双向俯冲作用和俯冲极性反转相关^[42]?②该地区的斑岩成矿系统明显比安第斯斑岩系统富金,多以铜金为主,而且普遍存在浅部的浅成低温金矿系统,金的来源是受洋壳基底性质控制还是与深部地幔物质的参与相关?

(3)北美西部成矿带。在北美板块西缘分布着一系列的微地体,自180 Ma开始,随着太平洋板块向北美西缘的俯冲作用,这些地体依次拼贴在板块边界,尤其形成了与安第斯陆缘弧和西南太平洋岛链均不相同的增生边界(图3)。北美西部成矿带在时空上存在较大差异,如大量产出中生代造山型金矿^[44],这些矿床在中、新生代的安第斯和西南太平洋俯冲边界未发现。中生代造山型金矿主要沿地体拼贴边界分布于阿拉斯加至美国中部,而美国西南部和墨西哥西部沿岸(即加利福尼亚半岛)则无明显地体拼贴作用,也无造山型金矿床产出,而是以新生代斑岩型矿床(美国西南部)和晚白垩世铁铜金矿床(加利福尼亚半岛)为主。北美西部成矿带长期存在的争议问题主要有:①为何在环太平洋构造带只是在阿拉斯加—加拿大—美国中部区域的板块边界出

现大量微地体?②中生代大量出现的造山型金矿显然与这段时期微地体沿板块边界的拼贴紧密相关,而全球造山型金矿的研究表明,该类型矿床的成矿流体多为变质流体,成矿深度较深,与俯冲板块边界常见的斑岩型矿床有很大区别,这是否表明有地体拼贴的俯冲作用与其他俯冲过程有本质区别?③在美国西南部,洋中脊在新生代已俯冲至北美板块以下,从而形成大量斑岩铜钼矿床,而且在内侧形成盆岭省(对应Laramide运动),相应产出大量世界级的斑岩钼矿床(如Climax、Hendson等)和内华达卡林型金矿带,而这些矿化类型在环太平洋其他俯冲边界成矿带中均未出现,这是否代表洋中脊俯冲至板块以下将会产生与洋壳俯冲不同的构造岩浆成矿作用?④墨西哥西缘(加利福尼亚半岛)的矿化类型显然与北部北美西缘成矿带有显著区别,这些中生代的富铁氧化物铜(金)矿床与南美安第斯中生代IOCG矿床表现出较多的一致性。这是否代表导致加利福尼亚半岛与北美大陆分离的太平洋板块俯冲作用与安第斯中生代纳兹卡板块高角度俯冲作用相似?但为何在墨西哥西缘产生的中生代弧后盆地未能完全闭合,也未出现安第斯中生代大量的铁矿床?

(4)中国东部—日本成矿带。太平洋板块(以及后期的菲律宾板块)沿欧亚大陆的西向俯冲与中国

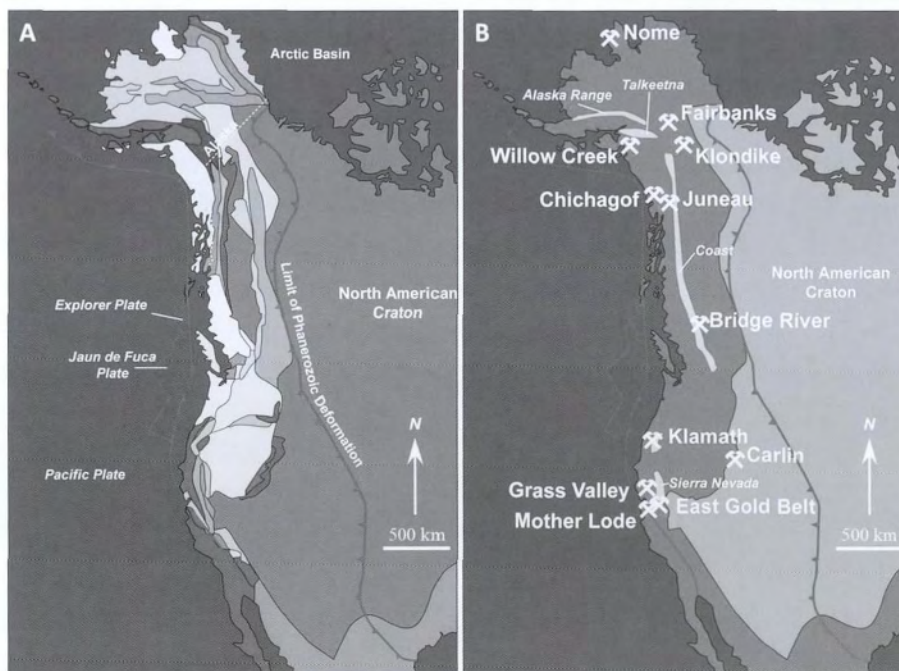


图3 北美西部中生代地体拼贴示意图(A)及相关造山型金矿带(B)

(据文献^[44]修改)

Fig. 3 Mesozoic terrane accretion of western North America(A) and relevant synorogenic gold deposits(B)

东部以及日本—中国台湾成矿带的形成直接相关。中国东部成矿作用以中生代为主, 而日本—中国台湾成矿带则多为新生代形成。太平洋西缘俯冲边界的成矿作用相对于环太平洋其他成矿域更为复杂, 中国东部中生代的成矿作用始于 180 Ma 左右, 与伊扎拉基 (Izanagi) 板块 (古太平洋板块一部分) 的西向俯冲相关。位于扬子和华夏地块之间的软杭构造带重新活化, 并形成以德兴斑岩铜矿 (170 Ma 左右) 为代表的软杭成矿带 (图 4)。而在软杭带以南的华夏板块内部 (如南岭地区) 则形成了大量年龄稍轻的 (160 Ma 左右) 花岗岩及与之相关的世界级钨-锡矿床。随着板块俯冲作用的角度变化, 中国东部的成矿作用也随之产生变迁, 145~130 Ma 期间成矿作用主要集中于长江中下游地区, 以斑岩型-夕卡岩型-玢岩型铁-铜-金矿床为主, 而在此期间, 软杭成矿带及其以南无明显矿化事件^[48]。由于 120 Ma 左右太平洋板块俯冲方向的剧烈变动^[46], 中国东部的成矿作用又产生明显变化, 长江中下游成矿带停止发育, 成矿作用主要表现为山东半岛 (沿郯庐断裂) 的造山型金矿以及沿东南沿海一带分布的斑岩及浅成低温铜-金矿床, 如紫金山地区。进入新生代, 太平洋板块俯冲作用的前缘已经移至日本—中国台湾—菲律宾一线, 产生了日本—中国台湾陆缘火山弧及日本海弧后盆地和台湾海峡 (大陆架), 成矿作用则以高硫型浅成低温金矿为主要特征, 如日本菱刈金矿和中国台湾金瓜石金矿。在日本岛弧南侧的海相拉张区域 (如冲绳海槽) 则出现了以 Kuroko 型黑矿为代表的 VMS 矿床。这些新生代成矿作用在中国东部均未产生。

复杂的板块俯冲过程和成矿作用使得太平洋西缘俯冲边界的研究存在很多争论的科学问题, 如: ①为何在中生代中国东部未产生类似新生代日本—中国台湾的陆缘弧和弧后盆地构造带? 或者类似安第斯平行于板块边缘的陆缘弧? 中国东部的软杭成矿带以及长江中下游成矿带均为近东西向, 斜交或几乎垂直于太平洋板块俯冲方向。②德兴斑岩铜矿以及长江中下游的斑岩-夕卡岩型矿床是否与安第斯斑岩矿床形成背景类似, 均属于典型的陆缘弧环境^[49], 还是属于较为特殊的板内环境^[50]? ③长江中下游成矿带的形成究竟是洋中脊俯冲作用导致^[51], 还是由于上覆板块不均一性 (扬子与华北板块之间) 导致^[45]? ④120 Ma 左右的造山型金矿为何只在山东半岛产出, 而东南沿海则产出年龄类似或稍年轻

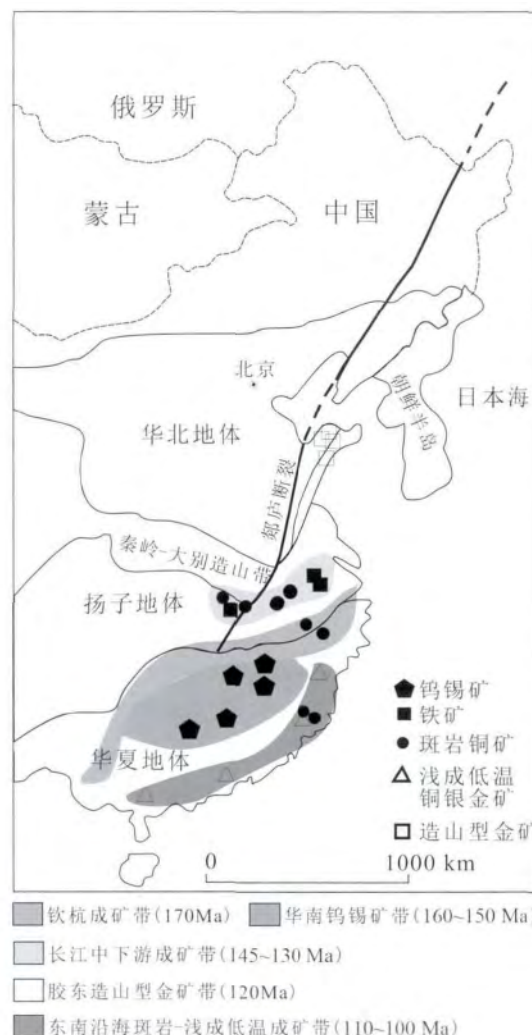


图 4 中国东部中生代主要成矿带
(据文献^[45-47]修改)

Fig. 4 The major Mesozoic metallogenic belts of Eastern China

的斑岩-浅成低温热液矿床? ⑤为何日本—中国台湾构造带只产出与斑岩铜矿有成因联系的高硫型浅成低温金矿床, 而没有斑岩铜矿发现? 是由于斑岩矿床位于深部未被发现, 还是独特的成矿环境导致斑岩系统发育较弱^[52]? ⑥虽然环太平洋俯冲边界成矿作用差异巨大, 但总体成矿作用均开始于 180 Ma 左右, 这与现代太平洋板块开始形成的时间基本一致 (180~160 Ma)^[53]。120 Ma 左右, 由于 Ontong Java 等地幔柱的产生, 太平洋板块进入了最活跃的形成期, 伴随剧烈的板块运移方向转变, 并导致南美板块和非洲板块的彻底分离^[54], 而正是在 120~110 Ma, 环太平洋构造带产生了强烈的成矿作用, 如中国东部造山型金矿与东南沿海斑岩-浅成低温成矿带的形成、安第斯 IOCG 铜金成矿带以及智利铁矿带的形成和北美西海岸以 Motherlode 为代表的造山

型金矿带的形成(图5)。所有这些特点是否证明环太平洋成矿域均与现代太平洋板块的形成直接相关?而各区域俯冲边界成矿作用的差异则可能是由于俯冲类型的不同(如俯冲角度、上覆板块性质等)造成的?

我们必须明确的是,环太平洋构造带是全球最大的现代俯冲边界,其发育时间始于侏罗纪,仅经历了180 Ma左右的成矿时间,但成矿作用却如此复杂多样。由此可见,对于我国广泛分布的古弧盆体系(俯冲边界),如古生代中亚造山带、中生代特提斯造山带等,想详细解析其俯冲边界构造单元及其成矿过程,将更加困难和存在多解性,需要借鉴现代俯冲边界的研究成果和更为细致的综合研究。

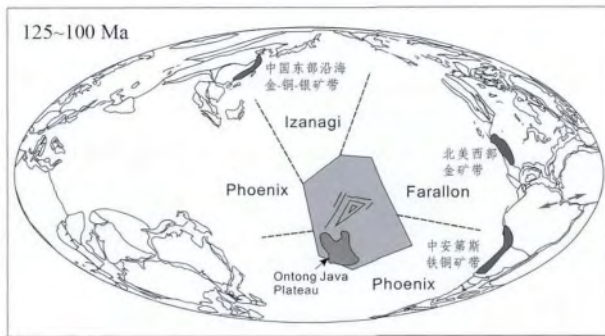


图5 太平洋晚白垩世大规模扩张作用与环太平洋成矿策应示意图

Fig. 5 Pacific Late Cretaceous large-scale expansion and the relevant circum-Pacific mineralization

2.3 古弧盆体系成矿系统的后期改造

我国陆区主要由三大构造域构成,即北部古亚亚洲构造域(中亚造山带等)、西南部特提斯构造域(喜马拉雅—三江构造带等)以及东部的太平洋构造域。除东部太平洋构造域之外,其他地区主要以大量分布中生代及其以前的古造山带(即古弧盆体系)为特点。这些古弧盆体系代表了古俯冲边界并记录了与俯冲边界相关的成矿作用,在环太平洋构造带中广泛分布的斑岩-浅成低温型矿床以及VMS型矿床等,在古俯冲边界的形成过程也会出现,如东天山古生代土屋—延东斑岩铜矿带,西天山浅成低温金矿带以及阿尔泰山南缘VMS型铜矿带。但与现代俯冲边界不同的是,古弧盆体系均已闭合,在板块俯冲过程形成的矿床可能受到后期地质作用的影响,如剥蚀破坏和成矿作用叠加改造等。这些地质事实也影响到对古俯冲边界成矿作用科学问题的认识:(1)与板块俯冲密切相关的斑岩-浅成低温型矿床成矿深

度一般小于3 km,在大多数的古俯冲边界可能应被剥蚀,因为安第斯和西南太平洋十分年轻(<10 Ma)的斑岩系统已经多位于地表,表明俯冲边界火山弧的抬升速度是很快的^[1]。已知地质历史时期的斑岩铜矿和浅成低温成矿系统的成矿时代多为新生代,中生代及古生代较少,可能与快速剥蚀相关^[5]。然而,在中亚造山带广泛发育古生代的斑岩铜矿,如我国新疆东天山土屋—延东、阿尔泰山哈腊苏、西准噶尔包古图等大型矿床,以及哈萨克斯坦科翁腊德、蒙古南戈壁奥云陶勒盖等超大型矿床,均保存完好,很多矿床位于地表较深部位;而新疆天山地区,尤其是西天山,保存着大量古生代的浅成低温型金矿床,如阿希、伊尔曼德等,这些古生代的浅成矿床为何在中亚造山带保存较完整而未被剥蚀?是否有特殊的构造活动导致了良好的后期保存条件?(2)形成于古弧后盆地体系的VMS型铜多金属矿床,经常出现多期成矿作用,从而表现出与典型同生VMS型矿床不同的特点,如阿尔泰山南缘的科塔勒铜锌矿^[55],这些后期热液蚀变和成矿作用的叠加是否指示后期碰撞造山过程对已有弧盆体系成矿系统的改造?

3 结语

全球金属矿床最为重要的类型无疑是热液矿床,而汇聚板块边缘则是热液矿床最为理想的聚集区。俯冲边界作为汇聚板块边缘最为重要的组成部分,其成矿作用一直是全球矿床学研究的热点,也是创新点的发源地。虽然已经建立了众多的成矿模式,但许多重要的科学问题尚未解决,成矿作用模式一直在不断更新和完善之中,这也为我们在矿床学尤其是汇聚板块边缘热液矿床研究的持续创新提供了空间和机遇。我国独有的地质环境和成矿作用特征也为我们进行相关研究提供了得天独厚的条件。因此,我们理应在俯冲边界成矿作用的研究上走在世界的前列。

感谢刘家军和顾雪祥教授的邀请,十分荣幸能为备受尊敬的郑明华教授80寿辰活动贡献微薄之力。

参考文献

- [1] Sillitoe R H. Porphyry copper systems[J]. *Economic Geology*, 2010, 105(1): 3-41.
- [2] 谢桂青,李瑞玲,王瑞廷,等. 全球铜矿资源的分布与潜力

- 调研报告[R]. 北京: 中国地质科学院, 2007: 230.
- [3] Hedenquist J W, Arribas A J, Gonzales-Urien E. Exploration for epithermal gold deposits[J]. *Reviews in Economic Geology*, 2000, 13: 245-277.
- [4] Richards J R, Boyce A J, Pringle M S. Geologic evolution of the Escondida area, Northern Chile: A model for spatial and temporal localization of porphyry copper mineralization[J]. *Economic Geology*, 2001, 96(2): 271-305.
- [5] Seedorff E, Dilles J H, Proffett J M, et al. Porphyry deposits: Characteristics and origin of hypogene features[C]//*Economic Geology 100th Anniversary Volume*. Littleton, Colorado: Society of Economic Geologists, 2005: 251-298.
- [6] Franklin J M, Gibson H L, Jonasson I R, et al. Volcanogenic massive sulfide deposits[C]//*Economic Geology 100th Anniversary Volume*. Littleton, Colorado: Society of Economic Geologists, 2005: 523-560.
- [7] Hannington M, Jamieson J, Monecke T, et al. The abundance of seafloor massive sulfide deposits [J]. *Geology*, 2011, 39(12): 1155-1158.
- [8] Halbach P, Nakamura K, Wahsner M, et al. Probable modern analogue of Kuroko-type massive sulphide deposits in the Okinawa Trough back-arc basin [J]. *Nature*, 1989, 338: 496-499.
- [9] Meinert L D, Dipple G M, Nicolescu S. World skarn deposits [C]//*Economic Geology 100th Anniversary Volume*. Littleton, Colorado: Society of Economic Geologists, 2005: 299-336.
- [10] Hitzman M W, Oreskes N, Einaudi M T. Geological characteristics and tectonic setting of Proterozoic iron oxide (Cu-U-Au-REE) deposits[J]. *Precambrian Research*, 1992, 58(1): 241-287.
- [11] Williams P J, Barton M D, Johnson D A, et al. Iron-oxide copper-gold deposits: Geology, space-time distribution, and possible modes of origin[C]//*Economic Geology 100th Anniversary Volume*. Littleton, Colorado: Society of Economic Geologists, 2005: 371-405.
- [12] Sillitoe R H. Iron oxide-copper-gold deposits: An Andean view[J]. *Mineralium Deposita*, 2003, 38(7): 787-812.
- [13] Chen H Y, Kyser T K, Clark A H. Contrasting fluids and reservoirs in the contiguous Marcona and Mina Justa iron oxide-Cu(-Ag-Au) deposits, south-central Perú[J]. *Mineralium Deposita*, 2011, 46(7): 677-706.
- [14] 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.
- [15] 侯增谦, 潘小菲, 杨志明等. 初论大陆环境斑岩铜矿[J]. *现代地质*, 2007, 21(2): 332-351.
- [16] Mitchell A H G. Metallogenic belts and angle of dip of Benioff zones[J]. *Nature*, 1973, 245: 49-52.
- [17] Cooke D R, Hollings P, Walshe J L. Giant porphyry deposits: Characteristics, distribution and tectonic controls[J]. *Economic Geology*, 2005, 100(5): 801-818.
- [18] Sun W D, Ling M X, Yang X Y, et al. Ridge subduction and porphyry copper gold mineralization: An overview[J]. *Science China: Earth Sciences*, 2010, 53(4): 475-484.
- [19] Sillitoe R H. A plate tectonic model for the origin of porphyry copper deposits[J]. *Economic Geology*, 1972, 67(2): 184-197.
- [20] Richards J P. Tectono-magmatic precursors for porphyry Cu-(Mo-Au) deposit formation[J]. *Economic Geology*, 2003, 98(8): 1515-1533.
- [21] Shen P, Shen Y C, Liu T B, et al. Geochemical signature of porphyries in the Baogutu porphyry copper belt, western Junggar, NW China[J]. *Gondwana Research*, 2009, 16(2): 227-242.
- [22] Cline J S, Bodnar R J. Can economic porphyry copper mineralization be generated by a typical calc-alkaline melt[J]? *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*, 1991, 96(B5): 8113-8126.
- [23] Robb L. *Introduction to Ore-forming Processes*[M]. London: Blackwell Publishing, 2005.
- [24] Wang Q, Xu J F, Jian P, et al. Petrogenesis of adakitic porphyries in an extensional setting, Dexing, South China: Implications for the genesis of porphyry copper mineralization [J]. *Journal of Petrology*, 2006, 47(1): 119-144.
- [25] Mungall J E. Roasting the mantle: Slab melting and the genesis of major Au and Au-rich Cu deposits[J]. *Geology*, 2002, 30(10): 915-918.
- [26] Wang Q, Wyman D A, Xu J F, et al. Partial melting of a thickened or delaminated lower crust in the middle of Eastern China: Implications for Cu-Au mineralization[J]. *Journal of Geology*, 2007, 115(2): 149-161.
- [27] Sun W D, Zhang H, Ling M X, et al. The genetic association of adakites and Cu-Au ore deposits[J]. *International Geology Review*, 2011, 53(5/6): 691-703.
- [28] Richards J P. Magmatic to hydrothermal metal fluxes in convergent and collided margins [J]. *Ore Geology Reviews*, 2011, 40(1): 1-26.
- [29] Force E R. Laramide alteration of Proterozoic diabase: A likely contributor of copper to porphyry systems in the Dripping Spring Mountains area, southeastern Arizona[J]. *Economic Geology*, 1998, 93(2): 171-183.
- [30] 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(3): 373-388.
- [31] Ulrich T, Günther D, Heinrich C A. Gold concentrations of magmatic brines and the metal budget of porphyry copper de-

- posits[J]. *Nature*, 1999, 399: 676-679.
- [32] Bouse R M, Ruiz J, Titley S R, et al. Lead isotope compositions of Late Cretaceous and early Tertiary igneous rocks and sulfide minerals in Arizona: Implications for the sources of plutons and metals in porphyry copper deposits[J]. *Economic Geology*, 1999, 94(2): 211-244.
- [33] Titley S R. Crustal affinities of metallogenesis in the American Southwest[J]. *Economic Geology*, 2001, 96(6): 1323-1342.
- [34] Heinrich C A. Fluid-fluid interactions in magmatic-hydrothermal ore formation[J]. *Reviews in Mineralogy and Geochemistry*, 2007, 65(1): 363-387.
- [35] Seo J H, Heinrich C A. Selective copper diffusion into quartz-hosted vapor inclusions: Evidence from other host minerals, driving forces, and consequences for Cu-Au ore formation[J]. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 2013, 113: 60-69.
- [36] Atherton M P, Pitcher W S, Warden V. The Mesozoic marginal basin of central Peru[J]. *Nature*, 1983, 305: 303-306.
- [37] Sillitoe R H, Perelló J. Andean copper province: Tectonomagmatic settings, deposit types, metallogeny, exploration, and discovery[C]// *Economic Geology 100th Anniversary Volume*. Littleton, Colorado: Society of Economic Geologists, 2005: 845-890.
- [38] Chen H Y, Clark A H, Kyser T K, et al. Evolution of the giant Marcona-Mina Justa iron oxide-copper-gold district, south-central Perú[J]. *Economic Geology*, 2010, 105(1): 155-185.
- [39] Kay S M, Godoy E, Kurtz A. Episodic arc migration, crustal thickening, subduction erosion, and magmatism in the south-central Andes[J]. *Geological Society of America Bulletin*, 2005, 117(1/2): 67-88.
- [40] Bissig T, Clark A H, Lee J K W, et al. Miocene landscape evolution and geomorphologic controls on epithermal processes in the El Indio-Pascua Au-Ag-Cu belt, Chile and Argentina [J]. *Economic Geology*, 2002, 97(5): 971-996.
- [41] Cooke D R, Hollings P, Chang Z S. Philippine porphyry and epithermal deposits: An introduction[J]. *Economic Geology*, 2011, 106(8): 1253-1256.
- [42] Solomon M. Subduction, arc reversal, and the origin of porphyry copper-gold deposits in island arcs[J]. *Geology*, 1990, 18(7): 630-633.
- [43] Colpron M, Nelson J L, Murphy D C. Northern Cordilleran terranes and their interactions through time[J]. *GSA Today*, 2007, 17(4/5): 4-10.
- [44] Goldfarb R J, Phillips G N, Nokleberg W J. Tectonic setting of synorogenic gold deposits of the Pacific Rim[J]. *Ore Geology Reviews*, 1998, 13(1): 185-218.
- [45] Mao J W, Xie G Q, Duan C, et al. A tectono-genetic model for porphyry-skarn-stratabound Cu-Au-Mo-Fe and magnetite-apatite deposits along the Middle-Lower Yangtze River Valley, Eastern China[J]. *Ore Geology Reviews*, 2011, 43(1): 294-314.
- [46] Sun W D, Ding X, Hu Y H, et al. The golden transformation of the Cretaceous plate subduction in the west Pacific[J]. *Earth and Planetary Science Letters*, 2007, 262(3/4): 533-542.
- [47] 毛景文, 陈懋弘, 袁顺达, 等. 华南地区钦杭成矿带地质特征和矿床时空分布规律[J]. *地质学报*, 2011, 85(5): 636-658.
- [48] 周涛发, 范裕, 袁峰. 长江中下游成矿带成岩成矿作用研究进展[J]. *岩石学报*, 2008, 24(8): 1665-1678.
- [49] Zhang H, Ling M X, Liu Y L, et al. High oxygen fugacity and slab melting linked to Cu mineralization: Evidence from Dexing porphyry Cu deposits, southeastern China [J]. *The Journal of Geology*, 2013, 121(3): 289-305.
- [50] 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.
- [51] Ling M X, Wang F Y, Ding X, et al. Cretaceous ridge subduction along the Lower Yangtze River Belt, eastern China [J]. *Economic Geology*, 2009, 104(2): 303-321.
- [52] Qin K Z, Ishihara S. On the possibility of porphyry copper mineralization in Japanese Islands[J]. *International Geology Review*, 1998, 40(6): 539-551.
- [53] Smith A D. A plate model for Jurassic to recent intraplate volcanism in the Pacific Ocean basin[J]. *Plates, Plumes, and Planetary Processes: Geological Society of America Special Paper*, 2007, 430: 471-495.
- [54] Larson R L. Latest pulse of Earth: Evidence for a mid-Cretaceous superplume[J]. *Geology*, 1991, 19(6): 547-550.
- [55] Zheng Y, Zhang L, Chen Y J, et al. Metamorphosed Pb-Zn-(Ag)ores of the Keketale VMS deposit, NW China: Evidence from ore textures, fluid inclusions, geochronology and pyrite compositions[J]. *Ore Geology Reviews*, 2013, 54: 167-180.