中国科学: 地球科学 2010 年 第 40 卷 第 2 期: 127 ~ 137
www.scichina.com earth.scichina.com
《中国科学》杂志社
SCIENCE CHINA PRESS

评 述

洋脊俯冲与斑岩铜金矿成矿

孙卫东[①②*], 凌明星[①③], 杨晓勇[②], 范蔚茗[①], 丁兴[①], 梁华英[④]

① 中国科学院广州地球化学研究所, 中国科学院同位素年代学和地球化学重点实验室, 广州 510640;
② 中国科学技术大学地球和空间科学学院矿产资源研究室, 合肥 230026;
③ 中国科学院研究生院, 北京 100049;
④ 中国科学院广州地球化学研究所成矿动力学重点实验室, 广州 510640
* E-mail: weidongsun@gig.ac.cn

收稿日期: 2009-07-20; 接受日期: 2010-01-08
中国科学院知识创新工程重大项目(编号: KZCX1-YW-15)、国家重点基础研究发展计划项目(编号: 2006CB403505)、国家自然科学基金(批准号: 40525010)和中国科学院国家外专局国际合作伙伴计划资助

摘要 很多大型、超大型斑岩铜、金矿都与洋脊俯冲密切相关. 环太平洋地区是世界上探明的超大型斑岩铜、金矿聚集的地区, 其中东太平洋沿岸中、南美洲的智利、秘鲁等地分布着多个正在俯冲的洋脊, 多数洋脊俯冲带都形成了大型、超大型斑岩铜、金矿; 而西太平洋的洋脊俯冲的数量少、规模小, 相应的斑岩铜、金矿的规模和数量都明显少于东太平洋, 造成了环太平洋地区斑岩铜、金矿分布不均一的特征. 其原因在于, 在洋脊俯冲过程中, 热的、年轻的洋壳容易发生部分熔融形成埃达克岩, 由于铜、金是中度不相容元素, 其在洋壳中的含量远比地幔和陆壳的平均丰度高, 因此, 洋壳部分熔融形成的岩浆具有系统偏高的铜、金含量, 有利于形成斑岩铜、金矿. 在中国东部、中亚造山带等地区剥蚀程度较低的地段寻找洋脊俯冲的迹象将有助于寻找大型、超大型斑岩铜、金矿以及其他相关矿床.

关键词
洋脊俯冲
斑岩铜矿
金矿
埃达克岩
洋壳部分熔融

斑岩铜矿是一种重要的矿床类型. 环太平洋地区是世界上最主要的斑岩铜矿带[1,2], 仅太平洋东海岸的智利就拥有El Teniente, Chuquicamata, Río Blanco-Los Bronces, La Escondida, Los Pelambres- El Pachón, Rosario, Radomiro Tomic, El Salvador and Toki等 10 个千万吨以上的世界级大型斑岩铜矿, 探明储量达 3.5 亿吨以上, 占全球铜探明储量的 30%以上, 其中El Teniente储量估计达到 9 千多万吨[2~6]; 太平洋西海岸的菲律宾也有多个大、中型斑岩铜、金矿床[2,7]. 这些斑岩铜、金矿多与埃达克岩有关[4~6,8], 其中很多矿床与洋脊或海岛链的俯冲有关[2].

与此形成鲜明对比的是同处于环太平洋成矿带的中国东部, 却属于相对贫铜地区, 探明铜储量不到智利的 5%. 中国东部至少自侏罗纪开始就一直处于俯冲板块之上[9,10], 多项研究认为板块俯冲对中国东部的构造运动和岩浆活动起着决定性的作用[9,11~13]. 与美洲相同, 中国东部也分布着大量中生代埃达克岩或埃达克质岩石, 且多与铜、金矿化有关, 然而只有德兴和长江中下游的斑岩铜矿具有一定的规模[14~20].

究竟是什么原因造成了环太平洋地区斑岩铜、金矿分布的不均一特征? 洋脊俯冲究竟与斑岩铜矿存在怎样的内在联系? 中国东部是否存在与太平洋板块俯冲有关的斑岩铜矿? 为了解决这些问题, 本文

引用格式: Sun W D, Ling M X, Yang X Y, et al. Ridge subduction and porphyry copper gold mineralization: An overview. Sci China Earth Sci, 2010, doi: 10.1007/s11430-010-0024-0

总结前人的工作, 分析环太平洋大型、超大型斑岩铜、金矿床的成因, 进而探讨了环太平洋地区斑岩铜、金矿的分布规律, 从地球化学的角度分析了斑岩铜矿与洋脊俯冲之间的内在联系.

1 环太平洋地区洋脊俯冲与斑岩铜金矿

洋脊俯冲是由于洋脊与俯冲带交叉而随俯冲板片一起俯冲到地幔的一种现象[21], 最早发现于对美国西部造山作用的研究[22]. 研究表明洋脊俯冲在现今环太平洋俯冲带广泛发育[23~27]. 事实上环太平洋地区的洋脊俯冲自中生代就多次发生[28~32]. 由于洋脊的特殊结构和形态, 洋脊俯冲对板块俯冲的角度、俯冲带的热结构、相关岩浆活动以及成矿作用有重要的控制作用, 因此受到广泛重视[2,25,33~37] (图 1).

洋脊俯冲与许多斑岩铜、金矿有着密切的关系, 例如, 在东太平洋的智利中部分布着El Teniente(0.94 亿吨), Rio Blanco-Los Bronces (0.57 亿吨), Los Pelambres-El Pachón(0.27 亿吨)等超大型矿床, 它们分别是位居世界上第 1, 3, 10 的斑岩铜钼矿、铜金矿床, 探明铜金属总储量超过 1.5 亿吨. 这些超大型矿床在空间上都与Juan Fernández 洋脊俯冲十分吻合, 形成时代在 5~10 Ma[2,39]. 在中美洲巴拿马的Cerro Colorado超大型斑岩铜金矿床(0.21 亿吨)与Cocos洋脊的俯冲对应(图 2), 其形成时代在 6~7 Ma[3].

美国有一些较大的矿, 如Bingham(0.28 亿吨铜, 1603 吨金), Butte(0.35 亿吨铜), 在空间分布上与现今的Baja California洋脊俯冲[36]比较近, 但是时代较老, 约 38~60 Ma, 是否与洋脊俯冲有关还有待研究. 此外, 智利Chuquicamata是全球第二大斑岩铜矿(0.66 亿吨铜, 300 吨金), 形成时代为 33.6 Ma; 其北面 5 km处的Radomiro Tomic(0.20 亿吨铜)[2], 也属于全球前 25 名的大矿, 形成时代 32.7 Ma[40]. 在空间位置上与Iquique洋脊一致. 但是考虑到上述矿床的形成时

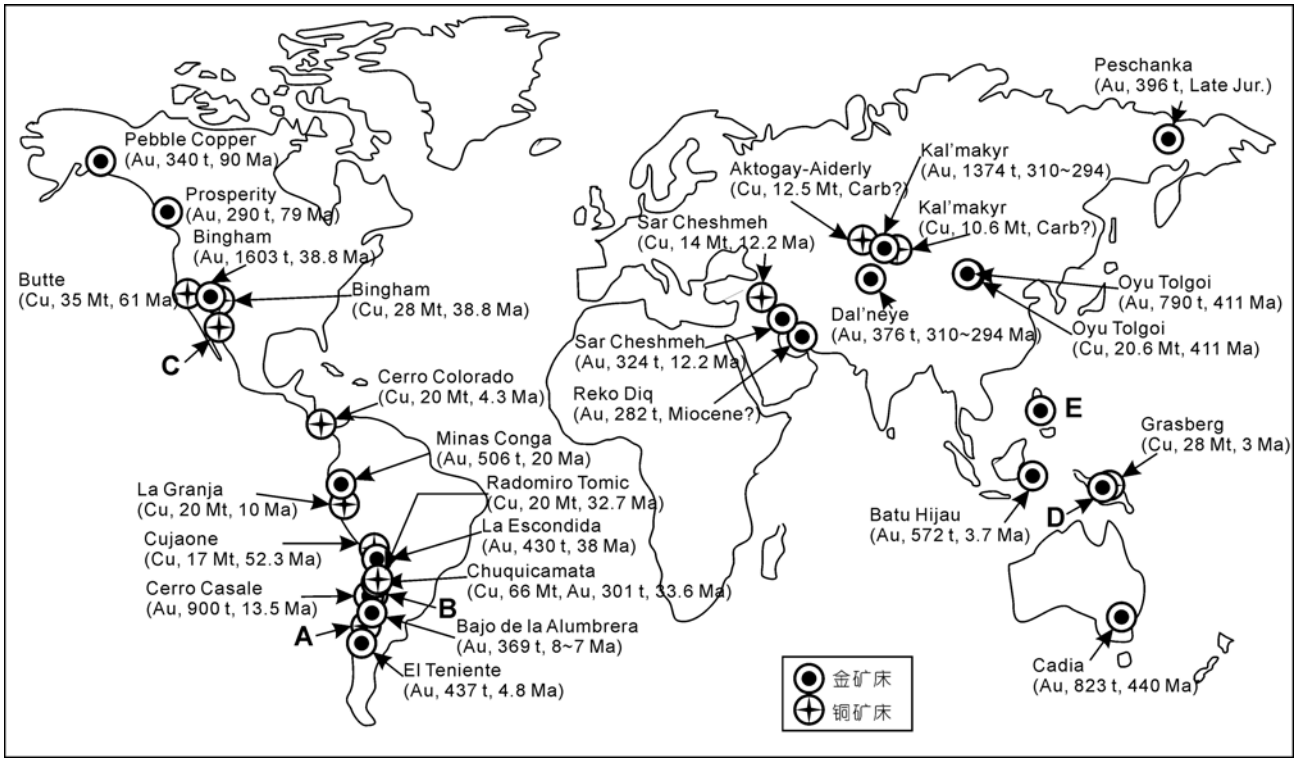

图 1 全球大型、超大型斑岩铜(金)矿床分布简图

数据引自文献[2, 3, 38]. A, B, C 为铜成矿省; D, E 为金成矿省. A, 智利中部成矿省(El Teniente, Río Blanco-Los Bronces, Los Pelambres); B, 智利北部成矿省(Chuquicamata, La Escondida, Radomiro Tomic, Rosario, El Salvador, El Abra); C, 西南亚利桑那成矿省(Cananea, Lone Star, Morenci-Metcalf, Pima, Ray); D, 巴布亚新几内亚成矿省(Grasberg, Ok Tedi, Panguna, Frieda River); E, 菲律宾成矿省(Far South East-Lepanto, Tampakan, Atlas, Sipalay)

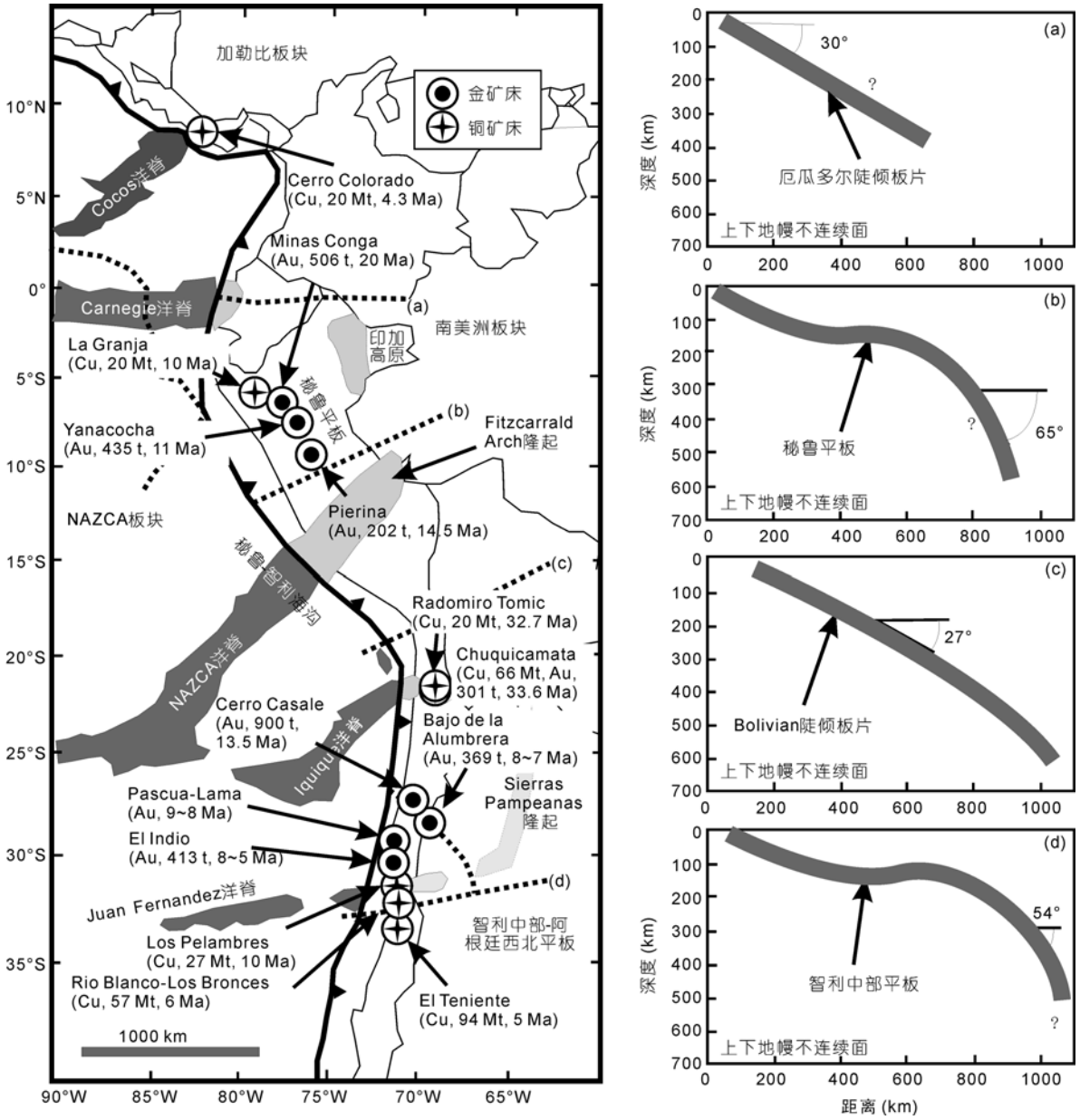

图 2　东太平洋洋脊俯冲与南美洲大型、超大型斑岩铜(金)矿

构造格架根据文献[23]修改, 矿床分布据文献[2, 3]

代较老, 其成因是否与 Iquiqua 洋脊有关尚有待进一步工作来验证. 通常洋脊俯冲要比普通的板块俯冲速度慢. 假设 Iquiqua 洋脊的俯冲速度是 10 cm/a, 则 30 Ma 内应该有 3000 km 的洋脊被俯冲下去. 考虑到洋脊通常要远远长于 3000 km, 上述矿床与很可能与 Iquiqua 洋脊俯冲有关. 事实上, 由于东太平洋由多个大小不同的板块组成, 洋脊俯冲在历史上很多, 上述超大型矿床也可能与其他更早的洋脊俯冲有关. 这些都有待进一步研究.

在西太平洋, 菲律宾吕宋岛的很多大、中型斑岩铜金矿与 Scarborough洋脊俯冲在空间分布上十分一致[2]. 这些矿床有: Lepanto-Far South East(548 万吨铜, 970 吨金)[41]; Santo Tomas II(120 万吨铜, 233 吨金)[1]; Guinaoang (200 万吨铜, 200 吨金)[3]. 除了斑岩铜金矿

外, Scarborough洋脊俯冲还与Baguio超大型低硫热液金成矿区有关. 这些矿的形成时代多小于 3 Ma(图3)[42]. 与南美洲的洋脊俯冲不同的是这个洋脊是板片撕裂造成的[43]. 在日本, Kyushu-Palau洋脊俯冲[26]在空间上与Hishikari 低硫热液矿床和Nansatsu高硫区重叠(图 4). 上述两个洋脊俯冲都主要与热液矿床有关, 没有超大型斑岩铜矿产出, 可能是由于这些与洋脊俯冲有关的矿床都很年轻, 剥蚀程度较小的结果. 如果这种推断成立, 则下面有可能存在斑岩铜矿.

总体看来, 与东太平洋相比, 现在西太平洋的洋脊俯冲要少很多. 这可能是斑岩铜矿远远少于东太平洋的一个主要原因.

处在西太平洋的中国, 目前已经离太平洋俯冲带较远. 长江中下游是中国东部最重要的铜多金属成矿带, 其主要成矿时代是(138±5) Ma[16,17,20], 铜金矿床主要与埃达克质岩有关, 呈近东西向线状展布. 在埃达克质岩石两侧分布着钙碱系列岩石. A型花岗岩与埃达克质岩石空间分布相近, 但是时代上要晚约 10 Ma, 主要在 125 Ma[44~47].

目前, 绝大部分学者考虑到其富集型同位素特征, 认为中国东部中生代埃达克岩是加厚或者拆沉

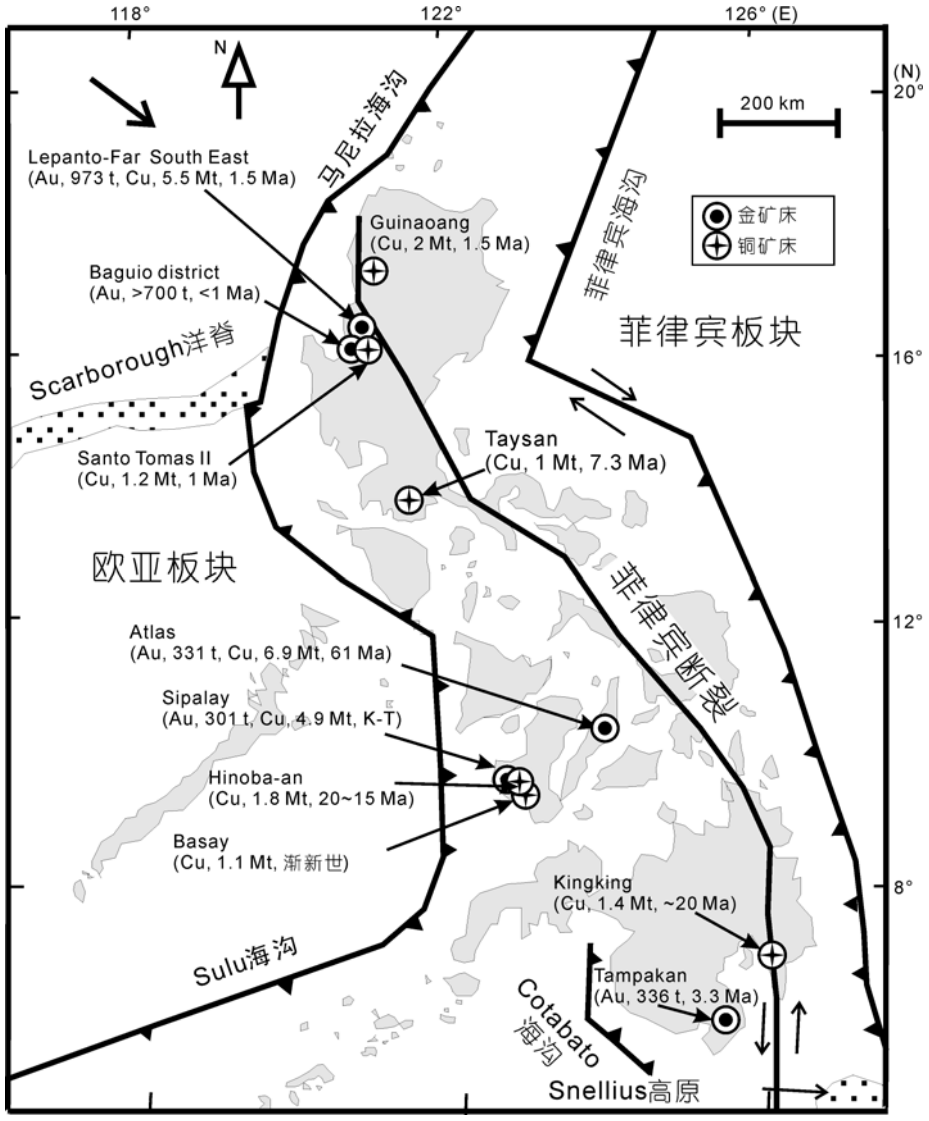

图 3 菲律宾洋脊俯冲与铜金矿床分布[2]

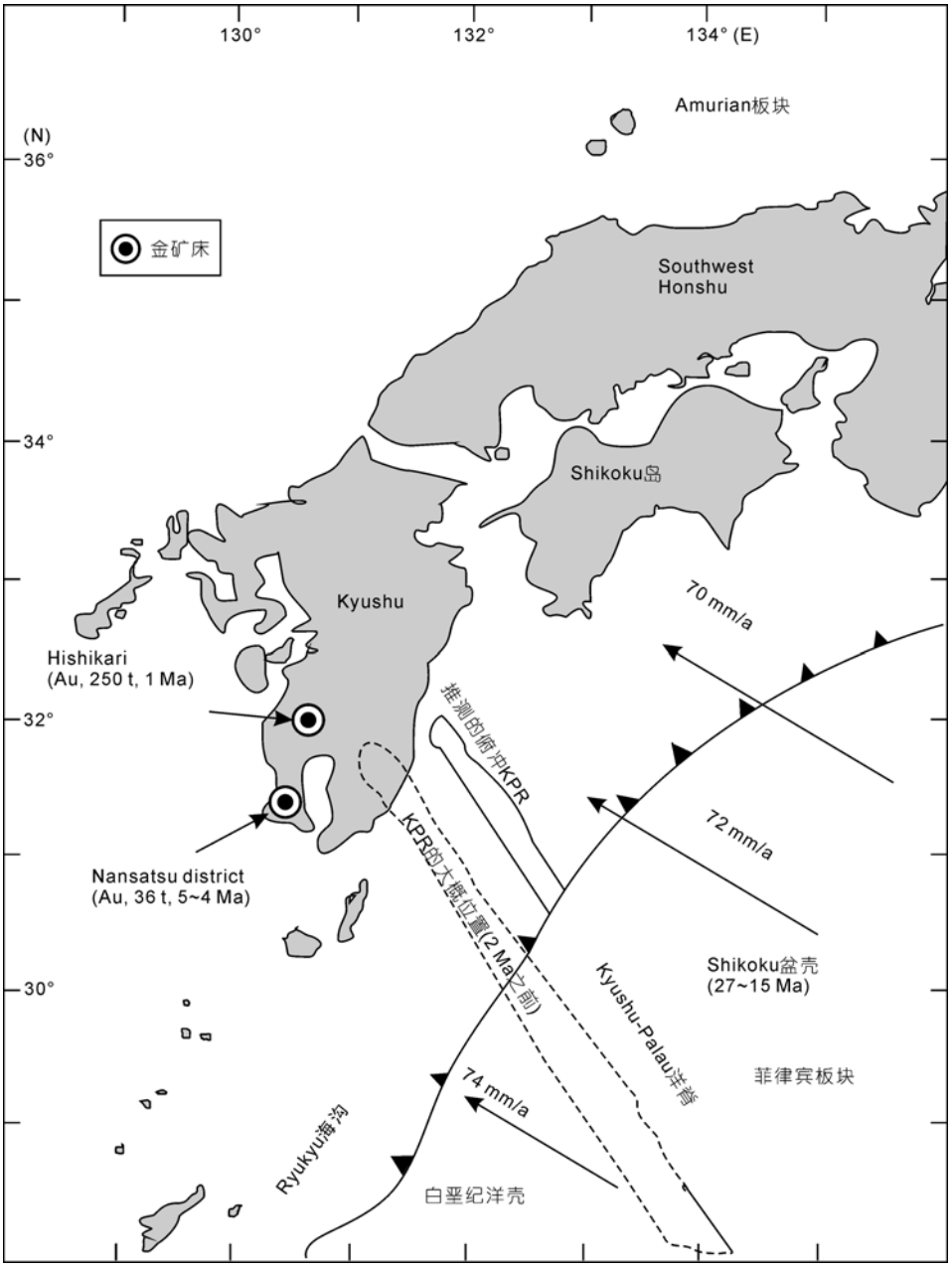

图 4　日本南部洋脊俯冲与铜金矿床分布

构造格架据文献[26], 矿床分布据文献[2]

下地壳部分熔融的产物[16,48~54], 相关的斑岩铜矿与板块俯冲无关. 但是很多学者提出成矿物质主要来自地幔[14,55], 两者之间存在明显的矛盾. 事实上, 铜是中度不相容元素[56,57], 亏损地幔中铜的丰度不高, 略低于初始地幔的丰度 (30 ppm)[58], 但是其在陆壳的平均丰度也很低 (27 ppm)[59]. 这主要是由于在岩浆演化后期铜和金类似, 会大量离开岩浆进入热液[56,57]. 由于铜的上述地球化学特性和丰度分布特征, 单纯的陆壳过程不容易成矿, 而地幔物质的加入也并不必然造成铜的富集.

另一种观点则认为长江中下游成矿带可能是早白垩一次洋脊俯冲的结果, 埃达克岩是洋壳部分熔

融产生的熔体受到陆壳和富集地幔混染的产物[30]. 约在 125~140 Ma之间, 太平洋板块向南西方向俯 冲[13], 而依泽纳吉板块则向北北西方向俯冲, 两者之间的洋脊正对长江中下游地区. 由于两个板块都有向西的运动分量, 可以导致洋脊俯冲. 该洋脊俯冲可以很好地解释该区埃达克岩、钙碱性岩、富铌岛弧岩石、A型花岗岩以及相关矿产资源的时空分布[30]: 靠近洋脊的部位, 由于洋壳热, 在俯冲过程中容易发生部分熔融, 形成埃达克岩; 而离俯冲带较远的地方, 洋壳相对较冷, 且含水较高, 洋壳脱水取代部分熔融, 主要形成类似岛弧环境的钙碱系列岩石; 随着俯冲的进行, 在洋脊的位置拉开形成板片窗, 软流圈物质上涌, 此时形成的是高温、无水的A型花岗岩. 洋脊俯冲往往形成富铌岛弧岩石[36], 长江中下游具有岛弧特征的富铌火山岩也支持洋脊俯冲的模型[30].

值得指出的是大别山白垩纪埃达克岩的形成时代与长江中下游地区含矿埃达克岩一致, 且东南缘有高镁埃达克岩发育, 但是往往都不含矿. 地球化学性质指示其为陆壳部分熔融的产物[52], 其形成很可能与洋脊俯冲的诱导引发的下地壳部分熔融有关.

2 埃达克岩与斑岩铜矿

埃达克岩是Defant和Drummond提出的, 用来描述在阿留申群岛的埃达克岛发现的一类具有俯冲洋壳部分熔融组分的特殊岩石[60~62]. 早在十几年前就有学者认为斑岩铜矿等矿床与埃达克岩之间存在密切的成因联系[8]. 在他们研究的 43 个矿床和成矿区中, 有 38 个与埃达克岩有关, 而且常常产出于埃达克岩中; 而在埃达克岩和非埃达克岩同时出现的矿区, 矿化通常与埃达克岩有关[8]. 这个观点迅速得到了世界各地研究结果的支持. 如: 菲律宾多数斑岩铜矿和热液金矿在时间和空间上与埃达克岩有关[7]; 蒙古的Erdenet斑岩铜矿与埃达克岩有关[63]; 而智利的Los Pelambres, Chuquicamata 等矿都与埃达克岩有关[4~6,64,65]; 在中国长江中下游的铜陵、沙溪以及江西的德兴斑岩、矽卡岩型铜矿大多与埃达克岩有关或者是直接产出于埃达克岩中[15,49,50,66~68]. 甚至有学者认为埃达克岩可以作为铜矿的找矿标志[69].

有人认为埃达克岩与斑岩铜矿的关系实质上是由于埃达克岩浆具有较高的氧逸度[70], 氧逸度对斑岩铜矿的形成起着更主要的作用[71]. 的确, 铜的地球化学性质受氧逸度的影响很大[1,57], 成矿斑岩体往往比同生的非成矿斑岩体具有更高的氧逸度[72,73]. 但是, 岛弧岩石总体都具有较高的氧逸度[74~76], 埃达克岩也不是氧逸度最高的岛弧岩石. 最新研究表明岛弧岩石这种高氧逸度并非主要受控于洋壳俯冲的部分熔融, 而往往是与俯冲板块脱水有关[77]. 因此, 埃达克岩与斑岩铜矿之间的关系显然不是简单的高氧逸度的结果.

铜是中度不相容元素, 在大洋玄武岩和岛弧岩浆岩演化过程中, 其不相容性与重稀土相似[56,57], 在洋壳中的含量一般在 60~125 ppm[78], 前人估计的平均丰度在 74 ppm[79], 远比地幔(30 ppm)[58]和陆壳的平均丰度(27 ppm)[59]高, 因此, 洋壳部分熔融形成的岩浆应该具有系统偏高的铜含量, 有利于成矿[80,81]. 斑岩铜矿与埃达克岩的成因联系实际上是斑岩铜矿与俯冲洋壳部分熔融之间的联系[81].

铜、金在岩浆演化过程中的性质十分相近[56,57], 金矿与洋脊俯冲的内在联系应该与铜相似. 但是在成矿流体中铜、金性质有明显的差异, 造成铜、金矿床在空间分布和产出形式上的差异.

3 埃达克岩与洋脊俯冲

在地球演化早期俯冲洋壳部分熔融普遍存在, 是早期大陆地壳形成的主要机制[82~85], 因此埃达克岩是近年来的研究热点. 相比之下, 现今俯冲大洋板片的热结构通常达不到部分熔融的条件[62,86], 只有年轻的、热的俯冲洋壳才会发生脱水熔融形成埃达克岩熔体[62,87].

考虑到洋脊的特殊结构和性质, 可以肯定地说, 显生宙以来, 洋脊俯冲应该是俯冲洋壳部分熔融形成埃达克岩的最佳地质过程. 显然, 如果埃达克岩确实与斑岩铜矿有着密切的成因联系, 那么埃达克岩, 确切地说是俯冲板片部分熔融, 是洋脊俯冲与斑岩铜矿之间的桥梁.

4 讨论

4.1 洋壳部分熔融型埃达克岩与斑岩铜矿

尽管越来越多的研究表明埃达克岩与斑岩铜、金矿有着密切的联系, 仍然有学者强烈反对埃达克岩与斑岩铜矿的形成密切相关的观点[88~90]. 主要的理

由是埃达克质岩石的地球化学特征并不一定需要俯冲板片的部分熔融, 可以通过普通岛弧岩浆的分异结晶产生[90~93]. 他们认为岩浆在地壳中的演化对铜矿形成起着更重要的作用[90]. 如果按照这种观点, 所有岛弧岩石都有可能形成斑岩铜矿. 这与斑岩铜矿分布的不均匀性矛盾. 这种观点的实质是反对洋壳部分熔融与斑岩铜矿的关系. 如前述, 铜是中度不相容元素, 其在洋壳中的含量是地幔和陆壳丰度的 2~4 倍, 因此, 洋壳部分熔融形成的岩浆显然更有利于成矿[80, 81].

当然, 并不是所有埃达克岩都有斑岩铜矿[52,94], 例如中国东部中生代有大量埃达克岩, 但是只有德兴和长江中下游有成规模的斑岩铜矿. 事实上, 有很多不含矿的埃达克岩是陆壳部分熔融形成的[52]. 从这一点来看, 洋脊俯冲也许是寻找斑岩铜矿的更有效的途径.

值得指出的是, 由于斑岩铜矿产出部位通常比较浅, 因此, 在古老俯冲带寻找斑岩铜矿应该优先考虑剥蚀程度较低的地方. 此外, 虽然洋壳部分熔融更有利于成矿, 但并不能排除普通岛弧安山岩成矿的可能性. 事实上, 不是所有斑岩铜矿都与埃达克岩有关, 如一些斑岩铜矿产出于钙碱质安山岩中[71]. 对于此类斑岩铜矿也要具体分析. 这些岩石有可能是通过其他途径富集了铜, 当然也不排除它们与埃达克岩有联系. 例如埃达克岩浆可以通过同化混染和长石的分离结晶而失去其埃达克岩的特征: 长石结晶造成Sr迅速下降, 而Y则缓慢升高, Sr/Y比值大幅度下降. 换言之, 原始岩浆是俯冲洋壳部分熔融形成的埃达克岩, 但是在岩浆演化过程中, 由于长石结晶和陆壳混染等过程的改造而表现为非埃达克岩的特征. 因此认真分析岩石的初始岩浆组成特征十分重要.

4.2 洋脊俯冲与斑岩铜矿

虽然洋脊俯冲十分有利于俯冲洋壳部分熔融, 而洋壳部分熔融则对形成富铜初始岩浆相当有利, 但并不是所有的斑岩铜矿都与洋脊俯冲有着直接的关系, 其他能够发生俯冲洋壳部分熔融的过程, 如平板俯冲、新生洋壳俯冲、板片撕裂部位以及俯冲板片的边缘, 也可以产生埃达克岩和相关的斑岩铜矿及其相关矿床. 例如秘鲁的Minas Conga 斑岩铜金矿床和La Granja 斑岩铜钼矿床在空间上与Nazca洋脊俯冲的位置上有几百公里的偏差(图 2). 该矿床被认为是Nazca洋脊和印加高原俯冲共同作用的结果[2].

当然也不是所有洋脊俯冲都形成斑岩型铜金矿床, 例如厄瓜多尔的Carnegie洋脊的俯冲带就尚没有发现超大型矿床. 一个可能的原因是这里的洋脊俯冲才刚刚开始, 还没有出现大规模俯冲洋壳部分熔融. 该区板块俯冲的角度仍然很大, 而且上覆陆壳也没有明显的变形(图 2(a)), 支持这种推断. 与此形成鲜明对比的是, Juan Fernández 洋脊俯冲的俯冲角度很小, 而且明显造成了上覆陆壳的变形(图 2(d)), 是世界上斑岩铜金矿床最集中的地区.

对古老的洋脊俯冲, 由于洋脊本身已经消失, 判断是否存在洋脊俯冲需要从仰冲板块入手. 首先是岩石组合: 洋脊俯冲在形成埃达克岩的同时, 会出现高镁安山岩和富铌玄武岩[95~97], 对于上覆陆壳较厚的区域, 可能会出现中酸性富铌岩; 在洋脊附近由于脱水较少, 会出现岛弧钙碱系列安山岩较少的现象; 在板片窗拉开时会出现A-型花岗岩和钾质火山 岩[30,36]. 从构造上看, 洋脊俯冲往往会伴随剪切断裂、抬升、拉张等现象[21,26]; 在洋脊与俯冲带不垂直的情况下, 相关岩浆岩带会随时间迁移[98,99].

我国分布着多条不同时代的造山带, 如中亚造山带、秦岭大别造山带等, 在这些造山带内寻找洋脊俯冲的迹象将帮助我们寻找斑岩铜矿以及相关矿床. 在中国东部, 除了长江中下游外, 山东和华北北缘都可能经历过洋脊俯冲, 有可能是有利铜、金成矿的地区. 在中亚造山带, 应该重点寻找有埃达克岩、富铌岛弧火山岩、高镁安山岩、A型花岗岩组合的地区, 如新疆北部的富蕴县等地[100,101]. 西准的包古图地区铜金矿化被认为是与石炭纪洋脊俯冲有关[102], 值得特别关注. 事实上, 新疆许多已经发现铜金矿床的地方, 比如喇嘛苏、阿希、土屋-延东、赤湖等都有埃达克岩、富铌岛弧火山岩、高镁安山岩组合[103], 很可能是洋脊俯冲的产物, 应该重点研究.

5 结论

洋脊俯冲有利于板片发生部分熔融, 从而形成斑岩铜矿, 环太平洋地区很多超大型斑岩铜矿都分布在洋脊俯冲区域内. 由于东太平洋分布着大量的洋脊俯冲, 而西太平洋洋脊俯冲较少, 因此造成了环太平洋地区斑岩铜矿分布的不均一特征. 在中生代时, 太平洋板块和依泽纳吉板块间洋脊俯冲向东亚

大陆俯冲, 可能是中国东部长江中下游铜多金属成矿带的主要控制因素. 洋脊俯冲与斑岩铜矿之间的内在联系源于俯冲洋壳部分熔融. 在中国东部、中亚造山带、秦岭大别造山带等构造带内剥蚀程度较低的区段寻找洋脊俯冲的迹象将帮助我们寻找斑岩铜矿以及相关矿床.

致谢 在本文撰写过程中曾与钟孙霖、李曙光教授和王强研究员进行了深入的讨论, 两位匿名审稿人提出了很多建设性的意见, 在此一并致谢.

参考文献

1 Sillitoe R H. Characteristics and controls of the largest porphyry copper-gold and epithermal gold deposits in the circum-Pacific region. Australian J Earth Sci, 1997, 44: 373—388
2 Cooke D R, Hollings P, Walsh J L. Giant porphyry deposits: Characteristics, distribution, tectonic controls. Econ Geol, 2005, 100: 801—818
3 Mutschler F E, Ludington S, Bookstrom A A. Giant porphyry-related metal camps of the world—A database. Open-File Report 99-556, online version 1.0. U.S. Geological Survey, 2000
4 Reich M, Parada M A, Palacios C, et al. Adakite-like signature of Late Miocene intrusions at the Los Pelambres giant porphyry copper deposit in the Andes of central Chile: Metallogenic implications. Mineral Depos, 2003, 38: 876—885
5 Oyarzun R, Marquez A, Lillo J, et al. Giant versus small porphyry copper deposits of Cenozoic age in northern Chile: Adakitic versus normal calc-alkaline magmatism. Mineral Depos, 2001, 36: 794—798
6 Oyarzun R, Marquez A, Lillo J, et al. Reply to discussion on "Giant versus small porphyry copper deposits of Cenozoic age in northern Chile: Adakitic versus normal calc-alkaline magmatism" by Oyarzun R, Marquez A, Lillo J, Lopez I, Rivera S (*Mineralium Deposita* 36: 794—798, 2001). Mineral Depos, 2002, 37: 795—799
7 Sajona F G, Maury R C. Association of adakites with gold and copper mineralization in the Philippines. Comptes Rendus de l'Academie des Sciences-Series IIA-Earth Planet Sci, 1998, 326: 27—34
8 Thieblemont D, Stein G, Lescuyer J L. Epithermal and porphyry deposits: The adakite connection. Comptes Rendus De L Academie Des Sciences Serie Ii Fascicule a-Sciences De La Terre Et Des Planetes, 1997, 325: 103—109
9 Li Z X, Li X H. Formation of the 1300-km-wide intracontinental orogen and postorogenic magmatic province in Mesozoic South China: A flat-slab subduction model. Geology, 2007, 35: 179—182
10 Maruyama S, Isozaki Y, Kimura G, et al. Paleogeographic maps of the Japanese Islands: Plate tectonic synthesis from 750 Ma to the present. Island Arc, 1997, 6: 121—142
11 Zhou X M, Li W X. Origin of Late Mesozoic igneous rocks in Southeastern China: Implications for lithosphere subduction and underplating of mafic magmas. Tectonophysics, 2000, 326: 269—287
12 Zhou X M, Sun T, Shen W Z, et al. Petrogenesis of Mesozoic granitoids and volcanic rocks in South China: A response to tectonic evolution. Episodes, 2006, 29: 26—33
13 Sun W D, Ding X, Hu Y H, et al. The golden transformation of the Cretaceous plate subduction in the west Pacific. Earth Planet Sci Lett, 2007, 262: 533—542
14 侯增谦, 潘小菲, 杨志明, 等. 初论大陆环境斑岩铜矿. 现代地质, 2007, 21: 332—351
15 Wang Q, Xu J F, Jian P, et al. Petrogenesis of adakitic porphyries in an extensional tectonic setting, Dexing, South China: Implications for the genesis of porphyry copper mineralization. J Petrol, 2006, 47: 119—144
16 Xie J C, Yang X Y, Sun W D, et al. Geochronological and geochemical constraints on formation of the Tongling metal deposits, middle Yangtze metallogenic belt, east-central China. Int Geol Rev, 2009, 51: 388—421
17 Sun W D, Xie Z, Chen J F, et al. Os-Os dating of copper and molybdenum deposits along the middle and lower reaches of the Yangtze River, China. Econ Geol Bull Soc Econ Geol, 2003, 98: 175—180
18 常印佛, 刘湘培, 吴言昌. 长江中下游铜铁成矿带. 北京: 地质出版社, 1991. 379
19 Pan Y M, Dong P. The Lower Changjiang (Yangzi/Yangtze River) metallogenic belt, east central China: Intrusion- and wall rock-hosted Cu-Fe-Au, Mo, Zn, Pb, Ag deposits. Ore Geol Rev, 1999, 15: 177—242
20 Mao J W, Wang Y T, Lehmann B, et al. Molybdenite Re-Os and albite ^{40}Ar/^{39}Ar dating of Cu-Au-Mo and magnetite porphyry systems in the Yangtze River valley and metallogenic implications. Ore Geol Rev, 2006, 29: 307—324

21 Thorkelson D J. Subduction of diverging plates and the principles of slab window formation. Tectonophysics, 1996, 255: 47—63

22 Palmer H. East Pacific Rise and westward drift of North America. Nature, 1968, 220: 341—345

23 Espurt N, Funiciello F, Martinod J, et al. Flat subduction dynamics and deformation of the South American plate: Insights from analog modeling. Tectonics, 2008, 27, doi: 10.1029/2007tc002175

24 Delong S E, Schwarz W M, Anderson R N. Thermal effects of ridge subduction. Earth Planet Sci Lett, 1979, 44: 239—246

25 Cole R B, Stewart B W. Continental margin volcanism at sites of spreading ridge subduction: Examples from southern Alaska and western California. Tectonophysics, 2009, 464: 118—136

26 Wallace L M, Ellis S, Miyao K, et al. Enigmatic, highly active left-lateral shear zone in southwest Japan explained by aseismic ridge collision. Geology, 2009, 37: 143—146

27 Imai A. Variation of Cl and SO_3 contents of microphenocrystic apatite in intermediate to silicic igneous rocks of Cenozoic Japanese island arcs: Implications for porphyry Cu metallogenesis in the Western Pacific Island arcs. Resour Geol, 2004, 54: 357—372

28 Kim S W, Oh C W, Choi S G, et al. Ridge subduction-related Jurassic plutonism in and around the Okcheon metamorphic belt, South Korea, and implications for Northeast Asian tectonics. Int Geol Rev, 2005, 47: 248—269

29 Kinoshita O. Migration of igneous activities related to ridge subduction in southwest Japan and the East-Asian continental-margin from the Mesozoic to the Paleogene. Tectonophysics, 1995, 245: 25—35

30 Ling M X, Wang F Y, Ding X, et al. Cretaceous ridge subduction along the Lower Yangtze River Belt, eastern China. Econ Geol, 2009, 104: 303—321

31 Haeussler P J, Bradley D, Goldfarb R, et al. Link between ridge subduction and gold mineralization in Southern Alaska. Geology, 1995, 23: 995—998

32 Goldfarb R J, Phillips G N, Nokleberg W J. Tectonic setting of synorogenic gold deposits of the Pacific Rim. Ore Geol Rev, 1998, 13: 185—218

33 Bourgois J, Martin H, Lagabrielle Y, et al. Subduction erosion related to spreading-ridge subduction: Taitao peninsula (Chile margin triple junction area). Geology, 1996, 24: 723—726

34 Karsten J L, Klein E M, Sherman S B. Subduction zone geochemical characteristics in ocean ridge basalts from the southern Chile Ridge: Implications of modern ridge subduction systems for the Archean. Lithos, 1996, 37: 143—161

35 Iwamori H. Thermal effects of ridge subduction and its implications for the origin of granitic batholith and paired metamorphic belts. Earth Planet Sci Lett, 2000, 181: 131—144

36 Benoit M, Aguillon-Robles A, Calmus T, et al. Geochemical diversity of Late Miocene volcanism in southern Baja California, Mexico: Implication of mantle and crustal sources during the opening of an asthenospheric window. J Geol, 2002, 110: 627—648

37 Groome W G, Thorkelson D J. The three-dimensional thermo-mechanical signature of ridge subduction and slab window migration. Tectonophysics, 2009, 464: 70—83

38 Singer D A, Berger V I, Moring B C. Porphyry Copper Deposits of the World: Database and Grade and Tonnage Models. Open-File Report, 2008—1155, 2008

39 Hollings P, Cooke D, Clark A. Regional geochemistry of tertiary igneous rocks in central Chile: Implications for the geodynamic environment of giant porphyry copper and epithermal gold mineralization. Econ Geol, 2005, 100: 887—904

40 Patricio C C, Gonzalo R S. Oxide Mineralization at the Radomiro Tomic Porphyry Copper Deposit, Northern Chile. Econ Geol, 2001, 96: 387—400

41 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. Econ Geol Bull Soc Econ Geol, 1998, 93: 373—404

42 Cooke D R, Bloom M S. Epithermal and subjacent porphyry mineralization, Acupan, Baguio District, Philippines——A fluid-inclusion and paragenetic study. J Geochem Explor, 1990, 35: 297—340

43 Yang T F, Lee T, Chen C H, et al. A double island arc between Taiwan and Luzon: Consequence of ridge subduction. Tectonophysics, 1996, 258: 85—101

44 Wong J, Sun M, Xing G F, et al. Geochemical and zircon U-Pb and Hf isotopic study of the Baijuhuajian metaluminous A-type granite: Extension at 125—100 Ma and its tectonic significance for South China. Lithos, 2009, 112: 289—305

45 Charoy B, Raimbault L. Zr-, Th-, and REE-rich biotite differentiates in the A-type granite pluton of Suzhou (Eastern China): The key role of fluorine. J Petrol, 1994, 35: 919—962

46 陈江峰, Foland K A, 刘义茂. 苏州复式花岗岩体的精确$^{40}Ar/^{39}Ar$定年. 岩石学报, 1993, 9: 77—85

47 郑永飞, 傅斌, 龚冰. 安徽黄梅尖岩体热历史及其与成矿关系: 同位素证据. 地质学报, 1995, 69: 337—348

48 Zhang Q, Wang Y, Wang Y L. Preliminary study on the components of the lower crust in east China Plateau during Yanshanian Period: Constraints on Sr and Nd isotopic compositions of adakite-like rocks. Acta Petrol Sin, 2001, 17: 505—513
49 Wang Q, Wyman D A, Xu J F, 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. Lithos, 2006, 89: 424—446
50 Wang Q, Zhao Z H, Bao Z W, et al. Geochemistry and petrogenesis of the Tongshankou and Yinzu adakitic intrusive rocks and the associated porphyry copper-molybdenum mineralization in southeast Hubei, east China. Resour Geol, 2004, 54: 137—152
51 Wang Y L, Zhang Q, Wang Y. Geochemical characteristics of volcanic rocks from Ningwu area, and its significance. Acta Petrol Sin, 2001, 17: 565—575
52 Huang F, Li S G, Dong F, et al. High-Mg adakitic rocks in the Dabie orogen, central China: Implications for foundering mechanism of lower continental crust. Chem Geol, 2008, 255: 1—13
53 Xu J F, Shinjo R, Defant M J, et al. Origin of Mesozoic adakitic intrusive rocks in the Ningzhen area of east China: Partial melting of delaminated lower continental crust? Geology, 2002, 30: 1111—1114
54 Xu W L, Wang Q H, Wang D Y, et al. Mesozoic adakitic rocks from the Xuzhou-Suzhou area, eastern China: Evidence for partial melting of delaminated lower continental crust. J Asian Earth Sci, 2006, 27: 454—464
55 Xia B, Chen G W, Wang H. Analysis of tectonic settings of global superlarge porphyry copper deposits. Sci China Ser D-Earth Sci, 2003, 46: 110—122
56 Sun W D, Arculus R J, Bennett V C, et al. Evidence for rhenium enrichment in the mantle wedge from submarine arc volcanic glasses (Papua New Guinea). Geology, 2003, 31: 845—848
57 Sun W D, Arculus R J, Kamenetsky V S, et al. Release of gold-bearing fluids in convergent margin magmas prompted by magnetite crystallization. Nature, 2004, 431: 975—978
58 McDonough W F, Sun S S. The composition of the Earth. Chem Geol, 1995, 120: 223—253
59 Rudnick R L, Gao S. Composition of the continental crust. In: Heinrich D H, Turekian K K, eds. Treatise on Geochemistry. Oxford: Pergamon, 2003. 1—64
60 Kay R W, Sun S S, Leehu C N. Pb and Sr isotopes in volcanic rocks from Aleutian Islands and Pribilof Islands, Alaska. Geochim Cosmochim Acta, 1978, 42: 263—273
61 Kay R W. Aleutian magnesian andesite: Melts from subducted Pacific Ocean crust. J Volcanol Geotherm Res, 1978, 4: 117—132
62 Defant M J, Drummond M S. Derivation of some modern arc magmas by melting of young subducted lithosphere. Nature, 1990, 347: 662—665
63 Morozumi H. Geochemical characteristics of granitoids of the Erdenet porphyry copper deposit, Mongolia. Res Geol, 2003, 53: 311—316
64 Kay S M, Mpodozis C. Setting and origin of miocene giant ore deposits in the central Andes. Pacrim'99: Proceedings of International Congress on Earth Science, Exploration and Mining Around the Pacific Rim, 1999. 5—12
65 Kay S M, Podozis C. Magmatism as a probe to the Neogene shallowing of the Nazca Plate beneath the modern Chilean flat-slab. J South Amer Earth Sci, 2002, 15: 39—57
66 Wang Q, Wyman D A, Xu J F, et al. Partial melting of thickened or delaminated lower crust in the middle of eastern China: Implications for Cu-Au mineralization. J Geol, 2007, 115: 149—161
67 Hou Z Q, Gao Y F, Meng X L, et al. Genesis of adakitic porphyry and tectonic controls on the Gangdese Miocene porphyry copper belt in the Tibetan orogen. Acta Petrol Sin, 2004, 20: 239—248
68 Hou Z Q, Xie Y L, Xu W Y, et al. Yulong deposit, eastern Tibet: A high-sulfidation Cu-Au porphyry copper deposit in the eastern Indo-Asian collision zone. Int Geol Rev, 2007, 49: 235—258
69 张旗, 秦克章, 王元龙, 等. 加强埃达克岩研究, 开创中国 Cu、Au 等找矿工作的新局面. 岩石学报, 2004, 20: 195—204
70 Mungall J E. Roasting the mantle: Slab melting and the genesis of major Au and Au-rich Cu deposits. Geology, 2002, 30: 915—918
71 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. Res Geol, 2002, 52: 147—161
72 Liang H Y, Campbell I H, Allen C, et al. Zircon Ce^{4+}/Ce^{3+} ratios and ages for Yulong ore-bearing porphyries in eastern Tibet. Mineral Depos, 2006, 41: 152—159
73 Liang H Y, Sun W D, Su W C, et al. Porphyry copper-gold mineralization at Yulong, China, promoted by decreasing redox potential during magnetite alteration. Econ Geol, 2009, 104: 587—596
74 Parkinson I J, Arculus R J. The redox state of subduction zones: Insights from arc-peridotites. Chem Geol, 1999, 160: 409—423
75 Brandon A D, Draper D S. Constraints on the origin of the oxidation state of mantle overlying subduction zones: An example from Simcoe,

Washington, USA. Geochim Cosmochim Acta, 1996, 60: 1739—1749
76 Sun W D, Bennett V C, Kamenetsky V S. The mechanism of Re enrichment in arc magmas: Evidence from Lau Basin basaltic glasses and primitive melt inclusions. Earth Planet Sci Lett, 2004, 222: 101—114
77 Sun X M, Tang Q, Sun W D, et al. Monazite, iron oxide and barite exsolutions in apatite aggregates from CCSD drillhole eclogites and their geological implications. Geochim Cosmochim Acta, 2007, 71: 2896—2905
78 Sun W, Bennett V C, Eggins S M, et al. Rhenium systematics in submarine MORB and Back-arc basin glasses: Laser ablation ICP-MS results. Chem Geol, 2003, 196: 259—281
79 Hofmann A W. Chemcial differentiation of the Earth: The relationship between mantle, oceanic crust and continental crust. Earth Planet Sci Lett, 1988, 90: 297—314
80 Ling M X, Sun W D, Chung S L, et al. The association of adakite with Cu (Au) deposits. Geochim Cosmochim Acta, 2009, 73: A59
81 Sun W D, Ling M X, Ding X, et al. On the association between adakites and Cu-Au ore deposits. Int Geol Rev, 2010, in review
82 McDonough W F. Partial melting of subducted oceanic-crust and isolation of its residual eclogitic lithology. Phil Trans Royal Soc London Ser A-Math Phys Eng Sci, 1991, 335: 407—418
83 Foley S, Tiepolo M, Vannucci R. Growth of early continental crust controlled by melting of amphibolite in subduction zones. Nature, 2002, 417: 837—840
84 Xiao Y L, Sun W D, Hoefs J, et al. Making continental crust through slab melting: Constraints from niobium-tantalum fractionation in UHP metamorphic rutile. Geochim Cosmochim Acta, 2006, 70: 4770—4782
85 Rapp R P, Shimizu N, Norman M D. Growth of early continental crust by partial melting of eclogite. Nature, 2003, 425: 605—609
86 Peacock S M. Fluid processes in subduction zones. Science, 1990, 248: 329—337
87 Peacock S M, Rushmer T, Thompson A B. Partial melting of subducting oceanic crust. Earth Planet Sci Lett, 1994, 121: 227—244
88 Rabbia O M, Hernandez L B, King R W, et al. Discussion on "Giant versus small porphyry copper deposits of Cenozoic age in northern Chile: Adakitic versus normal calc-alkaline magmatism" by Oyarzun et al. (*Mineralium Deposita* 36: 794—798, 2001). Mineral Depos, 2002, 37: 791—794
89 Richards J P. Discussion on "Giant versus small porphyry copper deposits of Cenozoic age in northern Chile: Adakitic versus normal calc-alkaline magmatism" by Oyarzun et al. (*Mineralium Deposita* 36: 794—798, 2001). Mineral Depos, 2002, 37: 788—790
90 Richards J P, Kerrich R. Adakite-like rocks: Their diverse origins and questionable role in metallogenesis. Econ Geol, 2007, 102: 537—576
91 Castillo P R. An overview of adakite petrogenesis. Chin Sci Bull, 2006, 51: 258—268
92 Macpherson C G, Dreher S T, Thirlwall M F. Adakites without slab melting: High pressure differentiation of island arc magma, Mindanao, the Philippines. Earth Planet Sci Lett, 2006, 243: 581—593
93 Rodriguez C, Selles D, Dungan M, et al. Adakitic dacites formed by intracrustal crystal fractionation of water-rich parent magmas at Nevado de Longav volcano (36.2°S; Andean Southern Volcanic Zone, central Chile). J Petrol, 2007, 48: 2033—2061
94 Chiaradia M, Fontbote L, Beate B. Cenozoic continental arc magmatism and associated mineralization in Ecuador. Mineral Depos, 2004, 39: 204—222
95 Aguillon-Robles A, Calmus T, Benoit M, et al. Late miocene adakites and Nb-enriched basalts from Vizcaino Peninsula, Mexico: Indicators of East Pacific Rise subduction below Southern Baja California? Geology, 2001, 29: 531—534
96 Viruete J E, Contreras F, Stein G, et al. Magmatic relationships and ages between adakites, magnesian andesites and Nb-enriched basalt-andesites from Hispaniola: Record of a major change in the Caribbean island arc magma sources. Lithos, 2007, 99: 151—177
97 Bourgois J, Michaud F. Comparison between the Chile and Mexico triple junction areas substantiates slab window development beneath northwestern Mexico during the past 12—10 Myr. Earth Planet Sci Lett, 2002, 201: 35—44
98 Breitsprecher K, Thorkelson D J, Groome W G, et al. Geochemical confirmation of the Kula-Farallon slab window beneath the Pacific Northwest in Eocene time. Geology, 2003, 31: 351—354
99 Guillaume B, Martinod J, Husson L, et al. Neogene uplift of central eastern Patagonia: Dynamic response to active spreading ridge subduction? Tectonics, 2009, 28, doi: 10.1029/2008tc002324
100 Niu H, Sato H, Zhang H, et al. Juxtaposition of adakite, boninite, high-TiO_2 and low-TiO_2 basalts in the Devonian southern Altay, Xinjiang, NW China. J Asian Earth Sci, 2006, 28: 439—456
101 张海祥, 沈晓明, 马林, 等. 新疆北部富蕴县埃达克岩的同位素年代学及其对古亚洲洋板块俯冲时限的制约. 岩石学报, 2008, 24: 1054—1058
102 唐功建, 王强, 赵振华, 等. 西准噶尔包古图成矿斑岩年代学与地球化学: 岩石成因与构造、铜金成矿意义. 地球科学——中国地质大学学报, 2009, 34: 56—74
103 王强, 赵振华, 许继峰, 等. 天山北部石炭纪埃达克岩-高镁安山岩-富 Nb 岛弧玄武质岩: 对中亚造山带显生宙地壳增生与铜金成矿的意义. 岩石学报, 2006, 22: 11—30