环太平洋成矿域主要铜-金矿床地质特征、 成矿作用及找矿潜力

张伟波,叶锦华 ZHANG Weibo, YE Jinhua

中国地质调查局发展研究中心,北京 100037 Development Research Center, China Geological Survey, Beijing 100037, China

摘要:环太平洋成矿域是全球最重要的成矿域之一,一直是世界找矿勘查开发和成矿理论研究的热点地区。域内斑岩型、砂卡 岩型、浅成低温热液型、造山型、卡林型等大型-超大型矿床在特殊构造背景中密集分布,资源潜力巨大。这些矿床的成矿时 代以中、新生代为主,构造背景多为显生宙造山带,成矿作用多与太平洋内各大洋板块俯冲作用密切相关,矿床的形成和产出 具有明显的偏在性、专属性。介绍了环太平洋成矿域的成矿环境,选取代表性的铜和金矿床,归纳总结了其地质特征和成矿作 用,梳理讨论了不同类型矿床的成矿背景、分布规律,分析了区域找矿潜力。 关键词:环太平洋成矿域;铜、金矿床;分布规律;成矿作用;找矿潜力 中图分类号:P61;P618.41;P618.51 文献标志码:A 文章编号:1671-2552(2017)01-0001-15

Zhang W B, Ye J H. Geological characteristics, ore-forming processes and prospecting potential of Cu-Au deposits in the Circum-Pacific metallogenic domain. *Geological Bulletin of China*, 2017, 36(1):1–15

Abstract: The Circum–Pacific metallogenic domain is one of the most important metallogenic domains in the world, and has always been the most attractive region for exploration development and metallogenic theory research. In this domain, many large–superlarge porphyry, skarn, epithermal, orogenic and carlin type deposits are distributed densely in special tectonic settings. In addition, the resources potential in the domain is also very great. The metallogenic epochs of these deposits are mainly Mesozoic and Cenozoic, with most of them formed in Phanerozoic orogenic belt and controlled by subduction and collision of Pacific Ocean plates. These deposits show obvious mineralization preferentiality and specificity. In this paper, the authors have described the metallogenic setting of Circum–Pacific metallogenic domain, and selected typical copper and gold deposits to summarize their geological characteristics and ore–forming processes. Meanwhile, the geological setting, temporal–spatial distribution regularities of various types of deposits and prospecting potentials of the metallogenic belts in this domain have also been discussed.

Key words: Circum-Pacific metallogenic domain; copper and gold deposits; distribution regularity; ore-forming processes; prospecting potential

环太平洋成矿域是全球第三大成矿域,环绕 太平洋周缘展布,地跨亚洲、大洋洲、北美洲和南 美洲4个大洲(图1),可分为东、西两带,东带主要 分布在太平洋东岸的科迪勒拉和安第斯山脉。西 带分为内、外两带,其中内带是指从俄罗斯鄂霍茨 克北缘,经中国东北地区东部、长江中下游,至华 南地区;外带从日本列岛经中国台湾、菲律宾、巴 布亚新几内亚和新西兰,延伸到澳大利亚大陆东缘 褶皱带^[1-3]。

受中、新生代以来太平洋板块俯冲作用影响,

资助项目:中国地质调查局项目《"一带一路"矿产资源信息采集与综合研究》(编号:121201004000150009)和《中亚及邻区铜镍铀资源潜 力评价与应用示范》(编号:121201103000150006)

收稿日期:2016-04-08;修订日期:2016-05-23

作者简介:张伟波(1987-),男,硕士,助理工程师,从事境外地质矿产勘查与评价。E-mail:zhangwb2007@163.com



图1 环太平洋成矿域主要铜、金矿床分布



Circum-Pacific metallogenic domain

a-北科迪勒拉成矿带;b-安第斯成矿带;c-楚科奇-鄂霍茨克成矿带;d-东亚成矿带;e-伊里安-新西兰成矿带。1-朱诺金矿床;2-多林溪金矿床;3-海兰瓦利铜矿床;4-比尤特铜矿床;5-莫伦 西铜矿床;6一贝茨-波斯特金矿床;7一卡纳内阿铜矿床;8-塞罗科罗拉多铜矿床;9-丘基卡马塔铜 矿床;10-埃尔特尼恩特铜-金矿床;11-洛斯帕兰布雷斯铜矿床;12-科亚瓦西铜矿床;13-埃斯康 迪达铜矿床;14--拉科伊帕金--银矿床;15---夸霍内铜矿床;16---托克帕拉铜矿床;17---拉格兰贾铜矿 床;18--涅日达宁金矿床;19--纳塔尔津金矿床;20--库拉纳赫金矿床;21--菱刈金矿床;22-紫金山 铜-金矿床;23-德兴铜矿床;24-坦帕坎铜-金矿床;25-阿特拉斯铜-金矿床;26-勒班陀-远东南 铜-金矿床;27-格拉斯贝格铜-金矿床;28-潘古纳铜-金矿床;29-弗里达河铜-金矿床; 30-巴杜希贾乌铜-金矿床;31-奥克泰迪铜-金矿床;32-豪拉基金-银矿床

环太平洋成矿域发生以铜、钼、金、银、镍、钨、锡、铅

分重要的份额,包括铜40%、金15%、铅14%、锌21%、 锌等矿产为主的大规模成矿作用。据估计,太平洋 银44%、锡59%、钨59%、镍30%和铀16%^[4-5]。环太平 周边地区的矿产资源在全球矿产资源总量中占十 洋成矿域铜、金资源十分可观,尤其是大型-超大型 矿床分布密集。据统计,全球规模最大的44个铜 矿床中,有21个分布在环太平洋成矿域⁶⁶。估计仅 分布在环太平洋成矿域的造山型金矿总储量近 12000t^[7]。

本文对环太平洋成矿域内的主要铜、金矿床的 形成环境、成矿规律和找矿潜力进行了总结,旨在 提高中国地质工作者对该成矿域和典型矿床地质 特征与成矿规律的认知水平,为推动该区成矿理论 研究和找矿勘查工作提供启示。

1 成矿环境

地质背景上,环太平洋成矿域是指太平洋海域 中各大洋板块与周围大陆板块自中生代以来相互 作用影响的地区,其构造背景主要是显生宙造山带 和新生代风化壳。环太平洋构造带是全球最重要 的中、新生代造山带之一,在该区域发生了频繁的 火山活动和强烈的地震活动,其作为大洋消减和 弧-陆碰撞的产物,以发育长距离迁移的移置地块 为特征^[8]。受太平洋板块俯冲影响,大洋边缘的金 属成矿体系与安山岩环的火山-深成岩有关,晚白 垩世不连续的太平洋超基性岩带分布在最靠近大 洋的位置。向大陆方向则分布一套与酸性岩有关 的大陆边缘成矿体系,东带和西带两侧的成矿体系 相互对应,金属矿产呈不对称分布^[4]。区内构造形 迹复杂,矿床类型众多,且铜、金矿床储量巨大,具 有很大的找矿潜力。

裴荣富等¹¹将环太平洋成矿域进一步划分为5 个成矿带,东带分为北科迪勒拉成矿带和安第斯成 矿带,西带分为楚科奇-鄂霍茨克成矿带、东亚成矿 带和伊里安-新西兰成矿带(图1)。

1.1 北科迪勒拉成矿带

北科迪勒拉成矿带位于环太平洋成矿域东环 北段,西与楚科奇-鄂霍茨克成矿带、东亚成矿带隔 太平洋相望,南与安第斯成矿带相接。其大地构造 背景为科迪勒拉造山带,是地壳薄弱带,由火山弧 或洋壳及其上覆沉积物组成的岩石圈碎块或地体 构成。区内构造形迹主要为前寒武纪剪切带和新 生代深大断裂。区内广泛分布太古宙—新生代由 沉积岩和火山岩组成的数千米厚的地层。火山活 动以中、新生代的岩浆侵入作用为主。北科迪勒拉 成矿带内铜、金矿床(点)星罗棋布,具有十分重要 的经济价值,代表性矿床包括加拿大海兰瓦利 (Highland Valley)斑岩型铜矿床、瓦利科帕(Valley Copper)斑岩型铜矿床、科帕山(Mt. Copper)斑岩型 铜矿床、米利根山(Mt. Milligan)斑岩型铜-金矿床, 美国多林溪(Donlin Creek)造山型金矿床、比尤特 (Butte)斑岩型铜矿床、莫伦西(Morenci)斑岩型铜 矿床、卡林(Carlin)金矿带,墨西哥卡纳内阿(Cananea)斑岩铜矿床、艾尔阿尔克(El Arco)斑岩型铜-金 矿床-山迪马斯(San Dimas)浅成低温热液型金矿 床,巴拿马塞罗克罗拉多(Cerro Colorado)斑岩型铜 矿床等。

1.2 安第斯成矿带

安第斯成矿带位于环太平洋成矿域东环南段, 北接北科迪勒拉成矿带,隔太平洋与伊里安-新西 兰成矿带相望。该成矿带大地构造背景为安第斯 造山带,带内的断裂构造主要包括贯穿南北向的西 部断裂系统、多梅科断裂系统和塞拉卡斯蒂约断裂 系统。岩浆活动以中、新生代侵入活动为主,区内 花岗岩、流纹岩、安山岩等广泛分布。安第斯成矿 带是全球最重要的斑岩型铜矿床集中区,其中全球 储量最大的10座铜矿床有6座分布在智利境内。 安第斯成矿带内的代表性矿床包括智利埃尔特尼 恩特(El Teniente)斑岩型铜矿床、丘基卡马塔 (Chu-quicamata) 斑岩型铜矿床、埃蒂纳(Andina) 斑 岩型铜矿床、洛斯帕兰布雷斯(Los Pelambres)斑岩 型铜矿床、科亚瓦西(Coilahuasi)斑岩型铜矿床、埃 斯康迪达(Escondida)斑岩型铜矿床、帕斯卡(Pascua)浅成低温热液型金-银矿床、埃尔因第奥(El Indio)斑岩型铜-金矿床、拉科伊帕(La Coipa)浅 成低温热液型金-银矿床,阿根廷埃尔帕琼(El Pachon)斑岩型铜矿床,秘鲁夸霍内(Cuajone)斑岩型 铜-金矿床、托克帕拉(Toquepala)斑岩型铜矿床、 拉格兰贾(La Granja)斑岩型铜矿床、米挈基累 (Michiguillay) 斑岩型铜矿床、廷塔亚(Tintaya) 斑 岩型铜矿床等。

1.3 楚科奇-鄂霍茨克成矿带

楚科奇-鄂霍茨克成矿带位于环太平洋成矿域 西环北段,南接东亚成矿带,展布范围大致包括俄 罗斯勒拿河以东、鄂霍茨克以北地区。其构造单元 包括前里菲期的古老地块、中新生代褶皱区及现代 构造活化带,发育大量火山-深成岩。该成矿带内 金矿资源极其丰富,大型规模以上的金矿床星罗棋 布,是俄罗斯最重要的金矿产区。代表性矿床有俄 罗斯涅日达宁(Nezhdaninsky)造山型金矿床、纳塔 尔津(Natalka)造山型金矿床、迈斯科耶(Mayskoye) 造山型金矿床、迪埃尤利(Duet-Yur)造山型金矿 床、斯克诺耶(Shkolnoye)造山型金矿床、库拉纳赫 (Kuranakh)浅成低温热液型金矿床、库普尔(Kupol) 浅成低温热液型金-银矿床、库巴卡(Kubaka)浅成 低温热液型金矿床等。

1.4 东亚成矿带

东亚成矿带位于环太平洋成矿域西环中段,北接 楚科奇-鄂霍茨克成矿带,南接伊里安-新西兰成矿 带,东隔太平洋与北科迪勒拉、安第斯成矿带相望。 展布地区主要包括西太平洋地区的日本、中国华南南 部地区、中国台湾、菲律宾群岛和加里曼丹岛。该成 矿带的主要构造单元为西太平洋岛弧链、中国东南沿 海陆缘火山-深成岩带及华南褶皱系。该成矿带内 的铜、金资源丰富,代表性矿床包括日本菱刈(Hishikari)浅成低温热液型金矿床,中国福建紫金山浅成低 温热液型铜-金矿床、江西德兴斑岩型铜-金矿床、贵 州烂泥沟卡林型金矿床、台湾金瓜石浅成低温热液型 金-铜矿床,菲律宾坦帕坎(Tampakan)斑岩型铜-金 矿床、西帕莱(Sipaly)斑岩型铜-金矿床、勒班陀-远 东南(Lepanto-FSE)斑岩-浅成低温热液型铜-金矿 床、桑托托马斯(Santo Tomas Ⅱ)斑岩型铜-金矿床、 金金(Kingking)斑岩型铜-金矿床等。

1.5 伊里安-新西兰成矿带

伊里安-新西兰成矿带位于环太平洋成矿域西 环南段,北接东亚成矿带,东隔太平洋与安第斯成矿 带相望。该成矿带展布范围为伊里安岛、新西兰岛、 澳大利亚东缘褶皱带和塔斯马尼亚岛,构造背景主要 为中新生代的火山活动带。该成矿带为大陆边缘岛 弧区,地壳较薄,成矿时代以新生代为主。代表性矿 床包括印度尼西亚格拉斯贝格(Grasberg)斑岩型铜-金矿床、艾茨贝格(Ertsberg)砂卡岩型铜-金矿床,巴 布亚新几内亚潘古纳(Panguna)斑岩型铜-金矿床、弗 里达河(Frieda River)斑岩型铜-金矿床、奥克泰迪 (OK Tedi)斑岩-砂卡岩型铜-金矿床,斐济那摩西 (Namosi)斑岩型铜-金矿床,新西兰豪拉基(Hauraki) 浅成低温热液型金-银矿床等。

2 代表性矿床地质特征

2.1 比尤特铜矿床

比尤特(Butte)铜矿床位于美国蒙大拿州西南

部,是北美产出规模最大的铜矿床(图1;表1)。 迄今为止,已探明铜金属储量3511×10⁴t,平均品 位0.67%^[9]。

大地构造位置上,比尤特铜矿床位于科迪勒拉 山脉晚白垩世弧后冲断层带的一个冲断层区内,与 晚白垩世中酸性侵入岩(76.5Ma)¹⁰¹有密切的时空分 布关系。矿体围岩以比尤特石英二长岩、石英斑岩 为主。铜矿化呈网脉状、细脉状和浸染状产出,矿 脉最长可达7000m,宽数厘米到数米不等,向下延伸 超过1500m^[11]。矿石的金属矿物有黄铁矿、黄铜矿、 斑铜矿、铜蓝、硫砷铜矿、方铅矿、辉钼矿、闪锌矿 等,脉石矿物有石英、钾长石、斜长石、角闪石、红柱 石、硬石膏、磷灰石、黑云母、方解石、金红石等。比 尤特矿床具有斑岩型和脉型铜矿床的特征,前人四 通过比尤特石英脉中的流体包裹体研究,认为其是 形成深度最大的斑岩铜矿床之一,早期流体在深部 形成钾化的石英脉,在浅部形成富黄铜矿-磁铁矿 的黑云母和绢云母脉体;后期热液系统活动减弱, 相关流体在固溶线上保持缓慢冷却,形成伴随绢云 母化的黄铁矿脉。

2.2 贝茨-波斯特金矿床

贝茨-波斯特(Betze-Post)金矿床位于美国内 华达州中北部,著名的卡林金矿带北部(图1;表 1)。该矿床探明储量超过1000t^[45],是已发现的全球 最大的卡林型金矿床,也是北美地区产出规模最大 的金矿床。迄今为止,整个卡林金矿带已经产金超 过2300t^[46],是全球最重要的产金地之一。

大地构造位置上,贝茨-波斯特金矿床位于美 国西部内华达州盆岭山脉区西部,冒地槽与优地槽 接合部位的西侧优地槽沉积岩组合区内¹¹⁷¹,与晚中 生代花岗闪长岩-花岗岩侵入体(158~78Ma)有密 切的时空分布关系¹¹³¹。金矿化呈细散浸染状赋存于 志留纪和泥盆纪沉积岩中,矿体与围岩无明显边 界。容矿围岩岩性包括纹层状含白云石泥质灰岩、 块状含化石灰岩等。矿石的金属矿物包括黄铁矿、 辉锑矿、闪锌矿、砷黄铁矿、白铁矿、自然金等,脉石 矿物有石英、方解石、碧玉、重晶石、雄黄、白云石、 石膏等。贝茨-波斯特矿床具有典型的卡林型金矿 床特征,关于其成因,有学者^{113,17,40}认为,其是由始 新世岩浆活动提供热源的循环热液沿断裂系统上 升,与富金地层相互作用而形成的低温浸染交代 型金矿床。

表1 环太平洋成矿域主要铜、金矿床地质特征 Table 1 Principal geological characteristics of major copper and gold deposits in Circum-Pacific metallogenic domain

序号	矿床名称	类型	构造背景	容矿围岩	成矿时代	矿体特征	矿物组合	围岩蚀变	规模/品位	参考文献
北科迪	由勒拉成矿带									
1	美国朱诺 (Juneau) 金矿床	造山型	大陆边缘 岩浆弧	早二叠世一 白垩纪板岩 和千枚岩	古近纪, 58~53Ma	网脉状矿 石构成脉 状矿体	含金硫化物, 石榴石、长石、 石英、云母	硅化、碳酸 盐化、硫化 物化、绢云 母化	Au:281t/ 1.42×10 ⁻⁶	[12-13]
2	多林溪 (Donlin Creek) 金矿床	造山型	大陆边缘 造山带内	晚白垩世花 岗斑岩, 砂岩	晚白垩世,74~ 68Ma	细网脉矿 石构成脉 状矿体	毒砂、黄铁矿、 辉锑矿,石英、 铁白云石、高 岭石、绿泥 石、伊利石、 白云母	绢云母化、 碳酸盐化	Au:720t/ 1.5×10 ⁶	[12]
3	加拿大海兰瓦利 (Highland Valley) 铜矿床	斑岩型	科内尔陆 缘弧南部	三叠纪石英 闪长岩、英 安斑岩	中生代	脉状、浸染 状矿石构 成脉状 矿体	黄铜矿、斑铜矿、 辉钼矿、黄铁矿、 闪锌矿、方铅矿、 磁黄铁矿、黝铜矿、 硫砷铜矿、铜蓝, 石英、钾长石、 绢云母、绿泥石	硅化、钾化、 绢云母化、 青磐岩化、 泥化	Cu:900×10 ⁴ t/ 0.45%	[6,14-15]
4	美国比尤特 (Butte)铜矿床	斑岩型	显生宙 造山带	白垩纪一新 近纪石英二 长岩、石英 斑岩	新生代	脉状、浸染 状矿石构 成脉状 矿体	磁铁矿、黄铁矿、 黄铜矿、辉钼矿、 斑铜矿、硫砷铜矿、 铜蓝、闪锌矿,石英、 钾长石、黑云母、 绢云母、硬石膏、 绿泥石、方解石	钾化、硅化、 黑云母化、 绢云母化、 绿泥石化	Cu:3511×10 ⁴ t/ 0.67%	[6,9,11]
5	美国莫伦西 (Morenci) 铜矿床	斑岩型	显生宙 造山带	古近纪一新 近纪石英二 长岩	新生代, 55~2Ma	网脉状矿 石构成脉 状矿体	黄铜矿、辉铜矿、 蓝铜矿、黄铁矿、 赤铁矿、水胆矾、 孔雀石,石英、钾 长石、方解石、等	绢云母化、 泥化、硅化、 钾化	Cu:2459×10 ⁴ t/ 0.52%	[6,9,14,16]
6	美国贝茨-波斯 特(Betze-Post) 金矿床	卡林型	被动大陆边 缘优地槽沉 积岩组合区	志留纪一泥 盆纪石灰 岩、粉砂岩	白垩纪	细脉浸染 状矿石构 成层状 矿体	黄铁矿、辉锑矿、 方铅矿、雄黄、 雌黄、毒砂、 石英、方解石、 重晶石、白云石	去钙化、 硅化、 泥化	Au:>1000t	[13,17]
7	墨西哥卡纳内 阿(Cananea) 铜矿床	斑岩型	显生宙 造山带	古近纪— 新近纪花 岗斑岩	古近纪,58Ma	脉状、浸染 状矿石构 成脉状 矿体	黄铜矿、辉铜矿、 黄铁矿、赤铁矿、 针铁矿、褐铁矿, 石英、钾长石、 方解石、黑云 母等	硅化、钾化、 黑云母化、 绿泥石化、 绢云母化、	Cu:3000×104t/ 0.42%	[6,9]
8	巴拿马塞罗 科罗拉多 (Cerro Colorado) 铜矿床	斑岩型	显生宙 造山带	古近纪— 新近纪流 纹安山岩	新近纪, 5.9~4.2Ma	浸染状、细 脉状矿石 构成脉 状矿体	黄铜矿、斑铜矿、 黄铁矿、磁铁矿、 自然金,石英、 钾长石、方解石、 黑云母	 硅化、钾化、 绢云母- 方解石化、 绢云母化、 绢云母化、 伊利石化、 青磐岩化 	Cu:1800×104t/ 0.6%	[6]

									约	奏表1-1
序号	矿床名称 斯成矿带	类型	构造背景	容矿围岩	成矿时代	矿体特征	矿物组合	围岩蚀变	规模/品位	参考文献
9	智利丘基卡马塔 (Chuquicamata) 铜矿床	斑岩型	显生宙造 山带,被动大 陆边缘	古近纪— 新近纪花 岗斑岩	古近纪, 31.1Ma	细脉状、网 脉状矿石 构成脉 状矿体	黄铁矿、黄铜矿、 斑铜矿、蓝辉铜矿、 硫砷铜矿、铜蓝, 石英、钾长石、绢云 母、斜长石、黑云母	钾化、石英 绢云母化、 青磐岩化、 粘土化	Cu:6935×10 ⁴ t/ 0.56%	[6]①
10	智利埃尔特尼恩 特(El Teniente) 铜-金矿床	斑岩型	显生宙造 山带,被 动大陆 边缘	古近纪—新 近纪安山玢 岩、辉长岩、 闪长玢岩和 黑云母 角砾岩	新近纪, 5.9~4.4Ma	网脉状矿 石构成脉 状矿体	黄铜矿、黄铁矿、 斑铜矿、辉钼矿、 辉铜矿、砷黝铜矿、 黝铜矿、少量磁 铁矿,石英、黑云 母、钾长石、硬石 膏、绢云母、绿泥石	钾化、黑云 母化、绢云 母化、绿泥 石化、青 磐岩化	Cu:9435×10 ⁴ t/ 0.63%; Au:437t/ 0.035×10 ⁴	[6,13]
11	智利洛斯帕 兰布雷斯 (Los Pelambres) 铜矿床	斑岩型	显生宙 造山带	古近纪一新 近纪安山岩、 凝灰岩	新近纪,9.74~ 9.96Ma	浸染状、细 脉状矿石 构成脉 状矿体	黄铁矿、斑铜矿、 黄铁矿、辉铜矿、 磁铁矿,石英、 钾长石、黑云母、 硬石膏、斜长石、 磷灰石、绢云母、 金红石、电气石	钾硅化、 绢云母化、 泥化	Cu:2663×104t	[6,13,18]
12	智利科亚瓦西 (Collahuasi) 铜矿床	斑岩型	显生宙 造山带	古近纪—新 近纪石英斑 岩、安山岩 和流纹岩	古近纪, 35.2~32.6Ma	浸染状、细 脉状矿石 构成脉 状矿体	黄铜矿、黄铁矿、 斑铜矿、辉钼矿、 砷黝铜矿,石英、 钾长石、黑云母、 钠长石	钾长石化、 钠长石化、 黑云母化、 硅化、伊 利石化、 绿泥石化、 白云母化等	Cu:1195×104t/ 1.2%	[6,19]
13	智利埃斯康迪 达(Escondida) 铜矿床	斑岩型	显生宙造山 带,被动大 陆边缘	古近纪一新 近纪石英二 长岩、花岗 闪长斑岩	古近纪, 33.7~31Ma	浸染状、网 脉状、细 脉状矿石 构成层状、 脉状矿体	黄铜矿、斑铜矿、 黄铁矿、层纹状 铜蓝、辉铜矿、 硫砷铜矿、闪锌矿、 方铅矿、砷黝铜矿, 正长石、石英、黑云 母、绿泥石、绢云母	 钾化、绿 泥石化、 青磐岩化、 硅化、 硅化、 绢云母化 	Cu:2775×104t/ 1.31%	[6]①
14	智利拉科伊帕 (La Coipa) 金-银矿床	浅成低温 热液型	新生代 岩浆弧	三叠纪黑色 页岩、砂岩, 晚渐新世到 早中新世凝 灰岩、凝灰 角砾岩	新近纪, 20~17Ma	浸染状、网脉状矿石构成板状、蘑菇状矿体	黄铁矿、斑铜矿、 黄铜矿、辉铜矿、 砷黝铜矿、黝铜矿、 铜蓝、硫砷铜矿、 方铅矿、闪锌矿、 角银矿、氯溴银矿、 自然银、银金矿、 辉银矿、银铁矾, 石英、明矾石、 石膏、重晶石等	硅化、泥化 (明矾石- 高岭土± 地开石- 石-炭、伊 利石-蒙 脱石± 绢云母)	Au:992t; Ag:6520t	[20-21]
15	秘鲁夸霍内 (Cuajone) 铜矿床	斑岩型	显生宙 造山带	古近纪一新 近纪石英 二长斑岩	古近纪,56.5~ 53Ma	浸染状、细 脉状矿石 构成脉 状矿体	黄铜矿、黄铁矿、 辉钼矿、斑铜矿、 辉铜矿,石英、 绿泥石、绢云母、 黑云母、钾长石等	绿帘石化、 绿泥石化、 钾长石化、 绢云母化、 黑云母化、 伊利石化	Cu:1234×10 ⁴ t/ 0.47%	[6,14,22]

它早	矿庄夕称	米刑	构选考县	宓矿国毕	成矿时代	矿休蛙尔	矿物组合	国毕师亦		会老立社
庁与	9 水石小 f成矿带	天堂	何但月泉	付 刊 凹石	八文句 中11 17	19 14*1寸111.	11/11/11/11	回石底又	/允快/ 印卫	<u> </u>
16	秘鲁托克帕拉 (Toquepala) 铜矿床	斑岩型	显生宙 造山带	古近纪一新 近纪石英二 长斑岩、 闪长玢岩	古近纪, 57~54Ma	浸染状、 网脉状、 细脉状矿 石构成脉 状矿体	黄铜矿、黄铁矿、 辉钼矿、斑铜矿、 辉铜矿,石英、 绿泥石、绢云母、 黑云母等	绿帘石化、 绿泥石化、 钾硅化、 黑云母化	Cu:1659×10 ⁴ t/ 0.47%	[6,22]
17	秘鲁拉格兰贾 (La Granja) 铜矿床	斑岩型	显生宙 造山带	古近纪一新 近纪石英 二长斑岩	新生代	浸染状、细 脉状矿石 构成脉 状矿体	黄铜矿、黄铁矿、 辉钼矿、斑铜矿、 辉铜矿、铜蓝, 石英、方解石、 绿泥石、绢云母、 叶腊石等	绢云母化、 泥化、绿 泥石化、 青磐岩化	Cu:1354×10 ⁴ t/ 0.59%	[6]
楚科者	奇-鄂霍茨克成矿	带								
18	俄罗斯涅日达 宁 (Nezhdaninsky) 金矿床	造山型	维尔霍扬 斯克·科累 马造山带, 冒地槽	早二叠世砂 岩、粉砂岩	白垩纪, 124~105Ma	细脉浸染 状、脉状、 网脉状矿 石构成透 镜体状、 板状矿体	黄铜矿、闪锌矿、 黝铜矿、方铅矿、 黄铁矿、白钨矿、 自然金、毒砂、 深红银矿、硫锑铜银 矿和硫锑砷银 矿和硫锑砷银 矿等,石英、 钠长石、绢云母 和碳酸盐等	绿磐岩化、 绢云母化、 碳酸盐化、 黄铁绢 英岩化	Au:629t/ 5.1×10 [*] ~ 5.8×10 [*]	[23-24]
19	俄罗斯纳塔尔 津(Natalka) 金矿床	造山型	雅拿-科累 马造山带	粘土页岩、 粉砂岩	中生代	细脉、网 脉状矿石 构成脉 状矿体	黄铁矿、自然金、 方铅矿、磁黄铁矿、 白钨矿、毒砂、 黄铜矿、金银矿, 石英、钠长石、 正长石、碳酸盐、 绢云母、绿泥石	 硅化、碳 酸盐化、 钠长石化、 钾长石化、 绢云母化、 方柱石化 	Au:1760t/ 1.7×10*	[25]
20	俄罗斯库拉纳 赫(Kuranakh) 金矿床	浅成低温 热液型	地盾构造- 岩浆活 化区	侏罗纪长石 砂岩和下寒 武统石灰 岩、白云岩	中生代	脉状、细脉 状矿石构 成毯状、 带状矿体	黄铁矿、黄铜矿、 雌黄铁矿、白铁矿、 闪锌矿、毒砂、 碲化物、自然金、 石英、冰长石等	冰长石化、 硅化	Au:487t/ 3.6×10 ⁻⁶	[26]
朱业贞	又何 带						相合矿 硒合矿			
21	日本菱刈 (Hishikari) 金矿床	浅成低温 热液型	琉球岛弧陆 相中新世 火山岩帯	白垩纪一古 近纪页岩、 砂岩,新近 纪一第四 纪安山岩	第四纪, 1.15~0.6Ma	脉状、条带 状矿体	 (報並9、(昭並9、) 鮮硒银矿、深红银矿、 黄铜矿、黄铁矿、 白铁矿,少量 (內锌矿、 方铅矿,石英、 冰长石、蒙脱石、 高岭石、方解石 	绿泥石- 伊利石、 绿泥石/ 蒙脱石- 伊利石/ 蒙脱石	Au:326t/ 45×10*~50×10*	[13,17,27-28]
22	中国紫金山 铜-金矿床	斑岩-浅成 低温热 液型	陆内火山盆 地边缘,深 断裂旁侧	侏罗纪花岗 岩,白垩纪 石英安山 斑岩	白垩纪	脉状或网 脉状、浸染 状矿石构 成透镜体 状,不规 则状矿体	褐铁矿、针铁矿、 微量黄钾铁矾、 黄铁矿、蓝辉铜矿、 铜蓝、自然金, 石英、明矾石、 绢云母	硅化、 绢云母化、 明矾石化	Au:323t/ 0.5×10*; Cu:236×10 ⁴ t/ 0.45%	[29-31]

序号	矿床名称	类型	构造背景	容矿围岩	成矿时代	矿体特征	矿物组合	围岩蚀变	规模/品位	参考文献
东亚成	矿带									
23	中国徳兴 铜矿床	斑岩型	扬子地块 江南隆 起东缘	侏罗纪花岗 闪长斑岩	中生代	浸染状、细 状、短块状、角 球状、角 板 成 透镜体 状、 で 体 、 状 で 体	黄铁矿、黄铁矿、 辉钼矿、砷黝铜矿、 斑铜矿、辉铜矿, 石英、绢云母、 水白云母、 伊利石、 方解石	 钾长石化、 钠长石化、 黑云母化、 硅化、 绢云母化、 绢云母化、 4日云母化、 伊利石化、 绿泥石化等 	Cu:832×10 ⁴ t/ 0.45%	[32-34]
24	菲律宾坦帕坎 (Tampakan) 铜-金矿床	斑岩型	中央科迪 勒拉造山 带近南北 向背斜 东翼	新近纪安山 岩、闪长岩、 角砾岩	新近纪— 第四纪, 3.3~2.2Ma	细脉状、 网脉状、 浸染状 矿石	黄鉄矿、黄铜矿、 斑铜矿、蓝铜矿、 孔雀石、赤铁矿、 辉钼矿,石英、 钾长石、硬石膏、 绢云母等	绿泥石化、 绿帘石化、 泥化、硅化、 钾化、黄铁 绢英岩化	Cu:770×10 ⁴ t/ 0.55%; Au:336t/ 0.24×10 ⁶	[9,35]
25	菲律宾阿特 拉斯(Atlas) 铜-金矿床	斑岩型	火山岛弧 区,俯冲 板块上盘	古新世石英 闪长斑岩和 英安斑岩	古近纪, 61Ma	薄膜状、細脉状、网脉状、浸染状矿石	黄铁矿、黄铜矿、 斑铜矿、铜蓝、 孔雀石、磁铁矿、 方铅矿、闪锌矿, 石英、绿泥石、 绢云母、绿泥石、 钾长石	绿泥石化、 孔雀石化、 绢云母化、 钾长石化、 黑云母化、 硅化、 青磐岩化	Cu:690×10 ⁴ t/ 0.5%; Au:331t/ 0.24×10 ⁶	[9,36]
26	菲律宾勒班 陀-远东南 (Lepanto-FSE) 铜-金矿床	斑岩型-浅 成低温热 液脉型	岛弧区	古近纪—新近 纪英安岩,火 山碎屑岩;第 四纪英安岩, 石英闪长斑 岩,火山 碎屑岩	第四纪, 1.5~1.3Ma	网脉状、 层状、细 脉状矿石 构成透镜 体状、脉 状矿体	黄铜矿、黄铁矿、 少量斑铜矿、 砷黝铜矿、 银金矿、碲金矿, 石英、明矾石、 硬石膏、 重晶石	硅化、 绿泥石化、 伊利石- 蒙脱石化	Cu:548×10 ⁴ t/ 0.8%; Au:973t/ 1.42×10 [*]	[13,37]
伊里安	-新西兰成矿带									
27	印度尼西亚 格拉斯贝格 (Grasberg) 铜-金矿床	斑岩型	西太平洋 大陆边缘 岛弧区	古近纪一新近 纪斑状石英 闪长岩、英 安岩灰岩	新近纪, 3.06~3.01Ma	网脉状和 浸染状矿 石构成网 脉状矿体	黄铜矿、黄铁矿、 斑铜矿、赤铁矿、 蓝辉铜矿、铜蓝、 白铁矿、硫砷铜矿、 自然金,石英、 硬石膏、黑云母	钾化、磁铁矿化、阳起石化、绢云母化、绿泥石化	Cu:2761×10 ⁴ t/ 1.1%; Au:2610t/ 1.04×10 ⁻⁶	[9,38]
28	巴布亚新几内 亚潘古纳 (Panguna) 铜-金矿床	斑岩型	美拉尼西 亚岛弧	上新世石英 闪长岩、黑 云母花岗 闪长岩、中 新世安 山岩	新近纪, 3.5Ma	浸染状矿 石构成脉 状矿体	黄铜矿、斑铜矿、 黄铁矿、磁铁矿、 自然金、辉钼矿、 闪锌矿,石英、 钾长石、黑云母、 绿泥石等	黑云母化、 钾长石化、 绿泥石化、 绿帘石化、 硅化、 绢云母化	Cu:651×10 ⁴ t/ 0.46%; Au:799t/ 0.57×10 ⁶	[9,39-40]
29	巴布亚新几内 亚弗里达河 (Frieda River) 铜-金矿床	斑岩型	新几内 亚活动 带南缘	中新世闪长 岩、闪长 斑岩	新近纪, 14~11Ma	网脉状和 浸染状矿 石构成脉 状矿体	黄铜矿、斑铜矿、 黄铁矿、辉铜矿、 硫砷铜矿、自然金、 辉钼矿,石英、 重晶石、红柱石、 黑云母、 每泥石等	黑云母化、 青磐岩化、 绿泥石化、 绢云母化	Cu:673×10 ⁴ t/ 0.61%; Au:354t/ 0.32×10 ⁻⁶	[9,41]

续表1-3

续表1	-4
-----	----

序号	矿床名称	类型	构造背景	容矿围岩	成矿时代	矿体特征	矿物组合	围岩蚀变	规模/品位	参考文献
东亚	成矿带									
30	巴布亚新几内 亚巴杜希贾乌 (Batu Hijau)	斑岩型	东巽他-班 达岛弧区	上新世石英 闪长岩、闪 长岩、变质 火山岩	新近纪,3.7Ma	网脉状和 浸染状矿 石构成脉 状矿体	黄铜矿、斑铜矿、 辉铜矿、银金矿、 辉铜矿、铜蓝、 赤铜矿、自然金, 石英、钾长石、 黑云母、 绢云母等	钾化、 黑云母化、 绢云母化、 泥化、黄铁 绢英岩化、 钠化	Cu:723×10 ⁴ t/ 0.44%; Au:572t/ 0.35×10 ⁻⁶	[9,42]
31	巴布亚新几内 亚奥克泰迪 (OK Tedi) 铜-金矿床	斑岩型- 砂卡岩型	西太平洋 大陆边缘 岛弧区	更新世二 长斑岩、二 长闪长岩	第四纪, 1.2~1.1Ma	细脉状和 浸染状矿 石构成脉 状矿体	黄铁矿、黄铜矿、 辉铜矿、辉钼矿、 磁铁矿,石英、 钾长石、黑云母、 绢云母、透闪石、 阳起石、石榴石、 绿帘石、辉石	钾长石化、 黑云母化、 黄铁绢英岩化、 绢云母化、 硅化、钙化	Cu:448×10 ⁴ t/ 0.64%;Au:446t/ 0.64×10 ⁻⁶	[9,43]
32	新西兰豪拉 基(Hauraki) 金-银矿田	浅成低温 热液型	板块俯冲带上 大陆边缘火山 带	中新世和上 新世流纹 英安岩、 安山岩	新近纪,16.3~ 2Ma	网脉状矿 石构成脉 状矿体	银金矿、硫银矿、 深红银矿、黄铁矿、 闪锌矿、方铅矿、 黄铜矿,石英、 方解石、少量冰长 石、重晶石、石膏	青磐岩化、 泥化、硅化、 绢云母化、	Au:1362t	[44]

2.3 埃尔特尼恩特铜-金矿床

埃尔特尼恩特(El Teniente)铜-金矿床位于智利中部奥伊金斯省(Ohiggins),首都圣地亚哥西南34km处。目前已探明铜金属量9435×10⁴t,金金属量437t,钼金属量250×10⁴t,平均品位分别为0.63%,0.035×10⁻⁶和0.02%。每年生产矿石量达13.6×10⁴t^[13],是目前世界上产出规模最大的铜矿床,也是世界上最大的地下开采矿床。

大地构造位置上,埃尔特尼恩特矿床位于安第 斯造山带内活动南火山带的北端弧前环境中,与区 域上一系列新近纪钙碱性、酸性-中性的侵入岩 (12~7Ma)有密切的时空分布关系。该矿床容矿围 岩为晚中新世镁铁质杂岩体,岩石类型有安山玢 岩、辉长岩、闪长玢岩、安山岩脉和黑云母角砾 岩。铜、金、钼矿化在安山质杂岩体内呈网脉状产 出,矿化带走向北西向,长2800m,宽1900m,向下 延伸超过1800m。矿石的金属矿物主要有黄铜矿、 黄铁矿、斑铜矿、辉铜矿、砷黝铜矿、黝铜矿、辉钼 矿等,脉石矿物有石英、硬石膏、阳起石、电气石、 重晶石、粘土矿物、碳酸盐等。埃尔特尼恩特矿床 为斑岩型矿床,矿化作用与连续的长英质岩浆侵 入活动密切相关,矿化年龄为5.9~4.4Ma,具有多阶 段成矿的特点[47-48]。

2.4 拉科伊帕金-银矿床

拉科伊帕(La Coipa)金-银矿床位于智利北部,距离首都圣地亚哥东北方向约800km。成矿区分为莱德拉-法拉龙(Ladera Farellón)和科伊帕北(Coipa Norte)两部分,总面积约30km²。目前已探明金储量992t,银储量6520t^[20],是世界级的金-银矿床。

大地构造位置上,拉科伊帕位于智利北部的新生 代火山岩带内,矿化主要以细脉状和网脉状发生在三 叠系黑色页岩和砂岩,以及渐新世—早中新世英安质 凝灰岩(24~22Ma)^[20]和火山碎屑角砾岩和岩穹中。 矿体呈陡立似板状、蘑菇状和透镜体状在围岩中产 出,矿体形态表明其主要受构造因素控制,品位较高 的金矿体多赋存在沉积地层中,矿体延伸可达 4300m。矿石的金属矿物包括黄铁矿、斑铜矿、黄铜 矿、辉铜矿、砷黝铜矿、黝铜矿、铜蓝、硫砷铜矿、方铅 矿、烟锌矿、角银矿、氯溴银矿、自然银、银金矿、辉银 矿、银铁矾等,脉石矿物有石英、明矾石、石膏、重晶石 等。拉科伊帕金银矿床属于高硫型浅成低温热液型 矿床,表现出深部富金、浅部富银的特征,该特征可能 与下伏火山碎屑岩之下的黑色页岩有关,而页岩中的

炭质在成矿作用中充当了金的沉淀剂[21]。

2.5 多林溪金矿床

多林溪(Donlin Creek)金矿床位于美国阿拉斯 加西南部卡斯科奎姆山脉区,具有品位低、规模大 的特征,目前已探明的金储量和资源量共计720t,平 均品位1.5×10^{-6[12]},是北美科迪勒拉北部最大的金矿 床之一。

大地构造位置上,多林溪矿床发育于活动大陆 边缘造山带内^[49]。矿化作用发生在长 8000m、宽 3000m范围内的浅成脉岩组合系列中,这些脉岩走 向北东向,宽一般 3~20m,岩性组成以隐晶质流纹英 安斑岩、显晶质流纹英安斑岩为主,此外还有流纹 斑岩、细粒流纹英安斑岩等,矿化的石英±碳酸盐岩 细网脉在火成岩体内断续延伸。矿化作用发生在 晚白垩世(74~68Ma)^[49],含矿矿物以毒砂、黄铁矿、 辉锑矿为主,金主要赋存在毒砂内,具难冶炼性。 脉石矿物包括石英、铁白云石、高岭石、绿泥石、伊 利石、白云母等。围岩蚀变包括绢云母化、碳酸盐 化等。多林溪金矿床是造山型金矿床,熔融的地幔 物质上涌诱发大规模的变质脱水作用,或大规模复 理石熔融组分岩浆的出溶作用为矿床的形成提供 了物质和流体^[49]。

2.6 涅日达宁金矿床

涅日达宁(Nezhdaninsky)金矿床位于俄罗斯联邦雅库特共和国的东南部,雅库茨克城东440km处。该矿床产出于南维尔霍扬斯克山脉南支脉的阿拉赫-云含金带内,是俄罗斯最大的金矿床之一,目前在长15km、平均宽4km的矿田范围内已探获的金储量和资源量共计629t,平均品位5.1×10⁻⁶~5.8×10⁻⁶,同时还含有大量的银和铂族元素^[23]。

大地构造位置上,涅日达宁矿床位于中生代维尔霍扬斯克-楚科塔火成岩褶皱带西缘,南维尔霍扬斯克复向斜的北部,紧邻西伯利亚地台东部边区的地垒-背斜构造的结合部,且与白垩纪库鲁姆花岗岩-花岗闪长岩深成岩株(126~110Ma)有密切的时空分布关系^[24]。金矿化主要呈细脉浸染状、脉状、网脉状产出,且构成透镜体状、板状矿体。容矿围岩以二叠纪砂岩-页岩层为主。矿田范围内共发现50多条矿体,其中金储量最富集的1号矿体赋存在破碎带内,南北向长达10km,向深部延伸1.7km,矿体倾向西,倾角70°,厚度可达40m,平均14m,被东西向断裂系分割成多个断块。矿石的金属矿物有

黄铜矿、闪锌矿、黝铜矿、方铅矿、黄铁矿、白钨矿、 自然金、毒砂、深红银矿、辉锑银矿、脆银矿、硫锑铜 银矿、硫锑砷银矿等,脉石矿物主要为石英、钠长 石、绢云母、碳酸盐等。涅日达宁矿床是造山型金 矿床,具有多阶段成矿的特点。涅日达宁热液-岩 浆系统形成于126~121Ma前,区域晚期的增生发育 使金属组分从岩石中初步释放;晚白垩世早期 (105~100Ma)鄂霍茨克俯冲作用使成矿系统内各种 流体卸载混合,后期格利金岩株群形成时的岩浆作 用引起金和其他硫化物再沉淀,从而形成巨大的金 矿床^[24,50]。

2.7 菱刈金矿床

菱刈(Hishikari)金矿床位于日本九州南部,鹿 儿岛市东北方向约45km处,是20世纪80年代发 现的世界级金矿床。迄今为止,在长2500m、宽 800m的矿区范围内,累计探明金储量超过326t, 平均品位45×10⁻⁶~50×10⁻⁶,是日本产出规模最大 的金矿床,也是世界同类型超大型矿床中品位最 高的金矿床^[13,17,51]。

大地构造位置上,菱刈金矿床位于琉球岛弧陆 相中新世火山岩带内,与第四纪流纹英安岩侵入岩 (1.10~0.66Ma)有密切的时空分布关系^[13], 矿化作用 发生的时间为1.21~0.64Ma^[51]。金矿化主要出现在 第四纪安山岩和白垩纪—古近纪沉积岩中,构成脉 状矿体,具有条带状结构和拉断构造、断层泥及拖 曳褶皱等伸展应力形变指示。矿体走向北东、倾向 北,倾角70°~90°,延伸300~400m,宽0.5~4m。矿石 的金属矿物包括银金矿、黄铁矿、黄铁矿、硒银矿-辉硒银矿、深红银矿、白铁矿、闪锌矿、方铅矿、辉锑 矿,脉石矿物有石英、冰长石、蒙脱石、方解石、高岭 土等。菱刈矿床具备低硫化型浅成低温热液脉型 金矿床的特征,深部矿源侵入岩驱动热液循环,地 壳深部流体与岩浆水、大气水混合形成含矿流体, 在伸展应力环境下沿垂直裂隙系统上升,经过多期 次的热液矿物沉淀事件形成矿脉[13,17]。

2.8 勒班陀-远东南铜-金矿床

勒班陀-远东南(Lepanto-FSE)铜-金矿床位于 菲律宾吕宋岛北部曼卡延(Mankayan)地区,首都马 尼拉北约200km处。该地区在25km²的范围内产出 多个斑岩型铜矿床和浅成低温热液型贵金属、贱金 属矿床^[51]。勒班陀-远东南矿床是菲律宾产出规模 最大的铜-金矿床之一,目前已探明铜金属储量 548×10⁴t,平均品位0.8%,金金属储量973t,平均品位1.42×10^{-6[13]}。

大地构造位置上,勒班陀-远东南矿床位于中央 科迪勒拉造山带近南北向背斜东翼,与上新世一更 新世中性火山岩具有密切的时空分布关系¹³。根 据成因类型,该矿床可分为勒班陀浅成低温热液型 矿床和远东南斑岩型矿床。勒班陀矿体位于远东 南矿体上部,容矿围岩为古近纪-新近纪和第四纪 英安岩、火山碎屑岩和石英闪长斑岩。矿化呈网脉 状、层状、细脉状产出,构成透镜体状、脉状矿体。 勒班陀矿体在垂向上延伸最长达300m,宽达10~ 30m。矿石的金属矿物有硫砷铜矿、黄铜矿、黄铁 矿、砷黝铜矿-黝铜矿、闪锌矿、方铅矿、银金矿、碲 化物等,脉石矿物有石英、明矾石、硬石膏、重晶石 等。勒班陀-远东南矿床具有典型的低温热液系 统和与斑岩系统空间上相互叠加的特征,2种矿化 环境叠加,导致以侵入体为中心的系统早期沉淀 成矿元素受到热液淋滤进一步富集,形成特大型 矿床[17]。

2.9 奥克泰迪铜-金矿床

奥克泰迪(OK Tedi)铜金矿床位于巴布亚新几 内亚西部边界的富必兰(Fubilan)山地区^[53],属于超 大型斑岩-砂卡岩型铜-金矿床,其铜和金的金属储 量分别为448×10⁴t和446t,平均品位分别为0.64%和 0.64×10^{-6[9]},其中剩余可采储量的80%都赋存在砂卡 岩体内^[43]。

奥克泰迪矿床产出于西太平洋大陆边缘岛弧 区,大地构造位置属于巴布亚新几内亚褶皱带的 南延段,矿化作用发生的时间为1.2~1.1Ma¹⁹,矿化 现象主要发生在奥克泰迪杂岩体内及其与周围碳 酸盐岩体的接触部位,细脉状或浸染状的矿石构 成席状、板状或管状的矿体。矿石的原生金属硫 化物矿物包括黄铁矿、黄铜矿、斑铜矿、白铁矿和 磁黄铁矿,砂卡岩风化-表生带矿物有蓝辉铜矿、 黄铜矿、铜蓝等,硫化物氧化带矿物有针铁矿、赤 铜矿、孔雀石、蓝铜矿等。脉石矿物包括石英、钾 长石、黑云母、绢云母、透闪石、阳起石、石榴子石、 绿帘石、辉石等。奥克泰迪矿床的热液蚀变主要 为矽卡岩化和斑岩型热液蚀变,其形成作用表现 为含Cu、Au的流体由深部巨型岩浆房出溶而来, 富必兰和悉尼(Sydney)岩体可能为成矿流体上升 提供了通道[43]。

3 成矿作用

环太平洋成矿域是世界上最重要的成矿域之 一,以中一新生代为主要成矿时代的大规模成矿作 用形成了该成矿带上颇具特色的铜、金等矿床的分 布。从20世纪初美国西南部发现第一个斑岩型铜 矿床开始,该区域一直是找矿勘查和成矿理论研究 的热点地区。百余年来,在环太平洋成矿域发现了 上百个世界级的大型-超大型铜矿床和金矿床,经 济价值十分可观。目前分布在该成矿带上的铜和 金矿床按照成因类型可分为6类,分别为以铜为主 的斑岩型铜矿床,如埃尔特尼恩特、丘基卡马塔等 矿床;铜、金共生的斑岩型铜-金矿床,如格拉斯贝 格、杜希贾乌等矿床;矽卡岩型铜-金矿床,如艾茨 贝格、奥克泰迪矿床;浅成低温热液型金矿床,如菱 刈、豪拉基等矿床;卡林型金矿床,如贝茨-波斯特 金矿床;造山型金矿床,如涅日达宁金矿床等。这 些矿床均是闻名于世的特大型矿床,勘查开发带来 的经济利益对当地社会的发展做出巨大贡献,同 时,对于其成矿作用的研究也极大地推动了矿床学 理论的讲步。

3.1 斑岩型铜矿床

本文的斑岩型铜矿床是指成矿元素以Cu为主, 不含金或含金很少的矿床,与斑岩型铜-金矿床不 同。安第斯中部、北科迪勒拉西南部和西南太平洋岛 弧区分别是全球第一、第二和第三大斑岩型铜矿床富 集区,具有极大的找矿潜力^[54]。斑岩型铜矿床由于产 出规模巨大,具有极重要的经济价值。此类矿床主要 产出于大陆边缘型岩浆弧环境,形成于古陆基底之 上,大陆地壳较厚14。成矿时代从中生代到新生代都 有分布,但以新生代为主。矿化作用与中酸性的钙碱 性岩浆密切相关,陆缘弧环境的含矿岩体以钙碱性系 列斑岩为主,少量为高钾钙碱性系列,岩性主要为花 岗闪长岩和石英二长岩^[55],矿床的就位多受区域性深 大断裂控制。俯冲的大洋板片直接熔融形成的钙碱 性岩浆,含矿岩浆通过软流圈和上部地幔岩石圈后, 在地壳底部储存,后经历地壳熔融、混染作用和均一 岩浆的储存过程(MASH)^[56],演化形成中性成分岩 浆,且继续上升至地壳中上部形成岩体,成矿物质随 之沉淀形成矿床[55]。

3.2 斑岩型铜-金矿床

斑岩型铜-金矿床多数分布在西带上,即西南

太平洋岛弧带的菲律宾、印度尼西亚、巴布亚新几 内亚境内,代表性矿床包括格拉斯贝格、巴杜希贾 乌、桑托托马斯等。东带上也有分布,如加拿大的 鱼湖(Fish Lake, 471t Au)、阿根廷的阿伦布雷拉(Bajo de la Alumbrera, 489t Au)等矿床^[57]。此类矿床有 时与浅成低温热液型矿床叠置产出,如菲律宾的勒班 陀-远东南矿床。斑岩型铜-金矿床与斑岩型铜矿床 在成因类型上具有相似性,但在产出环境、地质特征 等方面还存在差异。斑岩型铜-金矿床主要产出于 大洋火山岛弧区,少量产出于大陆边缘环境。成矿时 代大多为新生代,矿化与I型磁铁矿系列次火山岩侵 入体密切相关。含矿岩体以典型钙碱性系列斑岩为 主,岩性主要为石英闪长岩,少数为花岗闪长岩、石英 二长岩[55]。关于其成因,有学者认为[17,57-58],斑岩型 铜-金矿床多产在汇聚板块边缘部位,受张性背景控 制明显,与成矿有关的岩浆具有壳下来源的特征,可 能主要来自地幔楔的熔融,经过分异演化上升到浅部 而成矿,而岩浆在次火山岩浆房中的混合是促使硫化 物氧化释放出金的重要原因。

3.3 矽卡岩型铜-金矿床

砂卡岩型铜-金矿床主要分布在加拿大和美国 西部、秘鲁、日本、西南太平洋地区,以及中国长江 中下游地区,代表性矿床包括印度尼西亚的艾茨贝 格、巴布亚新几内亚的奥克泰迪、智利坎德拉里亚 (Candelaria)等。此类矿床一般产出于大洋和大陆 俯冲环境,与I型、磁铁矿系列、钙碱性侵入体有密 切的成因联系。规模较大的矿床多与斑状深成岩 体密切相关,这些矿化岩体通常表现出钾硅化或绢 云母化蚀变的特征,与之对应的是砂卡岩中出现进 化蚀变的石榴子石-辉石矿物组合和退化蚀变的绿 帘石-阳起石矿物组合¹⁵⁹。矽卡岩型铜矿床的成矿 时代以中-新生代为主。不同成矿元素组合的砂 卡岩型矿床一般产在特定的构造背景下,且与此类 矿床有关的岩浆岩也具有明显的成矿专属性。砂 卡岩型铜矿床成因比较复杂,中酸性岩浆上升至地 壳浅部后,带来的热量使围岩重结晶,岩浆与碳酸 盐岩围岩接触交代形成砂卡岩,岩浆中残余的含矿 热液通过裂隙扩散充填于砂卡岩发生交代作用,形 成退化蚀变岩,随着硫化物与成矿元素的沉淀,形 成矿床[17]。

3.4 浅成低温热液型金矿床

浅成低温热液型金矿床是环太平洋成矿域最

主要的金矿床类型之一,在东带和西带均有分 布。代表性矿床包括美国的科里普柯里可(Cripple Creek, 755t Au)^[57]、智利的拉科伊帕、日本的菱 刈、新西兰的豪拉基、菲律宾的碧瑶(Baguio,> 700t Au)^[57]、巴布亚新几内亚的拉杜拉姆(Ladolam, >1300t Au)^[60]、俄罗斯东北部的库拉纳赫、中 国台湾省的金瓜石等矿床。环太平洋地区的典型 浅成低温热液型金矿床主要产自大陆边缘、岛弧 和弧后张裂带^[57],与陆相火山岩或次火山岩有密切 的时空分布关系¹⁰¹,成矿时代以中一新生代为主, 部分地区的此类矿床矿化作用可能仍在持续(如 日本菱刈矿床)。有学者认为,该区的大型金矿 床,尤其是低硫化型矿床可能与碱性岩有密切的 成因联系[57,60]。Corbett[61]提出,低硫化型矿床的成 矿流体为受到深部矿源侵入岩驱动的热液循环单 元中的天水,在被活化扩容构造环境中,经过多期 次热液矿物沉淀成矿,其中沸腾是低硫化型矿床 成矿金属元素沉淀的主因。高硫化型矿床的形成 与去气的钙碱性岩浆密切相关,与低硫化型矿床 相比,其成矿金属元素的沉淀可能主要受制于流 体混合[13,60]。

3.5 卡林型金矿床

卡林型金矿床在环太平洋成矿域内的美国内华 达州、中国滇黔桂地区、印度尼西亚、菲律宾等地均有 分布四,是带内重要的金矿床类型之一。代表性矿床 包括美国卡林型金矿带内的金坑(Gold Quarry, 306t)、贝茨-波斯特和中国烂泥沟金矿床[46.62]。卡林 型金矿多产出在被动大陆边缘和岛弧地体上,多伴 有岩浆侵入活动与变形作用,矿化作用受区域构造 影响明显。容矿围岩主要有碳酸盐岩、粉屑岩、泥 岩等,赋矿地层以泥盆系为主,此外还有奥陶系、志 留系和三叠系。以美国贝茨-波斯特矿床为例,矿 化作用的发生伴随着始新世—渐新世的构造热事 件。在该时期,俯冲板块受浮力驱动回撤时形成伸 展构造,岩石圈减薄、软流圈的热对流效应驱动岩 石圈地幔和地壳中的岩浆运移至地壳浅部。大气 水热液与深源酸性流体在地壳浅部混合,从而形成 低温浸染交代型矿床[13,17]。

3.6 造山型金矿床

造山型金矿床在环太平洋成矿域内广泛分布, 主要产出于北美科迪勒拉造山带、俄罗斯东北部及 中国胶东半岛,在澳大利亚东部和新西兰岛南部也 有分布^[7]。代表性矿床包括美国阿拉斯加的朱诺、 多林溪^[12],俄罗斯远东地区纳塔尔津^[63]、涅日达宁^[23] 及中国玲珑金矿床(428t Au)^[64]等。造山型金矿床 多产出于汇聚板块边缘,矿床的就位受构造控 制,多产于区域构造带的二级或更次级的断层羽 中^[65]。矿化多形成于石英脉中,矿化作用发生于 大陆增生的2个阶段,其中冈瓦纳大陆边缘矿床 形成于古生代,北美科迪勒拉和欧亚大陆边缘矿 床主要形成于晚中生代一早新生代。成矿流体的 迁移和富集与增生型造山作用密切相关,岩浆弧 形成期间发生的增厚地壳熔融、俯冲板块回撤和 张性构造作用为地幔物质上涌成矿提供了必需的 热源^[7.66]。

4 找矿潜力

环太平洋成矿域是全球最重要的成矿域之 一,也是大型-超大型铜、金矿床分布最密集的地 区。环太平洋成矿域东带包括北科迪勒拉成矿 带、安第斯成矿带,由于太平洋板块俯冲消减作 用,新生代时期区域上形成强烈的钙碱性岩浆火 山活动,发生大规模的成矿作用,形成大量以斑岩 型铜-金-钼矿床为代表的大规模矿床[®],世界上 规模最大的铜矿床——埃尔特尼恩特矿床产于该 地区。北科迪勒拉造山带是造山型、卡林型、斑岩 型矿床的发源地。据估计,北科迪勒拉成矿带内 未被发现的斑岩型铜矿资源量可能与已发现的资 源量相当,而南美安第斯地区则蕴含了全球20%的 潜在铜资源量^{67]}。因此,在环太平洋成矿域东带具 有巨大的找矿潜力,尤其具有寻找斑岩型铜矿床 的潜力。环太平洋成矿域西带欧亚大陆边缘的岩 浆活动主要为中生代酸性岩浆侵入或喷出作用, 东南亚岛弧区则以新生代钙碱性岩浆侵入或喷出 活动为主,伴随频繁的岩浆活动,形成了多种类 型、规模不一的铜-金矿床。楚科奇-鄂霍茨克成 矿带地域辽阔,成矿地质条件较好,但工作程度较 低,具备继续寻找大型造山型、浅成低温热液型金 矿床的潜力,此外也是全球寻找斑岩型铜矿床最 有潜力的地区间。东亚成矿带、伊里安-新西兰成 矿带上的菲律宾弧、印尼新几内亚-亚美尼亚弧为 形成大规模斑岩型、砂卡岩型、浅成低温热液型 铜-金矿床的有利地区。据估计,该地区可能还有 一半的斑岩型铜-金矿床有待发现啊,具有巨大的 找矿潜力,应加强在有长英质到中性斑岩侵入体 分布地区的找矿工作。

5 结 论

(1)环太平洋成矿-构造域由北科迪勒拉、安第 斯、楚科奇-鄂霍茨克、东亚和伊里安-新西兰5个 巨型成矿带组成,可划分为东带和西带两部分,主 要由显生宙造山带构成,成矿地质背景主要是显生 宙造山带及新生代风化壳。

(2)环太平洋成矿域是全球铜、金储量最丰富的地区之一,大型-超大型矿床广泛分布,斑岩型、 浅成低温热液型、造山型、卡林型等类型的大型矿 床在该区具有明显的成矿区域偏在性,具有极大的 经济价值和找矿潜力。

(3)研究区内的铜、金矿床成矿时代以中、新生 代为主,大洋板块俯冲、弧陆碰撞等构造作用诱发 的强烈构造-岩浆活动为成矿物质的运移和富集提 供了动力、热量及物质来源,从而发生大规模的成 矿作用。

致谢:对中国地质科学院矿产资源研究所赵元 艺、袁忠信研究员及王丰翔博士在本文成文和修改 过程中给予的指导,致以诚挚的谢意。

参考文献

- [1]裴荣富, 梅燕雄, 瞿泓滢, 等. 大型-超大型矿床找矿新认知[J]. 矿 床地质, 2013, 32(4): 661-671.
- [2]梅燕雄, 裴荣富, 杨德凤, 等. 全球成矿域和成矿区带[J]. 矿床地 质, 2009, 28(4): 383-389.
- [3] 聂凤军, 赵元艺, 李振清, 等. 全球巨型成矿带基本地质特征与金属矿床分类[J]. 矿物学报,2013,S2:1056-1057.
- [4]戴自希, 王家枢. 矿产勘查百年[M]. 北京: 地震出版社, 2004.
- [5]张强, 钟琼, 贾振宏, 等. 世界铜矿资源与矿山铜生产状况分析[J]. 矿产与地质, 2014, 2: 196-201.
- [6] 瞿泓滢, 裴荣富, 梅燕雄, 等. 国外超大型-特大型铜矿床成矿特 征[J]. 中国地质, 2013, 40(2): 371-390.
- [7]Goldfarb R J, Phillips G N, Nokleberg W J. Tectonic setting of synorogenic gold deposits of the Pacific Rim[J]. Ore Geology Reviews, 1998,13:185–218.
- [8]邱瑞照,谭永杰,朱群,等.中国及邻区重要成矿带成矿规律对比研究[M].北京:地质出版社,2013.
- [9]Cooke D R, Hollings P, Walshe J L. Giant porphyry deposits: characteristics, distribution, and tectonic controls[J]. Economic Geology, 2005, 100(5): 801–818.
- [10]Houston R A, Dilles J H, Structural Geologic Evolution of the Butte District, Montana[J]. Economic Geology, 2013, 108(6):1397– 1424.

[11]Rusk B G, Reed M H, Dilles J H. Fluid inclusion evidence for magmatic-hydrothermal fluid evolution in the porphyry coppermolybdenum deposit at Butte, Montana[J]. Economic Geology, 2008, 103(2): 307-334.

14

- [12]Goldfarb R, Baker T, Dube B, et al. Distribution, Character, and Genesis of Gold Deposits in Metamorphic Terranes[J]. Economic Geology 100th Anniversary Volum, 2005: 407-450.
- [13]毛景文,张作衡,王义天,等.国外主要矿床类型,特点及找矿勘 查[M]. 北京:地质出版社, 2012.
- [14]夏斌,陈根文,王核.全球超大型斑岩铜矿床形成的构造背景分 析[J]. 中国科学(D辑), 2002, 32(S1): 87-95.
- [15]郭硕,赵元艺,许虹,等.加拿大海兰德瓦利斑岩型铜矿研究 进展[]]. 地质科技情报, 2013, 32(5): 64-71.
- [16]Enders M, Knickerbocker C, Titley S, et al. The role of bacteria in the supergene environment of the Morenci porphyry copper deposit, Greenlee County, Arizona[J]. Economic Geology, 2006, 101(1): 59 - 70
- [17]施俊法, 唐金荣,周平, 等. 世界找矿模型与矿产勘查[M].北京:地 质出版社,2010.
- [18]Sillitoe R H. Geology of the Los Pelambres Porphyry Copper Deposit, Chile[J]. Economic Geology, 1973, 68(1):1-10.
- [19]Masterman G J, Cooke D R, Berry R F, et al. ⁴⁰Ar/³⁹Ar and Re-Os geochronology of porphyry copper-molybdenum deposits and related copper-silver veins in the Collahuasi District, northern Chile[J]. Economic Geology, 2004, 99(4):673-690.
- [20]Bissig T, Clark A H, Rainbow A, et al. Physiographic and tectonic settings of high-sulfidation epithermal gold-silver deposits of the Andes and their controls on mineralizing processes[J]. Ore Geology Reviews, 2015, 65(65):327-364.
- [21]Oviedo L, Fuster N, Tschischow N, et al. General geology of La Coipa precious metal deposit, Atacama, Chile[J]. Economic Geology & the Bulletin of the Society of Economic Geologists, 1991, 6: 1287 - 1300
- [22]Simmons A T, Tosdal R M, Wooden J L, et al. Punctuated Magmatism Associated with Porphyry Cu-Mo Formation in the Paleocene to Eocene of Southern Peru[J]. Economic Geology, 2013, 108 (4):625-639.
- [23]Chernyshev I V, Bortnikov N S, Chugaev A V, et al. Metal sources of the large Nezhdaninsky orogenic gold deposit, Yakutia, Russia: Results of high-precision MC-ICP-MS analysis of lead isotopic composition supplemented by data on strontium isotopes[J]. Geology of Ore Deposits, 2011, 53(5):353-373.
- [24]Bortnikov N S, Gamyanin G N, Vikent' Eva O V, et al. Fluid composition and origin in the hydrothermal system of the Nezhdaninsky gold deposit, Sakha (Yakutia), Russia[J]. Geology of Ore Deposits, 2007, 49(2):87-128.
- [25]Goryachev N A, Vikent' Eva O V, Bortnikov N S, et al. The world-class Natalka gold deposit, northeast Russia: REE patterns, fluid inclusions, stable oxygen isotopes, and formation conditions of ore[J]. Geology of Ore Deposits, 2008, 50(5):362-390.

- [26]Rodionov S M, Fredericksen R S, Berdnikov N V, et al. The Kuranakh epithermal gold deposit (Aldan Shield, East Russia) [J]. Ore Geology Reviews, 2014, 59(4):55-65.
- [27]Tohma Y, Imai A, Sanematsu K, et al. Characteristics and Mineralization Age of the Fukusen No. 1 Vein, Hishikari Epithermal Gold Deposits, Southern Kyushu, Japan[J]. Resource Geology, 2010, 60 (4):348-358.
- [28]Izawa E, Urashima Y, Ibaraki K, et al. The Hishikari gold deposit: high-grade epithermal veins in Quaternary volcanics of southern Kyushu, Japan[J]. Journal of Geochemical Exploration, 1990, 36 (90):1-56.
- [29]Jiang S H, Liang Q L, Bagas L, et al. Geodynamic setting of the Zijinshan porphyry-epithermal Cu-Au-Mo-Ag ore system, SW Fujian Province, China: Constrains from the geochronology and geochemistry of the igneous rocks[J]. Ore Geology Reviews, 2013, 53: 287-305.
- [30]王少怀, 裴荣富, 曾宪辉, 等. 再论紫金山矿田成矿系列与成矿模 式[]]. 地质学报, 2009, 83(2): 145-157.
- [31]Zhong J, Chen Y J, Pirajno F, et al. Geology, geochronology, fluid inclusion and H-O isotope geochemistry of the Luoboling porphyry Cu-Mo deposit, Zijinshan Orefield, Fujian Province, China[J]. Ore Geology Reviews, 2014, 57: 61-77.
- [32]Li X F, Sasaki M. Hydrothermal Alteration and Mineralization of Middle Jurassic Dexing Porphyry Cu-Mo Deposit, Southeast China[J]. Resource Geology, 2007, 57(4): 409-426.
- [33]李晓峰, 胡瑞忠, 韦星林, 等. 江西德兴地区主要矿床类型, 成矿 地质特征及其成因关系[]]. 地质论评, 2012, 58(1): 82-90.
- [34]王翠云,李晓峰,肖荣,等.德兴铜厂斑岩铜矿脉体类型,分布规 律及其对成矿的指示意义[]]. 矿床地质, 2012, 31(1): 94-110.
- [35]Middleton C, Buenavista A, Rohrlach B. A geological review of the Tampakancopper-gold deposit, southern Mindanao, Philippines[C]//PACRIM 2004, AusIMM, Adelaide, Australia, September, 2004:173-187.
- [36]罗明强. 菲律宾斑岩型铜矿成矿背景田. 河南理工大学学报: 自 然科学版, 2011, 30(1): 47-54.
- [37]Claveria R J R. Mineral Paragenesis of the Lepanto Copper and Gold and the Victoria Gold Deposits, Mankayan Mineral District, Philippines[J]. Resource Geology, 2001, 51(2):97-106.
- [38]张伟波, 聂凤军, 王立胜, 等. 印度尼西亚格拉斯贝格铜金矿床研 究新进展[]]. 地质科技情报, 2013, 32(5): 112-117.
- [39]朱意萍, 王天刚, 姚仲友,等.潘古纳斑岩型铜金矿床的地质和矿 化特[C]//2014年中国地球科学联合学术年会——专题59:境外 地质矿产调查评价论文集,2014:2628-2630.
- [40]Baldwin J T, Swain H D, Clark G H, et al. Geology and grade distribution of the Panguna porphyry copper deposit, Bougainville, Papua New Guinea[J]. Economic Geology, 1978,73 (5).690-702.
- [41]Whalen J B, Britten R M, I McDougall. Geochronology and geochemistry of the Frieda River prospect area, Papua New Guinea[J]. Economic Geology, 1982, 77(3):592-616.
- [42]Meldrum S J, Aquino R S, Gonzales R I, et al. The Batu Hijau

porphyry copper-gold deposit, Sumbawa Island, Indonesia[J]. Journal of Geochemical Exploration, 1994, 50(1/3):203-220.

- [43]Van Dongen M, Weinberg R F, Tomkins A G. Grade distribution of the giant Ok Tedi Cu–Au deposit, Papau New Guinea[J]. Economic Geology, 2013, 108(7):1773–1781.
- [44]John D A. Epithermal Gold–Silver Deposits of the Hauraki Goldfield, New Zealand: An Introduction[J]. Economic Geology, 2011, 106(6):915–919.
- [45]Hickey K A, Ahmed A D, Barker S L L, et al. Fault-Controlled Lateral Fluid Flow Underneath and Into a Carlin-Type Gold Deposit: Isotopic and Geochemical Footprints[J]. Economic Geology, 2014, 109(5):1431-1460.
- [46]Lubben J D, Cline J S, Barker S. Ore Fluid Properties and Sources from Quartz– Associated Gold at the Betze– Post Carlin– Type Gold Deposit, Nevada, United States[J]. Economic Geology, 2012, 107(7):1351–1385.
- [47]Cannell J, Cooke D, Walshe J, et al. Geology, mineralization, alteration, and structural evolution of the El Teniente porphyry Cu– Mo deposit[J]. Economic Geology, 2005, 100:979–1003.
- [48]Vry V, Wilkinson J, Seguel J, et al. Multistage Intrusion, Brecciation, and Veining at El Teniente, Chile: Evolution of a Nested Porphyry System[J]. Economic Geology, 2010, 105(1):119–153.
- [49]Goldfarb R J, Ayuso R, Miller M L, et al. The late Cretaceous Donlin Creek gold deposit, Southwestern Alaska: Controls on epizonal ore formation[J]. Economic Geology,2004,99(4): 643–671
- [50]张立生. 涅日达宁金矿床(俄罗斯萨哈-雅库特)的矿物-地球化 学特点和形成条件[]]. 世界核地质科学, 1999, 1: 52-62.
- [51]Sanematsu K, Duncan R, Imai A, et al. Geochronological Constraints Using ⁴⁰Ar/³⁹Ar Dating on the Mineralization of the Hishikari Epithermal Gold Deposit, Japan[J]. Resource Geology, 2005, 55(3):249–266.
- [52]Berger B R, Henley R W, Lowers H A, et al. The Lepanto Cu–Au deposit, Philippines: A fossil hyperacidic volcanic lake complex[J]. Journal of Volcanology & Geothermal Research, 2014, 271(2):70–82.
- [53]姚仲友,王天刚,王国平,等.大洋洲地区优势矿产资源潜力评价[M].北京:科学出版社,2015.
- [54]Singer D A, Berger V I, Menzie W D, et al. Porphyry Copper De-

posit Density[J]. Economic Geology, 2005, 100(3):491-514.

- [55]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[]].地质学报,2014,88(12):2153-2175
- [56]Hildreth W, Moorbath S. Crustal contributions to arc magmatism in the Andes of Central Chile[J]. Contributions to Mineralogy & Petrology, 1988, 98(4):455–489.
- [57]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.
- [58]李金祥,秦克章,李光明.富金斑岩型铜矿床的基本特征、成矿物 质来源与成矿高氧化岩浆-流体演化[J].岩石学报,2006,22(3): 678-688.
- [59]Meinert L D, Gregory M D, Nicolescu S. World Skarn Deposits [J]. Economic Geology 100th Anniversary Volum, 2005:299–336
- [60]江思宏, 聂凤军, 张义,等. 浅成低温热液型金矿床研究最新进 展[J]. 地学前缘, 2004, 11(2):401-411.
- [61]Corbett G. Epithermal gold for explorationists[J]. AIG Journal-Applied Geoscientific Practice and Research in Australia, 2002:1-26.
- [62]Chen M H, Mao J W, Bierlein F P, et al. Structural features and metallogenesis of the Carlin-type Jinfeng (Lannigou) gold deposit, Guizhou Province, China[J]. Ore Geology Reviews, 2011, 43(1): 217–234.
- [63]Goryachev N A, Pirajno F. Gold deposits and gold metallogeny of Far East Russia[J]. Ore Geology Reviews, 2014, 59(6):123–151.
- [64]Wen B J, Fan H R, Santosh M, et al. Genesis of two different types of gold mineralization in the Linglong gold field, China: Constrains from geology, fluid inclusions and stable isotope[J]. Ore Geology Reviews, 2015, 65:643–658.
- [65]陈衍景. 造山型矿床、成矿模式及找矿潜力[J]. 中国地质, 2006, 33(6):1181-1196.
- [66]Goldfarb R J, Groves D I, Gardoll S. Orogenic gold and geologic time: a global synthesis[J]. Ore Geology Reviews, 2001, 18(1):1– 75.
- [67]Johnson K M, Hammarstrom J M, Zientek M L, et al. Estimate of undiscovered copper resources of the world, 2013[M].U.S. Geological Survey Fact Sheet 2014–3004, 2014:1–3.
- ① 芮宗瑶, 秦克章, 张立生,等. 国内外斑岩型铜矿研究进展. 中国地 质调查局, 2002.