

DOI: 10.12090/j.issn.1006-6616.2019.25.S1.022

智利北部—阿根廷西北部两类斑岩铜矿成矿方式

邱瑞照¹, 陈玉明¹, 陈秀法¹, 赵宏军¹, 任晓栋², 赵立克², 张潮¹, 王靓靓¹

(1. 中国地质调查局发展研究中心, 北京 100037;

2. 中国地质大学(北京), 北京 100083)

摘要: 智利北部和阿根廷西北部的中生代斑岩铜矿形成于古生代地体拼贴造山带背景。随着大西洋的张开, 南美大陆向西漂移, 中生代期间, 南美克拉通块体俯冲到古生代造山带之下形成加厚或双倍地壳。智利北部作为南美活动大陆边缘的组成部分, 不断“吞食”向东俯冲的太平洋(纳斯卡)板块, 斑岩铜矿成矿作用发生在俯冲板块断离后导致的大规模岩浆活动, 并沿再活化岩石圈不连续(先存的古生代拼接带、区域断裂)反复就位, 形成安第斯型斑岩铜矿。阿根廷西北部大规模铜(金、钼)成矿与加厚的造山带垮塌有关, 大规模成矿受控于造山岩石圈去根、软流圈物质和热上涌引发的大规模岩浆活动。总体而言, 智利北部、阿根廷西北部安第斯型和造山带垮塌型斑岩铜矿, 乃至南美安第斯山铜(金)成矿带形成, 与中生代以来南美大陆向西漂移、大西洋张开事件关系密切。

关键词: 大规模成矿作用; 安第斯型; 造山带垮塌型; 智利北部; 阿根廷西北部

中图分类号: P618.41; P611

文献标识码: A

DISCUSSION ON THE TWO TYPES OF PORPHYRY COPPER MINERALIZATION IN NORTHERN CHILE AND NORTHWEST ARGENTINA

QIU Ruizhao¹, CHEN Yuming¹, CHEN Xiufa¹, ZHAO Hongjun¹, REN Xiaodong², ZHAO Like²,
ZHANG Cao¹, WANG Liangliang¹

(1. China Geological Survey, Development and Research Center, Beijing 100037, China;

2. China University of Geosciences (Beijing), Beijing 100083, China)

Abstract: The Mesozoic-Cenozoic porphyry copper deposits in northern Chile and northwestern Argentina were formed in the orogenic setting of the Paleozoic terrane collocation. With the opening of the Atlantic Ocean, the South American continent drifted westward, in Mesozoic-Cenozoic the South American craton was subducted beneath the Paleozoic orogenic belts to form a thicker or double crust. As a part of the active continental margin of South America, northern Chile continuously “swallowed” the Pacific (Nasca) plate which subducted eastward. The mineralization of porphyry copper deposits in northern Chile occurred after the large-scale magmatic activity which caused by slab-failure subduction of the

基金项目: 国家国际科技合作专项(2011DFA22460); 中国地质调查局地质调查项目(DD20160118, DD20190370); 桂发改重大[2017] 670

作者简介: 邱瑞照(1963-), 男, 研究员, 主要从事深部地质、区域成矿和境外地质矿产研究。E-mail: qiurrzz@163.com

引用格式: 邱瑞照, 陈玉明, 陈秀法, 等. 智利北部—阿根廷西北部两类斑岩铜矿成矿方式[J]. 地质力学学报, 2019, 25(S1): 129-134 DOI: 10.12090/j.issn.1006-6616.2019.25.S1.022

QIU Ruizhao, CHEN Yuming, CHEN Xiufa, et al. Discussion on the two types of porphyry copper mineralization in northern Chile and northwest Argentina [J]. Journal of Geomechanics, 2019, 25(S1): 129-134 DOI: 10.12090/j.issn.1006-6616.2019.25.S1.022

Pacific (Nazca) plate, and repeatedly took place along the reactivated lithosphere discontinuities (the pre-existing Paleozoic splice zones and regional faults), forming so-called Andean-type porphyry copper deposits; The large-scale copper (gold, molybdenum) mineralization in northwestern Argentina was associated with the collapse of the thickened orogenic belt. The large-scale mineralization was controlled by the large-scale magmatism caused by the de-rooting of the orogenic lithosphere, asthenospheric material and thermal upwelling. Overall, Porphyry copper deposits of the Andean-type and orogenic collapse-type in northern Chile and northwestern Argentina, as well as the formation of the Andean copper (gold) metallogenic belt in South America, are closely related to the westward drift of the South American continent and the opening of the Atlantic Ocean since the Mesozoic and Cenozoic.

Key words: large-scale mineralization; Andean type; orogenic collapse; northern Chile; northwestern Argentina

南美大陆与非洲大陆分离是全球中新生的重大板块事件之一, 伴随大西洋张开、南美大陆西移, 侏罗纪以来沿太平洋边缘的长期俯冲形成连绵长达6000余公里的最长的大陆弧^[1]。从中生代到新生代经历陆块增生、火山岛弧和山脊碰撞, 在南美大陆西部形成全球著名的安第斯铜(金)矿成矿带, 并伴生有金、银、钼和铀等多种矿产; 成矿时代从190 Ma到6 Ma, 其中, 始新世—渐新世(28~43 Ma)和中新世(5~16 Ma)发生的大规模铜、钼成矿分别占探明资源量82%和94%^[2], 奠定了南美作为全球重要铜、钼资源基地的地位。在安第斯成矿带, 斑岩铜矿床散布在不同的时空集群中, 具有东西分带、南北分段特征, 其中以中安第斯带资源最丰富, 东、西分布范围也最宽^[3](图1)。根据斑岩矿床与俯冲作用之间的密切关系, 已经建立了较为完整的与俯冲有关的弧环境成矿模型^[3-4]。研究表明^[5-8], 许多构造岩浆条件都与控制俯冲弧中岩浆作用和矿床的时空分布有关, 其中包括: 与停滞俯冲板块外围沉积物之间的联系、俯冲板块和上覆板块之间的会聚速度和演化、上覆俯冲板块的绝对速度和伸展特征的演化、俯冲板块和平板俯冲的倾角、海沟迁移和俯冲倾斜度及俯冲板块的横向长度等等。但是, 对于哪种俯冲参数主要控制斑岩矿床的成因, 还没有达成共识^[9-11]。文章在对阿根廷西北部实地考察基础上, 结合深部资料分析, 提出智利北部、阿根廷西北部斑岩铜矿床可能存在与俯冲有关的和造山带垮塌有关的2种成矿方式。

1 成矿地质背景

智利北部和阿根廷西北部自西向东分布着智利

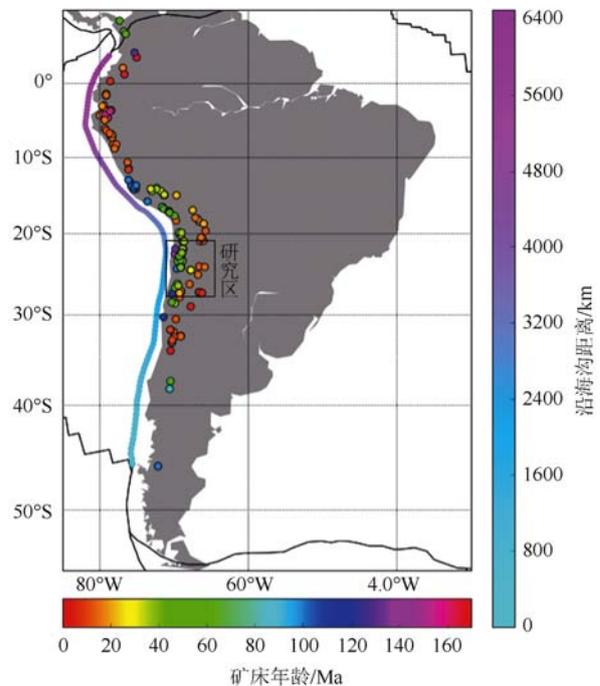


图1 南美洲斑岩铜矿床位置^[9]

Fig. 1 Porphyry copper deposit locations in South America^[9]

地体、前科迪勒拉地体和潘皮亚纳地体(图2)^[12]。

Dalziel等^[13]首次提出阿根廷西北部和智利北部受到“古生代时期有两个外来地体在阿根廷中部拼接”的认识, 两个外来地体分别为: 前科迪勒拉地体, 在奥陶纪末增生到阿根廷; 智利地体在晚泥盆世拼入。Ramos^[14]把这一认识引入到阿根廷西北部、智利北部、玻利维亚南部和秘鲁南部地区。Heinrich Bahlburg等^[15]基于对智利北部、阿根廷西北部早古生代地层学以及岩浆、变质事件放射性同位素年龄数据的整理, 评估了较早的中安第斯山南部地体增生模型, 提出了一个不同以往的中安第斯南部三个阶段增生历史(图3): ①

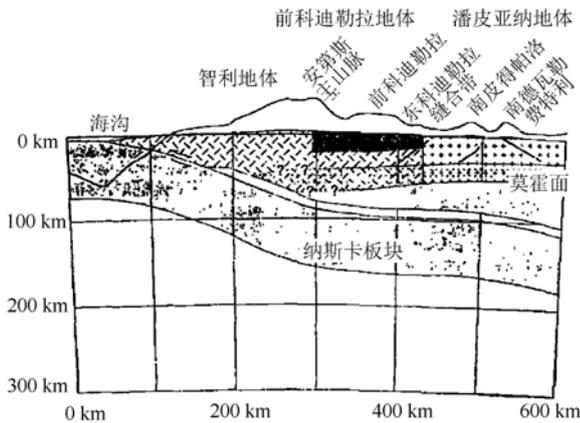


图2 智利北部—阿根廷西北部自西向东地体分布示意图^[12]

Fig. 2 Sketch map of the distribution of terranes from west to east in northern Chile and northwestern Argentina^[12]

寒武纪—奥陶纪阶段, 镁铁质-超镁铁质岩石组合还没有测年, 多数学者倾向于认为它们是奥陶纪蛇绿岩, 不清楚是反映有一个短命的被动大

陆边缘 (大约 20 Ma), 还是在这个盆地向克拉通方向发育有一个弧后边缘; ②志留纪—早石炭世阶段, 从早志留世时期到晚石炭世早期 (大约 100 Ma) 没有岩浆或变质活动的证据, 许多地质年代学的研究也确定了这个间隔^[15], 泥盆纪和早石炭世, 碎屑单元的沉积式样和大陆边缘的沉降演化以及缺少岩浆和变质事件, 被认为可能为被动大陆边缘背景; ③晚石炭世—二叠纪阶段, 在晚石炭世末, 钙碱性岩浆侵入和喷出作用发生在整个智利北部, 伴随着岩浆作用, 厚层的火山碎屑序列沉积在阿塔卡马盐湖 (Salar de Atacama) 附近地区, 火山碎屑岩同 Cerros de Cuevitas 的海相碳酸盐和阿里萨罗 (Arizaro) 组分别在东面和西面相互楔接; 这些深成岩体和火山岩的地球化学特征表明它们都来源于岩浆弧环境。

总之, 在智利北部、阿根廷西北部 (普纳) 的安第斯造山带是发育在古生代造山带基础上的, 至少曾有 2 次拼贴事件和发育 2 条岩浆弧或岩石圈不连续^[16], 且其经历了与古亚洲洋、阿巴拉契亚造山带几乎类似的地球动力学演化历史^[15]。

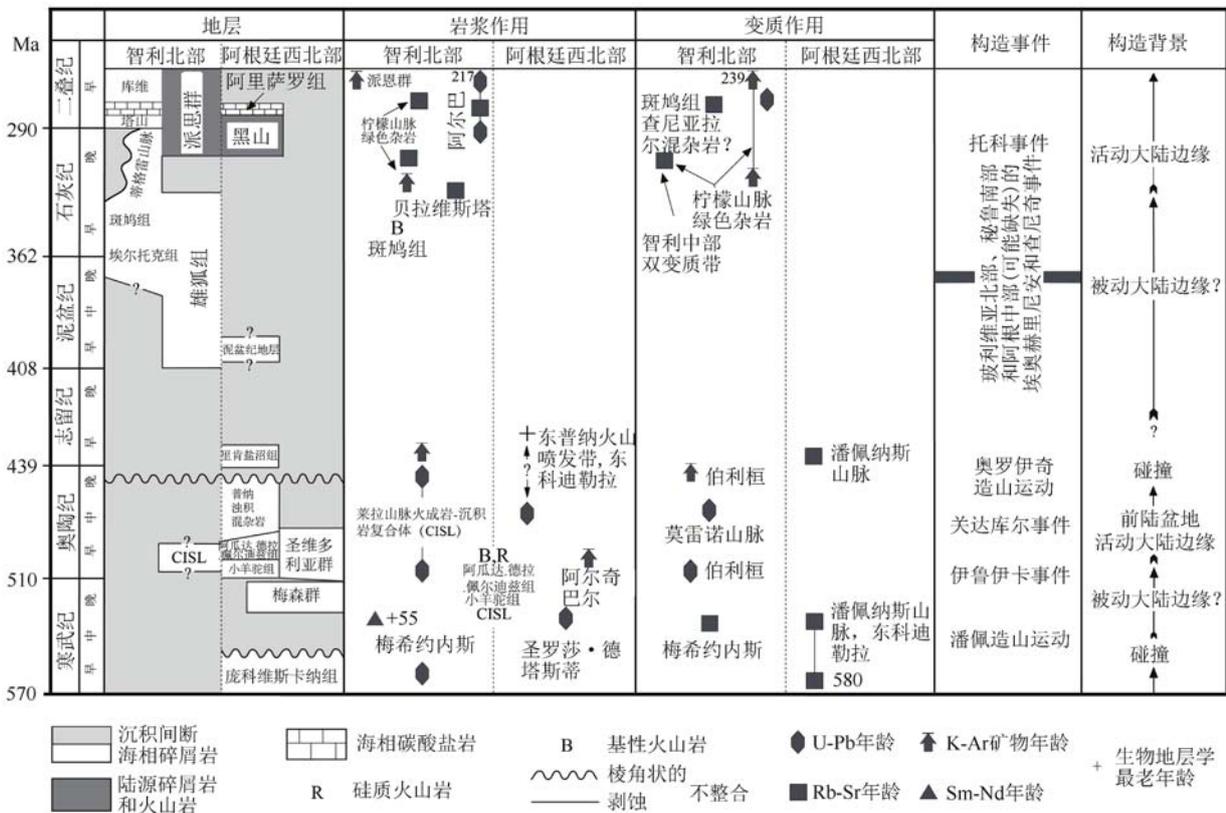


图3 智利北部和阿根廷西北部地层、岩浆作用、变质作用和构造事件^[15]

Fig. 3 Synopsis of stratigraphy, magmatism, metamorphism, and tectonic events in northwestern Argentina and northern Chile^[15]

2 成矿方式

已有资料表明,世界范围内大多数大型-巨型斑岩铜矿产于与俯冲有关的弧环境,与俯冲带的钙碱性和埃达克岩浆作用以及岩石圈地幔的再活化有关^[17-18],但也可产于非俯冲^[19]或碰撞造山带及陆内环境(即大陆环境)^[20],大多数学者倾向于认为产出于大陆环境、具有埃达克岩特征的含矿岩浆起源于加厚下地壳的部分熔融。

在安第斯山脉中段的智利和阿根廷境内,赋存有15个大型斑岩铜矿床和至少50个矿化点(图1),是世界上首屈一指的铜矿富集带^[21-24]。以下对智利北部和阿根廷西北部分别讨论其成矿模式。

2.1 智利北部

智利北部,大多数矿床均分布在南纬16°到南纬39°的五个纵向线性亚带内,每个亚带都有一个明确的时间范围,白垩纪斑岩铜矿分布在最西部,虽向东逐渐变新,但是都分布在狭窄的范围内并被较晚期矿带叠加或切割^[18,22];大部分矿床与中性和钙碱性岩株有关,具有深源浅成特征,斑岩体和矿体产出不受围岩控制,而与大型断层、区域断裂有关;最西边的早白垩世斑岩铜矿明显与太平洋(纳斯卡)板块向东俯冲有关;向东俯冲的大洋板块,在到达一定深度时将发生脱水、变为榴辉岩相的岩石,随着榴辉岩相岩石的增多,在重力作用下将使俯冲板片撕裂,上涌的软流圈物质和热将导致上覆下地壳发生熔融,如果熔融了残留的榴辉岩相岩石,将形成埃达克质岩浆成矿系统,即发生俯冲板片断离岩浆作用(Slab-failure magmatism)^[25]。由于大西洋扩张事件导致南美大陆西移,不断“吞食”太平洋俯冲板块的作用是区域性的,因此,由俯冲板片断离引发的岩浆作用和成矿作用也是区域性的,新俯冲板片到一定深度和榴辉岩相岩石聚积到足够数量时,俯冲板片断离岩浆作用将再次发生,不同时代斑岩铜矿带沿活化的古生代拼接带、区域断裂反复就位^[21,24],这种成矿方式可能也是整个南美大陆西部斑岩铜矿带形成的主要方式,即所称安第斯型。

2.2 阿根廷西北部

造山过程中,地壳因挤压而缩短、增厚,地

表抬升形成山脉,地壳增厚将使等温面下降,深部的巨大压力可能导致出现榴辉岩相变质作用,这些因素都使造山带岩石圈下部变冷而致密,在重力上失稳。它一旦拆离、陷入下伏软流圈地幔,造山带将丢失山根,浅部应力场也由挤压转为拉伸,造成造山带塌陷,这是造山带向克拉通转化过程的浅部响应。“中美对比研究”表明^[25],中国东部(晚中生代)、美国西部(新生代)大规模成矿作用与太平洋板块并无直接关系,即为“非俯冲性质”,大规模成矿作用发生与加厚的造山带垮塌有关,大规模成矿受控于造山岩石圈去根、软流圈物质和热上涌引发的大规模岩浆活动,并将造山带垮塌过程分为三个阶段,以青藏高原为代表的造山带属于初始垮塌阶段,以美国西部科迪勒拉为代表的属于不完全垮塌阶段,以中国东部为代表的属于完全垮塌阶段^[25]。

阿根廷西北部主体位于普纳高原。有学者估计前科迪勒拉受到强烈挤压,横向缩短了95 km,呈横向一维地壳缩短^[12];通过分析潘皮亚纳山脉和前科迪勒拉中等深度地震的转换波走时,得出从东到西莫霍面由50 km连续增加到60 km的结论^[12],表明南美克拉通块体俯冲到古生代造山带之下形成了加厚或双倍地壳。地壳因挤压而缩短、增厚。地壳的增厚将使等温面下降,深部的巨大压力可导致榴辉岩相变质作用,使造山带岩石圈下部变冷而致密。在重力失稳、去根作用下,大量软流圈物质和热上涌并使下地壳熔融,而熔融古生代板片俯冲到深部的洋壳物质,有利于斑岩铜矿成矿系统形成;浅部应力场也由挤压转为拉伸,导致造山带垮塌。地球物理资料揭示,在Payenia火山南部,安第斯山脉的东侧38°~39°,通过磁电勘探确定存在“热根”,玄武岩区下地壳中存在的高导体可能是岩浆和/或流体储层^[26];东安第斯山坡之下有一个衰减地壳(~33 km)^[27],且与最南端的溢流火山吻合;根据二维密度模型获得的下地壳几何结构^[27]与高导电储层布格异常吻合^[26],表明阿根廷西北部的普纳高原确实经历了造山带去根、大量软流圈物质和热上涌、并使下地壳熔融过程,同时说明普纳高原起源于挤压状态下的“热隆升”。

安第斯主要山脉隆升在早中新世(18~15 Ma),中—晚中新世(14~7.5 Ma)前陆破裂^[28]可能标志着造山带垮塌开始,破裂前陆向东

拓展, 并伴随玄武质弧后火山作用、流纹质火山和主火山弧下的下地壳深熔作用。上地壳处于较长时期挤压状态, 在造山带垮塌后形成有利于斑岩铜矿床形成的区域性引张环境^[17,29]。智利近南北向纵向山谷、阿根廷西北部近南北向高山深盆形成的盐湖盆地等可以作为造山带垮塌浅部标志。阿根廷西北部造山带垮塌、岩石圈去根诱发了古生代 2 次拼贴形成的岩石圈不连续带再活化^[16,30]和大规模的岩浆-成矿活动。因此, 在中新世 (5 ~ 16 Ma) 发生的大规模铜 (金、钼) 成矿可能与造山带垮塌有关, 并获得内乌肯盆地北部中生代、新生代地层单元中碎屑锆石 U-Pb 年龄的支持^[31]。

众所周知, 南美大陆与非洲大陆分离是全球中生代发生的一件具有重要意义的重大地质事件, 伴随大西洋扩张, 太平洋板块不断被西移的南美大陆“吞食”, 从这个意义上讲, 上述 2 种斑岩铜矿成矿方式, 乃至南美安第斯山铜 (金) 成矿带形成, 与中生代以来南美大陆向西漂移、大西洋张开事件关系密切。

3 结论

(1) 智利北部、阿根廷西北部中生代斑岩铜矿形成于古生代地体拼贴造山带背景; 中生代随大西洋张开南美大陆向西漂移, 克拉通块体俯冲到古生代造山带之下形成加厚或双倍地壳, 伴随热隆升形成高原。

(2) 智利中北部以安第斯型为主, 斑岩铜矿成矿作用与洋-陆俯冲有关, 不同时期的太平洋 (纳斯卡) 板块俯冲断离岩浆作用导致的成矿沿再活化岩石圈不连续 (古生代拼接带、区域断裂) 反复就位; 阿根廷西北部大规模铜 (金、钼) 成矿与加厚的造山带垮塌有关, 大规模成矿受控于造山岩石圈去根、软流圈物质和热上涌引发的大规模岩浆活动。

(3) 智利北部、阿根廷西北部安第斯型和造山带垮塌型斑岩铜矿, 乃至南美安第斯山铜 (金) 成矿带形成, 与大西洋张开事件关系密切。

参考文献/References

- [1] MALONEY K T, CLARKE G L, KLEPEIS K A, et al. The Late Jurassic to present evolution of the Andean margin: Drivers and the geological record [J]. *Tectonics*, 2013, 32 (5): 1049 - 1065.
- [2] EDUARDO O Z. Servicio geologico minero argentino insllthho de geologfa y recursos minerales, anales no 44. Mapa Metalogenetico De America Do Sul Metallgenic Map of South America, 1: 5, 000, 000, Memoria Explicativa/Explanatory Text. Es propiedad del instituto de geologla y recursos minerales-segemar [M]. Prohibida su reproduccion Armado y disenio editorial: OSVALDO D. CACCAGLIO. 2005.
- [3] RICHARDS J P. Tectono - magmatic precursors for porphyry Cu- (Mo-Au) deposit formation [J]. *Economic Geology*, 2003, 98 (8): 1515 - 1533.
- [4] SILLITOE R H. Porphyry copper systems [J]. *Economic Geology*, 2010, 105 (1): 3 - 41.
- [5] KHOMICH V G, BORISKINA N G, SANTOSH M. A geodynamic perspective of world-class gold deposits in East Asia [J]. *Gondwana Research*, 2014, 26 (3 - 4): 816 - 833.
- [6] BERTRAND G, GUILLOU - FROTTIER L, LOISELET C. Distribution of porphyry copper deposits along the Western Tethyan and Andean subduction zones: Insights from a paleotectonic approach [J]. *Ore Geology Reviews*, 2014, 60: 174 - 190.
- [7] RAMOS V A. The tectonic regime along the Andes: Present-day and mesozoic regimes [J]. *Geological Journal*, 2010, 45 (1): 2 - 25.
- [8] SCHELLART W P. Overriding plate shortening and extension above subduction zones: A parametric study to explain formation of the Andes mountains [J]. *Geological Society of America Bulletin*, 2008, 120 (11 - 12): 1441 - 1454.
- [9] BUTTERWORTH N, STEINBERG D, M? LLER R D, et al. Tectonic environments of South American porphyry copper magmatism through time revealed by spatiotemporal data mining [J]. *Tectonics*, 2016, 35 (12): 2847 - 2862.
- [10] COOKE D R, HOLLINGS P, WALSH J L. Giant porphyry deposits: characteristics, distribution, and tectonic controls [J]. *Economic Geology*, 2005, 100 (5): 801 - 818.
- [11] RICHARDS J P. Giant ore deposits formed by optimal alignments and combinations of geological processes [J]. *Nature Geoscience*, 2013, 6 (11): 911 - 916.
- [12] REGNIER M, CHIU J M, SMALLEY R, et al. Crustal thickness variation in the Andean foreland, Argentina, from converted waves [J]. *Bulletin of the Seismological Society of America*, 1994, 84 (4): 1097 - 1111.
- [13] DALZIEL I W D, FORSYTHE R D. Andean evolution and the terrane concept [C] //HOWELL D G. *Tectonostratigraphic Terranes of the Circum - Pacific Region*: Circum-Pacific-Council for Energy and Mineral Resources Earth Science Series. 1985, 1: 565 - 581.
- [14] RAMOS V A. Tectonics of the late proterozoic-early paleozoic: A collisional history of Southern South America [J]. *Episodes*, 1988, 11 (3): 168 - 174.
- [15] BAHLBURG H, HERV? F. Geodynamic evolution and tectonostratigraphic terranes of northwestern Argentina and northern Chile [J]. *GSA Bulletin*, 1997, 109 (7): 869 -

- 884.
- [16] 邱瑞照, 李廷栋, 周肃, 等. 中国大陆岩石圈物质组成及演化 [M]. 北京: 地质出版社, 2006: 1-308.
 QIU Ruizhao, LI Tingdong, ZHOU Shu, et al. the composition and evolution of lithosphere in China continent [M]. Beijing: Geological Publishing House, 2006: 1-308 (in Chinese).
- [17] GRIFFIN W L, BEGG G C, O'REILLY S Y. Continental-root control on the genesis of magmatic ore deposits [J]. *Nature Geoscience*, 2013, 6 (11): 905-910.
- [18] KAY S M, MPODOZIS C. Central Andean ore deposits linked to evolving shallow subduction systems and thickening crust [J]. *GSA Today*, 2001, 11 (3): 4-9.
- [19] 严光生, 邱瑞照, 连长云, 等. 中国大陆斑岩铜矿资源潜力定量评价 [J]. *地学前缘*, 2007, 14 (5): 27-41.
 YAN Guangsheng, QIU Ruizhao, LIAN Changyun, et al. Quantitative assessment of the resource potential of porphyry copper systems in China [J]. *Earth Science Frontiers*, 2007, 14 (5): 27-41. (in Chinese with English abstract)
- [20] 侯增谦, 杨志明. 中国大陆环境斑岩型矿床: 基本地质特征、岩浆热液系统和成矿概念模型 [J]. *地质学报*, 2009, 83 (12): 1779-1817.
 HOU Zengqian, YANG Zhiming. Porphyry deposits in continental settings of China: geological characteristics, magmatic-hydrothermal system, and metallogenic model [J]. *Acta Geologica Sinica*, 2009, 83 (12): 1779-1817. (in Chinese with English abstract)
- [21] MAKSAEV V, ALMONACID T A, MUNIZAGA F, et al. Geochronological and thermochronological constraints on porphyry copper mineralization in the Domeyko alteration zone, northern Chile [J]. *Andean Geology*, 2010, 37 (1): 144-176.
- [22] SILLITOE R H, COOPER C, SALE M J, et al. Discovery and geology of the Esquel low-sulfidation epithermal gold deposit, Patagonia, Argentina [C] //GOLDFARB R J, NIELSEN R L. *Integrated Methods for Discovery: Global Exploration in the 21st Century*. SEG Special Publication 9. Society of Economic Geologists, 2002: 227-240.
- [23] VILA T, LINDSAY N, ZAMORA R. Geology of the Manto Verde copper deposit, Northern Chile: a specularite-rich, hydrothermal-tectonic breccia related to the Atacama Fault Zone [C] //CAMUS F, SILLITOE R H, PETERSEN R. *Andean copper deposits; new discoveries, mineralization style and metallogeny*. Society of Economic Geologists Special Publication, 1996, 5: 1-198.
- [24] ZENTILLI M, MAKSAEV V, BORIC R, et al. Spatial coincidence and similar geochemistry of Late Triassic and Eocene-Oligocene magmatism in the Andes of northern Chile: evidence from the MMH porphyry type Cu-Mo deposit, Chuquicamata District [J]. *International Journal of Earth Sciences*, 2018, 107 (3): 1097-1126.
- [25] 邱瑞照, 李小伟, 周肃, 等. 北美科迪勒拉山系中生代大陆拼合 [M]. 北京: 地质出版社, 2017: 1-238.
 QIU Ruizhao, LI Xiaowei, ZHOU Shu, et al. Mesozoic assembly of the north American cordillera [M]. Beijing: Geological Publishing House, 2017: 1-238. (in Chinese)
- [26] BRASSE H, SOYER W. A magnetotelluric study in the Southern Chilean Andes [J]. *Geophysical Research Letters*, 2001, 28 (19): 3757-3760.
- [27] YUAN X C, ASCH G, BATAILE K, et al. Deep seismic images of the Southern Andes [C] //KAY S M, RAMOS V A. *Late Cretaceous to recent magmatism and tectonism of the Southern Andean Margin at the latitude of the Neuquen Basin (36-39°S)*. Geological Society of America, Special Paper, 2006, 407: 61-72.
- [28] RAMOS V A, LITVAK V D, FOLGUERA A, et al. An Andean tectonic cycle: From crustal thickening to extension in a thin crust (34°-37°SL) [J]. *Geoscience Frontiers*, 2014, 5 (3): 351-367.
- [29] RICHARDS J P, BOYCE A J, PRINGLE M S. Geologic evolution of the Escondida area, northern Chile: a model for spatial and temporal localization of porphyry Cu mineralization [J]. *Economic Geology*, 2001, 96 (2): 271-305.
- [30] 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: 1-598.
 QIU Ruizhao, TAN Yongjie, ZHU Qun, et al. Metallogenic regularity of important metallogenic belts in China and adjacent areas [M]. Beijing: Geological Publishing House, 2013: 1-596. (in Chinese)
- [31] HORTON B K, FUENTES F, BOLL A, et al. Andean stratigraphic record of the transition from backarc extension to orogenic shortening: A case study from the northern Neuquén Basin, Argentina [J]. *Journal of South American Earth Sciences*, 2016, 71: 17-40.