

玻利维亚铜金锡铁主要矿床类型及资源潜力

杜菊民¹, 毛大华², 姚仲友³, 张潮⁴, 祖辅平⁵, 连晨光¹, 景永波¹
DU Jumin¹, MAO Dahua², YAO Zhongyou², ZHANG Chao⁴, ZU Fuping³,
LIAN Chenguang¹, JING Yongbo¹

1. 江苏省地质工程有限公司, 江苏南京 210018;
2. 江西省地矿局赣东北地质大队, 江西上饶 334000;
3. 中国地质调查局南京地质调查中心, 江苏南京 210016;
4. 中国地质调查局发展研究中心, 北京 100037;
5. 西安石油大学地球科学与工程学院, 陕西西安 710065

1. *Jiangsu Geology and Engineering Co., Ltd., Nanjing 210018, Jiangsu, China;*
2. *Northeast Brigade of Jiangxi Geology Bureau, Shangrao 334000, Jiangxi, China;*
3. *Nanjing Center, China Geological Survey, Nanjing 210016, Jiangsu, China;*
4. *Development and Research Center, China Geological Survey, Beijing 100037, China;*
5. *School of Earth Sciences and Engineering, Xi'an Shiyou University, Xi'an 710065, Shaanxi, China*

摘要:玻利维亚的铜矿规模以中小型为主,主要成矿类型为红层型(砂岩层)、沉积相关脉状型、VMS型和IOCG型等。金矿规模以中小型为主,主要成矿类型有火山成因浅成热液型、与深成岩相关的脉状矿床、造山型矿床和砂金矿。锡矿发育众多大型、超大型矿床,成矿类型以玻利维亚型多金属脉状矿床和与长英质深成岩相关的脉状矿床为主,少量砂锡矿。铁矿以El Mutún超大型BIF型铁锰矿著称。西科迪勒拉和玻利维亚高原有重要的浅成低温热液贵金属资源潜力;东科迪勒拉北部主要为钨、锡、金、锑资源,中部为锡、银、金、锑资源,南部有金、锑、银、铅、锌潜力;次安第斯带南部有银-锌资源潜力;查科-贝尼平原带有广泛的砂金矿资源;前寒武纪克拉通内金、铂、镍、钽、铜和铁锰资源潜力丰富。

关键词:安第斯成矿带;铜金锡铁;成矿类型;矿产资源潜力;玻利维亚

中图分类号:P618.3;P618.4;P618.5 文献标志码:A 文章编号:1671-2552(2017)12-2308-14

Du J M, Mao D H, Yao Z Y, Zhang C, Zu F P, Lian C G, Jing Y B. Main ore deposit types and resource potential analysis of gold copper tin iron deposits in Bolivia. *Geological Bulletin of China*, 2017, 36(12):2308-2321

Abstract: This paper systematically summarizes the characteristics of mineralization types and resource potential of gold, copper, tin and iron deposits. The copper deposits are from small to medium in size in Bolivia, and the main mineralization types are red-bed copper, sediment-associated vein-type deposits, VMS, IOCG and some other types. The gold deposits are from small to medium in size, and the main deposit types are the volcanogenic epithermal deposits (vein-type or porphyry), vein-type deposits associated with felsic plutons, orogenic gold (\pm antimony) deposits and placer gold deposits. Bolivia has many large and superlarge tin deposits, and the typical mineralization types are "Bolivia-type" polymetallic veins and pluton-associated polymetallic vein deposits, with minor placer tin deposits. The superlarge Mutún iron-manganese deposit is hosted in Banded Iron Formation (BIF). Western Cordillera and Altiplano have important potentiality for discovering epithermal precious metal resources. North Eastern Cordillera mainly contains po-

收稿日期:2014-12-09;修订日期:2015-07-01

资助项目:中国地质调查局项目《海上丝绸之路大洋洲和南美洲矿产资源潜力评价》(编号:DD20160110)

作者简介:杜菊民(1979-),男,博士,高级工程师,从事固体矿产勘查与开发工作。E-mail:emaildjim79@163.com

通讯作者:毛大华(1964-),男,本科,高级工程师,从事地质矿产勘查与地质找矿。E-mail:maodhuhua@126.com

tential of tungsten, tin, gold, antimony resources, and central Eastern Cordillera has potential of tin, silver and gold, antimony resources, with gold, antimony, silver, lead and zinc in the south segment. Important silver-zinc resources occur in south Subandean. Chaco-Beni plain has extensive placer gold resources. Precambrian craton contains potential of gold, platinum, nickel, tantalum, copper, iron and manganese resources.

Key words: Andean metallogenic belt; copper-gold-tin-iron; ore deposits type; mineral resource potential; Bolivia

玻利维亚是世界最著名的矿产储藏国之一,据 Bertrand 等^[1]统计,玻利维亚已发现 884 个矿床,依据矿床规模,大型矿床有 21 个,中型矿床有 105 个。Arce Burgoa^[2]进一步对玻利维亚主要金属矿床进行了分类,识别出 14 种成矿类型(图 1),其中最出名的是玻利维亚型多金属脉状矿床,还有深成岩相关多金属脉状矿床、造山型金(锑)矿、浅成低温和过渡型脉状矿床、红层铜矿等。玻利维亚的矿产资源还未得到充分的勘探与开发,是当今世界最具勘查潜力的国家之一^[2]。本文系统阐述玻利维亚的金属成矿带划分,在此基础上对中国紧缺而玻利维亚有优势的铜、金、锡、铁等主要矿产资源的主要成矿作用类型进行介绍,进而对矿产资源潜力进行分析。

1 玻利维亚金属成矿带的划分及其主要成矿类型

玻利维亚由环太平洋成矿域安第斯成矿带和冈瓦纳成矿域南美成矿区组成^[4],可以进一步划分出 7 个金属成矿带(图 1):安第斯造山带的东科迪勒拉多金属成矿带、锡矿带、玻利维亚高原、西科迪勒拉多金属成矿带、查科-贝尼平原亚马孙含金盆地、前寒武纪巴拉圭克拉通金-锰成矿带、Sunsás 多金属成矿带和 Mutún-Tucavaca 铁锰成矿带^[2-3]。

1.1 东科迪勒拉多金属成矿带

该带延伸约 950km,走向 NW-SN 向,在构造位置上与东科迪勒拉山脉的内安第斯带相对应(图 1)。该成矿带内主要发育 2 种类型的矿床,一种是造山型金(锑)矿床,从秘鲁边界向南经 Yani-拉巴斯-奥鲁罗-Amayapampa-Carma 地区到阿根廷边界均有发育;另一种是发育于奥陶纪页岩中的脉状铅-锌-银矿床,主要发育在该成矿带南部。Arce Burgoa^[2]进一步将该成矿带划分为东科迪勒拉金(锑)成矿带和铅锌成矿带。本文着重介绍玻利维亚造山型金(锑)矿。

造山型金矿是指变质带中形成于造山作用晚阶段的金矿床,其成矿与变形变质主幕和地壳最大缩短相伴(形成于大陆生长的地区),成矿流体来

自中-下地壳(但可能也有深部岩浆流体),在变质带中的产出位置主要是先前的外弧环境,并受构造控制^[5-6]。玻利维亚造山型金(锑)矿主要分布在东科迪勒拉山脉中(图 1),可进一步划分出 3 个成矿区,其排列与中央安第斯主要地壳构造方向一致,部分与锡矿带重合^[7]。造山型金矿主要赋存在中奥陶世-一早志留世沉积岩中,少量在白垩纪(Tarapaya 组)海相页岩、板岩及粉砂岩中,形成带状、网状、鞍状及浸染状矿石。许多矿床,特别是在 Caracota-Carma-Candelaria 地区,锑品位高达 10%~20%。这些矿床一般经历过 2 期矿物共生事件,早期形成含金、黄铁矿、毒砂、钨的乳白色石英,晚期低温事件形成含铅-锌-铜-锑微粒、蓝灰色石英^[1]。

该类矿床通常长度大于 1000m,宽度小于 200m,受控于断层系统或背斜轴部。矿脉最常见的走向为 NE 向,倾向多变。单独矿脉走向延伸一般小于 500m,垂向深度小于 500m,矿脉宽度一般不超过 1m。含金(锑)石英脉常薄且平行于层理,也常见串珠状矿脉。其他矿化类型还有网状脉(如 San Luis, Challviri)、断裂带中的平行细脉群(如 Amayapampa, Milluri, Churina)、鞍状矿脉、拖曳褶皱中的矿脉、等斜褶皱中的矿脉等^[2,8]。矿脉中的矿石矿物主要有辉锑矿、自然金、闪锌矿、方铅矿等,脉石矿物主要是碳酸盐(白云石、铁白云石、菱铁矿、方解石)和石英。金常出现在石英、黄铁矿、毒砂和辉锑矿中,最常见的蚀变为黄铁绢英岩化。

此类矿床大多为中小型矿床,典型的矿床有 Yani-Aucapata, Apolobamba, Amayapampa, Iroco, Vinto, Cocapata, Carma, San Bernardino 等(图 1、图 2)。这些金矿也是次安第斯带和查科-贝尼平原大量砂金矿的来源^[2]。

1.2 锡成矿带

玻利维亚锡矿带延伸大约 900km,走向 NW-SN(图 1),在构造上与东科迪勒拉山脉瓦里纳褶皱带对应。高品位的热液锡矿脉(1%~5%),并含有明显的银和钨,在空间上与过铝质花岗岩和斑岩有关,时代上从晚二叠世到 4Ma,以新近纪为主。侵入

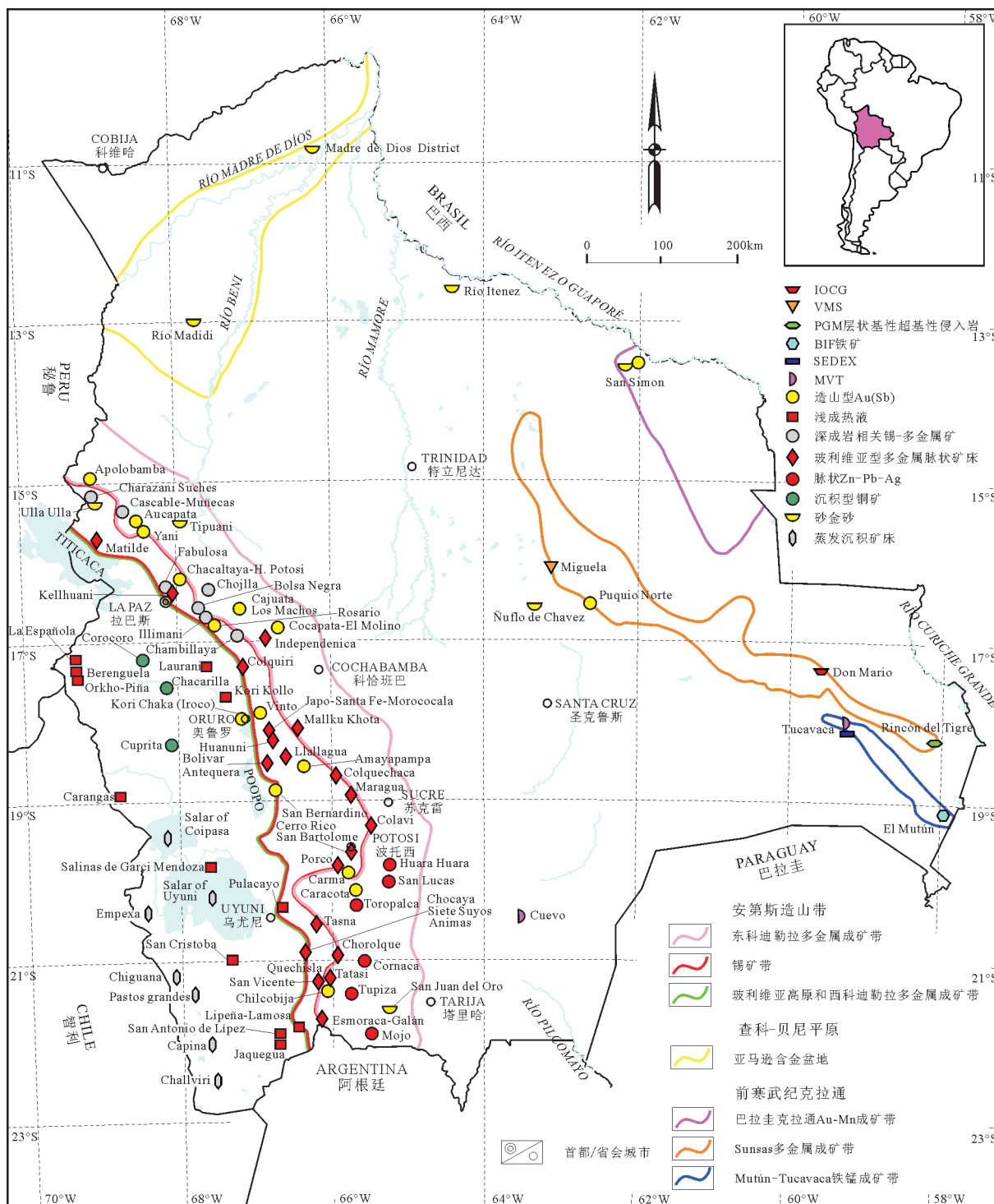


图1 玻利维亚金属成矿带划分、主要矿床类型与分布(据参考文献[1,3]修改)

Fig. 1 Metallogenic belt types and distribution of main ore deposits in Bolivia

岩主要由深部古生代岩石熔融而成^[2,8]。锡成矿带的矿床可以分为两大类型:玻利维亚型多金属脉状矿床和与深成岩相关的多金属脉状矿床。

1.2.1 玻利维亚型多金属脉状矿床

玻利维亚型多金属脉状矿床是玻利维亚最重要的成矿类型,最初由 Ludington 等^[9]定义,指主要

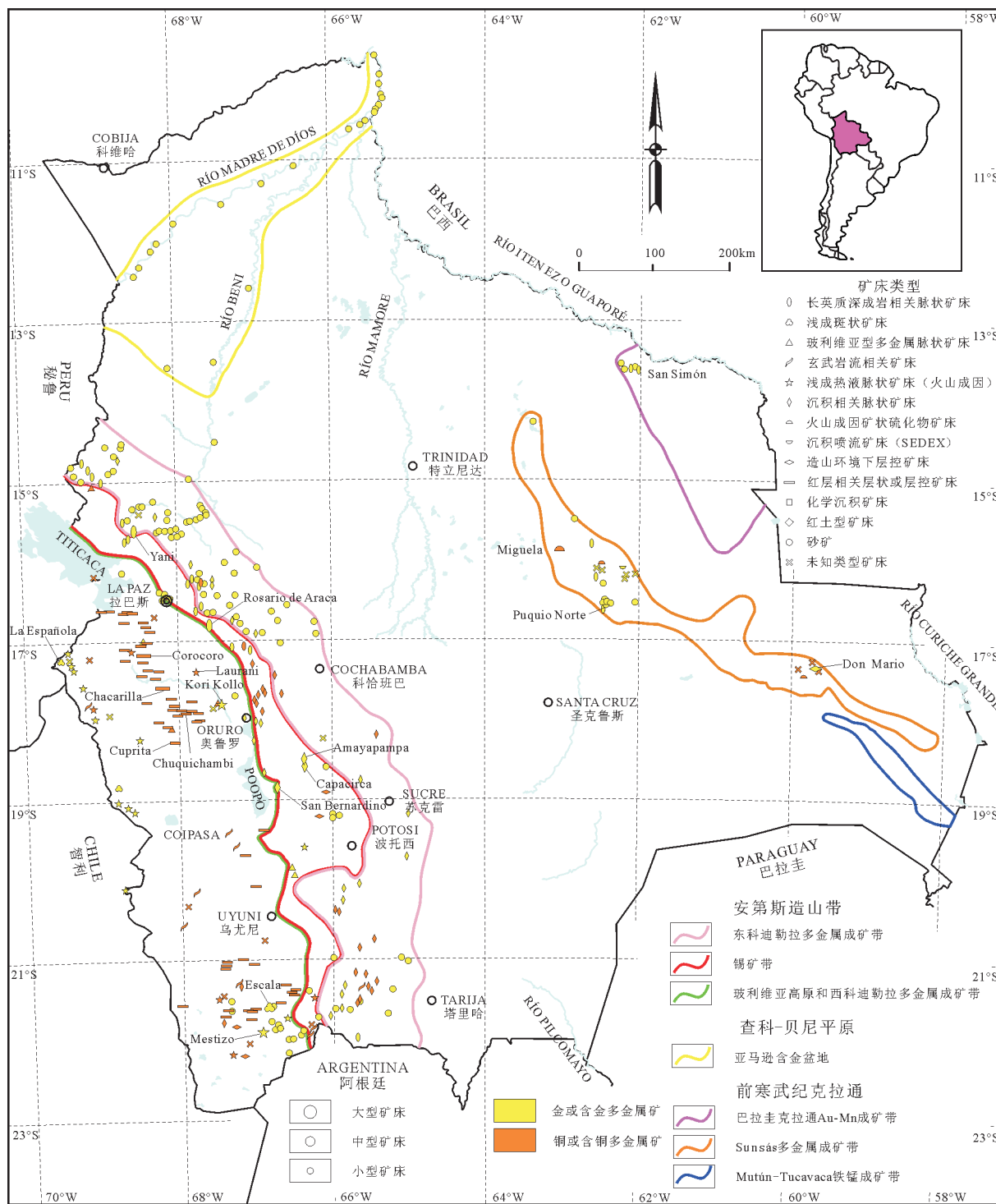


图2 玻利维亚主要铜、金矿床类型与分布(据参考文献[1]修改)

Fig. 2 Cu and Au deposit types and their distribution in Bolivia

发育在锡矿带南段,形成于22~4Ma,在空间上与过铝质花岗岩、斑岩侵入体相关,主要以脉状形式产出的高品位(1%~5%)锡矿脉,同时也赋存银、钨等

金属^[8,10-11](图3)。这类矿床发育许多著名的大型-超大型矿床,如Cerro Rico de Potosí、Oruro、Llallagua、Huanuni等(图4)。

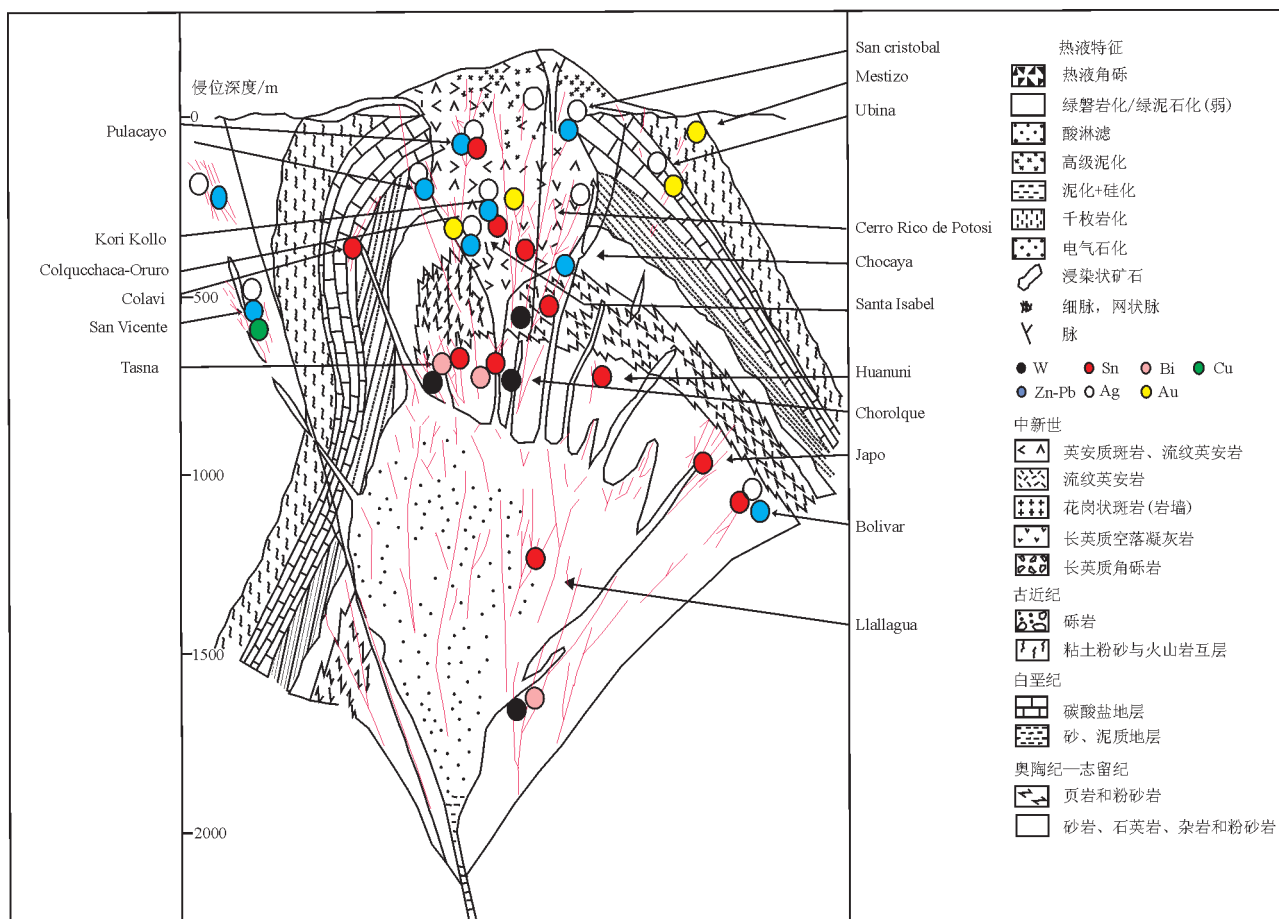


图3 玻利维亚多金属脉状矿床概念模型(据参考文献[1]修改)

Fig. 3 Conceptual model of polymetallic vein type ore deposits in Bolivia

玻利维亚型多金属脉状矿床一般经历叠加成矿阶段(低温和高温矿物共存),空间上与浅成或中成侵入作用有关,是大范围热液活动的产物。矿化作用的早期阶段为高温、高盐度和高压环境,暗示其形成深度大。由于受11~4Ma安第斯演化过程中晚期火山事件和表生过程的影响,矿床还经历了若干浅层次低温事件的叠加阶段^[1]。矿化作用的呈现方式(图3)包括脉状矿床群、次一级的脉状、细脉状、网状脉和弥散状矿化,矿床见于多类岩石中,包括古生代沉积岩和变质沉积岩、中成和浅成岩株,以及同造山的熔岩、岩脉和火山穹丘,后者多为流纹质、英安质和安山质成分。根据赋矿围岩的不同,可将玻利维亚型多金属脉状矿床进一步划分为3个亚类^[1-2]:①斑岩型锡矿床;②与火山穹丘和次火山岩株有关的矿床;③与沉积岩有关的矿床。

斑岩型锡矿床(图3)主要赋存在侵入到古生代

沉积地层中的次火山英安岩和二长安山岩中。火山岩广泛经历电气石化和/或长石化蚀变作用。锡矿化受裂隙、断层、角砾岩和剪切带构造控制,以脉状、细脉状、网脉状、浸染状等形式产出,常与钨-铋共生。最典型的矿床为Llallagua和Chorolque矿床(图3、图4)。

与火山穹丘和次火山岩岩株有关的玻利维亚型多金属脉状矿床(图3)通常与英安质、流纹英安质和石英安粗质次火山岩相关,伴随热液作用形成角砾岩筒和岩墙,典型的矿体呈圆形分布,直径近似1km,呈现出垂直分带特征,表面区域为低硫化物区域,有时富集金,中间区域为硫酸盐类和硫化物,富集银和/或金,深部区域富集贱金属元素、银、金和/或锡^[12]。这类矿床主要分布在锡矿带南部(图4),形成于18~13Ma^[1,13]。该矿床类型的实例包括Cerro Rico de Potosi、Oruro、Colquechaca、Maragua等(图1)。

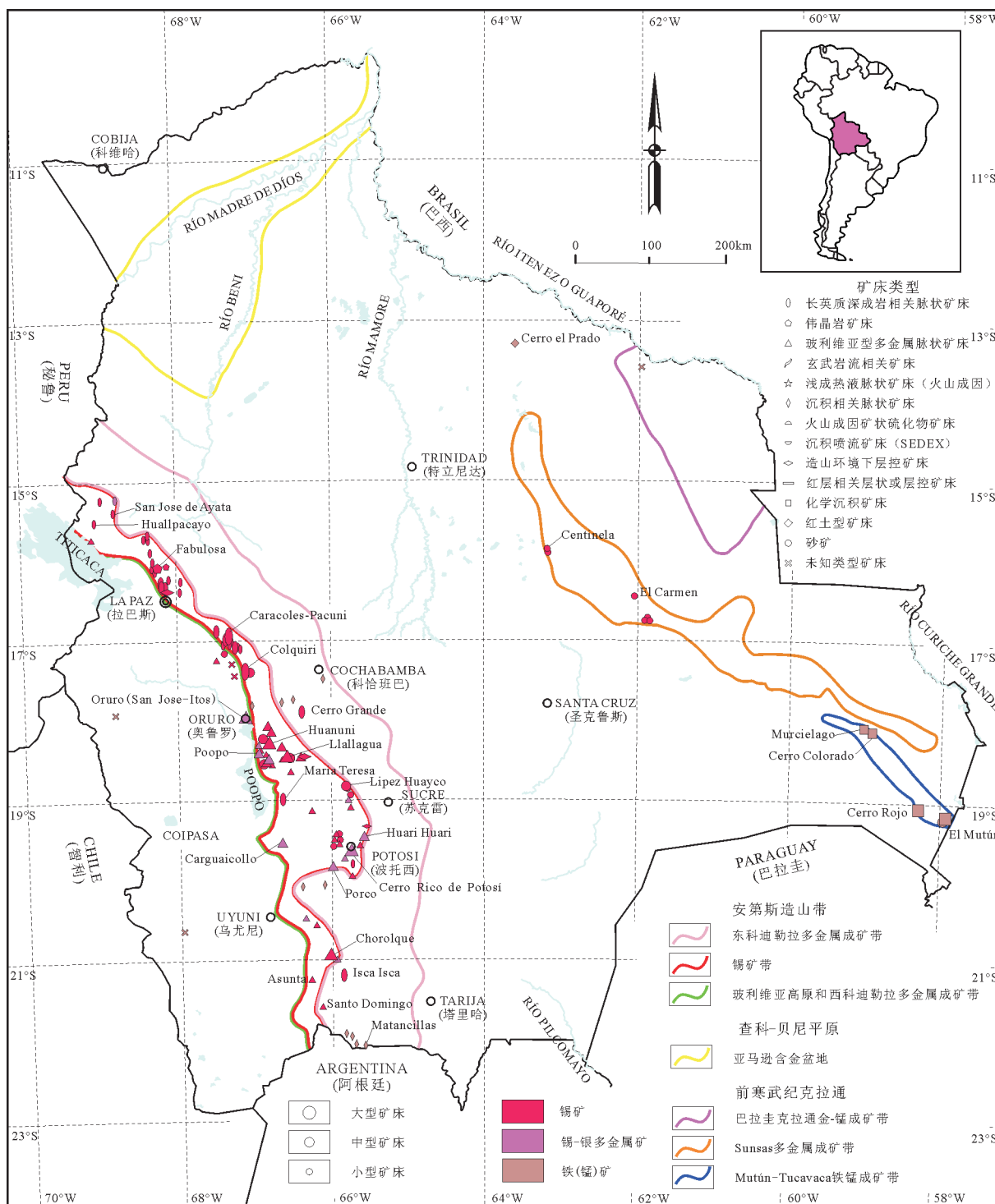


图 4 玻利维亚主要成矿带划分及锡、铁矿床类型与分布(据参考文献[1]修改)

Fig. 4 Metalliferous belts of Bolivia and Sn and Fe deposit types and locations

与沉积岩相关的玻利维亚型多金属脉状矿床(图 3),通常赋存在奥陶纪和古近纪、新近纪页岩、粉砂岩、砂岩和砾岩中,富含锡、银锌铅或金。围岩

通常具断层或剪切破碎,形成了有利容矿空间。高品位的矿脉通常被低品位网状脉和浸染状矿体包围^[1]。此类矿化的典型矿床或地区主要有 Huanuni、

Canadon Antequera 地区(包括 Bolivar、Avicaya)、San Vicente、Monserrat、Matilde等。

1.2.2 与深成岩相关的多金属脉状矿床

该类矿床指形成于长英质深成岩顶部区域,通常在时间和空间上与长英质深成岩体的侵位和冷却有关的多金属脉状矿床[14]。尽管这类矿床一般与金矿有关,但在玻利维亚,它们通常为锡多金属矿[2]。主要特征有(图5):①控矿岩性主要为晚奥陶世砂岩、板岩,多位于基岩的变质晕圈中;②控矿构造主要为伸展断裂、剪切带和区域性断层;③与深成岩关系密切,尤其是冷却的长英质深成岩顶部;④矿化类型多样,有顺层脉、网状脉、席状脉、细脉群等;⑤矿物组合特殊,有自然金、白钨矿、黑钨矿、黄铁矿、毒砂、闪锌矿

等;⑥脉石矿物主要为石英、菱铁矿、萤石等;⑦热液蚀变主要为绢云母化、黄铁矿化和硅化。长英质深成岩顶部或远端脉状矿床中常见金多金属矿床,而底部近岩体部位发育钨-锡矿床。

这类矿床主要分布在锡矿带内北部剥蚀程度较深的 Cordillera Real(图1),矿体赋存于古生代沉积岩、接触晕、伟晶岩和侵入杂岩中。存在2期主要矿化作用,早期为晚二叠世-侏罗纪,侵入岩与大量锡-钨±金-铋-锌-铅-银-锑脉状矿床相关,分布于 Cordillera Real 北段(如 Chojlla、Bolsa Negra等)。晚期为渐新世时期(28~19Ma),花岗岩类侵入到古生代沉积岩中形成锡多金属矿化,分布在 Cordillera Real 南段,2期矿床局部叠生,核部产出钨-锡±金矿,外围形成富贱金属矿脉[7]。

玻利维亚深成岩相关的锡多金属脉状矿床代表性矿床(区)包括 Cascabel-Munecas 成矿省、Chacaltaya-Huayna Potosi 成矿区、Kellhuani 矿床、La Solucion 矿床、Illimani 成矿区、Himalaya 矿床、Rosario de Araca-Laramcota 成矿区、La Chojlla 矿床、Chambillaya 矿床及 Colquiri 成矿区(图4)。

1.3 玻利维亚高原和西科迪勒拉多金属成矿带

玻利维亚高原和西科迪勒拉多金属成矿带长约800km,宽200km(图1),与西科迪勒拉造山带和玻利维亚高原位置大致对应,主要发育3种矿床类型:①火山成因浅成热液多金属矿床,分布在西科迪勒拉北段及玻利维亚高原南段;②红层铜矿,主要分布在玻利维亚高原南北两侧;③蒸发沉积矿床,分布在 Coipasa 和 Uyuni 盐湖及以南。本节仅介绍前两种矿床类型。

1.3.1 火山成因浅成热液矿床

玻利维亚浅成热液银-金-铅-锌-铜矿床主要分布在玻利维亚高原和西科迪勒拉多金属成矿带上(图1)。中一晚中新世及早上新世,火山作用及浅成岩浆活动形成了广泛分布的贵金属和贱金属浅成热液矿床[14,15]。大多数矿床受线性构造、大型横断层、局部张性断

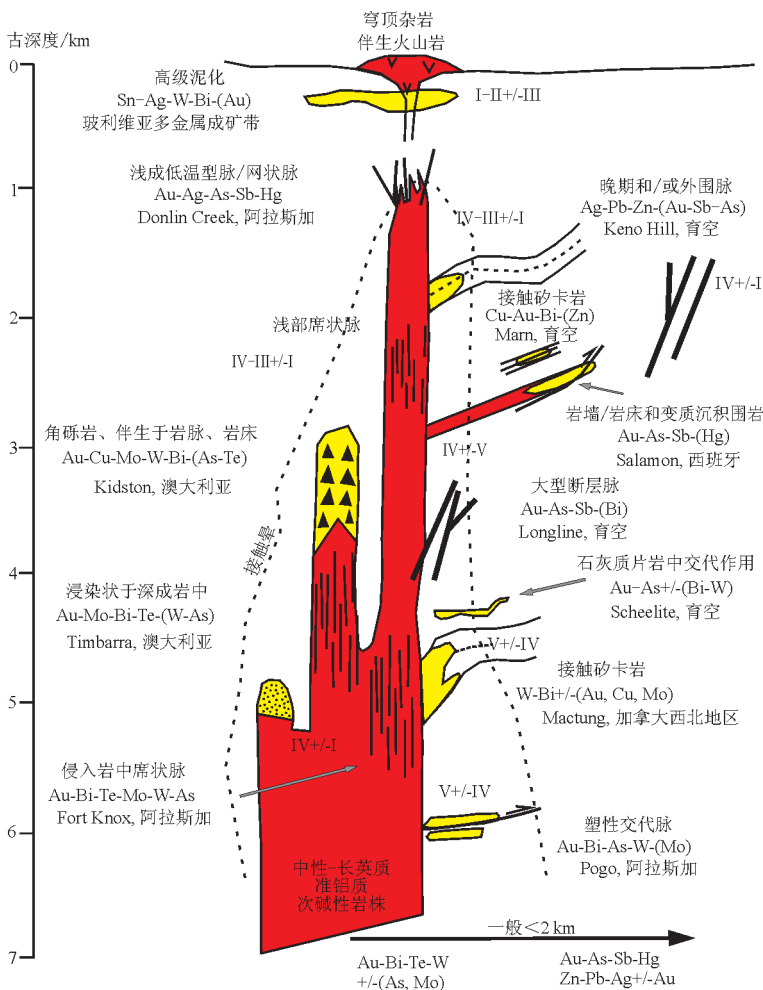


图5 深成岩相关脉状多金属矿床模式

(据参考文献[14]修改)

Fig. 5 Schematic geological model for intrusion-related gold system
热液流体: I—富流体水成低-中盐度; II—富蒸汽水成低盐度;
III—高盐度; IV—CO₂-H₂O +/- CH₄; V—CH₄-CO₂-H₂O

裂控制。矿化类型有脉状和网状脉、角砾岩中浸染状、多孔火山碎屑岩和斑岩等。矿化岩石一般呈条带状、角砾状、晶簇-晶洞状^[12]。在垂向上金属矿化常呈带状分布,底部富铜、锌-铅(银)、铅-(银),顶部富银-(金)^[7]。热液蚀变一般呈透入性及分带性特点,核部表现出绢英岩化或硅化蚀变,广泛发育泥化和/或青磐岩化圈晕,顶部带蚀变成高级泥化组合物或硅质栓(silicic plugs)。最主要的成矿类型为中硫和高硫化态型,与小型的浅成斑状次火山栓、层状火山岩、火山碎屑岩、熔结凝灰岩,以及英安质、流纹-英安质、流纹质或安山质火山口相关^[2]。

玻利维亚富银的浅成热液矿床主要是中间硫化态型,典型矿床有Pulacayo^[15]、Berenguela、Carangas、San Cirstobal^[16]等,高硫化态型浅成热液矿床数量少一些,主要有Laurani、La Española。还有一些矿床成因有争议,如形成于15.7Ma的Kori Kollo矿床,历史产量金高达167t和银907t,是1990年代南美开采的最大金矿^[8],一些学者认为是与侵入岩相关型金矿床^[17],还有些学者认为是中间硫化态或过渡型浅成热液矿床^[2,7-8]。

1.3.2 红层铜矿

在玻利维亚高原,存在大量中新世—上新世的红层铜矿,从Titicaca湖地区南部一直向南延伸至阿根廷边界(图2)。一般红层铜矿床规模为小型,每个矿床的铜储量为1~2t,仅Corocoro和Chacarilla矿床为中型^[2]。矿床中存在2种类型的矿体,辉铜矿体赋存在浅灰色长石砂岩和砂岩中,可能是同生成因,自然铜矿体赋存在红色砂岩中,可能与早期岩浆活动形成矿化的后期氧化有关^[18]。这些矿体呈层状发育于砂岩而不是页岩中^[19]。尽管玻利维亚红层铜矿分布范围较广,但没有发育大型矿床,可能是由于在陆相红层之上缺乏形成世界级矿床所需的大范围海侵层序^[7]。

红层铜矿床的主要成矿特征有:①岩性控制:微红色-褐色砂岩、砾岩、粉砂岩,以及石膏底辟;②构造控制:背斜、复背斜,以及逆断层和正断层;③矿体形态:席状、透镜状、细脉状、不规则状、细粒浸染状矿体,部分矿点中,存在成岩作用阶段铜交代黄铁矿颗粒的现象;④矿石矿物:辉铜矿、斑铜矿、黄铜矿、赤铜矿、孔雀石、黑铜矿,此外常见黄铁矿、方铅矿和自然银,并可见辉铜矿和自然铜交代碳酸盐胶结物和古植物;⑤脉石矿物:主要为

方解石;⑥热液蚀变作用:弱-中等绿泥石化。

1.4 亚马孙含金盆地成矿带

Great Madera、Madre de Dios、Beni和Mamoré河流及其大量支流,从中央安第斯山脉含大量古生代造山金矿床的东北斜坡流出,横贯查科-贝尼平原北部,其中一些河流含工业品位的砂金,即定义了所谓的亚马孙含金盆地(图2)。

1.5 前寒武纪克拉通成矿带

玻利维亚前寒武纪克拉通成矿带由3个次级金属成矿带组成,包括巴拉圭克拉通金-锰成矿带、Sunsás多金属成矿带及Mutún-Tucavaca铁-锰成矿带(图2)。这些次级成矿带大致呈NW—SE走向,近平行排布,空间和成因上与San Ignacio、Sunsás和Tucavaca造山带有关^[2]。巴拉圭克拉通金-锰成矿带位置接近巴西边界,以发育San Simón金矿为代表,含金矿脉常沿褶皱鞍部产出。Sunsás多金属成矿带位于Sunsás省西部,以发育Puquio Norte金矿、Don Mario铁氧化物铜金矿为代表。本文主要介绍Mutún-Tucavaca铁-锰成矿带。

Mutún-Tucavaca铁-锰成矿带的形成与巴西沉积旋回(650~570Ma)关系密切,是Paraguay-Araguaia盆地(N—S)和Tucavaca(WNW—ESE)盆地裂谷扩张所致。重要的金属矿床主要集中在东部的条带状含铁建造中,是玻利维亚前寒武纪克拉通中最大的矿产资源^[20](图6)。该地区的超大型BIF型铁矿属Rapitan型,主要由赤铁矿和碧玉铁质岩组成,成因模式尚未完全确定,但是,所提出的模式应当满足形成于陆缘海相盆地、气候控制沉积作用、火山-海水热水作用等条件^[21]。El Mutún矿层赋存在Jacadigo群火山-沉积序列中,年龄650~600Ma,铁矿赋存在海拔200~800m的山脊中,矿层厚度100~320m,由下至上为:①与裂谷相关火山碎屑岩流;②未成熟碎屑沉积物(扇积砾、长石砂岩);③冰川碎屑沉积物(混杂岩、长石砂岩、岩屑碎屑岩)与条带状铁锰矿互层^[2]。

2 铜金锡铁等矿床主要类型及其分布

2.1 铜矿床类型与分布

玻利维亚铜矿资源目前已探明储量0.74Mt,远景储量4.6Mt^[2]。铜矿主要类型是红层铜矿,分布在玻利维亚高原地区,53处为小型铜矿,仅有2处是中型铜矿^[14],分别是拉巴斯-奥鲁罗之间的Corocoro铜矿和Chacarilla铜矿(图2)。2处中型铜矿共含20Mt

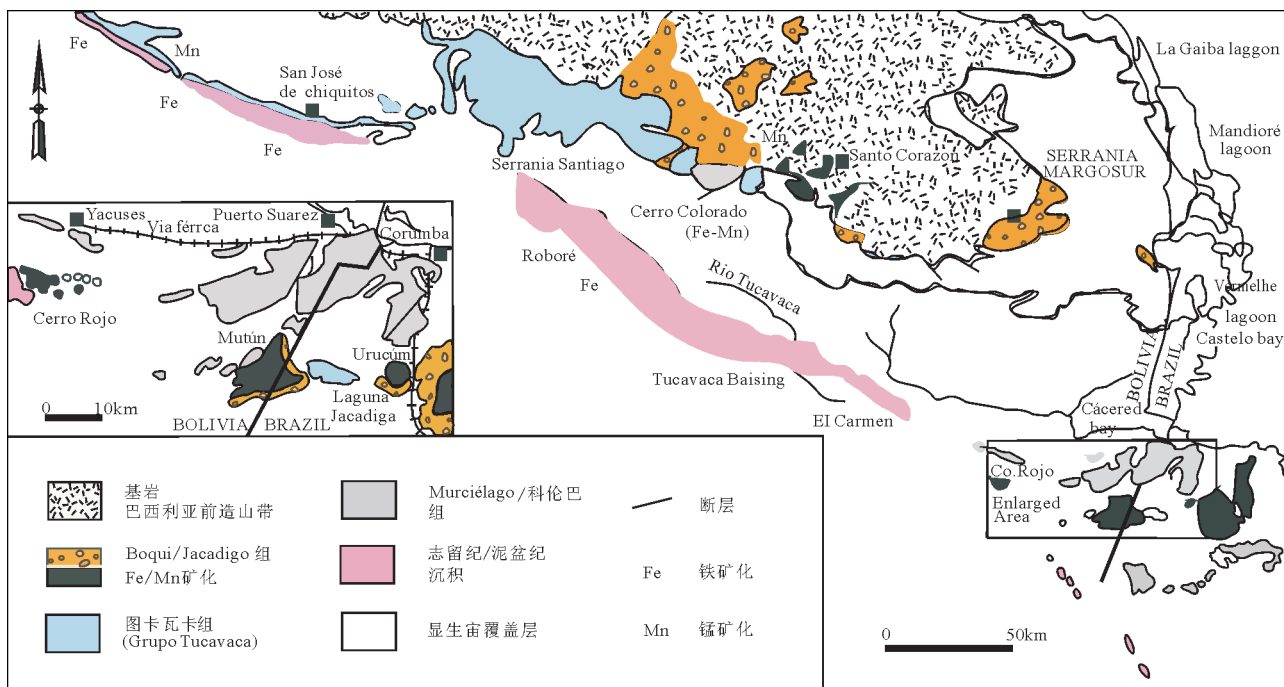


图6 玻利维亚前寒武纪克拉通地质简图(据参考文献[20]修改)

Fig. 6 Geological sketch map of Precambrian craton of Bolivia

铜矿石,含金属铜 0.3Mt,平均品位 1.5%;红层铜矿还分布在 Chuquichambi 地区,有 3Mt 铜矿石,含金属铜 0.1Mt,平均品位 1.7%;在 Azurita—Cuprita—Tenorita 地区,有 12Mt 铜矿石,含 0.2Mt 金属铜,平均品位 1.45%;在 Lipez 地区,有 9Mt 铜矿石,含 0.1 Mt 金属铜,平均品位 0.12%^[2]。近年来,部分红层铜矿经过系统勘探,扩大了资源量^[22]。

除上述红层铜矿外,玻利维亚铜矿资源还以共生或伴生形式赋存在多种类型的金属矿床中,主要类型有火山成因硫化物矿床(Miguela)、铁氧化物铜金型矿床(Don Mario)、玻利维亚型多金属脉状矿床(San Vicente—Monserat)和浅成热液型矿床(San José de Berenguela、Lipeña—Lamosa、Pacuani)^[2]。

2.2 金矿床类型与分布

玻利维亚金矿资源丰富,目前探明储量约 200t,远景资源量 2099t^[2]。据 Bertrand 等^[1]统计,发育 9 个中型矿床,193 个小型矿床,主要分布在西科迪勒拉造山带、东科迪勒拉造山带、亚马孙含金盆地、巴拉圭金—锰成矿带和 Sunsás 多金属成矿带内(图 2)。主要成矿类型有火山成因浅成热液型金矿床、造山型金矿、IOCG 型铜金矿和砂金矿^[1,3]。

火山成因浅成热液型金或含金多金属矿床是玻

利维亚金资源主要成矿类型之一,主要分布在西科迪勒拉构造带内。以金为主的矿床规模大多为小型,中型矿床仅有 Escala(金—铋±银)、Mestize(金±银±锌±铅±铜±钼)和 Kori Kollo(金—银)。此外还发育大量含金的银—金—贱金属矿床,其中规模较大的有 Laurani、Pulacayo、Tasna、Lipeña—Lamosa 等(表 1)。

造山型金矿床主要分布在东科迪勒拉山脉,目前发现超过 500 个造山型金(铋)矿床(点),分布走向与造山带走向一致^[2]。矿床规模以小型为主,达到中型以上的矿床有 Yani、Rosario de Araca、Amayapampa、Capacirca、San Bernardino 等(表 1)。

其他类型含金矿床,如前寒武纪克拉通内火山成因块状硫化物型矿床 Miguela,含金 5.3t,银 56.5t,铁氧化物铜金型矿床 Don Mario,含金 21t,银 254t,铜 82000t(表 1)。冲积型砂金矿主要分布在东科迪勒拉的北东坡,沿 Madera、Beni 和 Madre de Dios 河发育,规模以小型为主,在亚马孙含金盆地等地区的河流中还发育大量的砂金矿(图 2)。至 2008 年整个玻利维亚估计共采出超过 1200t 金^[2]。

2.3 锡矿床类型与分布

玻利维亚锡矿已探明金属储量 0.4Mt,远景资源量 7.33Mt^[2]。锡矿主要成矿类型是玻利维亚型多

表 1 玻利维亚主要金(银、铜、锑、铋)矿床(据参考文献[2]修改)
Table 1 Major gold (silver, copper, antimony, bismuth) deposits in Bolivia

矿床名称	构造带	矿床类型	当前状态	估计历史产量	当前资源量	品位
Yani-Aucapata Gold district	东科迪勒拉	造山型金(锑)	地下开采	5t Au	15t Au	3.8g/t Au
Liphlehi	东科迪勒拉	造山型金(锑)	未开采	2t Au	9.5t Au	3.8g/t Au
Apolobamba Gold district	东科迪勒拉	造山型金(锑)	地下开采	10t Au	84t Au	7g/t Au
Rosario de Araca	东科迪勒拉	造山型金(锑)	历史地下开采	5t Au	34t Au	1.3~2.5g/t Au
Kori Kollo	玻利维亚高原	Transitional	历史露天开采	167t Au, 907t Ag	8t Au, 40t Ag	2 g/t Au, 11g/t Ag
San Bernardino	玻利维亚高原	造山型金(锑)	未开采	1t Au	72t Au	1.4g/t Au
Laurani	玻利维亚高原	浅成低温热液	历史地下开采	0.5t Au, 0.3Mt Cu, 40t Ag	20t Au, 1Mt Cu, 1500t Ag	1g/t Au 8% Cu, 40g/t Ag
Iroco (Kori Chaka)	玻利维亚高原	造山型金(锑)	露天开采	30t Au	5t Au	0.7g/t Au
Vinto	玻利维亚高原	造山型金(锑)	未开采	0.3t Au	9t Au	1.1g/t Au
Amayapampa district	东科迪勒拉	造山型金(锑)	未开采	2t Au	17t Au	1.68g/t Au
Mallku Khota	东科迪勒拉	造山型金(锑)	未开采	未知	1700t Ag, 14t Au	50g/t Ag, 0.4g/t Au
Cajuata district	东科迪勒拉	造山型金(锑)	地下开采	7t Au, 0.01Mt Sb	50t Au, 0.06Mt Sb	5g/t Au, 2% Sb
Cocapata Gold district	东科迪勒拉	造山型金(锑)	历史地下开采	2t Au, 0.05Mt Sb	20t Au, 0.4Mt Sb	1g/t Au, 2% Sb
Carma	东科迪勒拉	造山型金(锑)	历史地下开采	0.2t Au	23.5t Au	1.5g/t Au
Pulacayo	玻利维亚高原	浅成低温热液	勘探	1t Au, 5000t Ag	77t Au, 7153t Ag	65g/t Ag, 0.7g/t Au
Tasna	东科迪勒拉	Transitional	地下开采	0.5t Au, 0.05Mt Bi	48t Au, 0.5Mt Bi	1.2g/t Au, 1.3% Bi
Lipeña-Lamosa	西科迪勒拉 (Lípez)	Transitional	未开采	0.05t Au, 10000t Cu, 0.3Mt Ag	15t Au, 0.14Mt Cu, 8Mt Ag	1.5~1.8g/t Au, 1.5%~2% Cu, 30g/t Ag
Don Mario	前寒武纪克拉通	IOCG	地下及露天开采	10t Au, 100t Ag, 40000t Cu	21t Au, 254t Ag, 82000t Cu	1.4g/t Au, 47g/t Ag, 1.5% Cu
San Simón	前寒武纪克拉通	造山型金	历史地下开采	2t Au	20t Au	5g/t Au
Miguela	前寒武纪克拉通	VMS	未开采	---	5.3t Au, 56.5t Ag	1.26g/t Au, 11.3g/t Ag
Puquio Norte	前寒武纪克拉通	造山型金	历史露天开采	28t Au	---	2.8g/t Au

金属脉状矿床、与长英质深成岩相关的脉状矿床和砂锡矿,主要分布在锡矿带内(图4)。据 Bertrand 等^[1]统计,共发现大型矿床 5 个,中型矿床 23 个,小型矿床 52 个,其中大多为不含银的锡矿床;少数锡矿与银、铅、锌等组成复合型矿床,目前已发现大型床 1 个,中型矿床 5 个,小型矿床 6 个。玻利维亚型多金属脉状矿床主要分布在锡矿带的中南部;与长英质深成岩相关的脉状矿床主要分布在锡矿带的中北部(图4)。这些矿床许多被划分成超大型矿床,如 Llallagua 矿床含锡 0.8Mt、Huanuni 矿床含锡 0.55Mt^[4]。

Llallagua 位于 Oruro 南—南东 75km(图 1),曾是世界上最富的锡矿床^[23]。自 20 世纪初开始开采,共产出了大于 1Mt 锡,现在已过了生产最高峰,但仍在开采中(表 2)。

Cerro Rico de Potosí 多金属矿(图 4)自 1500 年就开始开采,是世界上最大的银矿^[24],迄今已产出了银 60000t,锡 0.2Mt,估计仍有银 55182t 和锡 0.8Mt,

品位分别为 102g/t 和 0.15%(表 2)。

Huanuni 位于 Oruro 城市南东 45km,发现于 1745 年,是玻利维亚最重要的锡矿,也可能是目前发现的世界上最大的锡矿。矿床中央与斑状岩体侵入有关,矿脉中主要产出锡,远端矿脉中富锌—铅^[25]。迄今已产出锡 0.1Mt,估计仍有 0.2Mt,平均品位达 3%(表 2)。

2.4 铁矿床类型与分布

玻利维亚铁矿资源量超过 400×10^8 t,成矿类型以超大型 BIF 铁矿为主,发育在与巴西交界的前寒武纪克拉通内(图 6),其他类型的铁矿均为小型,在安第斯造山带内零星出露(图 4)。

在圣克鲁斯省 El Mutún 地区的长达 300km 的铁锰成矿带,面积约 84km²。该带出露 El Mutún 和 Cerro Rojo 两个铁矿,El Mutún 铁矿预测铁矿资源量达 402×10^8 t,品位 45%~65%,并有 1.8×10^8 t 品位 42% 的锰矿石;Cerro Rojo 铁矿含 5×10^8 t 品位约 50% 的铁矿

表2 玻利维亚主要锡(银)及贱金属矿床(据参考文献[2]修改)

Table 2 Major tin (silver) and base metal deposits in Bolivia

矿床名称	构造带	矿床类型	当前状态	估计历史产量	当前资源量	品位
Cerro Rico Potosi	东科迪勒拉	玻利维亚多金属脉状矿床	地下开采	60000t Ag, 0.2Mt Sn	55182t Ag, 0.8Mt Sn	102g/t Ag, 0.15% Sn
San Bartolome	东科迪勒拉	玻利维亚多金属脉状矿床	地表开采	---	35Mt Ag	108g/t Ag
Llallagua	东科迪勒拉	玻利维亚多金属脉状矿床	历史地下开采	1Mt Sn	---	5% Sn
Huanuni	东科迪勒拉	玻利维亚多金属脉状矿床	地下开采	0.1Mt Sn	0.2Mt Sn	3% Sn
Colquiri	东科迪勒拉	深成岩相关多金属脉状矿床	地下开采	0.05Mt Sn, 0.3Mt Zn	0.1Mt Sn, 0.8Mt Zn	1% Sn, 8% Zn
Japo, Sta Fe, oroco-cala	东科迪勒拉	玻利维亚多金属脉状矿床	地下开采	0.05Mt Sn	0.07Mt Sn	0.4% Sn
Bolivar	东科迪勒拉	玻利维亚多金属脉状矿床	地下开采	0.1Mt Sn, 0.2Mt Zn, 0.15Mt Pb	0.15Mt Sn, 0.5Mt Zn, 0.4Mt Pb	3% Sn, 10% Zn, 8% Pb
Oruro district	玻利维亚高原	玻利维亚多金属脉状矿床	地下开采	0.1Mt Sn, 10000t Ag, 0.1Mt Pb	0.5Mt Sn, 9200t Ag, 3.2Mt Pb	200g/t Ag, 1% Sn, 7% Pb
Colquechaca	东科迪勒拉	玻利维亚多金属脉状矿床	地下开采	5000t Ag, 0.4Mt Zn, 0.05Mt Sn	6,749t Ag, 1.85Mt Zn, 0.37 Mt Sn	55g/t Ag, 1.5% Zn, 0.3% Sn
Choroque Group	东科迪勒拉	玻利维亚多金属脉状矿床	地下开采	0.2Mt Sn, 3000t Ag	2.4Mt Sn, 9600t Ag	2% Sn, 80g/t Ag
Colavi	东科迪勒拉	玻利维亚多金属脉状矿床	地下开采	1000t Ag, 0.05Mt Sn, 0.05Mt Pb, 0.1Mt Zn	6400t Ag, 0.4Mt Sn, 0.4Mt Pb, 0.64Mt Zn	80g/t Ag, 0.5% Sn, 0.5% Pb, 0.8% Zn

石。在El Mutún铁矿东侧30km处有巴西已开采的超大型Urucum铁矿(图6),其中赋存有 310×10^8 t品位44%~60%的铁矿石和 6×10^8 t品位44%的锰矿石^[2]。

3 矿产资源潜力分析

Bertrand等^[1]根据成矿类型的不同,将成矿构造与已知矿床交汇部位,定义为一级成矿预测区,成矿构造与成矿类型叠加部位,定义为次级成矿预测区,在玻利维亚全国范围内共划分出了307个成矿预测区,覆盖了全国不同的构造区带(图7)。

玻利维亚有约490000km²国土的有利于金属成矿,占国土面积的45%(图7),其中仅2.4%具有采矿权。此外,还有近250000km²国土未勘查过,200000km²国土勘查程度不足,意味着玻利维亚仍是世界上最具勘查潜力的国家之一^[2,26]。玻利维亚最具成矿潜力的是位于西部的安第斯构造带,但对位于玻利维亚东部的前寒武纪瓜波雷克拉通,矿产资源潜力还知之甚少^[7]。

3.1 西科迪勒拉

安第斯的西科迪勒拉山脉中赋存有浅成金-银和金-银-锌-铅-铜-钨-铋多金属脉状矿床。20世纪末勘查红火期,许多外国矿产勘查公司勘查了约40%的火山(130座),存在明显的热液蚀变作用^[2]。

西科迪勒拉北侧与智利交界的Berenguela-Ca-

nasita地区(图7),地球化学异常可能与浅成热液系统或斑岩型铜矿有关,这些地区发育具有控制意义的NW向和NE向断裂,很可能是矿化流体的通道。西科迪勒拉南侧的Lípez地区(图7)发育近百个金、银、贱金属、铋、锑成矿远景区,这些远景区可能主要与斑岩系统有关。此外,该地区还存在重要的未勘查区域^[2,26]。

3.2 玻利维亚高原

玻利维亚高原北部新近纪陆相沉积岩中的红层铜矿具有一定勘查前景(图7)。此外,在Titicaca湖至Poopo湖之间的地区,以及Poopo湖南侧,在对航空磁测数据和重力异常进行验证的钻孔发现了铜、铋和金异常,表明存在多金属矿脉系统,可能是一个有远景的金矿区^[2,26]。

玻利维亚高原的南部除红层铜矿勘查具有前景外,中新世火山作用还指示了浅成热液贵金属矿床重要的勘查前景(图7)。Uyuni的Salar东北部渐新世凝灰岩中的油井钻孔,在450m深部发现了富铜矿化,该处矿化可能与斑岩型铜矿床系统有关^[2,26]。

玻利维亚高原拥有世界上最大储量的碱金属(如锂和钾)和碱土金属(如镁和硼),这些矿床产于Uyuni的Salars、Coipasa、Pastos Grandes、Capina、Hedionda Norte、Empexa等盐湖中,形成于中、晚中新世至现今^[27]。

3.3 东科迪勒拉

东科迪勒拉是玻利维亚最重要的区域金属成矿带,发育多期金属成矿事件,形成了锡、钨、银、锌、铅、金、锑、铋等矿床,其中2个主要事件是古元古代黑色页岩盆地和中新世地壳缩短^[28]。东科迪勒拉北部区域的NW—SN向锡矿带及周边叠加了造山型金矿及与深成岩相关的脉状矿床,在火成岩及沉积岩中产出钨—锡—金—铋—锌—铅—银—锑脉型矿床(图7)。Aucapata—Yani段中重要的金矿资源是石英脉型矿床及砂矿,金矿化与块状铅、锌和铜矿化相关,主要分布在Yani西北15km处。西北侧的Charazani地区,玻利维亚型多金属(锌、银、金、铅)矿脉主要出现在Amarete和Akamani成矿远景区。南侧的Lake Titicaca、Matilde多金属成矿区中,锌矿是最重要的金属矿种^[2,26]。东科迪勒拉中央区域有1000个玻利维亚矿脉型多金属矿床(点),其中包括2个世界级的Potosi矿床和Llallagua矿床,通常与中新世侵入中心有关。中央区域东部,位于Potasi的La Cobra和Cochabamba Viluyo地区的沉积岩中产有后生的浸染状金矿点,主要赋存在白垩纪La Puerta砂岩中。东科迪勒拉南部区域除发育造山型金—锑矿点外,早古生代碎屑岩中具有形成SEDEX型锌—铅—银的成矿潜力。在Tupiza东北部,白垩纪Aroifilla组玄武岩中常见蓝铜矿和黄铜矿矿化^[2,26]。

总的来说,约40%的东科迪勒拉山脉仍然未经勘查,其中可能包含可观的矿产资源^[2]。

3.4 次安第斯山带

次安第斯山带北部Beni河流的部分支流,如Tequeje河和Maniqui河,其盆地中堆积了由晚中新世和上新世Tutumio组砾岩侵蚀而来的冲积金砂矿(图7)。同时,Tuichi河中可能存在冲积金刚石。次安第斯带南部有利于MVT型锌—银—铜矿床的形成,主要集中在Cuevo盆地中^[2,26]。

3.5 查科—贝尼平原带

砂金矿在玻利维亚北部和东部的河谷中到处都有,资源潜力巨大(图7)。北部Madre de Dios、Madera、Pando、Beni等河的流域含大量砂金、锡、钨、独居石矿。这些矿床大多为小型且不连续,随着东科迪勒拉的抬升,大量含金石英脉被剥蚀,最终在现代阶地、河床及古河床中沉积下来。前寒武纪地层区的砂金矿主要与晚、中新世以来片岩带中金矿的剥蚀有关^[2,26]。

3.6 前寒武纪克拉通

玻利维亚前寒武纪克拉通内赋存超过120个金、铂、镍、钼、铜和铁锰矿床(点)。这些矿床(点)大多与世界上太古宙—元古宙超大型矿床特征类似,不过,目前仅在部分地区作过地质勘查^[2,26]。

在前寒武纪片岩Naranjal群、La Bella群和其他片岩组,以及闪岩中,非常适于后生的、与断层相关的金矿床发育^[2]。在La Bella群伟晶岩中还有金、锡、钨、铋、铍等异常。航磁调查显示,沿区域性San Simón断层还可能存在尚未发现的VMS型和后生矿床^[25]。

在Mutún/Urucum地区附近(图4),凝灰质岩石中富含金、铀、稀土和金矿化,与IOCG型矿床相似,在Tucavaca盆地中也发现了类似的矿化,并具区域性钾—铀—钍放射性异常,其基底岩石的航磁异常格外强烈。此外,在Rincón del Tigre地区,还具有重要的铂族元素矿床成矿潜力,Chaquipoc层状基性杂岩中的铂族元素、铜、铬、镍和钴资源潜力还未知。大型侏罗纪—白垩纪碱性/碳酸岩岩墙群出露在Velasco、Cerro Manomó、Mercedes Depression和El Tigre地区,蕴藏巨大的钍、铀、铋、钼和镧资源潜力。Tucavaca盆地中也发育SEDEX型矿化^[2,26]。

4 结 论

(1)玻利维亚铜矿以中小型为主,玻利维亚高原发育中新世—上新世红层型铜矿床;东科迪勒拉铜矿以沉积岩相关脉状矿床为主;前寒武纪克拉通中发育VMS、IOCG型铜多金属矿床。

(2)玻利维亚金矿以中小型为主,火山成因浅成热液矿床分布在西科迪勒拉;造山型金矿分布在东科迪勒拉及前寒武纪克拉通内;与深成侵入岩相关的金矿主要发育在东科迪勒拉北部。此外,在东科迪勒拉东北坡、亚马逊含金盆地等地区还发育大量砂金矿。

(3)玻利维亚锡矿以玻利维亚型多金属脉状矿床和与深成岩有关的多金属脉状矿为主,前者主要发育在锡矿带中南部,后者主要分布在锡矿带北部,此外,还发育小型砂锡矿。

(4)玻利维亚铁矿以BIF型为主,以El Mutún超大型铁锰矿为代表,出露在前寒武纪克拉通内。

(5)西科迪勒拉和玻利维亚高原具有重要的浅成热液贵金属资源勘查潜力;东科迪勒拉北部主要为钨、锡、金、锑资源,中部为锡、银、金、锑资源,南

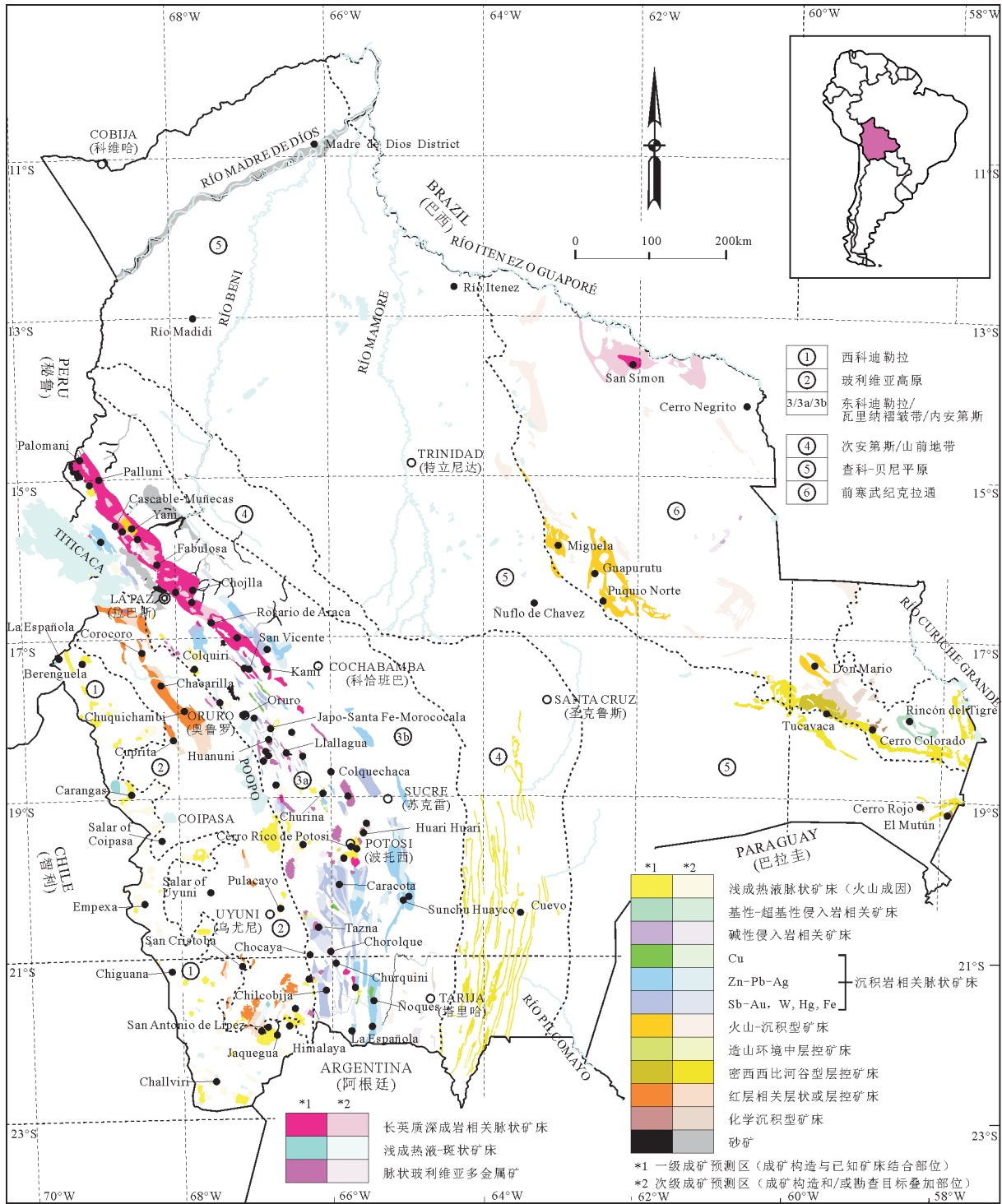


图7 玻利维亚金属矿床预测区(据参考文献[1,26]修改)

Fig. 7 Metalliferous prospective areas of Bolivia

部有金、锑、银、铅、锌资源潜力;次安第斯带南部有重要的银-锌矿资源勘查潜力;查科-贝尼平原带有广泛的砂金矿资源潜力;前寒武纪克拉通具有发现

中元古代-早古生代贵金属矿床(造山型金矿、IOCG)和贱金属矿床(VMS、MVT、SEDEX、BIF)的资源潜力。

致谢:南京大学顾连兴教授对论文进行了详细审阅并提出宝贵的修改意见,论文编写过程中得到中国地质调查局南京地质调查中心郭维民高级工程师的帮助,在此一并表示衷心的感谢。

参考文献

- [1] Bertrand H, Jorge B L T, Vitaliano M A, et al. Las Areas Prospectivas de Bolivia Para Yacimientos Metaliferos[M]. La Paz: Servicio Nacional de Geologia y Minería, 2002: 1-152.
- [2] Arce Burgoa O R. Metalliferous ore deposits of Bolivia, Second Edition[M]. La Paz: SPC Impresores S. A. 2009: 1-233 and three Appendices.
- [3] Ramiro S S. Compendio de Geologia de Bolivia[C]//La Paz: Servicio Nacional de Geologia Y Minería, Yacimientos Petroliferos Fiscales Bolivianos, 2000: 1-216.
- [4] 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): 661-664.
- [5] Groves D I, Goldfarb R J, Gebre-Mariam M, et al. Orogenic gold deposits: A proposed classification in the context of their crustal distribution and relationship to other gold deposit types[J]. Ore Geology Reviews, 1998, 13(1/5): 7-27.
- [6] Groves D I, Goldfarb R J, Robert F, et al. Gold deposits in metamorphic belts: Overview of current understanding, outstanding problems, future research, and exploration significance[J]. Economic Geology, 2003, 98: 1-29.
- [7] Arce Burgoa O R, Goldfarb R J. Metallogeny of Bolivia[J]. SEG Newsletter, 2009, 79(1): 8-15.
- [8] Redwood S D. The Metallogeny of the Bolivian Andes[M]. Vancouver: University of British Columbia, 1993: 1-125.
- [9] Ludington S, McKee E, Shew N. K-Ar ages of Bolivian Tertiary polymetallic vein deposits[C]//Richard W S. Advances related to U. S. and international mineral resources: Developing frameworks and exploration technologies, 1992: 87-93.
- [10] Sugaki A, Kitakaze A. Tin-bearing minerals from Bolivian polymetallic deposits and their mineralization stages[J]. Mining Geology, 1988, 38(5): 419-435.
- [11] Sugaki A, Shimada N, Ueno H, et al. K-Ar ages of tin-polymetallic mineralization in the Oruro mining district, Central Bolivian tin belt[J]. Resource Geology, 2003, 53(53): 273-282.
- [12] Cunningham C G, McNamee J, Vasquez J P, et al. A model of volcanic dome-hosted precious metal deposits in Bolivia[J]. Economic Geology, 1991, 86(2): 415-421.
- [13] Zartman R E, Cunningham C G. U-Th-Pb zircon dating of the 13.8-Ma dacite volcanic dome at Cerro Rico de Potosí, Bolivia[J]. Earth & Planetary Science Letters, 1995, 133(3/4): 227-237.
- [14] Lang J R, Baker T. Intrusion-related gold systems: the present level of understanding[J]. Mineralium Deposita, 2001, 36(6): 477-489.
- [15] Pinto Vásquez J. Volcanic dome-associated precious and base metal epithermal mineralization at Pulacayo, Bolivia[J]. Economic Geology, 1993, 88(3): 697-700.
- [16] Phillipson S E, Romberger S B. Volcanic stratigraphy, structural controls, and mineralization in the san cristobal Ag-Zn-Pb deposit, southern bolivia[J]. Journal of South American Earth Sciences, 2004, 16(8): 667-683.
- [17] Thompson J F H, Sillitoe R H, Baker T, et al. Intrusion-related gold deposits associated with tungsten-tin provinces[J]. Mineralium Deposita, 1999, 34(4): 323-334.
- [18] Entwistle L P, Gouin L O. The chalcocite-ore deposits at Coro-coro, Bolivia[J]. Economic Geology, 1955, 50(6): 555-570.
- [19] Junggren P, Meyer H C. The copper mineralization in the Coro-coro Basin, Bolivia[J]. Economic Geology, 1964, 59(1): 110-125.
- [20] Litherland M, Annells R N, Appleton J D, et al. The geology and mineral resources of the Bolivian Precambrian Shield[M]. British Geological Survey, Overseas Memoir, 1986, 9: 1-153.
- [21] Walde D H G, Hagemann S G. The Neoproterozoic Urucum/Mutún Fe and Mn deposits in W-Brazil/SE-Bolivia: assessment of ore deposit models [Die neoproterozoischen Fe- und Mn-Lagerstätten Urucum/Mutún in W-Brasilien/SE-Bolivien: Bewertung der Modelle zur Lagerstättenbildung] [J]. Zeitschrift Der Deutschen Gesellschaft Für Geowissenschaften, 2006, 158(1): 45-55.
- [22] 李丽文, 温彬, 黄明生. 玻利维亚阿力安萨铜矿床地质特征与成因分析[J]. 甘肃冶金, 2015, 37(3): 98-101.
- [23] Hyrsl J, Petrov A. Famous mineral localities: Llallagua, Bolivia[J]. Mineralogical Record, 2006, 37(2): 117-162.
- [24] Wilson W E, Petrov A. Famous mineral localities: Cerro Rico de Potosi Bolivia[J]. Mineralogical Record, 1999, 30(1): 9-36.
- [25] Arqués L, Cacho A, Artiaga D, et al. The Huanuni Sn-W-Pb-Zn-Ag vein deposits, Bolivia: Structure and mineralogy[C]//Mineral Deposit Research for a High-Tech World. Uppsala: 12th SGA Biennial Meeting, 2013: 1236-1238.
- [26] Bertrand H, Vitaliano M A, Jorge B T, et al. Sinopsis de La Metalogenia en Bolivia[M]. La Paz: Servicio Nacional de Geologia Y Minería, 2000: 1-56.
- [27] Kesler S E, Gruber P W, Medina P A, et al. Global lithium resources: Relative importance of pegmatite, brine and other deposits[J]. Ore Geology Reviews, 2012, 48(5): 55-69.
- [28] Redwood S D. The Metallogeny of the Eastern Cordillera of the Bolivian Andes[C]//Colegio De Geologos De Bolivia Bodas De Oro Seminario Tecnico-Cientifico. Bolivian San Pablo: Colegio de geologos de Bolivia, 2011: 81-86.