

西藏多龙矿集区花岗闪长斑岩地球化学特征 及其意义

符家骏¹, 赵元艺², 郭 硕³

(1. 中国地质大学 地球科学与资源学院, 北京 100083; 2. 中国地质科学院 矿产资源研究所 国土资源部成矿作用与矿产资源评价重点实验室, 北京 100037; 3. 中国地质调查局 天津地质调查中心, 天津 300170)

摘要: 班公湖-怒江成矿带是近年来在西藏地区发现的继玉龙铜矿带和冈底斯铜矿带之后的又一成矿带, 以多龙矿集区为典型代表, 并具有巨大的找矿潜力。为了研究多龙矿集区内花岗闪长斑岩的地球化学特征、构造背景、物质来源等问题, 对矿集区内北东向构造带上分布的拿顿、波龙、多不杂、拿若、铁格龙以及尕尔勤6个矿床的花岗闪长斑岩开展了系统的主微量元素以及Pb-Sr-Nd同位素研究。结果显示, 花岗闪长斑岩K₂O含量介于2.03%~6.07%之间, 主要为高钾钙碱性和钾玄岩系列; 富集大离子亲石元素(LILE: Rb、K等), 而亏损高场强元素(HFSE: Nb、Ta、P、Ti); Σ REE介于 48.95×10^{-6} ~ 249.02×10^{-6} 之间, LREE/HREE为4.09~21.47, 显示富集轻稀土元素, δ Eu为0.56~1.03, 平均值为0.78; $^{208}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$ 在38.554~39.419之间, 平均值为38.835, $^{207}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$ 在15.534~15.665之间, 平均值为15.615, $^{206}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$ 在18.465~19.161之间, 平均值为18.659, 较为富集放射性成因铅, 在铅同位素图解上位于造山铅演化线附近; $(^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr})_t$ 在0.70579~0.71112之间, 平均值为0.70774; ϵ Nd(*t*)值介于-15.3~-1.7之间, 平均值为-4.5。铅锶钕同位素显示壳幔混合特征。认为多龙矿集区形成于增生造山背景下, 成矿背景为增生杂岩上发育的岛弧环境; 含矿岩浆由俯冲板片释放的流体及熔体交代地幔并在上涌过程中得到地壳物质的加入而形成。多龙矿集区内矿床以及青草山和雄梅矿床等一系列成矿时代相近矿床的发现, 表明在班公湖-怒江成矿带有望发现更多斑岩型铜矿床。

关键词: 多龙矿集区; 花岗闪长斑岩; 地球化学特征; Pb-Sr-Nd同位素; 构造背景

中图分类号: P588.13; P618.41

文献标识码: A

文章编号: 1000-6524(2014)06-1039-13

Geochemical characteristics and significance of granodiorite porphyry in the Duolong ore concentration area, Tibet

FU Jia-jun¹, ZHAO Yuan-yi² and GUO Shuo³

(1. School of Earth Sciences and Resources, China University of Geosciences, Beijing 100083, China; 2. Institute of Mineral Resources, Chinese Academy of Geological Sciences; MRL Key Laboratory of Metallogeny and Mineral Assessment, Beijing 100037, China; 3. Tianjin Center, China Geological Survey, Tianjin 300170, China)

Abstract: Following the discovery of the Yulong metallogenic belt and the Gangdise metallogenic belt, the Bangong Co-Nujiang River metallogenic belt is the third metallogenic belt found in Tibet, and the Duolong ore concentration area is a typical ore concentration area in this metallogenic belt. The authors investigated geochemical characteristics, tectonic setting and provenance of granodiorite porphyry by conducting whole rock analysis and

收稿日期: 2014-02-23; 修订日期: 2014-07-01

基金项目: 国家973项目(2011CB403103); 国际地学计划项目(IGCP/SIDA-600); 国家科技支撑课题(2006BAB01A05); 中国地质调查局青藏专项(1212010818097)

作者简介: 符家骏(1990-), 男, 在读硕士生, 地质工程专业, E-mail: fjj1990831@126.com; 通讯作者: 赵元艺(1966-), 男, 研究员, 主要从事矿床学与地球化学研究, E-mail: yuanyizhao2@sina.com。

网络优先出版时间: 2014-09-25; 网络优先出版地址: <http://www.cnki.net/kcms/detail/11.1966.P.20140925.1723.001.html>

Pb-Sr-Nd isotope analysis of Nadun, Bolong, Duobuza, Naruo, Tiegelong and Gaerjin deposits in the NE-trending tectonic belt of this ore concentration area. According to the results obtained, the granodiorite porphyry is mainly of the high K calc-alkaline and shoshonite rock series, with K_2O values being in the range of 2.03%~6.07%; it is enriched in LILE(Rb, K), but depleted in HFSE(Nb, Ta, P, Ti); ΣREE and LREE/HREE values are 48.95×10^{-6} ~ 249.02×10^{-6} and 4.09~21.47, respectively, suggesting the enrichment of LREE; δEu values are in the range of 0.56~1.03, with the average value being 0.78; $^{208}Pb/^{204}Pb$, $^{207}Pb/^{204}Pb$, $^{206}Pb/^{204}Pb$ ratios are 38.554~39.419, 15.534~15.665 and 18.465~19.161, respectively, being 38.835, 15.615, 18.659 on average. In the lead isotope diagrams, the granodiorite porphyry is located around the evolution line of the orogenic lead. $(^{87}Sr/^{86}Sr)_i$ vary in a wide range of 0.70579~0.71112, with the average value of 0.70774. $\epsilon Nd(t)$ vary in the range of -15.3~-1.7, with the average value of -4.5. Sr and Nd isotope data show that the magma was mixed with the crust and the mantle. In combination with previous researches, the authors hold that the Duolong ore concentration area was formed at the accretionary orogen stage, and its geological setting was an island arc developed on the basis of an accretionary complex, and that the ore-forming materials were derived from the mantle with the addition of crustal material, with the activity conducted by the melt formed by subducting plate. The discovery of the Duolong ore concentration area, the Qingcaoshan deposit and the Xiongmei deposit indicate that more ore deposits are likely to be found in the Bangong Co-Nujiang River metallogenic belt.

Key words: Duolong ore concentration area; granodiorite porphyry; geochemical characteristics; Pb-Sr-Nd isotopes; tectonic setting

近年来在西藏班公湖一带发现了几个大型的斑岩铜矿床及一系列矿点和矿化点(李光明等, 2006), 奠定了班公湖-怒江成矿带的基础。多龙矿集区是该成矿带的重要组成部分, 目前已在区内发现拿顿、波龙、多不杂、拿若、色那、铁格龙、尕尔勤等矿床, 其中多不杂和波龙的铜金属量达到704.7万吨, 金达到168.8吨。2013年在多龙矿集区内的钻探工作取得了可喜的成果, 拿若矿区连续见矿厚度583 m, 初步估计资源量为200万吨铜和50~100吨金; 铁格龙矿区钻孔控制矿体长1 200, 宽400~600 m, 平均厚度超过600 m, 初步估算332+333级别资源量铜约300万吨, 共生金约50吨(环球矿业资讯, 2013)。唐菊兴等(2014)的研究表明, 矿集区内的铁格龙南(荣那)铜(金银)矿床为斑岩-浅成低温热液成矿系统地产物, 是典型的高硫型浅成低温热液矿床, 且储量巨大, 区域上可能还存在其他相同类型的矿床, 显示该矿集区巨大的找矿潜力。因此, 深入系统地研究成矿斑岩体的地球化学特征有重要的意义。

目前已有学者对矿集区内的一些矿床做了关于成矿背景的研究, 例如: 对于多龙矿集区, 辛洪波等(2009)仅对多不杂这一矿床的含矿斑岩进行了3个

Pb-Sr-Nd同位素样品的研究, 认为多不杂矿床的成矿背景为大陆碰撞的地壳隆升阶段。吕立娜等(2010)对色那和拿若两个矿床Si、O、S、Pb同位素的研究认为矿床中的石英以及硫化物均是岩浆成因, Pb同位素指示其成矿背景为活动大陆边缘的造山过程。但是, 目前尚未有学者对多龙矿集区内的矿床进行过全面的成矿背景研究。本文对多龙矿集区内的拿顿、波龙、多不杂、拿若、铁格龙、尕尔勤这6个矿床的花岗闪长斑岩进行了Pb-Sr-Nd同位素的研究, 并结合地球化学特征系统地揭示了整个矿集区的成矿地质背景, 期望能对区内的找矿工作提供帮助。

1 地质背景及岩体特征

多龙矿集区位于羌塘地块的南缘, 大地构造位置处于班公湖-怒江缝合带西段的北侧。

矿集区出露的地层(图1)主要有中侏罗统曲色组(J_2q)、中侏罗统色哇组(J_2s)、下白垩统美日切组(K_1m)、中新统康托组(N_1k)以及第四纪残坡积物(Q_4)(张天平等, 2004)^①。曲色组(J_2q)主要岩性为

^① 张天平, 陈泽刚, 卫鲁杰, 等. 2004. 西藏自治区改则县多不杂铜矿普查地质报告. 西藏地质矿产勘查开发局第五地质大队.

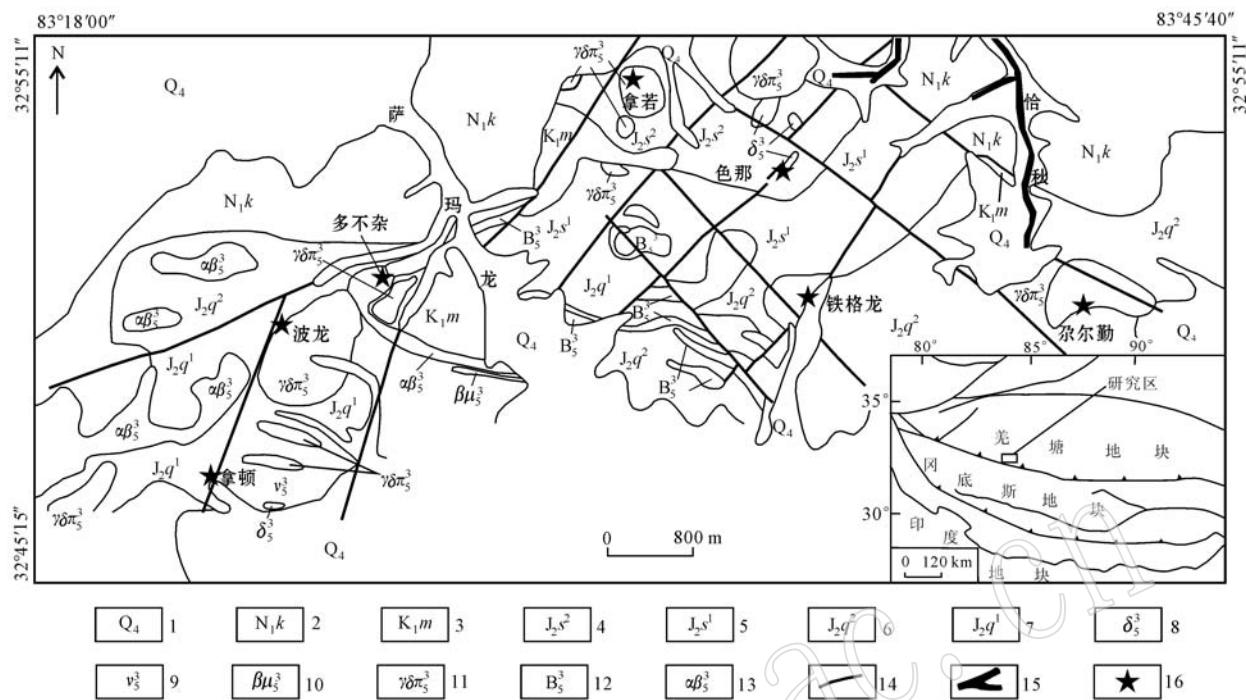


图1 多龙矿集区地质略图(据张天平等, 2007^①; 吕立娜, 2012; 吴德新等, 2012)

Fig. 1 Geological map of the Duolong ore concentration area (after Zhang Tianping et al., 2007^①; Lü Lina et al., 2012; Wu Dexin et al., 2012)

1—第四系; 2—上第三系康托组; 3—下白垩统美日切组; 4—中侏罗统色哇组二段; 5—中侏罗统色哇组一段; 6—中侏罗统曲色组二段; 7—中侏罗统曲色组一段; 8—灰绿色闪长岩、石英闪长岩; 9—浅绿色辉长岩; 10—灰绿色辉绿岩; 11—花岗闪长斑岩; 12—火山角砾岩; 13—安山岩; 14—断层; 15—砂金矿点、金矿体; 16—矿区位置

1—Quaternary; 2—Upper Tertiary Kangtuo Formation; 3—Lower Cretaceous Meiriqie Formation; 4—2nd member of Middle Jurassic Sewa Formation; 5—1st member of Middle Jurassic Sewa Formation; 6—2nd member of Middle Jurassic Quse Formation; 7—1st member of Middle Jurassic Quse Formation; 8—grayish green diorite and quartz diorite; 9—light grayish green diabase; 10—grayish green diabase; 11—granodiorite porphyry; 12—breccia; 13—andesite; 14—fault; 15—placer gold ore spot and orebody; 16—location of ore district

灰岩、长石石英砂岩、粉砂质板岩、基性侵入岩、硅质岩、中基性火山岩等。色哇组(J₂s)岩性主要为砂岩、砂砾岩、粉砂质板岩、长石石英砂岩以及弱变质板岩。美日切组(K₁m)主要为中酸性火山岩, 以大套的英安岩-流纹岩为特征。康托组(N₁k)以砂砾岩以及红色泥岩和石膏岩层为主要岩性。

班公湖-康托-兹格当错大断裂位于多龙矿集区南部, 为超壳断裂。在该断裂的影响下, 多龙矿集区的次级断裂构造非常发育, 主要为近东西向断裂、北东向断裂以及北西向断裂。段志明等(2013)认为近东西向压扭性断裂形成最早, 并与增生楔的形成时代一致, 其产状主体向北陡倾斜(个别向南陡倾斜); 北东向的压扭性断裂形成于早白垩世, 产状陡立或近于直立, 具左行走滑兼逆冲的特征, 该组断裂控制

了含矿斑岩的产出; 而北西向的断裂以走滑为主, 形成最晚, 对矿床有一定的破坏作用。

区内侵入岩侵入到中侏罗统雁石坪群和下白垩统美日切组(K₁m)地层中, 侵入岩主要有基性岩(辉长岩、辉绿岩、辉绿玢岩等)、中酸性岩(闪长岩、石英闪长岩、石英闪长玢岩和花岗闪长斑岩等), 主要以岩脉、岩株、岩墙等形式产出。

拿顿矿床与成矿相关的岩石主要是花岗闪长斑岩, 主要矿物为斜长石和石英, 其次为钾长石、角闪石和黑云母等。岩石呈斑状结构、块状构造, 斑晶主要为斜长石和石英, 含量约占 54%, 粒径约为 2~5 mm。斜长石含量为 60%, 石英含量为 30%, 钾长石 5%, 角闪石 3%, 黑云母为 2%, 基质粒度均小于 0.1 mm。岩石发生绿泥石化及绢云母化。

① 张天平, 陈红旗, 李光荣, 等. 2007. 西藏自治区改则县多龙区域地质图(比例尺 1:50000). 西藏地质矿产勘查开发局第五地质大队.

波龙矿床花岗闪长斑岩呈斑状结构、块状构造，斑晶主要为有斜长石、石英、角闪石、钾长石、黑云母等，粒径2~5 mm，基质为隐晶质，斑晶含量达40%~50%，且斑晶粒径较大，较大的角闪石斑晶粒径可达1 cm。花岗闪长斑岩均发生钾化，叠加绢英岩化。

多不杂矿区含矿斑岩具斑状结构，块状构造。斑晶成分有斜长石、钾长石、石英、黑云母，大小在0.5~4 mm之间，含量约占岩石体积的35%~40%；基质成分有石英、斜长石、黑云母及副矿物磷灰石、锆石、金红石、磁铁矿、黄铁矿等，呈显微半自形粒状结构，粒径一般在0.05~0.2 mm之间。角闪石和黑云母发生绿泥石化，长石粘土化。

拿若花岗闪长斑岩具块状构造，斑状结构、似斑状结构，斑晶粒径约2~5 mm，含量约占45%。斑晶矿物组合以斜长石为主，其中含有少量黑云母和角闪石。基质粒度均小于0.1 mm，多为花岗结构，局部为隐晶质结构。基质矿物组合主要为斜长石、钾长石、石英。

铁格龙花岗闪长斑岩具斑状结构，基质具微晶

结构，块状构造。斑晶矿物为斜长石、正长石、石英及暗色矿物黑云母、普通辉石等，矿物粒度为0.2~2.0 mm，含量22%~30%；基质由微晶斜长石及少量正长石等组成，粒度小于0.02 mm。副矿物为磷灰石、少量榍石及金属矿物。斜长石表面分布绢云母，正长石表面粘土化，黑云母多蚀变为绿泥石。

尕尔勤矿床与成矿相关的花岗闪长斑岩呈斑状结构、块状构造，斑晶主要为斜长石、石英、角闪石等，粒径1~5 mm，斑晶含量约40%；基质为显微晶质结构，主要为斜长石、石英、角闪石、黑云母，粒径小于0.1 mm。斜长石发育绢云母化，黑云母和角闪石绿泥石化。

2 样品与分析测试

2.1 样品采集

本文样品采自矿集区内的拿顿、波龙、多不杂、拿若、铁格龙、尕尔勤这6个矿区，每个矿区各选出3件岩石全分析样品和3件Pb-Sr-Nd同位素样品（表1），均为弱蚀变的岩石。

表1 多龙矿集区样品汇总
Table 1 Collection of samples in the Duolong ore concentration area

矿区	GPS	岩石全分析样品	Pb-Sr-Nd同位素样品
拿顿	32°47'08.6"N, 83°21'44.2"E	ND-3, ND-4, Nd-5	ND-11-1-1, ND-11-1-2, ND-11-1-3
波龙	32°48'31"N, 83°24'10"E	BL-1, BL-2, BL-9	BL-11-1-1, BL-11-1-2, BL-11-1-3
多不杂	32°50'14"N, 83°26'43"E	17102-22, 17102-23, 17102-33	DBZ-11-4-1, DBZ-11-4-7, DBZ-11-4-10
拿若	32°52'36.9"N, 83°31'33.3"E	NN-26, NN-27, NR-1	NRZK-03, NRZK-04, NRZK-05
铁格龙	32°49'35.8"N, 83°35'04.0"E	TGL-2, TGL-3, TGL08-2	TGLZK-01, TGLZK-02, TGLZK-03
尕尔勤	32°49'45.0"N, 83°41'42.8"E	Geq-1-1, Geq-1-5, Geq-1-7	GRZK-06, GRZK-07, GRZK-08

2.2 测试方法

本文所有测试均在核工业地质研究院分析测试研究中心完成。

岩石主微量元素测试：首先，将进行主微量元素测试的样品碎至200目，碎样时保证样品不受污染。主量元素的测定依据与方法为GB/T14506.28-2010，测试仪器为飞利浦PW2404型X荧光光谱仪，精度高于1%，另采用重铬酸钾容量法测定氧化亚铁含量，参见GB/T14506.14-2010；微量元素和稀土元素测定依据与方法为DZ/T0223-2001电感耦合等离子体质谱（ICP-MS）方法通则，仪器型号为ELEMENT-I质谱仪，分析精度高于2%。

Pb、Sr、Nd同位素测试：同样先将样品碎至200目。Pb同位素测试所用仪器为MAT-261型质谱

仪。样品用三酸($\text{HF} + \text{H}_2\text{SO}_4 + \text{HCl}$)分解后再用离子交换树脂分离出铅，蒸干后进行同位素测定，分析精度对1 μg 铅含量 $^{204}\text{Pb}/^{206}\text{Pb}$ 低于0.05%， $^{208}\text{Pb}/^{206}\text{Pb}$ 一般不大于0.005%。对国际标样NBS981的测试结果为： $^{208}\text{Pb}/^{206}\text{Pb} = 2.162\ 189$ ，误差为0.002 7%； $^{207}\text{Pb}/^{206}\text{Pb} = 0.913\ 626$ ，误差为0.005 9%； $^{204}\text{Pb}/^{206}\text{Pb} = 0.059\ 201$ ，误差为0.001 5%，全流程Pb空白本底为 $1 \times 10^{-9} \sim 2 \times 10^{-9}$ 。Nd和Sr同位素分析所用仪器为MAT-261固体同位素质谱仪。样品先用 $\text{HF} + \text{HNO}_3$ 完全溶解，蒸干后再用HCl融解。样品中的Nd、Sr采用常规的离子交换技术分离。Nd同位素测定用 $^{146}\text{Nd}/^{144}\text{Nd} = 0.721\ 9$ 进行质量分馏校正，标样J.M. Nd_2O_3 测定结果， $^{143}\text{Nd}/^{144}\text{Nd}$ 为 $0.511\ 125 \pm 8$

(2σ), 标样 GBW04419 测定结果, $^{143}\text{Nd}/^{144}\text{Nd}$ 为 $0.512\,725 \pm 10(2\sigma)$, Sm、Nd 流程空白为 $5 \times 10^{-11}\text{ g}$ 。Sr 同位素测定用 $^{88}\text{Sr}/^{86}\text{Sr} = 8.375\,21$ 进行质量分馏校正, 标样 NBS987 SrCO_3 测定结果, $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ 为 $0.710\,25(2\sigma)$, Rb、Sr 流程空白为 $10^{-9} \sim 10^{-11}\text{ g}$ 。

2.3 测试结果

多龙矿集区内拿顿、波龙、多不杂、拿若、铁格龙、尕尔勤这 6 个矿床花岗闪长斑岩样品的主量元素、微量元素、稀土元素测试结果列于表 2, Pb、Sr、Nd 同位素测试结果见表 3。

3 地球化学特征

3.1 主量元素

从样品的主量元素分析结果(表 2)来看, 多龙矿集区内花岗闪长斑岩的 SiO_2 含量介于 57.94% ~ 68.94% 之间, 平均值为 63.15%; Al_2O_3 含量在 12.50% ~ 28.11% 之间, 平均值为 20.55%, 其中多不杂矿区明显低于其他矿区, 仅为 12.50% ~ 14.24%; K_2O 含量介于 2.03% ~ 6.07% 之间, 平均值为 4.44%, 其中尕尔勤矿区含量明显低于其他矿区, 仅为 2.03% ~ 2.70%; Na_2O 含量在 0.15% ~ 2.40% 之间, 平均值为 0.75%, 其中尕尔勤矿区明显高于其他矿区, 在 1.37% ~ 2.40% 之间; CaO 含量介于 0.19% ~ 1.54% 之间, 平均值为 0.58%; MgO 含量介于 0.33% ~ 2.54% 之间, 平均值为 0.95%。除矿集区北东端的尕尔勤矿区之外, 其他 5 个矿区均显示出富碱质(主要是 $\text{K}_2\text{O}, \text{Na}_2\text{O}$ 含量少)、贫 Ca 和 Mg 的特点。6 个矿床的 A/CNK 均大于 1, 为铝过饱和岩石。在 $\text{K}_2\text{O}-\text{SiO}_2$ 图(图 2)上, 拿顿、波龙、多不杂、铁格龙这 4 个矿区主要落在了钾玄岩系列中, 而拿若和尕尔勤矿床相对其他几个矿床, K_2O 含量较低, 处于高钾钙碱性系列附近。

3.2 微量元素与稀土元素

多龙矿集区内 6 个矿区样品的微量元素列于表 2 中。从微量元素原始地幔标准化图解(图 3)中可以看出, 多龙矿集区内矿床整体上富集大离子亲石元素(LILE; Rb、K 等), 而亏损高场强元素(HFSE; Nb、Ta、P、Ti)。特别是 Nb 的亏损, 是岛弧火山岩的显著标志, 反映了板块俯冲环境中岩浆岩的典型特征(Wilson, 1989)。矿集区内矿床多具有 Ti 的负异常, 只有尕尔勤矿区的样品几乎不具有 Ti 的亏损。

多龙矿集区内的稀土元素测试结果列于表 2。

ΣREE 介于 $48.95 \times 10^{-6} \sim 249.02 \times 10^{-6}$ 之间, LREE/HREE 在 4.09 ~ 21.47 之间, 且 $(\text{La/Yb})_N$ 介于 2.99 ~ 23.97 之间, 最大值为尕尔勤矿区样品, 可以看出其轻重稀土元素发生分异的特征。从图 4 中可以看出, 矿集区内的矿床轻稀土元素分配模式整体上呈右倾型(发生分异), 重稀土元素分配模式较为平直(分异不明显), 很多与俯冲带相关的矿床都显示这种特征(Gill, 1981)。本区中样品普遍具有 Eu 的负异常, δEu 为 0.56 ~ 1.03, 平均值为 0.78。其中拿顿、波龙、多不杂、拿若、铁格龙这 5 个矿床具有明显的 Eu 负异常, 暗示岩浆经历了不同程度的斜长石结晶分异作用, 并与大陆上地壳的稀土配分曲线相似(Rudnick and Gao, 2003)。而尕尔勤矿床几乎没有 Eu 异常, 与大陆中部地壳的稀土配分曲线相似(Rudnick and Gao, 2003)。这说明拿顿、波龙、多不杂、拿若、铁格龙这 5 个矿床的岩浆可能受到大陆上地壳物质的混染, 而尕尔勤受到大陆中地壳物质的混染。

3.3 Pb 同位素

由于中酸性岩中 U、Th、Pb 含量较高, 所以岩石在后期累积了较多的放射性成因铅, 不能代表初始的铅同位素组成。因此, 采用样品的 U、Th、Pb 含量以及成岩年龄 t 对铅同位素进行年龄校正(表 3)。校正后, $(^{208}\text{Pb}/^{204}\text{Pb})_{\text{i}}$ 值在 38.222 ~ 39.041 之间, 平均值为 38.616; $(^{207}\text{Pb}/^{204}\text{Pb})_{\text{i}}$ 值在 15.589 ~ 15.634 之间, 平均值为 15.612; $(^{206}\text{Pb}/^{204}\text{Pb})_{\text{i}}$ 值在 18.083 ~ 18.779 之间, 平均值为 18.465。位于多龙矿集区西南部的拿顿和波龙矿床相对其他 4 个东北部的矿床, 具有较高的放射性成因铅, 这两个矿床的 $^{208}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}, ^{207}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}, ^{206}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$ 平均值分别为 38.731、15.626、18.527, 而其他 4 个矿床分别为 38.559、15.605、18.433。据图 5 和图 6 可看出这两个矿床更靠近上地壳区域, 可能具有较多的上地壳物质组成, 且投点位置均处于 EM II 中。

3.4 Sr、Nd 同位素

对 Sr、Nd 同位素的测试值用年龄进行计算后[用于计算的年龄 t 为本项目同一批样品所测得的锆石年龄(另文发表)]得出, 多龙矿集区的 Sr 同位素初始比值($^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$)_i 在 0.705 79 ~ 0.711 12 之间, 平均值为 0.707 95, 极差为 0.005 33(表 3), 说明地壳物质在岩浆中具有贡献。 $\epsilon\text{Nd}(t)$ 值小于零, 变化较大, 介于 -15.3 ~ -1.7 之间, 平均值为 -4.9, 极差为 13.6, 其中拿若最低, 在 -15.3 ~ -6.8 之间。与

表2 多龙矿集区花岗闪长斑岩化学分析结果

Table 2 Chemical analyses of granodiorite porphyries in the Duolong ore concentration area

矿区	样号	SiO ₂	TiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	FeO	MnO	MgO	CaO	Na ₂ O	K ₂ O	P ₂ O ₅	烧失量	总量	La
拿顿	ND-3	63.26	0.58	23.13	1.9	0.25	0.06	0.9	0.37	0.2	5.49	0.05	3.79	99.98	9.49
	ND-4	59.58	0.54	23.4	3.92	0.65	0.04	0.7	0.21	0.17	5.92	0.04	4.98	100.15	18.6
	ND-5	64.24	0.55	21.24	1.49	0.15	0.06	0.96	0.31	0.34	5.94	0.02	4.60	99.90	11.3
波龙	BL-1	57.94	0.76	21.95	5.48	0.86	0.02	0.97	0.38	0.19	3.96	0.17	6.12	98.80	48
	BL-2	62.16	0.64	22.04	1.99	0.24	0.01	0.33	1.43	0.73	3.91	0.1	6.06	99.64	8.28
	BL-9	60.67	0.76	19.84	5.27	3.46	0.07	2.54	0.44	0.68	4.52	0.11	3.87	102.23	36.8
多不杂	17102-22	65.62	0.64	12.95	7.81	5.04	0.08	1.55	0.63	1.09	5.4	0.09	2.96	103.86	38.6
	17102-23	65.64	0.71	14.24	5.5	3.86	0.09	2.34	0.35	1.17	6.07	0.09	2.44	102.50	40
	17102-33	68.94	0.85	12.5	4.42	2.96	0.08	1.2	1.16	0.86	5.81	0.11	2.40	101.29	58.7
拿若	NN-26	58.86	0.55	28.11	1.16	0.3	0.02	0.35	0.47	0.25	2.55	0.19	6.92	99.73	10.1
	NN-27	59.15	0.57	27.5	1.67	0.24	0.02	0.35	0.29	0.18	2.41	0.13	7.16	99.67	21.5
	NR-1	63.27	0.56	20.52	4.26	0.6	0.05	0.87	0.43	0.15	5.53	0.09	3.90	100.23	17.8
铁格龙	TGL-2	66.79	0.38	22.11	0.72	0.29	0.02	0.45	0.19	0.76	4.48	0.04	3.47	99.70	17.3
	TGL-3	64.41	0.51	21.12	3.21	0.42	0.03	1.05	0.38	0.51	4.83	0.13	3.63	100.23	27.4
	TGL08-2	63.83	0.46	22.93	1.23	0.1	0.02	1.07	0.7	0.44	5.62	0.04	3.43	99.87	20.9
尕尔勤	Geq-1-1	62.05	0.29	19.31	4.31	0.69	0.02	0.54	1.54	1.37	2.7	0.05	7.13	100.00	11.6
	Geq-1-5	64.88	0.32	18.76	4.03	0.75	0.02	0.56	0.37	2.05	2.7	0.1	5.83	100.37	13.2
	Geq-1-7	65.46	0.25	18.28	2.54	1.41	0.03	0.43	0.74	2.4	2.03	0.05	7.23	100.85	15
矿区	样号	Ce	Pr	Nd	Sm	Eu	Gd	Tb	Dy	Ho	Er	Tm	Yb	Lu	Y
拿顿	ND-3	18.0	2.03	8.33	1.76	0.38	1.75	0.34	2.36	0.50	1.62	0.27	1.83	0.30	16.5
	ND-4	33.9	3.75	15.2	2.83	0.75	2.22	0.36	2.20	0.44	1.37	0.22	1.48	0.25	13.1
	ND-5	22.6	2.47	9.41	1.72	0.36	1.75	0.36	2.45	0.52	1.65	0.28	1.88	0.32	16.7
波龙	BL-1	90.6	11.4	44.7	9.36	2.13	8.69	1.14	6.17	1.20	3.27	0.47	3.03	0.44	29.8
	BL-2	16.0	2.18	9.93	2.28	0.70	2.30	0.32	2.20	0.50	1.72	0.28	1.99	0.33	12.7
	BL-9	70.1	8.10	29.2	5.39	0.99	5.32	0.75	4.29	0.88	2.53	0.35	2.39	0.35	22.5
多不杂	17102-22	73.8	8.83	29.4	5.19	1.05	4.37	0.72	3.53	0.66	2.03	0.30	2.04	0.31	21.8
	17102-23	77.5	9.3	30.9	5.53	1.13	4.81	0.80	3.85	0.72	2.13	0.33	2.13	0.32	23.3
	17102-33	109	13.2	43.3	7.18	1.27	6.09	0.90	4.09	0.71	2.11	0.30	1.90	0.27	22.5
拿若	NN-26	31.8	2.17	8.74	3.42	1.22	5.38	0.59	2.22	0.35	1.02	0.15	1.01	0.16	7.14
	NN-27	45.7	5.81	22.3	4.99	1.36	5.60	0.64	2.45	0.41	1.23	0.19	1.39	0.23	7.74
	NR-1	33.6	3.64	13.6	2.41	0.74	2.67	0.58	4.49	1.04	3.34	0.57	3.58	0.53	36.0
铁格龙	TGL-2	30.7	3.80	14.1	2.60	0.66	2.40	0.28	1.46	0.30	0.87	0.13	0.92	0.15	7.62
	TGL-3	49.6	5.72	20.6	3.64	0.93	3.66	0.47	2.86	0.60	1.85	0.27	1.80	0.27	16.1
	TGL08-2	35.7	3.66	14.1	2.46	0.63	2.15	0.36	2.30	0.47	1.49	0.25	1.73	0.28	14.9
尕尔勤	Geq-1-1	21.4	2.65	8.97	1.22	0.41	1.16	0.20	1.13	0.22	0.73	0.12	0.89	0.13	6.91
	Geq-1-5	25.1	3.05	11.3	1.48	0.41	1.03	0.15	0.66	0.12	0.41	0.07	0.53	0.09	3.78
	Geq-1-7	25.7	3.06	9.89	1.27	0.33	0.92	0.13	0.55	0.10	0.31	0.05	0.45	0.07	3.03
矿区	样号	ΣREE	LREE/HREE	(La/Yb) _N	δEu	Rb	Sr	Zr	Nb	Ba	Hf	Ta	Th	U	
拿顿	ND-3	48.96	4.46	3.72	0.66	232	38.9	184	6.62	568	5.27	0.60	5.00	1.86	
	ND-4	83.57	8.79	9.02	0.88	242	28.3	148	5.91	671	4.55	0.54	4.05	0.90	
	ND-5	57.07	5.20	4.31	0.63	284	32.2	127	6.03	467	4.13	0.54	4.71	1.40	
波龙	BL-1	230.60	8.45	11.37	0.71	138	24.5	299	15.5	450	7.11	1.35	15.30	4.93	
	BL-2	49.00	4.09	2.99	0.92	176	132	167	4.63	456	4.43	0.39	2.95	1.15	
	BL-9	167.44	8.93	11.05	0.56	179	32.3	224	17.1	424	5.39	1.35	13.50	2.75	
多不杂	17102-22	170.83	11.24	13.58	0.66	146	84	153	9.90	573	4.03	0.78	10.20	1.72	
	17102-23	179.45	10.90	13.48	0.66	196	83.6	122	14.0	569	3.20	1.03	9.51	1.61	
	17102-33	249.02	14.21	22.17	0.57	143	82.7	135	16.8	606	3.82	1.17	13.00	1.90	
拿若	NN-26	68.33	5.28	7.18	0.87	128	892	160	8.97	399	4.27	0.79	5.08	0.81	
	NN-27	113.80	8.38	11.1	0.78	123	809	165	8.27	445	4.42	0.68	6.38	1.06	
	NR-1	88.58	4.27	3.57	0.88	256	224	168	7.60	552	4.93	0.71	7.51	2.97	
铁格龙	TGL-2	75.66	10.64	13.51	0.79	164	107	119	6.79	596	3.64	0.74	3.82	1.28	
	TGL-3	119.67	9.16	10.92	0.77	166	76.8	143	9.71	607	4.15	0.99	6.90	1.91	
	TGL08-2	86.49	8.58	8.67	0.82	214	40.6	246	8.06	488	6.97	0.84	5.01	1.73	
尕尔勤	Geq-1-1	50.83	10.09	9.38	1.03	131	206	51.7	5.34	180	1.66	0.48	3.20	1.32	
	Geq-1-5	57.60	17.86	17.97	0.96	94.7	203	54.6	4.43	210	1.66	0.41	4.01	0.92	
	Geq-1-7	57.82	21.47	23.97	0.9	68.8	261	50.4	4.56	172	1.56	0.40	4.38	1.27	

注：主元素单位 w_B/%，微量元素单位 w_B/10⁻⁶。

表3 多龙矿集区花岗闪长斑岩 Pb、Sr、Nd 同位素组成

Table 3 Pb, Sr, Nd isotope compositions of granodiorite porphyries in the Duolong ore concentration area

矿区	样品原号	$^{208}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$	$^{207}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$	$^{206}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$	$^{87}\text{Rb}/^{86}\text{Sr}$	$^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$	$^{147}\text{Sm}/^{144}\text{Nd}$	$^{143}\text{Nd}/^{144}\text{Nd}$
拿顿	ND-11-1-1	38.854 ± 0.004	15.633 ± 0.002	18.705 ± 0.002	12.820 9	0.729 484	0.128 4	0.512 388
	ND-11-1-2	38.771 ± 0.004	15.614 ± 0.001	18.623 ± 0.002	4.380 8	0.715 685	0.080 0	0.512 356
	ND-11-1-5	38.886 ± 0.006	15.635 ± 0.002	18.731 ± 0.003	20.471 3	0.744 401	0.118 7	0.512 364
波龙	BL-11-1-1	39.419 ± 0.003	15.646 ± 0.001	19.161 ± 0.002	3.737 5	0.713 933	0.106 5	0.512 414
	BL-11-1-2	39.002 ± 0.004	15.665 ± 0.002	18.743 ± 0.002	2.408 6	0.712 651	0.129 6	0.512 432
	BL-11-1-3	39.394 ± 0.008	15.648 ± 0.003	19.055 ± 0.003	2.214 4	0.711 740	0.114 8	0.512 228
多不杂	DBZ-11-4-1	38.717 ± 0.004	15.605 ± 0.002	18.574 ± 0.002	1.325 3	0.708 298	0.107 4	0.512 337
	DBZ-11-4-7	38.717 ± 0.003	15.603 ± 0.001	18.575 ± 0.002	0.809 8	0.707 169	0.114 7	0.512 329
	DBZ-11-4-10	38.711 ± 0.004	15.600 ± 0.002	18.573 ± 0.002	1.848 9	0.709 278	0.109 8	0.512 297
拿若	NRZK-03	38.786 ± 0.004	15.606 ± 0.002	18.589 ± 0.002	1.391 2	0.708 866	0.114 4	0.512 227
	NRZK-04	38.795 ± 0.004	15.614 ± 0.002	18.589 ± 0.002	1.285 3	0.709 357	0.104 8	0.512 173
	NRZK-05	38.813 ± 0.006	15.622 ± 0.002	18.609 ± 0.003	1.686 4	0.709 285	0.121 4	0.511 797
铁格龙	TGLZK-01	38.838 ± 0.004	15.612 ± 0.002	18.681 ± 0.002	7.471 1	0.719 680	0.119 5	0.512 321
	TGLZK-02	38.884 ± 0.006	15.638 ± 0.002	18.661 ± 0.003	32.391 3	0.762 103	0.109 5	0.512 415
	TGLZK-03	38.885 ± 0.006	15.612 ± 0.002	18.754 ± 0.003	31.535 2	0.761 293	0.110 6	0.512 389
尕尔勤	GRZK-06	38.677 ± 0.003	15.610 ± 0.001	18.518 ± 0.001	1.708 9	0.714 085	0.102 4	0.512 478
	GRZK-07	38.705 ± 0.004	15.614 ± 0.002	18.485 ± 0.002	1.405 8	0.713 329	0.098 5	0.512 436
	GRZK-08	38.672 ± 0.005	15.612 ± 0.002	18.465 ± 0.002	2.947 9	0.715 024	0.121 2	0.512 403
矿区	样品原号	t/Ma	$\epsilon\text{Nd}(t)$	$(^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr})_i$	t_{DM}	$(^{206}\text{Pb}/^{204}\text{Pb})_i$	$(^{207}\text{Pb}/^{204}\text{Pb})_i$	$(^{208}\text{Pb}/^{204}\text{Pb})_i$
拿顿	ND-11-1-1	115	-3.9	0.708 53	1 363	18.540	15.625	38.712
	ND-11-1-2	115	-3.8	0.708 53	906	18.572	15.612	38.698
	ND-11-1-5	115	-4.2	0.710 94	1 263	18.465	15.622	38.600
波龙	BL-11-1-1	122	-3.0	0.707 45	1 049	18.779	15.628	39.041
	BL-11-1-2	122	-3.0	0.708 48	1 304	18.083	15.634	38.461
	BL-11-1-3	122	-6.7	0.707 90	1 423	18.722	15.632	38.873
多不杂	DBZ-11-4-1	120	-4.5	0.706 04	1 168	18.430	15.598	38.444
	DBZ-11-4-7	120	-4.8	0.705 79	1 266	18.423	15.596	38.430
	DBZ-11-4-10	120	-5.3	0.706 12	1 254	18.349	15.589	38.222
拿若	NRZK-03	119	-6.8	0.706 51	1 419	18.572	15.605	38.753
	NRZK-04	119	-7.7	0.707 18	1 369	18.583	15.614	38.783
	NRZK-05	119	-15.3	0.706 43	2 231	18.478	15.616	38.707
铁格龙	TGLZK-01	120	-5.0	0.706 94	1 342	18.323	15.595	38.497
	TGLZK-02	120	-3.0	0.706 86	1 077	18.260	15.619	38.422
	TGLZK-03	120	-3.5	0.707 51	1 127	18.641	15.607	38.781
尕尔勤	GRZK-06	122	-1.7	0.711 12	922	18.458	15.607	38.631
	GRZK-07	122	-2.4	0.710 89	947	18.333	15.607	38.493
	GRZK-08	122	-3.4	0.709 91	1 233	18.353	15.607	38.548

注:用于计算初始同位素比值的年龄 t 为本项目同一批样品所测得的锆石年龄(另文发表)。

Pb 同位素相对应,拿顿和波龙矿区也具有较高的 $(^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr})_i$ 值,平均值为 0.708 64,而其他 4 个矿床为 0.707 61。同时, $\epsilon\text{Nd}(t)$ 也略高于其他 4 个矿床,平均值分别为 -4.1 和 -5.3。如图 7 所示,拿顿和波龙的样品投点也基本处于 EM II 区域中,与图 6 保持一致。

4 讨论

4.1 成矿构造背景

近年的研究(侯增谦等,2009,2012; 侯增谦,2010)提出了形成于碰撞背景下的斑岩型矿床模型,

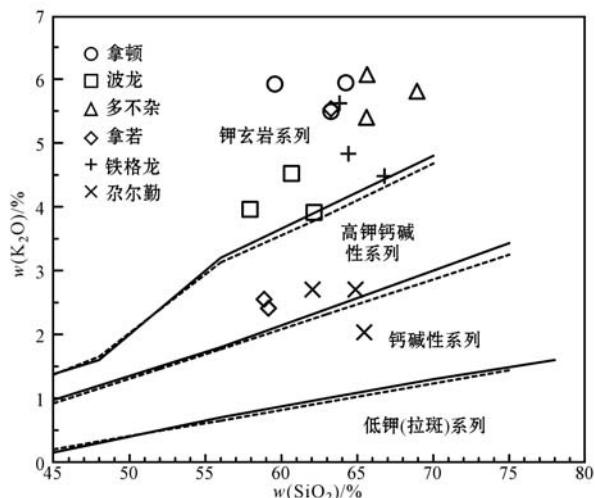
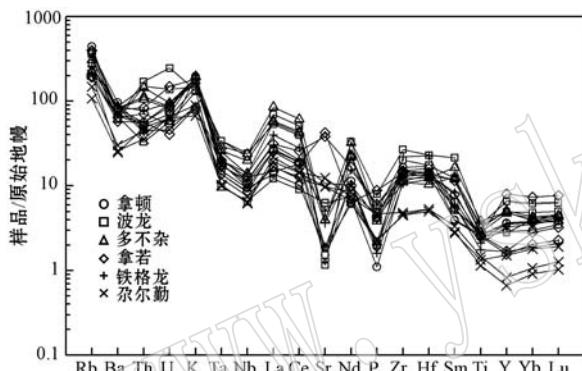
图2 花岗闪长斑岩K₂O-SiO₂图解Fig. 2 K₂O-SiO₂ diagram of the granodiorite porphyries

图3 花岗闪长斑岩微量元素蛛网图(Sun and McDonough, 1989)

Fig. 3 Trace element spidergram of the granodiorite porphyries(after Sun and McDonough, 1989)

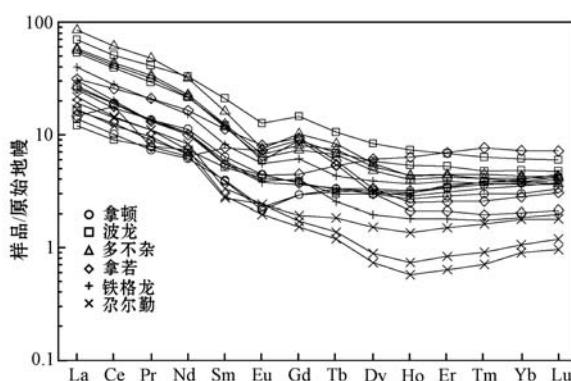
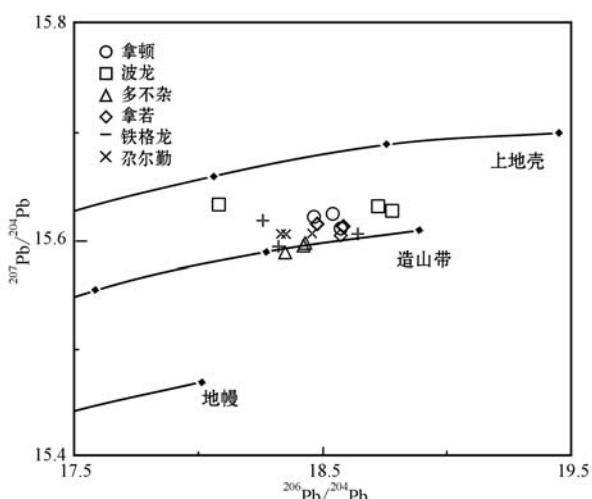


图4 花岗闪长斑岩稀土元素原始地幔标准化图解

(Sun and McDonough, 1989)

Fig. 4 Primitive mantle normalized REE patterns of the granodiorite porphyries(after Sun and McDonough, 1989)

在西藏地区以冈底斯矿带为代表。曲晓明等(2006)认为多不杂矿床形成于碰撞后地壳隆升阶段,而段志明等(2013)则认为多不杂矿床是发育于俯冲背景下的斑岩矿床。那么多龙矿集区究竟是俯冲增生过程中形成的还是在碰撞造山过程中形成的?

(1) 俯冲时间: 史仁灯等(2005)、史仁灯(2007)的研究认为班公湖怒江缝合带中的SSZ型蛇绿岩指示其为威尔逊旋回的末期阶段产物,且其锆石SHRIMP U-Pb年龄为167.0±1.4 Ma,说明班公湖-怒江新特提斯洋至少从中侏罗世开始由扩张转换为俯冲消减。

(2) 闭合时间: Mao等(2013)认为班公湖-怒江

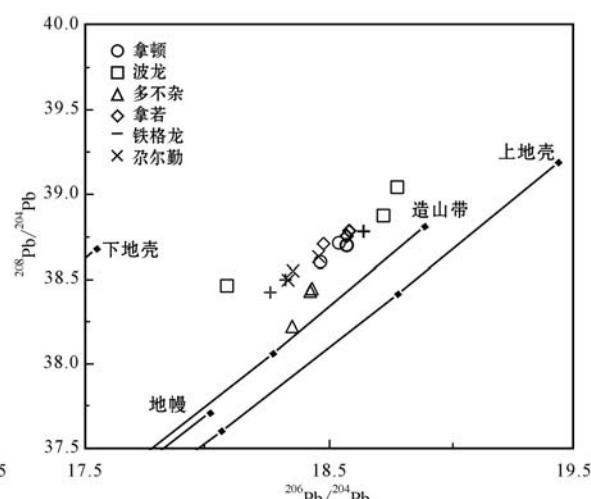


图5 花岗闪长斑岩Pb同位素构造模式图

Fig. 5 Pb isotopic structural diagrams of the granodiorite porphyries

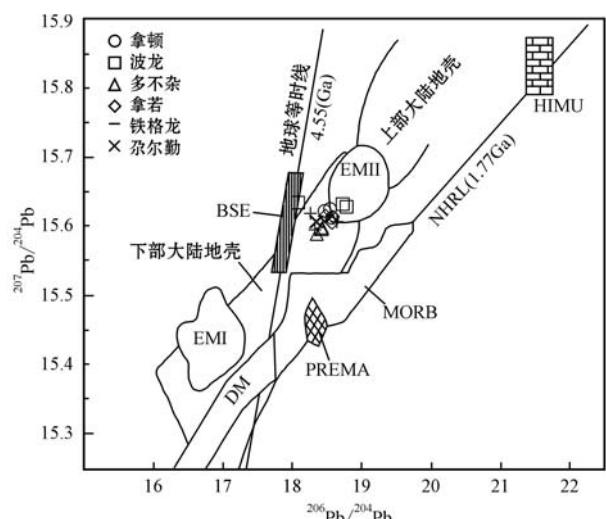


图 6 花岗闪长斑岩 $^{207}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$ - $^{206}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$ 相关图解(底图据 Rollison, 1993)

Fig. 6 $^{207}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$ - $^{206}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$ diagram of the granodiorite porphyries (after Rollison, 1993)

DM—亏损地幔; BSE—全硅酸盐地球; PREMA—普通地幔;
HIMU—高 U/Pb 值地幔; EM I、EM II—富集地幔
DM—depleted mantle; BSE—bulk silicate earth; PREMA—prevaleent mantle; HIMU—mantle with high U/Pb ratio; EM I, EM II—enriched mantle

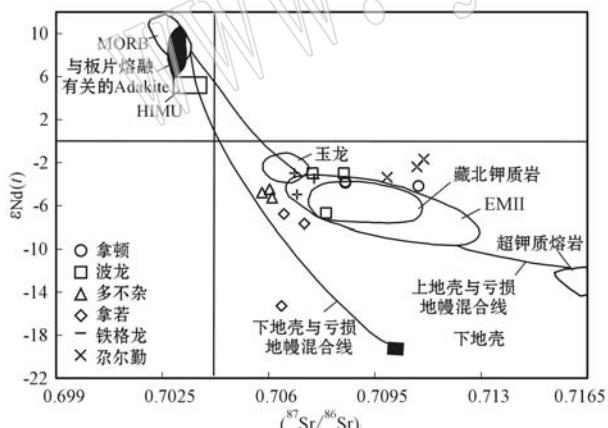


图 7 花岗闪长斑岩 Sr-Nd 同位素图解
(底图据郝金华等, 2011)

Fig. 7 Sr-Nd isotope diagram of granodiorite porphyries (after Hao Jinhua et al., 2011)

洋盆形成于三叠纪,于早侏罗世发育成熟,早白垩世闭合。李光明等(2011)的研究指出多龙矿集区广泛产出的美日切组英安岩形成于早白垩世($111.1 \pm$

1.4 Ma),具有岛弧特征。近年的工作测得矿集区内玄武质安山岩年龄为 106 Ma,说明闭合时间晚于 106 Ma(Li et al., 2011)。因此,闭合时间应在早白垩世之后。

(3) 岛弧背景:以上研究说明班公湖怒江新特提斯洋至少是在中侏罗世(约 167 Ma)开始向北俯冲,而在早白垩世(约 106 Ma)仍然没有完全闭合,那么发育于洋壳俯冲的这段时间内的岩浆活动应具有岩浆弧特征。最近的年代学研究(Guo et al., 2013)表明拿顿、波龙、拿若、铁格龙、尕尔勤含矿斑岩年龄分别为 115.54、122.4、119.45、119.65、122.45 Ma。同时,多龙矿集区内斑岩富集大离子亲石元素和亏损高场强元素,显示出岩浆与俯冲过程有关的特点(Miller et al., 1999)。对于多龙矿集区内的 6 个矿床,本文样品在 Rb-Yb+Ta 图解和 Rb-Y+Nb 图解(图 8)上的投点几乎都在落在火山弧花岗岩区域内。可见,多龙矿集区内矿床形成时间处于板块俯冲阶段,且显示为火山弧花岗岩。

(4) 增生造山背景:20世纪 90 年代提出了增生型造山带这种新型造山类型。增生造山表现为洋壳消减产生岛弧或陆缘弧的过程,包括增生杂岩的侧向生长、弧-弧和弧-陆拼贴等过程(潘桂棠等, 2004; 袁四化等, 2009)。在增生型造山带中存在大型斑岩矿床,如 Pebble 斑岩铜-钼-金矿床(Goldfarb et al., 2013)。段志明等(2013)对多龙矿集区内地层和构造特征的研究,认为多龙矿集区内的这套岩石为典型造山带大陆增生边缘的增生杂岩。从 1:25 万物玛幅地质图(陈玉禄等, 2006)^①中,可以看出多龙矿集区内地层整体表现出从北向南逐渐变新(由北向南分别出露上三叠统日干配错群 T₃r、下侏罗统曲色组 J₁q 和中侏罗统色哇组 J₂s)的向洋增生的特点,地质界线多为逆冲断裂,这同样也显示出成矿过程发生于增生造山背景中。

以上事实说明了多龙矿集区形成于洋壳向北俯冲这一增生造山背景中。洋壳的俯冲,深入地幔,使得俯冲板片发生部分熔融,释放的流体和熔体交代地幔物质,从而形成岩浆,岩浆上涌侵入增生杂岩从而形成增生型岛弧,并带来了地壳的增生以及矿床形成。这较为符合 Sillitoe(1972, 2010)所提出的斑岩矿床模型。

① 陈玉禄, 徐天德, 张宽忠, 等. 2006. 中华人民共和国地质图, 物玛幅 I44C004004.

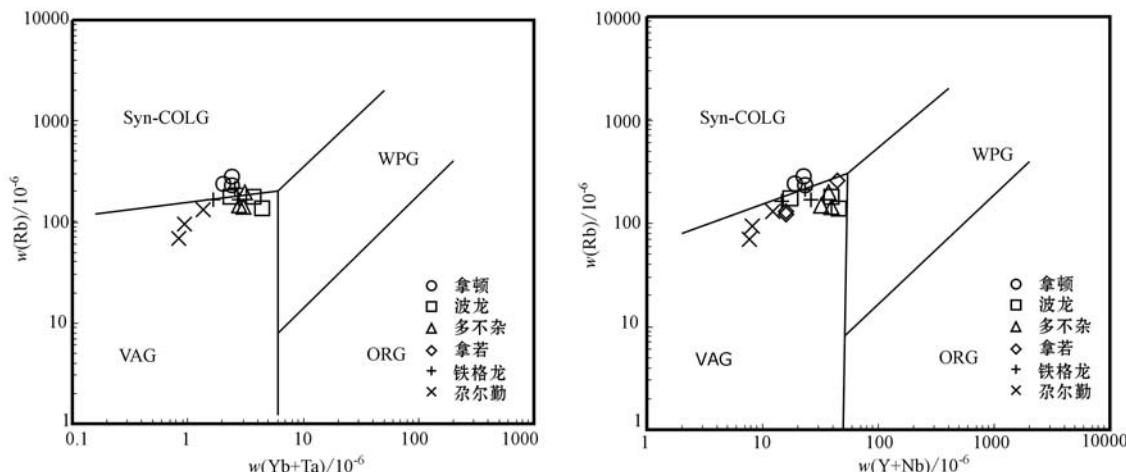


图 8 花岗闪长斑岩 Rb-Yb-Ta 图解和 Rb-Y+Nb 图解

Fig. 8 Rb-Yb-Ta diagram and Rb-Y+Nb diagram of the granodiorite porphyries

Syn-COLG—同碰撞花岗岩; WPG—板内花岗岩; VAG—火山弧花岗岩; ORG—造山期花岗岩

Syn-COLG—syn-collision granite; WPG—intratplate granite; VAG—volcano arc granite; ORG—orogenic granite

4.2 含矿岩浆源区

区内⁸⁷Sr/⁸⁶Sr均高于原始地幔现代值(0.7045),¹⁴³Nd/¹⁴⁴Nd低于原始地幔现代值(0.512638),具有高Sr和低Nd的特征。区内较高的(⁸⁷Sr/⁸⁶Sr)_i值(0.70579~0.71112)说明了地壳组分对成矿物质具有贡献。由于Rb的不相容性大于Sr,因而Rb更容易在地壳中富集,所以地壳中Rb/Sr值较高,据Taylor等(1985),上部陆壳Rb/Sr值大约为0.32,陆壳平均比值为0.24。在多龙矿集区,Rb/Sr值为0.14~8.82,平均值为2.97,高于地壳的平均值,同样也说明了地壳物质的加入。

从铅同位素特征上看,多龙矿集区内的矿床均落在造山铅演化线的附近(图5),应为地幔铅和下地壳铅的混合。在²⁰⁷Pb/²⁰⁴Pb-²⁰⁶Pb/²⁰⁴Pb相关图解(图6)中,多龙矿集区内矿床多集中在下部大陆地壳区域与EM II型富集地幔区域之间的边界附近,说明物质来源包括EM II型地幔以及大陆下部地壳。从矿集区内的Sr-Nd同位素图解(图7)同样可以看出,样品主要分布在EM II区域的周围,指示矿集区的成矿物质的幔源和壳源组成。其较低的¹⁴³Nd/¹⁴⁴Nd(0.511797~0.512478)和εNd(t)(-15.3~-1.7,平均值-4.5)可能代表了来源于俯冲板片的富集大离子亲石元素和轻稀土元素的流体或者熔体交代弧下地幔(侯增谦等,2008)。另外,祝向平等(2011)测得多不杂矿床辉钼矿中Re含量为397×10⁻⁶~3013×10⁻⁶,波龙矿区辉钼矿含量

为279×10⁻⁶~3066×10⁻⁶,暗示成矿物质来源于地幔(Mao et al., 1999; Stein et al., 2001)。此外,近年的研究(Oyarzun et al., 2001; Lee et al., 2012)认为起源于俯冲板片部分熔融的岩浆具有高氧逸度、水饱和以及高硫的特征,可以抑制Cu、Au等成矿元素进入不混溶的硫化物相,因而能从地幔源区搬运出大量的Cu、Au等成矿元素,在上地壳中石膏和磁铁矿等在成矿之前首先从流体中沉淀出来,导致流体中剩余的氧化态硫转化为还原态硫(硫化物相),进而使得矿质发生沉淀,例如智利的Caspiche斑岩铜金矿的金属硫化物也存在着与磁铁矿和石膏共生的特点(Sillitoe, 2013)。因此,在板块增生造山阶段中,由俯冲形成的大型斑岩矿集区的物质很可能来源于地幔。

综上所述,多龙矿集区内岩浆形成于板片俯冲增生造山的过程中,是由俯冲板片释放的流体和熔体交代地幔物质形成的岩浆,在上涌过程中得到地壳物质的加入,最终形成壳幔混源特征的岩浆。

4.3 区域成矿意义

多龙矿集区内矿床具有相似的地球化学特征,在K₂O-SiO₂图解中岩石多集中在钾玄岩系列和高钾钙碱性系列区域,富集大离子亲石元素(LILE: Rb、K等),而亏损高场强元素(HFSE: Nb、Ta、P、Ti),均具有δEu负异常,Pb-Sr-Nd同位素组成较为一致,集中在造山带区域;在Th/Yb-Ta/Yb图解中集中在活动大陆边缘区域;在Rb-Y+Nb图解中,

集中在岛弧花岗岩区域。

曲晓明等(2012)发现了距多龙矿集区500 km的班公湖-怒江成矿带中段的雄梅斑岩铜矿具有与多龙矿集区较为一致的岩石地球化学特征(富集大离子亲石元素和亏损高场强元素),且岩体年龄也与多龙矿集区较为相近($^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$ 加权平均年龄为 106 ± 0.48 Ma, MSWD=0.92)。另外,近年来于班公湖-怒江缝合带的北侧、多龙矿集区的西北方又发现具超大型远景的青草山斑岩铜金矿床,周金胜等(2013)对该矿花岗闪长斑岩进行了锆石U-Pb年代学及微量元素的研究,得到锆石 $^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$ 加权平均年龄为 114.60 ± 1.20 Ma(MSWD=1.07)。由于缺少青草山矿区的岩石地球化学数据,不能判断其与多龙矿集区内矿床在这方面的相似性,但是其形成年龄与多龙矿集区相当,也应处于俯冲阶段。可见,班公湖-怒江成矿带北侧的这些斑岩矿床具有较为相近的年龄,说明这些矿床是在同一板块构造阶段形成的,也暗示了班公湖-怒江成矿带的存在,仍然具有发现更多类似矿床的可能。

5 结论

(1) 多龙矿集区形成于板块俯冲时的增生造山阶段,成矿背景为典型的岛弧环境,俯冲板块部分熔融后交代地幔而形成大规模岩浆活动,最后侵入上部增生楔从而形成斑岩矿床。

(2) 多龙矿集区含矿岩浆为壳幔混源,为俯冲板片释放的流体和熔体交代地幔所形成的岩浆在向上运移过程中混入地壳物质而形成。

(3) 多龙矿集区的存在以及班公湖-怒江带西段的青草山矿床和中段的雄梅矿床的发现,暗示了班公湖-怒江成矿带的存在。这些矿床具有较为一致的年代学和地球化学特征(缺乏青草山矿床数据),说明它们是同一板块活动的结果,有望在该带上发现更多类似矿床。

致谢 野外工作得到西藏地质矿产勘查开发局第五地质大队李玉彬、中煤集团吕立娜、中国地质大学(北京)李小赛的帮助,在此表示感谢。

References

Duan Zhiming, Li Guangming, Zhang Hui, et al. 2013. The formation

and its geologic significance of Late Triassic-Jurassic accretionary complexes and constraints on metallogenic and geological settings in Duolong porphyry copper gold ore concentration area, northern Bangong Co-Nujiang suture zone, Tibet[J]. Geological Bulletin of China, 32(5): 742~750(in Chinese with English abstract).

Gill J. 1981. Orogenic Andesites and Plate Tectonics[M]. Berlin, Heidelberg, New York: Springer, 1~390.

Goldfarb R J, Anderson E D and Hart C J R. 2013. Tectonic Setting of the Pebble and Other Copper-Gold-Molybdenum Porphyry Deposits within the Evolving Middle Cretaceous Continental Margin of Northwestern North America[J]. Economic Geology, 108(3): 405~419.

Guo S, Zhao Y Y, Li X S, et al. 2013. Mineral deposit model of the Duolong gold-rich porphyry copper deposit cluster in Gaize County, Tibet: Evidence from zircon U-Pb dating[A]. Mineral Deposit Research for a High-tech World[C]. 12th Biennial SGA Meeting, Sweden: The Society for Geology Applied to Mineral Deposits, 1455~1458.

Hao Jinhua, Chen Jianping, Dong Qingji, et al. 2011. Element and Sr-Nd-Pb isotope geochemistry of ore-bearing porphyries in northern Sanjiang Mo(Cu) ore belt, Qinghai Province: Implications for tectonic setting and petrogenesis[J]. Acta Petrologica et Mineralogica, 30(3): 427~437(in Chinese with English abstract).

Hou Zengqian. 2010. Metallogenesis of continental collision[J]. Acta Geologica Sinica, 84(1): 30~58(in Chinese with English abstract).

Hou Zengqian and Yang Zhiming. 2009. Porphyry deposits in continental setting of China: Geological characteristics, magmatic-hydrothermal system, and metallogenic model[J]. Acta Geologica Sinica, 83(12): 1779~1816(in Chinese with English abstract).

Hou Zengqian, Zheng Yuanchuan, Yang Zhiming, et al. 2012. Metallogenesis of continental collision setting: Part I. Gangdese Cenozoic porphyry Cu-Mo systems in Tibet[J]. Mineral Deposits, 31(4): 647~670(in Chinese with English abstract).

Lee C T A, Luffi P, Chin E J, et al. 2012. Copper systematics in arc magmas and implications for crust-mantle differentiation[J]. Science, 336(6077): 64~68.

Li Guangming, Duan Zhiming, Liu Bo, et al. 2011. The discovery of Jurassic accretionary complexes in Duolong area, northern Bangong Co-Nujiang suture zone, Tibet, and its geologic significance[J]. Geological Bulletin of China, 30(8): 1256~1260(in Chinese with English abstract).

Li Guangming, Li Jinxiang, Qin Kezhang, et al. 2006. Preliminary study on alteration and mineralization features and high-oxidized ore-forming fluids at Duobza super-large Au-rich porphyry Cu de-

- posit, western Tibet[J]. *Mineral Deposits*, 25: 411~414(in Chinese with English abstract).
- Li J X, Qin K Z, Li G M, et al. 2011. Magmatic-hydrothermal evolution of the Cretaceous Duolong gold-rich porphyry copper deposit in the Bangongco metallogenic belt, Tibet: Evidence from U-Pb and $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$ geochronology[J]. *Journal of Asian Earth Sciences*, 41(6): 525~536.
- Lü Lina. 2012. A Dissertation Submitted to Chinese Academy of Geological Sciences for Master of Science[D]. Beijing: Chinese Academy of Geological Sciences, 5~11(in Chinese with English abstract).
- Lü Lina and Zhao Yuanyi. 2010. Si, O, S, Pb isotope characteristics and geological significance of Duobuza porphyry copper-gold deposit [J]. *Mineral Deposits*, 29: 489~490(in Chinese).
- Mao J W, Pirajno Franco, Lehmann Bernd, et al. 2013. Distribution of porphyry deposits in the Eurasian continent and their corresponding tectonic settings[J]. *Journal of Asian Earth Sciences*, <http://dx.doi.org/10.1016/j.jseaes.2013.09.002>.
- Mao J W, Zhang Z C, Zhang Z H, et al. 1999. Re-Os isotopic dating of molybdenites in the Xiaoliugou W(Mo) deposit in the northern Qilian mountains and its geological significance[J]. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 63(11): 1815~1818.
- Miller C, Schuster R, Frank W, et al. 1999. Post-collisional notassic and ultranotassic magmatism in SW Tibet: geochemical and Sr-Nd-Pb-O isotopic constraints for mantle source characteristics and netrogenesis[J]. *Petrol.*, 40(9): 1339~1424.
- Oyarzun R, Maroueza Lollo J, Lopez I, et al. 2001. Giant versus small porphyry copper deposits of Cenozoic age in northern Chile: Adakitic versus normal calc-alkaline magmatism[J]. *Mineralium Deposita*, 6(7): 94~798.
- Pan Guitang, Wang Liquan, Yin Fuguang, et al. 2004. Charm of landing of plate tectonics on the continent as viewed from the study of the archipelagic arc-basin system[J]. *Geological Bulletin of China*, 23(9~10): 933~939(in Chinese with English abstract).
- Qu Xiaoming, Wang Ruijiang, Dai Jingjing, et al. 2012. Discovery of Xiongmei porphyry copper deposit in middle segment of Bangonghu-Nujiang suture zone and its significance[J]. *Mineral Deposits*, 31(1): 1~12(in Chinese with English abstract).
- Qu Xiaoming and Xin Hongbo. 2006. Ages and tectonic environment of the Bangong Co Porphyry copper belt in western Tibet, China[J]. *Geological Bulletin of China*, 25(7): 792~799(in Chinese with English abstract).
- Rollison H R. 1993. Using Geochemical Data: Evolution, Presentation, Interpretation[M]. Longman Scientific (Technical Limited), 186 ~187.
- Rudnick R L and Gao S. 2003. Composition of the continental crust[J]. *Treatise on Geochemistry*, 3: 1~64.
- Shi Rendeng. 2007. Bangong Lake SSZ type ophiolite age restrict Bangong Nu Ocean[J]. *Chinese Science Bulletin*, 52(2): 223~227(in Chinese).
- Shi Rendeng, Yang Jingsui, Xu Zhiqin, et al. 2005. Recognition of MOR-and SSZ-type ophiolites in the Bangong Lake ophiolite manges western Tibet: evidence from two kinds of mantle peridotites[J]. *Acta Petrologica et Mineralogica*, 24(5): 397~408(in Chinese with English abstract).
- Sillitoe R H. 1972. A Plate Tectonic Model for the Origin of Porphyry Copper Deposits[J]. *Economic Geology*, 67(2): 184~197.
- Sillitoe R H. 2010. Porphyry Copper Systems[J]. *Economic Geology*, 105(1): 3~41.
- Sillitoe R H. 2013. Geology of the Caspoche Porphyry Gold-Copper Deposit, Maricunga Belt, Northern Chile[J]. *Economic Geology*, 108(4): 585~604.
- Stein H J, Markey R J, Morgan J W, et al. 2001. The remarkable Re-Os chronometer in molybdenite: How and why it works[J]. *Terra Nova*, 13(6): 479~486.
- Sun S S and McDonough W F. 1989. Chemical and isotopic systematics of oceanic basalts: Implications for mantle composition and processes[A]. Saunders A D and Norry M J. *Magmatism in the Ocean Basins*[C]. Geological Society, London, Special Publications, 42: 313~345.
- Tang Juxing, Sun Xinguo, Ding Shuai, et al. 2014. Discovery of the Epithermal Deposit of Cu(Au-Ag) in the Duolong Ore Concentrating Area, Tibet[J]. *Acta Geoscientica Sinica*, 35(1): 6~10(in Chinese with English abstract).
- Taylor S R and McLenna W F. 1985. The Continental Crust: Its Composition and Evolution[M]. London: Blackwell Sci. Publ., 1~312.
- Wilson M. 1989. Igneous Petrogenesis: A Global Tectonic Approach [M]. London: Unwin Hyman, 1~466.
- Wu Dexin, Zhao Yuanyi, Liu Chaoqiang, et al. 2012. Geochemical indicators of porphyry copper deposits in the Dobzha ore concentration area, Tibet[J]. *Acta Geoscientica Sinica*, 33(2): 185~196 (in Chinese with English abstract).
- Xin Hongbo, Qu Xiaoming, Wang Ruijiang, et al. 2009. Geochemistry and Pb, Sr, Nd isotopic features of ore-bearing porphyries in Bangong Lake porphyry copper belt, western Tibet[J]. *Mineral Deposits*, 28(6): 785~792(in Chinese with English abstract).
- Yuan Sihua, Pan Guitang, Wang Liquan, et al. 2009. Accretionary

- orogenesis in the active continental margins [J]. Earth Science Frontiers, 16(3): 31~48(in Chinese with English abstract).
- Zhou Jinsheng, Meng Xiangjin, Zang Wenshuan, et al. 2013. Zircon U-Pb geochronology and trace element geochemistry of the ore-bearing porphyry in Qingcaoshan porphyry Cu-Au deposit, Tibet, and its geological significance [J]. Acta Petrologica Sinica, 29(11): 3 755~3 766(in Chinese with English abstract).
- Zhu Xiangping, Chen Huaan, Ma Dongfang, et al. 2011. Re-Os dating for the molybdenite from Bolong porphyry copper-gold deposit in Tibet, China and its geological significance [J]. Acta Petrologica Sinica, 27(7): 2 159~2 164(in Chinese with English abstract).

附中文参考文献

- 段志明, 李光明, 张晖, 等. 2013. 西藏班公湖-怒江缝合带北缘多龙矿集区晚三叠世-侏罗纪增生杂岩结构及其对成矿地质背景的约束[J]. 地质通报, 32(5): 742~750.
- 郝金华, 陈建平, 董庆吉, 等. 2011. 青海“三江”北段斑岩钼铜矿带含矿斑岩地球化学、Sr-Nd-Pb同位素特征及地质意义[J]. 岩石矿物学杂志, 30(3): 427~437.
- 环球矿业资讯. 2013. 西藏多龙铜矿区钻探继续见到厚富铜矿体[OL]. http://blog.sina.com.cn/s/blog_489dd7c80102ec0t.html. 2013-12-27.
- 候增谦. 2010. 大陆碰撞成矿论[J]. 地质学报, 84(1): 30~58.
- 候增谦, 王二七, 莫宣学, 等. 2008. 青藏高原碰撞造山与成矿作用[M]. 北京: 地质出版社, 1~980.
- 候增谦, 杨志明. 2009. 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, 83(12): 1 779~1 816.
- 候增谦, 郑远川, 杨志明, 等. 2012. 大陆碰撞成矿作用: I. 冈底斯新生代斑岩成矿系统[J]. 矿床地质, 31(4): 647~670.
- 李光明, 段志明, 刘波, 等. 2011. 西藏班公湖-怒江结合带北缘多龙地区侏罗纪增生杂岩的特征及意义[J]. 地质通报, 30(8): 1 256~1 260.

- 李光明, 李金祥, 秦克章, 等. 2006. 西藏多不杂超大型富金斑岩铜矿的蚀变-矿化特征及高氧化成矿流体研究[J]. 矿床地质, 25(增刊): 411~414.
- 吕立娜. 2012. 西藏班公湖-怒江成矿带西段富铁与铜(金)矿床模型[D]. 北京: 中国地质科学院, 5~11.
- 吕立娜, 赵元艺. 2010. 多不杂斑岩型铜金矿床的Si、O、S和Pb同位素特征及地质意义[J]. 矿床地质, 29(增刊): 489~490.
- 潘桂棠, 王立全, 尹福光, 等. 2004. 从多岛弧盆系研究实践看板块构造登陆的魅力[J]. 地质通报, 23(9~10): 933~939.
- 曲晓明, 王瑞江, 代晶晶, 等. 2012. 西藏班公湖-怒江缝合带中段雄梅斑岩铜矿的发现及意义[J]. 矿床地质, 31(1): 1~12.
- 曲晓明, 辛洪波. 2006. 西藏班公湖斑岩铜矿带的形成时代与成矿构造环境[J]. 地质通报, 25(7): 792~799.
- 史仁灯. 2007. 班公湖SSZ型蛇绿岩年龄对班-怒洋时限的制约[J]. 科学通报, 52(2): 223~227.
- 史仁灯, 杨经绥, 许志琴, 等. 2005. 西藏班公湖存在MOR型和SSZ型蛇绿岩——来自两种不同地幔橄榄岩的证据[J]. 岩石矿物学杂志, 24(5): 397~408.
- 唐菊兴, 孙兴国, 丁帅, 等. 2014. 西藏多龙矿集区发现浅成低温热液型铜(金银)矿床[J]. 地球学报, 35(1): 6~10.
- 吴德新, 赵元艺, 刘朝强, 等. 2012. 西藏多不杂矿集区斑岩铜矿地球化学指标研究[J]. 地球学报, 33(2): 185~196.
- 辛洪波, 曲晓明, 王瑞江, 等. 2009. 藏西班公湖斑岩铜矿带成矿斑岩地球化学及Pb、Sr、Nd同位素特征[J]. 矿床地质, 28(6): 785~792.
- 袁四化, 潘桂棠, 王立全, 等. 2009. 大陆边缘增生造山作用[J]. 地学前缘, 16(3): 31~48.
- 周金胜, 孟祥金, 藏文栓, 等. 2013. 西藏青草山斑岩铜金矿含矿斑岩锆石U-Pb年代学、微量元素地球化学及地质意义[J]. 岩石学报, 29(11): 3 755~3 766.
- 祝向平, 陈华安, 马东方, 等. 2011. 西藏波龙斑岩铜金矿床的Re-Os同位素年龄及其地质意义[J]. 岩石学报, 27(7): 2 159~2 164.