

doi: 10.12029/gc20190101

李观龙, 杨经绥, 薄容众, 芮会超, 熊发挥, 郭腾飞, 张承杰. 2019. 西藏班公湖—怒江缝合带东段丁青蛇绿岩中的铬铁矿: 产出特征与类型[J]. 中国地质, 46(1): 1–20.

Li Guanlong, Yang Jingsui, Bo Rongzhong, Rui Huichao, Xiong Fahui, Guo Tengfei, Zhang Chengjie. 2019. Dingqing ophiolite chromite in the eastern segment of Bangong Co–Nujiang suture zone, Tibet: Occurrence characteristics and classifications[J]. Geology in China, 46(1):1–20 (in Chinese with English abstract).

西藏班公湖—怒江缝合带东段丁青蛇绿岩中的 铬铁矿: 产出特征与类型

李观龙^{1,2}, 杨经绥², 薄容众^{1,2}, 芮会超^{2,3}, 熊发挥², 郭腾飞⁴, 张承杰⁴

(1. 中国地质大学(北京)地球科学与资源学院, 北京 100083; 2. 地幔研究中心, 自然资源部深地动力学重点实验室, 中国地质科学院地质研究所, 北京 100037; 3. 中国地质大学(武汉)地球科学学院, 湖北 武汉 430074; 4. 中国冶金地质总局第二地质勘查院, 福建 福州 350108)

摘要:丁青蛇绿岩体位于班公湖—怒江缝合带东段, 该缝合带与雅鲁藏布江缝合带并列, 是寻找我国铬铁矿床的重要地区。该蛇绿岩体呈近南东向展布, 总面积近 600 km², 主要由地幔橄榄岩、辉石岩、辉长岩、辉绿岩、玄武岩、斜长花岗岩、硅质岩和泥质岩组成。根据空间分布, 丁青蛇绿岩分为东、西两个岩体。在前人工作基础上, 通过地质填图、实测剖面、探槽和钻孔编录, 共发现豆荚状铬铁矿矿点 83 处, 其中东岩体 27 处, 西岩体 56 处。根据铬铁矿产出和围岩特征, 丁青铬铁矿可分为 4 种产出类型。类型 I: 矿体呈脉状产出, 围岩为条带状或透镜状纯橄榄岩和块状方辉橄榄岩; 类型 II: 矿体呈透镜状、豆荚状或不规则团块状产出, 围岩为薄壳状纯橄榄岩和斑杂状或块状方辉橄榄岩; 类型 III: 矿体呈浸染状弥散分布于纯橄榄岩中, 围岩为条带状纯橄榄岩和块状或斑杂状方辉橄榄岩; 类型 IV: 矿体呈条带状产出, 围岩为条带状或透镜状纯橄榄岩和具定向结构的方辉橄榄岩。根据矿石构造特征, 主要分为块状、脉状、浸染状、浸染条带状 4 种类型。块状和脉状铬铁矿为矿石的主要类型, 少量为浸染状和浸染条带状, 局部纯橄榄岩中发育极少量瘤状或豆状构造。本研究选择了 13 处代表性铬铁矿点开展了详细的岩石学、矿相学、矿物学和矿物化学等工作。根据矿石中铬尖晶石的矿物化学特征, 可将丁青铬铁矿矿体分为高铬($Cr^{\#}=78\sim 86$)、中高铬($Cr^{\#}=60\sim 74$)、中铬($Cr^{\#}=30\sim 51$)和低铬($Cr^{\#}=9\sim 14$) 4 种类型($Cr^{\#}=100\times Cr/(Cr+Al)$)。丁青东岩体赋存有中高铬型和中铬型铬铁矿, 缺少高铬型铬铁矿; 西岩体赋存有高铬型和低铬型铬铁矿, 缺少中高铬型铬铁矿。同时在丁青东、西岩体内均发现存在一种 $Cr^{\#}$ 极低的铬铁矿, 暂定为“低铬型铬铁矿”。这些不同类型的铬铁矿体与野外产出有一定的对应关系, 也可能后者制约了它们的成因。与罗布莎岩体中的典型高铬型铬铁矿对比, 丁青豆荚状铬铁矿在矿物组合和矿物化学成分等方面具有许多相似性, 认为存在较大的找矿空间。

关键词:班公湖—怒江缝合带; 丁青蛇绿岩; 铬铁矿; 产出特征; 低铬型铬铁矿

中图分类号: P618.33 文献标志码: A 文章编号: 1000-3657(2019)01-0001-20

Dingqing ophiolite chromite in the eastern segment of Bangong Co–Nujiang suture zone, Tibet: Occurrence characteristics and classifications

收稿日期: 2018-12-06; 改回日期: 2019-01-16

基金项目: 中国地质调查局项目(DD20160023-01)、国家自然科学基金项目(41720104009)及国土资源部行业基金项目(201511022)联合资助。

作者简介: 李观龙, 男, 1992 年生, 硕士生, 研究方向为蛇绿岩和铬铁矿; E-mail: lglftq@163.com。

通讯作者: 杨经绥, 男, 1950 年生, 中国科学院院士, 研究方向为岩石大地构造; E-mail: yangjsui@163.com。

LI Guanlong^{1,2}, YANG Jingsui², BO Rongzhong^{1,2}, RUI Huichao^{2,3}, XIONG Fahui²,
GUO Tengfei⁴, ZHANG Chengjie⁴

(1. School of Earth Sciences and Resources, China University of Geosciences, Beijing 100083, China; 2. Center for Advanced Research on the Mantle (CARMA), Key laboratory of Deep-Earth Dynamics of Ministry of Natural Resources, Institute of Geology, Chinese Academy of Geological Sciences, Beijing 100037, China; 3. School of Earth Sciences, China University of Geosciences, Wuhan 430074, Hebei, China; 4. The Second Geo-Exploration Institute of CMGB, Fuzhou 350108, Fujian, China)

Abstract: The Dingqing ophiolite is located in the eastern segment of the Bangong Co–Nujiang suture zone which is juxtaposed with the Yarlung Zangbo suture zone, and is an important area for finding chromite deposits in China. The ophiolite body is distributed in the southeast direction, with a total area of nearly 600 km². It is mainly composed of mantle peridotite, pyroxenite, gabbro, diabase, basalt, plagiogranite, siliceous rock and argillaceous rock. According to the spatial distribution, the Dingqing ophiolite is divided into east and west ophiolite bodies. On the basis of previous work, 83 chromite ore spots were discovered through geological mapping, measured sections, trench recording and drilling, including 27 in the east ophiolite body and 56 in the west ophiolite body. According to the production characteristics of the chromite spots and types of wall rock, Dingqing chromite can be divided into four types: Type I: chromite orebodies are vein-like, the wall rock is stripe-like or lenticular dunite and massive harzburgite; Type II: chromite orebodies are lenticular, podiform or irregularly agglomerated, the wall rock is thin-shelled dunite and porphyry or massive harzburgite; Type III: chromite is diffusely distributed in dunite, and the wall rock is stripe-shaped dunite and massive or porphyry harzburgite; Type IV: chromite orebodies are produced in stripes, and the wall rock is stripe-like or lenticular dunite and directional harzburgite. According to the structural characteristics of chromitites, they are mainly divided into four types: massive, vein, disseminated and disseminated stripe. Massive and veined chromitites are the main types of chromitites, a small amount is disseminated and disseminated stripe, with a small amount of nodular or bean-like structure developed in local dunite. In this study, 13 representative chromite ore spots were selected for detailed studies of petrology, mineralogy, and mineral chemistry. According to the mineral chemistry characteristics of chrome spinel in the chromitites, the chromite bodies can be divided into four types, i.e., high chromium (Cr[#]78–85), medium-high chromium (Cr[#]60–74), medium chromium (Cr[#]30–51) and low chromium (Cr[#]9–14) (Cr[#]=100×Cr/(Cr+Al)). The east ophiolite body contains medium-high chromium and medium chromium type chromitite, with the lack of high chromium type chromitite; the west ophiolite body contains high chromium and medium chromium type chromitite, and lacks medium-high chromium type chromitite. At the same time, there is a very low Cr# chromitite in the east rock mass and the west rock mass, which is tentatively assigned to “low chromium type chromitite”. These different types of chromitites have a certain correspondence with the field output, and may also restrict their geneses. This content will be expanded in subsequent articles. A comparison with Luobusa podiform chromitite and peridotite in mineral assemblages and mineral chemistry shows that they have many similar characteristics, even with the probable existence of a good prospecting space.

Keywords: Bangong Co–Nujiang suture zone; Dingqing ophiolite; chromitite; occurrence characteristics; low chromium type chromitite

About the first author: LI Guanlong, male, born in 1992, master candidate, majors in ophiolite and chromitite; E-mail: lglfftq@163.com.

About the corresponding author: YANG Jingsui, male, born in 1950, academician of Chinese Academy of Sciences, majors in petrology and tectonics in Tibetan Plateau and orogenic belts; E-mail: yangjsui@163.com.

Fund support: Supported by China Geology Survey Project (No. DD20160023–01), National Natural Science Foundation of China (No. 41720104009) and Foundation of MLR (No. 201511022).

1 引 言

铬铁矿 ((Mg, Fe²⁺)(Cr, Al, Fe³⁺)₂O₄) 是自然界中唯一可用于提炼铬的矿物原料。铬由于具有质硬、耐磨、耐高温、抗腐蚀等特性, 被广泛应用于冶金工

业、耐火材料以及化学工业中, 是生产不锈钢不可替代的原料。与中国巨大需求呈现反差的是, 铬铁矿一直是短缺矿种, 中国铬铁矿储量仅占世界储量千分之一左右(杨经绥等, 2010)。铬铁矿作为一种不可或缺的战略资源, 对其开展深入的野外地质调

查与成因研究具有重要意义。目前已在西藏雅鲁藏布江缝合带达机翁、东波、普兰、休古嘎布、昂仁、日喀则、罗布莎等几个较大岩体内发现了许多铬铁矿体(黄圭成等, 2007; 杨经绥等, 2011; 熊发挥等, 2013; 来盛民等, 2015; 连东洋等, 2015; 熊发挥等, 2016; Xiong Fahui, et al., 2017; 余宇伟, 2017; 章奇志等, 2017), 但规模都相对较小, 超过100万t的铬铁矿矿床仅西藏罗布莎一处。罗布莎铬铁矿作为中国最大的铬铁矿床, 其找矿规律及成因问题长期以来备受国内外学者关注(王希斌等, 1987; Yang Jingsui et al., 2007; 杨经绥等, 2008; 鲍佩声, 2009; Yang Jingsui et al., 2014; 熊发挥等, 2014; Xiong Fahui et al., 2015)。与雅鲁藏布江缝合带并称为西藏两条最重要的缝合带之一的班公湖—怒江缝合带, 具有与雅鲁藏布江缝合带相似的地质背景与岩石组合, 因此也具有蕴藏超大型铬铁矿矿床的潜力。

作为班公湖—怒江缝合带东段最大的蛇绿岩体, 丁青蛇绿岩形成的年龄和构造背景已有一定程度研究。丁青蛇绿岩存在(186.5±1.5)Ma、(217.8±1.6)Ma、(164±5)Ma三种不同的年龄数据(强巴扎西等, 2009; 林靛等, 2015; Wang Baodi et al., 2016)。(186.5±1.5)Ma和(217.8±1.6)Ma为东岩体辉长岩和堆晶辉长岩结晶年龄, (164±5)Ma为西岩体辉绿岩形成年龄。根据硅质岩中发现的放射虫化石, 认为丁青东蛇绿岩体形成于晚三叠世, 西蛇绿岩体形成于早侏罗世(李红生, 1988; 王玉净等, 2002)。西藏丁青蛇绿混杂岩中新发现有辉长质碎斑糜棱岩块, 采用⁴⁰Ar-³⁹Ar快中子活化法获得的糜棱岩基质普通辉石坪年龄为(197.3±3.3)Ma(早侏罗世), 认为代表蛇绿岩的侵位年龄(游再平, 1997)。根据丁青东蛇绿岩基性侵入岩地球化学特征, 认为其形成于弧前环境(张旗等, 1985, 1987; 刘文斌等, 2002); 西岩体缺少玻安质岩浆杂岩, 构造混杂岩块具有MORB和OIB的地球化学特征, 认为形成于洋中脊和洋岛的构造背景(邹光富, 1993; 韦振权等, 2007)。

1966—1972年, 四川省地质局108队在丁青一带对超镁铁质岩开展了铬铁矿普查找矿工作, 圈定了若干超基性岩体, 并提交了《西藏丁青东超基性岩体铬铁矿普查报告》和《西藏丁青西超基性岩体铬铁矿普查报告》, 这是目前研究丁青超基性岩体和铬铁矿最详细的资料。但由于高原地区强烈的

风化作用和人为的滥采, 导致几乎所有出露地表的铬铁矿都遭到严重的破坏。在前人工作基础上, 在丁青蛇绿岩体中标定了83处铬铁矿矿体和矿化点(下文统称矿点), 开展了丁青蛇绿岩铬铁矿的野外产出、矿相学和矿物化学等特征研究。本文将通过丁青蛇绿岩地幔橄榄岩和铬铁矿调查, 为研究高铬和高铝铬铁矿成因, 探讨丁青蛇绿岩乃至班公湖—怒江缝合带的构造演化提供证据, 为在丁青地区进一步开展铬铁矿找矿工作打下基础。

2 丁青蛇绿岩产出地质背景

班公湖—怒江缝合带是青藏高原著名的两条缝合带之一, 是新特提斯蛇绿岩的东延部分(Girardeau et al., 1984)。该带横贯青藏高原中部, 东西向延伸超过2000 km。从西部的班公湖经改则、尼玛、东巧、安多向东延伸, 过了丁青之后转向南(图1)。班公湖—怒江缝合带蛇绿岩主要由班公湖、安多和丁青等几大蛇绿岩体组成, 是中生代班公湖—怒江洋经历扩张、俯冲消减、地体拼合后残留在地表的大洋岩石圈残片, 在建立青藏高原构造格架和恢复青藏高原演化历史方面具有重要地位。

20世纪60年代, 李璞等(1955)首次发现并报道沿怒江上游断裂带有超基性岩体的分布; 70年代, 王希斌等对在安多和丁青超基性岩体中做了初步岩石学和铬铁矿初步找矿工作; 80年代, 诸多学者相继在怒江断裂带沿线发现保存较好的蛇绿岩剖面 and 岩石组合(郑一义, 1982; 郑海翔等, 1982; 张旗, 1983), 至此初步确定班公湖—怒江缝合带的雏形。

研究区位于西藏丁青县和类乌齐县境内, 班公湖—怒江缝合带呈北西西向狭长带状贯穿研究区, 面积约900 km²。带内发育与缝合带密切相关的丁青蛇绿岩套和其后沉积的海相、陆相地层。尺牍以西分布侏罗系木噶岗日群浅变质岩系, 以东则为下侏罗统亚宗混杂岩、中侏罗统德极国组、德吉弄组和上侏罗统机末组。在其上分布着上白垩统竟柱山组、八达组和古近系宗白组陆相盖层。蛇绿岩体与南侧竟柱山组呈断层接触, 与北侧亚宗混杂岩、德极国组呈不整合接触。本区木噶岗日群(JM)为其东延末端, 与蛇绿岩套紧密共生, 为一套复理石建造。岩性以深灰色—灰黑色含泥钙质粉砂质板岩、粉砂质泥质板岩、含泥细—粉砂质板岩为主, 夹

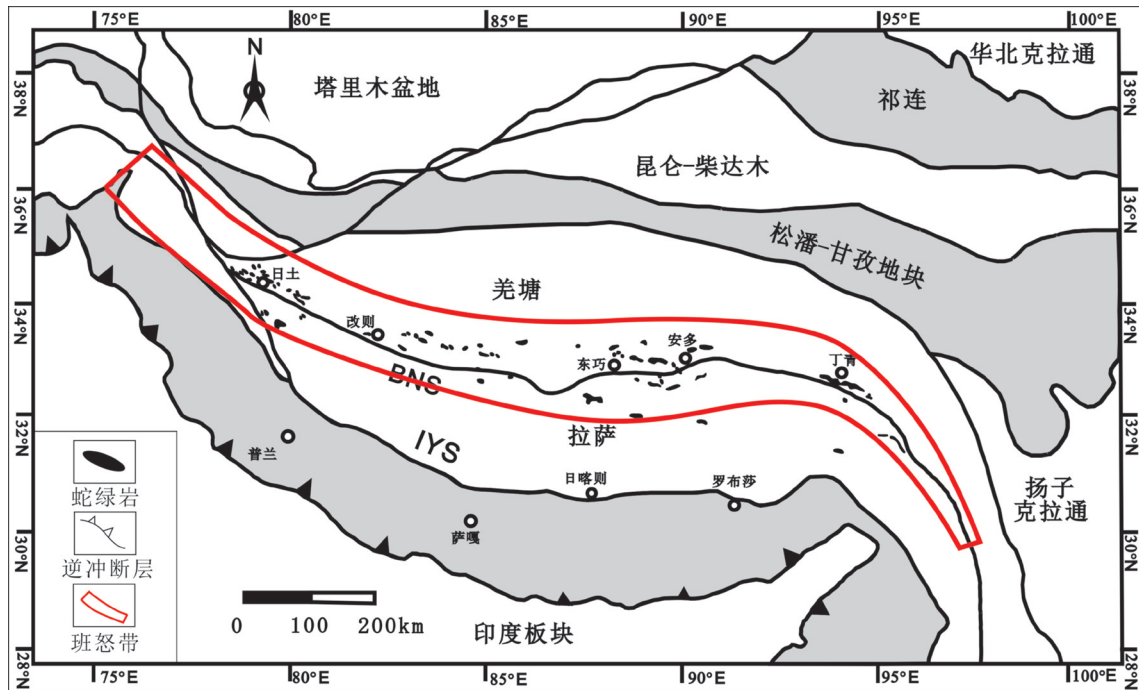


图1 青藏高原构造格架图(据 Liu Chuanzhou et al., 2010)

Fig.1 Geological sketch map of the Tibetan Plateau, showing major tectonic units(after Liu Chuanzhou et al., 2010)

灰—灰黑色中层变质石英砂岩,厚约3544.91 m;亚宗混杂岩(J_{1yz})分布于丁青县城北4 km的亚宗村西山,出露局限约3 km²,由基质、原地岩块、外来岩块三部分组成。外来岩块主要是蛇绿岩的肢解残片,原地岩块以火山岩、火山碎屑岩、块状硅质岩为主,基质部分主要岩性为黑板岩、灰色薄层状变质岩屑长石石英砂岩夹灰色、灰白色、褐色、紫红色薄板状硅质岩或硅质板岩;德极国组(J_2d)为不整合在三叠纪蛇绿岩套或下侏罗统混杂岩之上的一套灰色细碎屑岩。其岩性底部为灰色、灰褐色复成分砾岩;下部为灰色、灰白色细粒石英砂岩、粉砂岩、粉砂质泥岩;上部为灰黑色、黑色泥页岩夹饼状炭泥质结核。为一套向上变细的滨岸陆源碎屑沉积,厚约987.6 m,岩性稳定,横向变化不大;德吉弄组(J_2dj)整合与德极国组之上、机末组之下的一套灰色细碎屑岩夹薄层状、条带状、团块状、透镜状灰岩的地层体,富含石珊瑚、刺毛螭、层孔虫、海百合化石。主要岩性为灰色泥岩、粉砂质泥岩、粉砂岩、灰色薄层细粒长石石英砂岩及灰色薄层状、条带状、团块状、透镜状微晶灰岩、生物灰岩、生物碎屑灰岩及礁灰岩大滑块。为一套浅海陆棚边缘碳酸盐岩、陆源碎屑岩沉积,厚约968.75 m,横向变化不大;机

末组(J_j)为整合于德极国组之上的一套灰岩、白云岩。下部岩性为深灰色薄层状—厚层状泥(微)晶灰岩、生屑灰岩、核形石辉石、亮晶砂屑灰岩夹少量灰色泥(页)岩;上部岩性为灰黄色厚层含粉砂微晶白云岩、页片状泥质泥晶白云岩。为一套浅海相沉积地层,厚约592.1 m;竞柱山组(K_j)与蛇绿岩体呈断层接触关系,或不整合分布于机末组之上,主要由紫红色砾岩、含砾砂岩、砂岩和粉砂岩组成,为一套陆相河湖相沉积地层;宗白组(E_z)为不整合于上白垩统、中侏罗统及丁青蛇绿岩套之上的一套灰色碎屑岩夹油页岩。其下部为灰色、灰黄色、灰褐色厚层状细砾岩、石英砂岩、长石砂岩;上部为灰色黏土岩、泥岩、黑色页岩夹灰黄色细粒长石石英砂岩、粉砂岩及油页岩。为一套向上变细的湖相沉积地层,厚度大于294.19 m。

研究区出露二叠纪到白垩纪侵入岩,面积约1856 km²,占研究区总面积的11%。岩石类型为中酸性花岗岩类,成因类型以S型为主,I型次之。根据所处构造位置、同位素年龄、岩石组合特征及关系等,将研究区侵入岩分为2个时期、3个构造侵入岩带。海西期(古生代)和燕山期(中生代);他念翁构造侵入岩带、唐古拉构造侵入岩带和冈底斯—念

青唐古拉构造侵入岩带。他念他翁构造侵入岩带侵入岩时代为晚二叠世至三叠纪,由2个岩体组成。晚二叠世拉疆弄岩体岩石组合为英云闪长岩+花岗闪长岩+二长花岗岩,属火山岩浆弧环境中强力就位热气球膨胀形成的I型花岗岩,地球化学投点多数位于火山弧花岗岩范围;三叠纪甘穷郎岩体岩石组合为二长花岗岩+正长花岗岩,属碰撞造山带环境强力就位破火山口塌陷的S型花岗岩,地球化学投点多数位于同碰撞花岗岩范围;唐古拉构造侵入岩带侵入岩属同碰撞环境中形成的下地壳深部熔融具被动就位特征的S型花岗岩;冈底斯—念青唐古拉构造侵入岩带主要包括中侏罗世巴登岩体、早白垩世雄拉岩体和晚白垩世折拉岩体,它们与白垩纪英安岩—安山岩组合的钙碱性火山岩共同构成雅鲁藏布江缝合带北侧冈底斯陆缘火山岩浆弧的一部分。中侏罗世巴登岩体属I型花岗岩,早白垩世雄拉岩体和晚白垩世折拉岩体均属于同碰撞环境中形成的S型花岗岩。

3 地幔橄欖岩主要岩性单元划分

丁青蛇绿岩体位于班公湖—怒江缝合带近东西向向南东向转弯的部位,根据空间位置分为东、西两个岩体(图2)。北部为羌塘地块南缘,南部为拉萨地块北缘,与两侧地层均为断层接触关系。西

岩体呈透镜状,走向南东,面积约150 km²。岩体北部侏罗系中统德极国组地层向南逆冲推覆于橄欖岩之上,岩体南部橄欖岩向南逆冲推覆于白垩系上统竞柱山组地层之上。东岩体呈细长条状,走向南东,面积约400 km²。岩体北部侏罗系中统德极国组地层向南逆冲推覆于东岩体橄欖岩之上,岩体南部橄欖岩向南逆冲推覆于白垩系上统竞柱山组地层之上。

根据丁青蛇绿岩1:5万、1:1万、1:2000地质调查成果,丁青蛇绿岩具有较为完整的蛇绿岩岩石组合,由地幔橄欖岩、辉石岩、辉长岩、辉绿岩、玄武岩、斜长花岗岩、硅质岩和泥质岩组成(图3~图5)。丁青蛇岩体主体由地幔橄欖岩组成,包括方辉橄欖岩和纯橄欖岩两种类型,以方辉橄欖岩为主。

方辉橄欖岩是组成丁青蛇绿岩体的主要岩石类型,出露面积占东、西两个岩体的85%~90%。方辉橄欖岩一般作为地幔橄欖岩岩体的主体部分产出,与两侧地层为构造接触关系(图3,图4);极少量以团块状分布于纯橄欖岩中,且团块一般规模较小,直径一般为数米(图6c)。根据岩石结构构造特征,将丁青蛇绿岩岩体中的方辉橄欖岩划分为四种类型,即块状方辉橄欖岩、斑杂状方辉橄欖岩、辉石定向的方辉橄欖岩和球粒状方辉橄欖岩。块状方

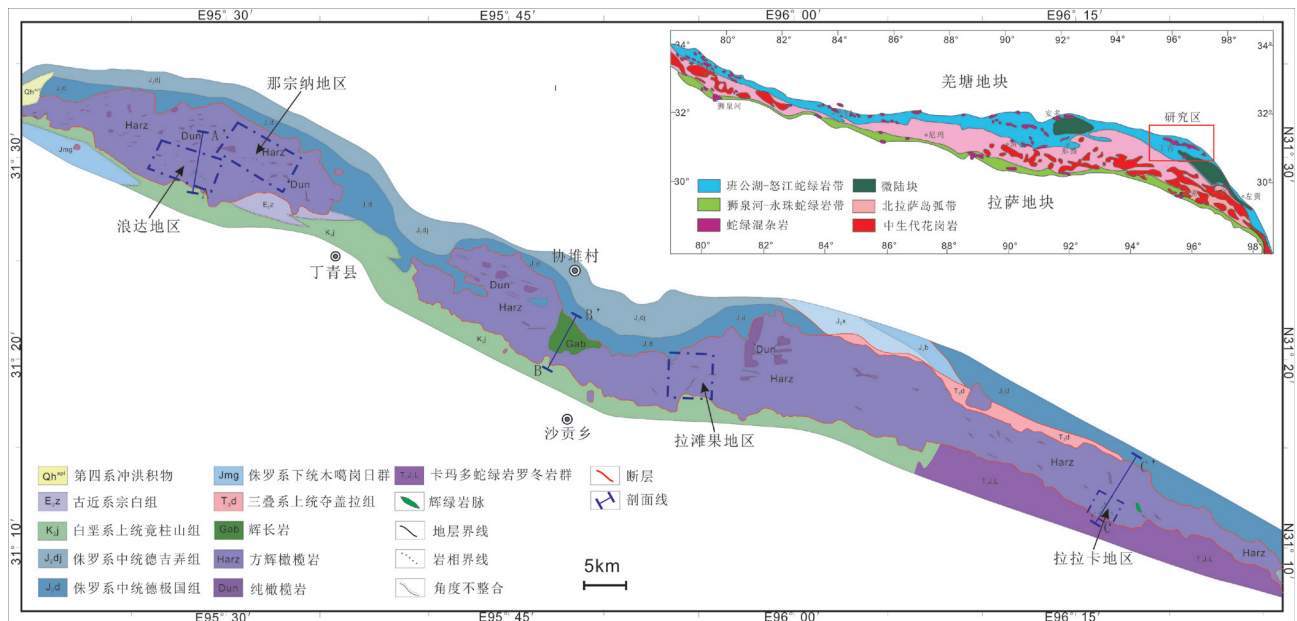


图2 丁青蛇绿岩地质图
Fig.2 Geological map of the Dingqing ophiolite

辉橄榄岩是丁青蛇绿岩地幔橄榄岩的主要岩石类型(图6d);斑杂状方辉橄榄岩多见于丁青东岩体东段拉拉卡南部地区,岩石中辉石聚集不均匀分布而呈斑杂状构造(图6e);辉石定向方辉橄榄岩在丁青东西岩体内均有分布,岩石中辉石定向排列(图6f);斑杂状方辉橄榄岩和发育定向结构的方辉橄榄岩界线附近的方辉橄榄岩同时发育斑杂构造与辉石定向结构(图6g);球粒状方辉橄榄岩仅见于东岩体东段拉拉卡地区,橄榄岩呈捕虏体分布于伟晶辉石岩体中,出露规模较小,岩石中辉石聚集成球粒状(图6h),同时也可见球粒状-斑杂状过渡的构造特征(6i)。

方辉橄榄岩蛇纹石化较强,风化面呈黄褐色或灰绿色,新鲜面呈灰黑色。主要矿物包括橄榄石和斜方辉石,极少量的单斜辉石、铬尖晶石和磁铁矿,具蚀变结构和塑性流变结构(图10e)。橄榄石含量65%~90%,呈他形粒状产出,粒径1.8~2.5 mm;斜方辉石含量8%~33%,根据产出特征分为两种类型:第一种呈半自形短柱状产出;第二种呈他形粒状分布

于橄榄石粒间;单斜辉石在方辉橄榄岩中的含量极少,粒度较细,多分布在斜方辉石内部或边部(图10g,图10h);铬尖晶石含量1%~2%,粒度0.5~1.5 mm,平均约1 mm,多分布于斜方辉石内部或边部,根据产出特征可分为两种类型:一类呈他形的不规则蠕虫状形式产出,另一类呈半自形-自形粒状产出。

纯橄榄岩在丁青蛇绿岩体中规模较小,约占岩体6%。根据纯橄榄岩的形态和规模,将其分为3种类型。第一种类型纯橄榄岩呈薄壳状产出,分布于铬铁矿外围(图3,图4);规模一般较小,走向北东或南东,与岩体走向近于一致或斜交;长数十米到数百米,宽数米到数十米不等;围岩为块状方辉橄榄岩或斑杂状方辉橄榄岩,纯橄榄岩与铬铁矿主要为直接接触关系,局部可见过渡接触关系,与方辉橄榄岩为直接接触关系;此类纯橄榄岩多分布于丁青东岩体东部拉拉卡地区和中部拉滩果地区。第二种类型纯橄榄岩呈透镜状或条带状产出(图3,图4,图6a,图6b),规模一般较大,走向北东或南东,与岩

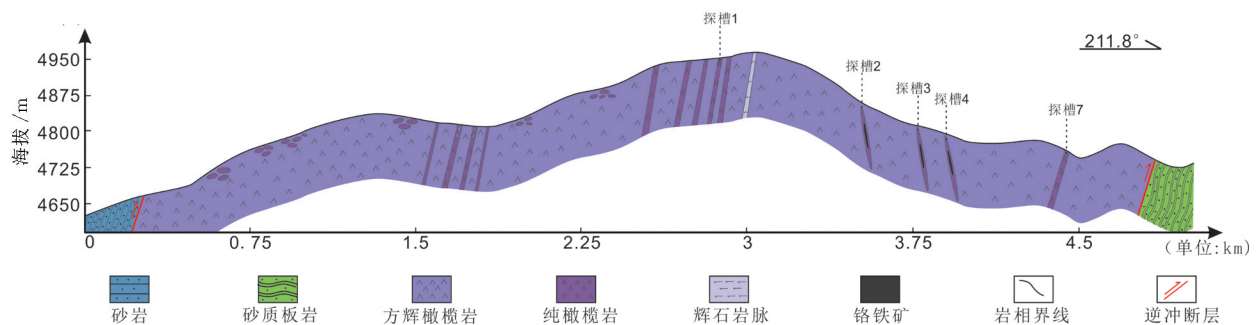


图3 丁青东蛇绿岩体地幔橄榄岩剖面

Fig.3 Peridotite profile of the eastern ophiolite in Dingqing

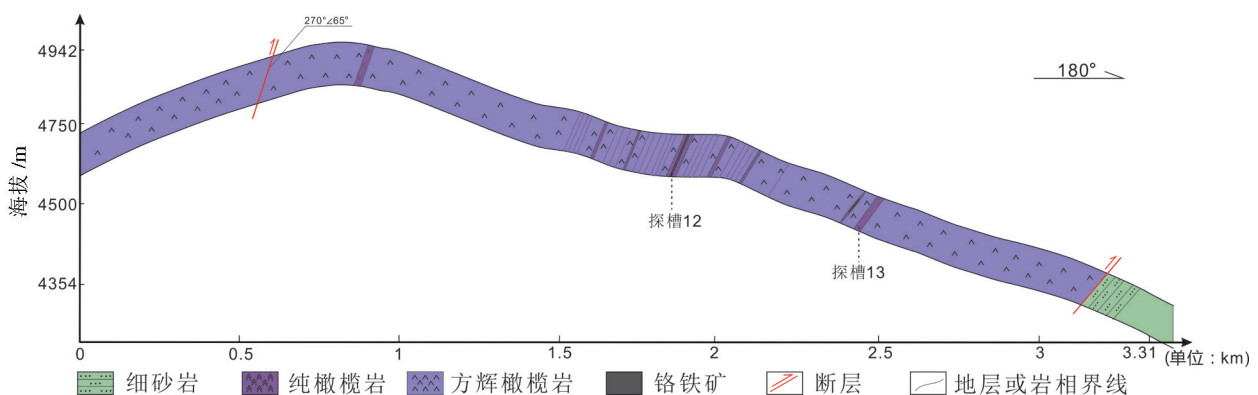


图4 丁青西蛇绿岩体地幔橄榄岩剖面

Fig.4 Peridotite profile of the western ophiolite in Dingqing

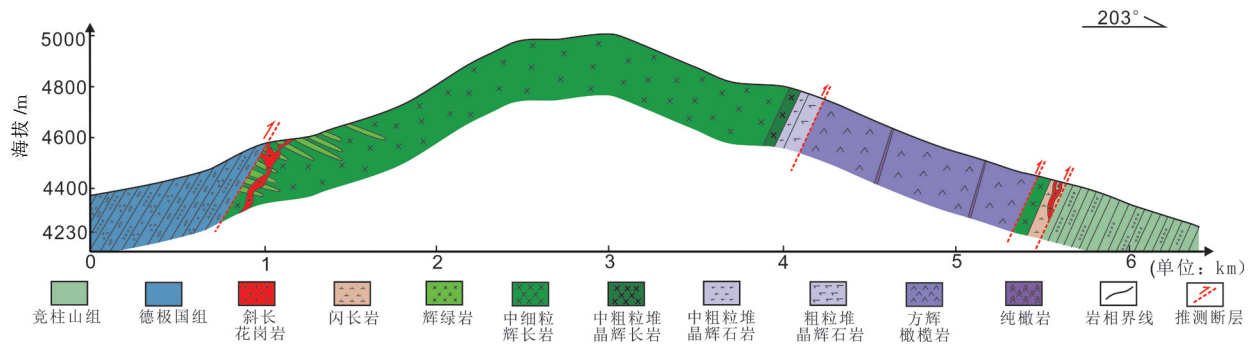


图5 丁青东蛇绿岩体扎西觉剖面
Fig.5 Zhaxijie profile of the east ophiolite in Dingqing

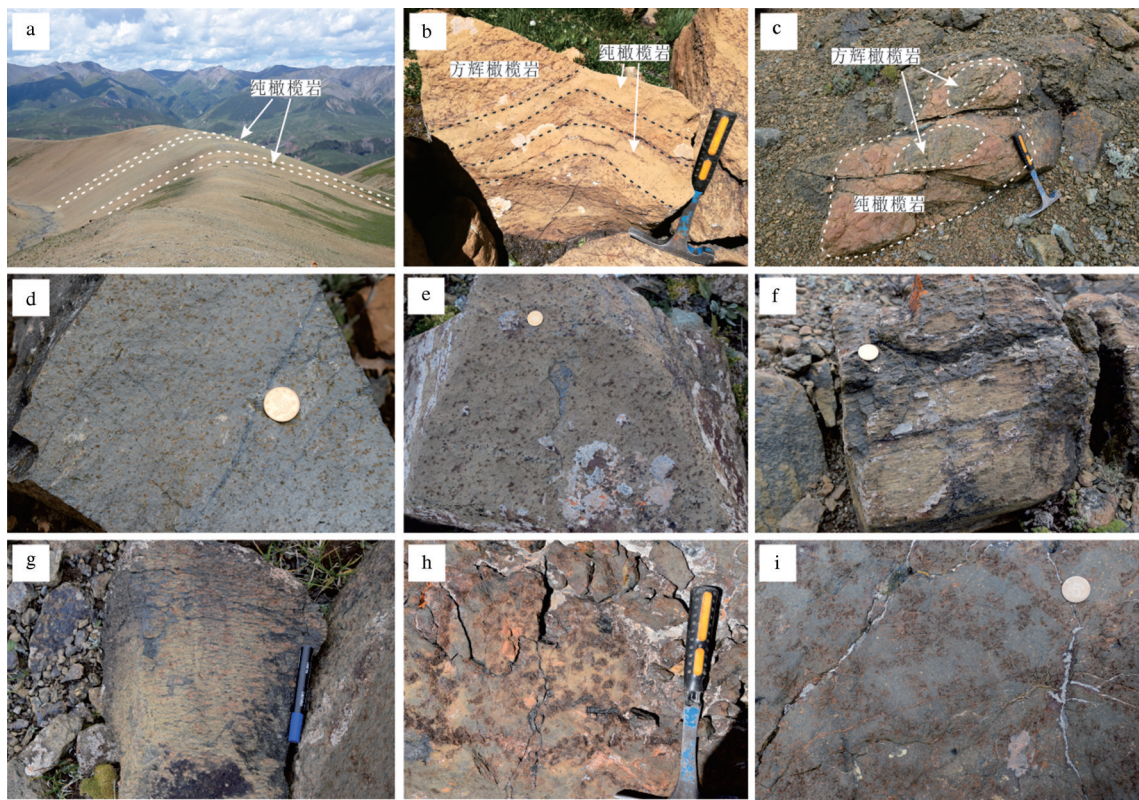


图6 丁青蛇绿岩地幔橄榄岩野外露头照片
a—一条带状纯橄岩和方辉橄榄岩;b—一条带状纯橄岩和方辉橄榄岩(小尺度);c—一团块状纯橄岩和方辉橄榄岩;d—一块状方辉橄榄岩;
e—斑杂状方辉橄榄岩;f—定向方辉橄榄岩;g—斑杂—定向方辉橄榄岩;h—球粒状方辉橄榄岩;i—斑杂—球粒状方辉橄榄岩

Fig. 6 Field photos of peridotites in the Dingqing ophiolite

a—Banded dunite and harzburgite, b—Banded dunite and harzburgite (at small scale), c—Crumby dunite and harzburgite, d—Massive harzburgite, e—Taxitic harzburgite, f—Directed harzburgite, g—Taxitic-directed harzburgite, h—Globular harzburgite, i—Taxitic-globular harzburgite

体走向近于一致或斜交;纯橄岩透镜或条带长可达数十千米,宽数米到数千米不等;纯橄岩与铬铁矿和方辉橄榄岩均为直接接触关系,围岩为块状方辉橄榄岩、具定向结构的方辉橄榄岩或斑杂状方辉橄榄岩;此类纯橄岩多分布于丁青蛇绿岩体拉

拉卡地区北部和浪达地区。第三种类型纯橄岩以不规则团块状产出于方辉橄榄岩中(图3,图6c),规模普遍较小,不发育铬铁矿;纯橄岩与方辉橄榄岩为直接接触关系,围岩为块状方辉橄榄岩或具定向结构的方辉橄榄岩。

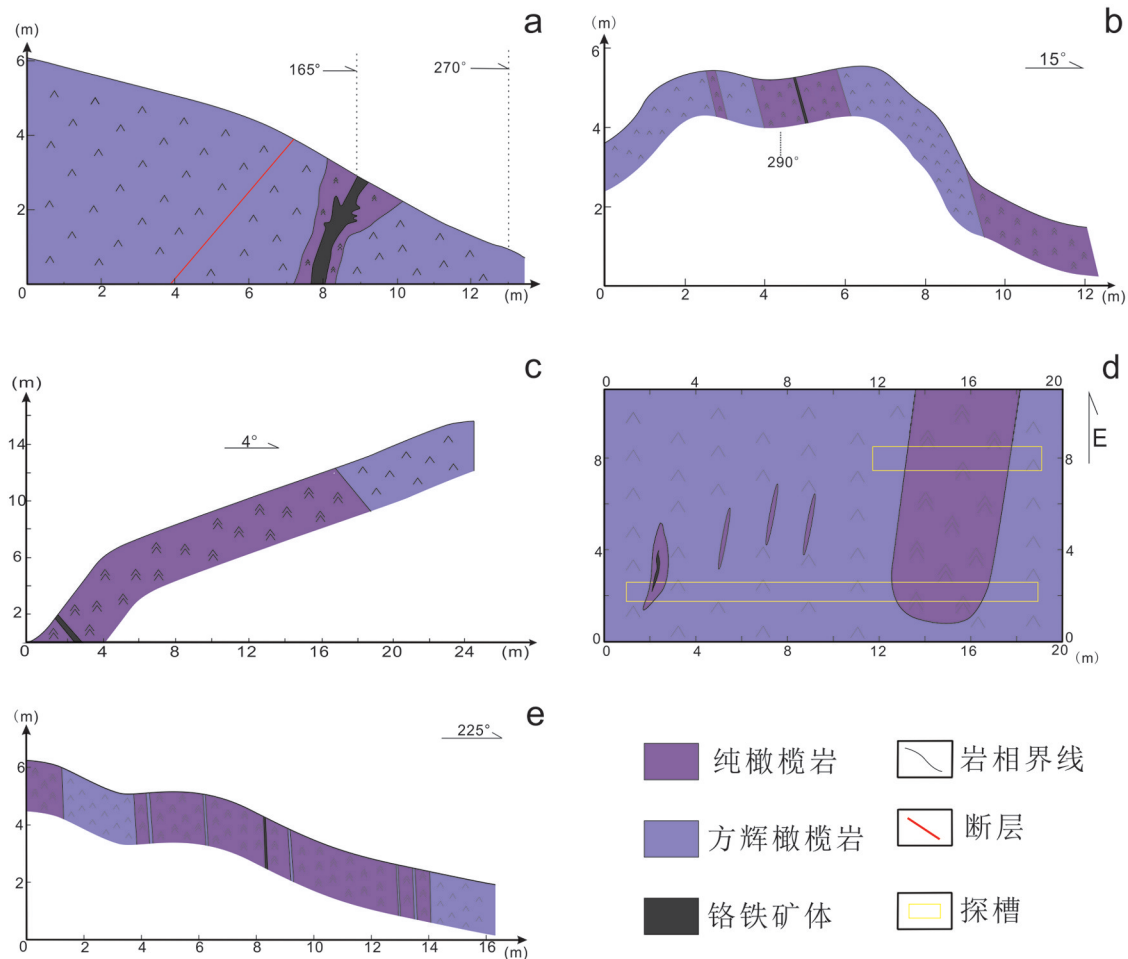


图7 丁青蛇绿岩铬铁矿剖面图和平面图

a—拉拉卡探槽6剖面图; b—拉拉卡探槽1剖面图 c—拉滩果探槽10剖面图; d—浪达探槽13平面图; e—那宗纳探槽9剖面图

d—Fig. 7 Profiles and a plan view of chromite bodies in the Dingqing ophiolite

a—Profile of Trench 6 in Lalaka; b—Profile of Trench 1 in Lalaka; c—Profile of Trench 10 in Latanguo; d—Plan of Trench 13 in Langda; e—Profile of Trench 9 in Nazongna

纯橄榄岩蛇纹石化较强,40%~80%的橄榄石都已经发生蛇纹石化。风化面呈黄褐色或灰绿色,新鲜面呈暗绿色或灰黑色。表面因没有辉石而造成的差异风化而显得十分平滑,易于与方辉橄榄岩区别。岩石具蚀变结构、塑性流变结构、块状构造。岩石主要由橄榄石组成,含量占90%以上,橄榄石颗粒大小一般约0.5 mm;副矿物铬尖晶石呈半自形—自形晶粒状产出,含量1%~3%,粒径为0.2~1.0 mm,平均0.6 mm;斜方辉石呈针状出溶体分布于橄榄石内部(图10i)。

基性岩、斜长花岗岩、硅质岩和泥岩出露面积约占东岩体出露面积4%,多见于岩体的边部或岩体宽度较小的部位,以东岩体宗白和西岩体扎西觉

(图5)两个剖面蛇绿岩组合出露最为齐全。蛇绿岩洋壳部分岩性主要以辉长岩和辉绿岩为主,少量的辉石岩、玄武岩、硅质岩和泥岩。辉石岩呈堆晶岩或后期脉体产出,规模一般较小。在宗白地区硅质岩、泥岩、玄武岩、辉绿岩和辉长岩以蛇绿混杂岩岩块的形式产出,而在扎西觉地区辉绿岩和辉长岩则多以蛇绿岩端元或后期岩脉的形式产出。

4 丁青岩体中的铬铁矿产出

丁青蛇绿岩体中发现并标定铬铁矿矿点83个。其中东岩体矿点27个;西岩体矿点56个。根据蛇绿岩体岩体中矿点的分布、产出及出露情况,选择丁青蛇绿岩体中13个代表性铬铁矿矿点开展

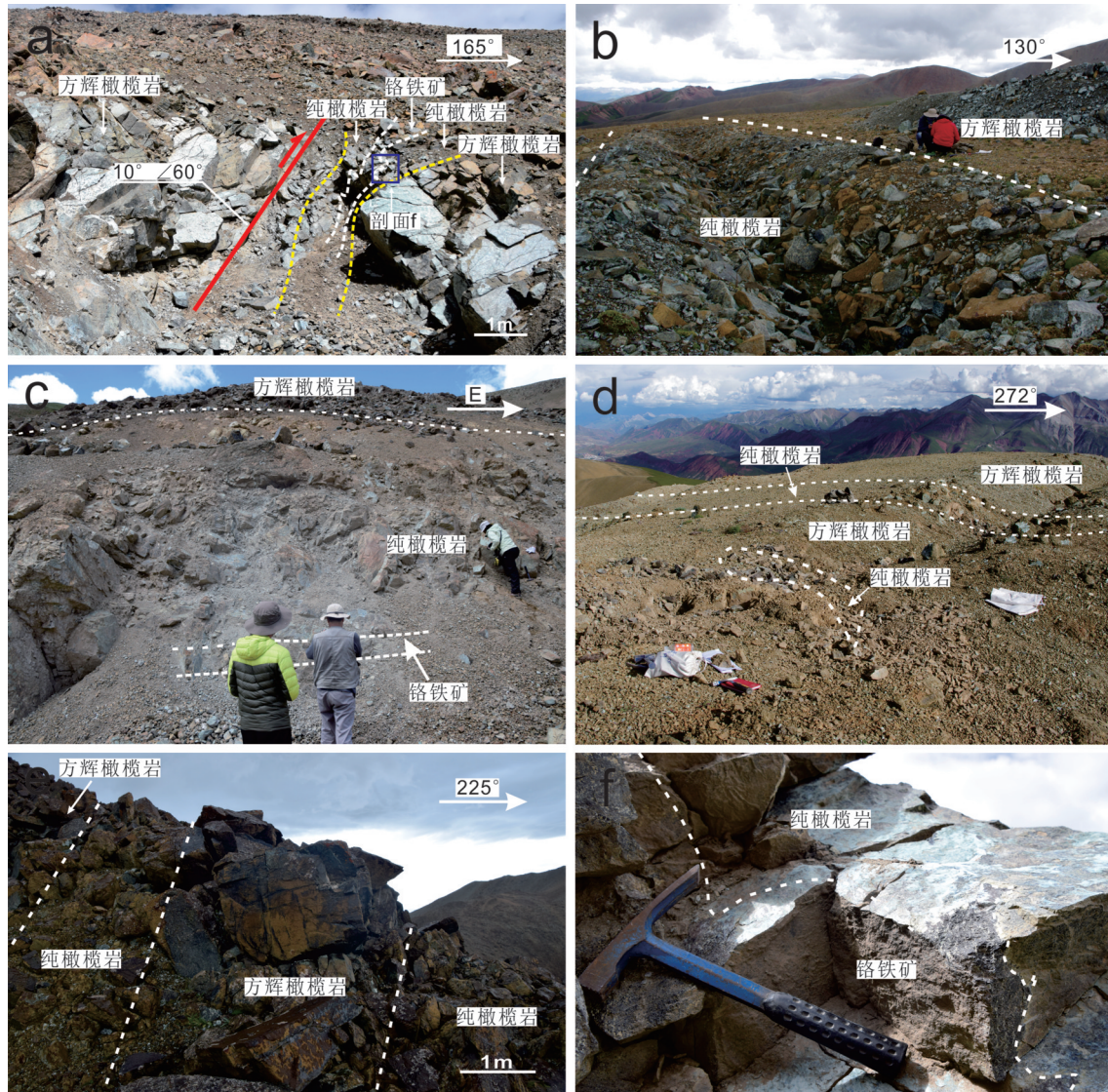


图8 丁青蛇绿岩铬铁矿野外照片

a—拉拉卡探槽6照片; b—拉拉卡探槽1照片; c—那宗纳探槽10照片; d—浪达探槽13照片; e—那宗纳探槽9照片; f—拉拉卡探槽6矿体边部脉状特征

Fig. 8 Field occurrence of chromite bodies in the Dingqing ophiolite

a—Photo of Trench 6 in Lalaka; b—Photo of Trench 1 in Lalaka; c—Photo of Trench 10 in Nazongna; d—Photo of Trench 13 in Langda; e—Photo of Trench 9 in Nazongna; f—Photo of the part of Trench 6 in Lalaka

了详细的探槽一壁的编录工作。根据这些矿点在每个地区露头出露的空间位置从北向南依次编号Cr1~13,分别对应探槽1~13。其中探槽1、探槽2、探槽3、探槽4、探槽5、探槽6、探槽7位于东岩体拉拉卡地区,探槽8位于东岩体拉滩果地区,探槽9、探槽10两个探槽位于西岩体那宗纳地区,探槽11、探槽12和探槽13三个探槽位于西岩体浪达地区。

4.1 东岩体

目前已在丁青东蛇绿岩体中发现豆荚状铬铁

矿矿点27处,主要分布于岩体东段拉拉卡地区和中段拉滩果地区。根据铬铁矿矿体的形态和围岩特征可分为3种铬铁矿类型。

第一种类型铬铁矿呈豆荚状、透镜状或不规则团块状产出,矿体走向北东向或近南东向,与岩体走向一致或斜交;规模一般较大,长数米到数十米,宽0.5~0.8 m(表1);围岩为薄壳状纯橄榄岩和斑杂状方辉橄榄岩;铬铁矿体和纯橄榄岩一般为直接接触关系,岩相界面明显,局部呈过渡接触关系,矿体

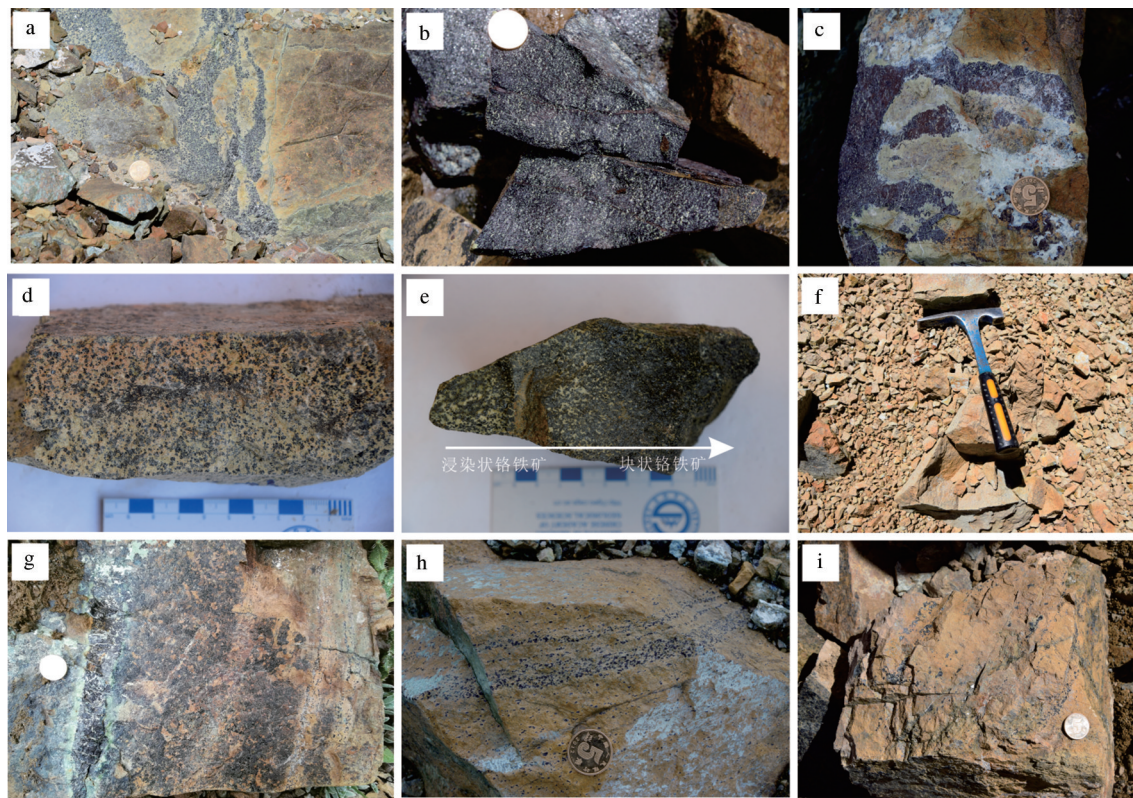


图9 丁青蛇绿岩铬铁矿不同类型矿石

a—脉状铬铁矿；b—块状铬铁矿；c—块状铬铁矿矿体边部脉状特征；d—浸染状铬铁矿；e—浸染状—块状铬铁矿；f—星散状—稀疏浸染状铬铁矿；g—浸染条带状铬铁矿；h—浸染条带状铬铁矿；i—瘤状铬铁矿

Fig.9 Different types of chromitites in the Dingqing ophiolite

a—Vein chromitite; b—Massive chromitite; c—Vein characteristics at the edge of massive chromitite; d—Disseminated chromitite; e—Disseminated-massive chromitite; f—Star-sparse disseminated chromitite; g—Disseminated banded chromitite; h—Disseminated banded chromitite; i—Tumor chromitite

边部具脉状侵入特征。此类铬铁矿体以探槽2、3、4、5、6、8为代表，其中探槽2最为典型(图7a,图8a)。此类铬铁矿为东岩体铬铁矿的主要类型，多分布于拉拉卡南部地区和拉滩果地区。

第二种类型铬铁矿呈浸染状弥散分布于纯橄榄岩条带内，矿体走向近南东向，与岩体走向一致；规模一般较大，长数十米，宽约6 m(表1)；围岩为条带状纯橄榄岩和斑杂状方辉橄榄岩；矿体与纯橄榄岩呈直接接触关系。此类铬铁矿体以探槽7为代表，在东岩体仅见拉拉卡南部地区一处矿点。

第三种类型铬铁矿呈条带状产出，铬铁矿走向近南东向，与岩体走向一致(表1)；规模一般较小，长1~3 m，宽0.02~0.05 m；围岩为条带状或透镜状纯橄榄岩和具辉石定向结构的方辉橄榄岩；铬铁矿体与纯橄榄岩为直接接触关系，岩相界面明显。此类铬铁矿以探槽1(图7b,图8b)为代表，仅见于东岩体拉拉卡北部地区一处矿点。

4.2 西岩体

目前已在丁青西蛇绿岩体中发现豆荚状铬铁矿矿点56处，主要分布在岩体南部浪达地区和北部那宗纳地区。根据铬铁矿矿体形态和围岩特征将其分为4种类型。第一种类型铬铁矿除与矿体外围方辉橄榄岩构造不同，其他特征与东岩体的第一种类型铬铁矿基本相同；第二种与第三种类型铬铁矿产出特征与东岩体基本相同；第四种类型的矿体产出、矿石构造等特征多不同于其他3种类型铬铁矿。

第一种类型铬铁矿呈透镜状或不规则团块状产出，矿体走向北东或近南东向(表1)，与岩体走向一致或斜交；长数米到数十米，宽0.1~0.2 m；围岩为薄壳状纯橄榄岩和块状方辉橄榄岩；铬铁矿体与纯橄榄岩岩相界面明显。此类铬铁矿目前仅见于浪达地区2处矿点。

第二种类型铬铁矿呈浸染状弥散分布于条带状纯橄榄岩内，铬铁矿走向近南东向(表1)，与岩体走向

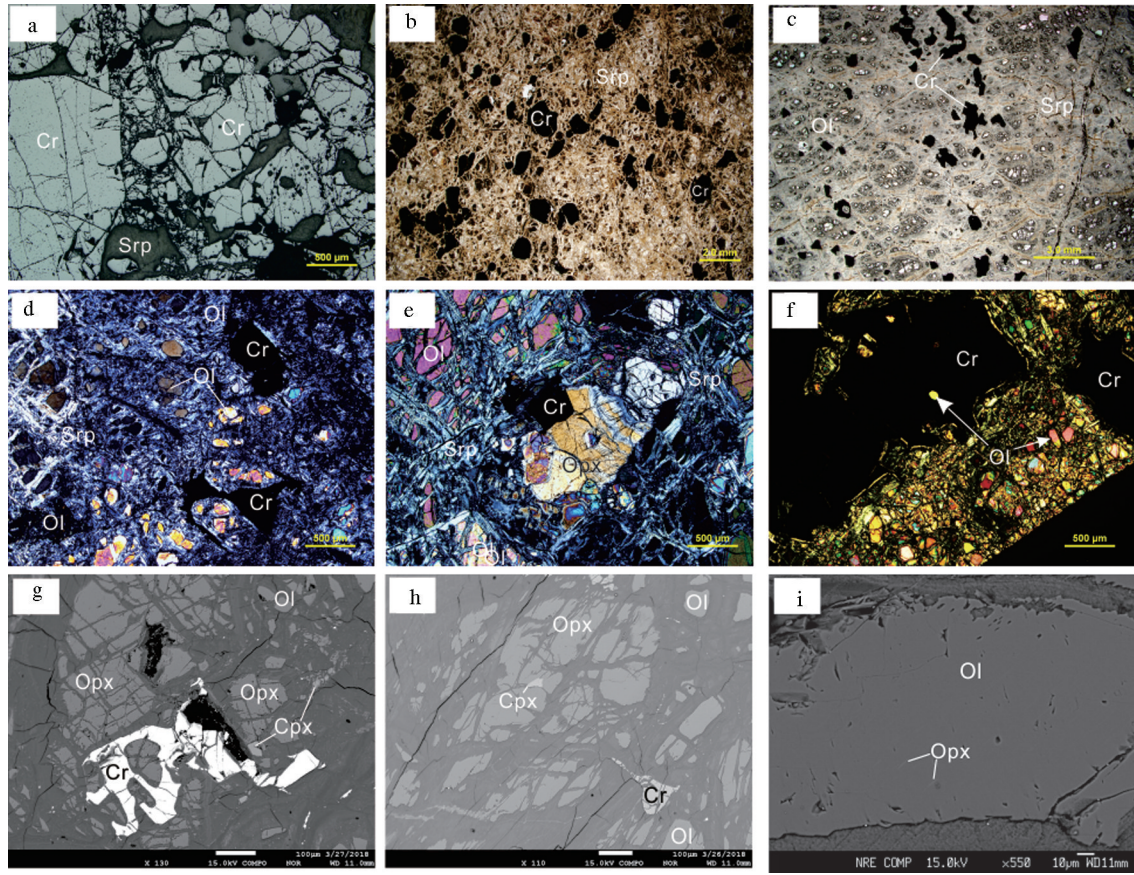


图10 丁青蛇绿岩铬铁矿矿石和橄榄岩显微照片

a—块状铬铁矿;b—浸染状铬铁矿;c—浸染条带状铬铁矿;d—纯橄榄岩;e—方辉橄榄岩;f—浸染条带状铬铁矿;g—方辉橄榄岩(背散射照片);h—方辉橄榄岩(背散射照片);i—纯橄榄岩(背散射照片);Cr—铬铁矿;Ol—橄榄石;Opx—辉石;Srp—蛇纹石

Fig.10 Microphotographs of chromitite and peridotite in the Dingqing ophiolite

a—Massive chromitite;b—Disseminated chromitite;c—Disseminated banded chromitite;d—Dunite;e—Harzburgite;f—Disseminated banded chromitite;g—Harzburgite (EBS);h—Harzburgite (EBS);i—Dunite;Cr—Chromitite;Ol—Olivine;Opx—Pyroxene;Srp—Serpentine

一致;规模较大,长数十米,宽约5 m;围岩为条带状纯橄榄岩和块状方辉橄榄岩;铬铁矿体与纯橄榄岩为直接接触关系。此类铬铁矿体以探槽13(图7d、图8d)为代表,目前仅见浪达南部地区一处矿点。

第三种类型铬铁矿呈条带状产出,铬铁矿走向近南东向,与岩体走向一致(表1);规模一般较小,长约1 m,宽0.02~0.05 m;围岩为条带状或透镜状纯橄榄岩和辉石定向的方辉橄榄岩;铬铁矿体与纯橄榄岩为直接接触关系,岩相界面明显。此类铬铁矿以探槽9(图7e,图8e)为代表,目前仅见那宗纳北部地区一处矿点。

第四种类型铬铁矿呈脉状产出,走向北东或近南东向,与岩体一致或斜交(表1);规模一般较小,长十余米,宽0.03~0.4 m;围岩为条带状或透镜状纯橄榄岩和块状方辉橄榄岩;铬铁矿体与纯橄榄岩为

直接接触关系,岩相界面明显。此类铬铁矿体以探槽10(图7c,图8c)、探槽11和探槽12为代表,为西岩体主要矿体类型。

综上所述,根据铬铁矿产出和围岩特征可将丁青铬铁矿分为4种类型。第一种类型铬铁矿呈豆荚状、透镜状或不规则团块状产出,矿体走向与岩体一致或斜交,围岩为薄壳状纯橄榄岩和块状或斑杂状方辉橄榄岩;第二种类型铬铁矿呈浸染状弥散分布于纯橄榄岩内,矿体走向与岩体一致,围岩为条带状或透镜状纯橄榄岩和斑杂状或块状方辉橄榄岩;第三种类型铬铁矿呈条带状产出,矿体走向与岩体一致,围岩为条带状或透镜状纯橄榄岩和辉石定向的方辉橄榄岩;第四种类型铬铁矿脉状产出,矿体走向与岩体一致或斜交,围岩为条带状或透镜状纯橄榄岩和块状方辉橄榄岩。东岩体以第一种类型铬铁矿为

表1 丁青蛇绿岩铬铁矿矿体野外产出特征统计

Table 1 Field occurrence characteristics of chromite bodies in the Dingqing ophiolite

探槽编号	矿体产状	矿体规模	围岩类型	矿石构造
探槽1	条带状产出,走向108°	长1~3 m,宽0.02~0.05 m	条带状纯橄橄榄岩	浸染条带状
探槽2	豆荚状产出,走向110°	—	薄壳状纯橄橄榄岩	块状,少量浸染状
探槽3	透镜状产出,走向103°	—	薄壳状纯橄橄榄岩	块状
探槽4	透镜状产出,走向120°	长约10 m,宽约0.8 m	薄壳状纯橄橄榄岩	块状
探槽5	透镜状产出	—	薄壳状纯橄橄榄岩	块状
探槽6	不规则团块状,走向55°	长约8 m,宽约0.5 m	薄壳状纯橄橄榄岩	块状,极少量浸染状
探槽7	浸染弥散状产出,走向135°	长数十米,宽约6 m	条带状纯橄橄榄岩	星散浸染状
探槽8	透镜状产出,走向47°	长数十米,宽约0.8 m	薄壳状纯橄橄榄岩	块状和浸染状
探槽9	条带状产出,走向105°	长约1 m,宽0.02~0.05 m	条带状纯橄橄榄岩	浸染条带状
探槽10	脉状产出,走向105°	长十余米,宽约0.4 m	条带状纯橄橄榄岩	脉状
探槽11	脉状产出,走向45°	长约3 m,宽约0.4 m	条带状纯橄橄榄岩	脉状
探槽12	脉状,走向115°	长约1.5 m,宽约0.03 m	条带状纯橄橄榄岩	脉状
探槽13	浸染弥散状产出,走向107°	长数十米,宽约5 m	条带状纯橄橄榄岩	星散-稀疏浸染状

主,西岩体以第四种类型铬铁矿为主,第二、第三种类型铬铁矿在丁青东、西岩体都有少量分布。

5 铬铁矿的矿石结构构造特征

根据铬铁矿矿石构造特征,丁青铬铁矿主要分为块状(铬尖晶石含量大于80%)、浸染状(10%~80%),包括星散浸染状(10%~20%)、稀疏浸染状(20%~30%)、中等浸染状(30%~50%)和稠密浸染状(50%~80%)、脉状、浸染条带状四种类型。以块状和脉状为主,少量的浸染状和浸染条带状,局部纯橄橄榄岩中发育极少量瘤状或豆状构造。

5.1 块状铬铁矿石

块状铬铁矿是丁青东岩体主要矿石类型(图9b),其边部呈脉状侵入特征(图9c)。矿石主要由铬尖晶石和蛇纹石组成,具残碎结构、碎裂结构和蚀变结构(图10a)。铬尖晶石呈他形粒状产出,含量约85%,粒度0.5~2.5 mm,平均约1.5 mm;单偏光镜下铬尖晶石呈深红色;反光镜下铬尖晶石呈亮白色,发育弧形边具残碎结构。铬尖晶石中发育较多橄橄榄岩或辉石包体,但大部分都已经发生蛇纹石化。蛇纹石为橄橄榄石和辉石水热蚀变产物,呈片状集合体产出,含量约15%,具蚀变结构。单偏光镜下蛇纹石无色透明,突起较低;正交镜下具一级灰白干涉色。

5.2 脉状铬铁矿石

脉状铬铁矿是丁青西岩体主要矿石类型(图9a)。此类铬铁矿规模较小,但品位却很高,围岩为

透镜状或条带状纯橄橄榄岩。矿石主要由铬尖晶石和蛇纹石组成,具残碎结构和蚀变结构。铬尖晶石呈他形粒状产出,含量约60%,粒度0.5~3 mm,平均约1.8 mm。单偏光镜下整体不透明呈灰黑色,局部呈暗紫红色;反光镜下呈亮白色,发育弧形边具残碎结构。蛇纹石片状集合体产出,含量约占矿石40%,具蚀变结构。

5.3 稀疏浸染状铬铁矿石

丁青蛇绿岩地幔橄橄榄岩中浸染状铬铁矿分布较少,根据浸染状铬铁矿矿石的野外产状可将其分为2种类型。第一种是产于纯橄橄榄岩条带中的稀疏浸染状铬铁矿或星散状铬铁矿(图10f),第二种是分布于块状铬铁矿边部与块状铬铁矿呈过渡接触关系的浸染状铬铁矿(图9d,9e)。第二种类型浸染状铬铁矿矿石结构构造与块状铬铁矿类似。稀疏浸染状铬铁矿矿石主要由铬尖晶石和蛇纹石组成,具残碎结构和蚀变结构。铬尖晶石呈他形粒状产出,含量约30%,粒度0.25~1.5 mm,平均约0.8 mm。单偏光镜下铬尖晶石不透明呈黑色,可见细小蛇纹石分布于铬尖晶石裂隙呈塑性活化结构;反光镜下呈亮白色,铬铁矿发育弧形边具残碎结构。蛇纹石含量约占矿石70%,具蚀变结构。星散浸染状铬铁矿目前仅发现于丁青东岩体拉拉卡地区1处矿点(图10c)。此类铬铁矿规模较大,但品位却很低,围岩为条带状纯橄橄榄岩。矿石主要由铬尖晶石和蛇纹石组成,少量的橄橄榄石,具残碎结构、蚀变结

构。铬尖晶石呈他形粒状产出,含量约15%,粒度0.25~1 mm,平均约0.5 mm;偏光镜下铬尖晶石呈灰黑色;反光镜下呈亮白色,铬尖晶石普遍发育弧形边而呈残碎结构。蛇纹石呈片状集合体产出,具蚀变结构。橄榄石呈他形粒状产出,粒度较细,含量约5%。

5.4 浸染条带状铬铁矿石

浸染条带状铬铁矿在丁青蛇绿岩东、西岩体中均有发现(图9g,图9h),东岩体拉拉卡地区和西岩体那宗纳地区各有1处矿点。此类铬铁矿规模较小,围岩为条带状或透镜状纯橄榄岩。浸染条带状铬铁矿矿石主要由铬尖晶石和蛇纹石组成,少量橄榄石,具残碎结构和蚀变结构,磁铁矿化强烈(图10c)。铬尖晶石呈他形粒状产出,含量约35%,粒度0.5~2.5 mm,平均约1.5 mm;单偏光镜下铬尖晶石呈棕灰色;反光镜下呈亮白色,铬铁矿普遍发育弧形边具残碎结构;铬尖晶石中发育较多橄榄岩或辉石包体,但大都已经发生蛇纹石化。蛇纹石呈片状集合体产出,含量约占矿石57%,具蚀变结构。橄榄石含量约8%,根据产出状态分为两种类型。一种橄榄石分布于铬铁矿粒间,另一种以包体形式分布于铬尖晶石内部。

除了块状、浸染状、脉状和浸染条带状铬铁矿,丁青蛇绿岩地幔橄榄岩中还分布有极少量的瘤状(图10i)或豆状铬铁矿。

6 铬铁矿矿物成分特征

根据工作组2015—2017年丁青蛇绿岩和铬铁矿调查和研究工作成果,对丁青蛇绿岩,尤其是其中的地幔橄榄岩和铬铁矿做了详细的野外描述工作。在此基础上,根据铬铁矿矿点分布、产出和野外出露情况,选择丁青东、西蛇绿岩体中13个代表性铬铁矿矿点做了详细的大比例尺剖面编录工作,并系统采集了铬铁矿矿石和橄榄岩样品。每个探槽中选取2~3个新鲜的铬铁矿矿石样品磨制探针片2~5个,并对每个薄片中的5~10个铬尖晶石进行电子探针试验分析,获得13个铬铁矿体的62组矿物化学数据。电子探针试验是在中国地质科学院地质研究所电子探针实验室完成,仪器型号为日本电子公司JXA-8100、INCA能谱仪,探针束流20 nA,加速电压15.0 kV,电子束斑5 μ m。结果发现丁青蛇绿岩体中不仅同时赋存高铬和高铝2种类型的铬

铁矿,而且还存在高铬和高铝的中间过渡型和铬值极低的一种铬铁矿类型。因此本文根据各矿点矿石铬尖晶石Cr[#]值大小初步将丁青铬铁矿划分为高铬型、中高铬型、中铬型和低铬型4种铬铁矿类型(图11)。中高铬型铬铁矿分布于东岩体,高铬型铬铁矿分布于西岩体,中铬型和低铬型铬铁矿在丁青东西岩体均有分布。探槽10、11、12中铬铁矿为高铬型,探槽2、3、4、5、6、8为中高铬型,探槽7、13为中铬型,探槽1、9为低铬型。

高铬型铬铁矿Cr[#]值为78~86,平均值83;Mg[#]值52~66(Mg[#]=100×Mg/(Mg+Fe)),平均值62;Cr₂O₃含量60.06%~64.94%,平均值63%;Al₂O₃含量7.00%~11.20%,平均值8.85%;TiO₂含量0.03%~0.15%,平均值0.08%(表3)。

中高铬型铬铁矿Cr[#]值为60~74,平均值65;Mg[#]值61~69,平均值69;Cr₂O₃含量47.05%~58.21%,平均51.97%;Al₂O₃含量13.89%~23.66%,平均18.82%;TiO₂含量0.00%~0.12%,平均值0.07%(表3)。

中铬型铬铁矿,Cr[#]值30~51,平均值41;Mg[#]值65~72,平均值68;Cr₂O₃值25.63%~42.61%,平均值33.96%;Al₂O₃含量26.81%~40.94%,平均33.67%;TiO₂含量0.14%~0.28%,平均值0.20%(表3)。

低铬型铬铁矿,Cr[#]极低,介于9~14,平均值为12;Mg[#]值变化为71~84,平均为78;TiO₂含量为0.00%~0.04%,平均值为0.01%;铬尖晶石Cr₂O₃含量7.22%~15.28%,平均值为11.22%;Al₂O₃含量51.69%~59.61%,平均值为56.21%(表3)。

随着铬铁矿体中铬尖晶石Cr[#]的降低,Mg[#]整体有递增趋势,而探槽12中高铝型铬铁矿体的Mg[#]较小。Cr[#]与Cr₂O₃含量呈正相关关系,而与Al₂O₃呈负相关关系。铬铁矿中的TiO₂含量变化较大,高铬型和中高铬型铬铁矿TiO₂含量基本一致,分布在0.07%~0.08%附近;中铬型铬铁矿体TiO₂含量变化在0.20%左右;低铬型铬铁矿体TiO₂含量较低,分布于0.01%附近。

从上述特征可知,高铬型、中高铬型、中铬型、中低铬型和低铬型铬铁矿的铬尖晶石各矿物化学组分含量变化较大。

7 讨论

豆荚状铬铁矿,最先由Thayer定义:豆荚状铬

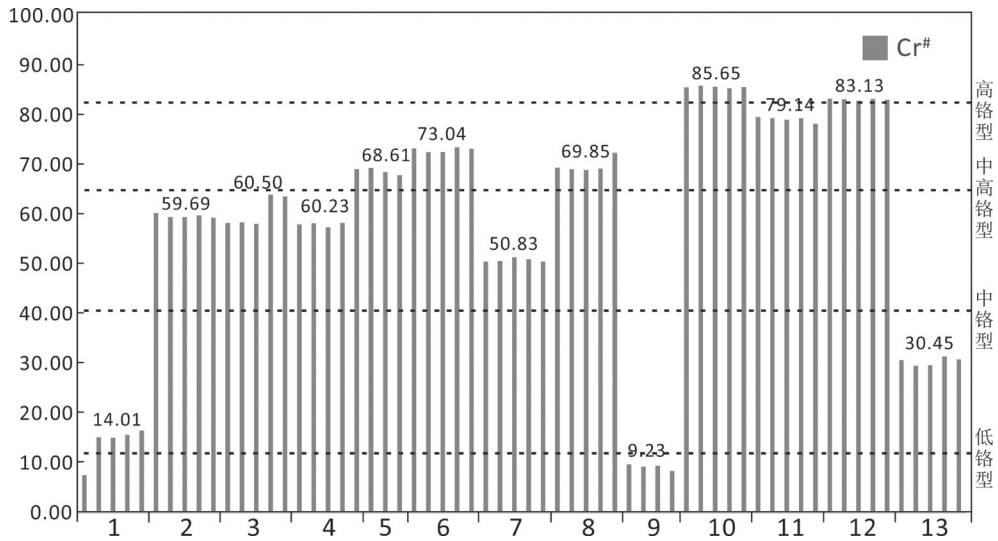


图 11 丁青 13 个铬铁矿矿点铬铁矿 Cr# 直方图

Fig. 11 Column diagram of Cr# of chromitites from 13 chromite ore spots in Dingqing ophiolite

表 2 4 种类型铬铁矿特征

Table 2 Characteristics of four different chromitites

矿体类型	矿体产出	围岩类型	接触关系(围岩)	矿石构造	矿相特征	矿物化学
高铬型铬铁矿	脉体	透镜状、条带状纯橄 榄岩和块状方辉橄 岩	直接接触关系	脉状	粒度平均 1.8 mm; 残碎结构	高铬 Cr# = 78.25 ~ 85.94
中高铬型铬铁矿	豆荚、透镜、不规 则团块	薄壳状纯橄榄岩和斑 杂状或块状方辉橄 岩	直接, 局部渐变	块状、少量 浸染状	粒度平均 1.5 mm; 残碎 结构	中高铬 Cr# = 59.69 ~ 73.51
中铬型铬铁矿	浸染弥散状分布	条带状纯橄榄岩和斑 杂或块状方辉橄 岩	直接接触关系	浸染状(星 散浸和稀疏 浸染状)	粒度平均 0.6 mm; 残碎 结构	中铬 Cr# = 59.69 ~ 73.51
低铬型铬铁矿	条带状	条带状或透镜状纯橄 榄岩和定向方辉橄 岩	直接接触关系	浸染条带状	粒度平均 1.5 mm; 磁铁矿化; 残碎结 构	低铬 Cr# = 9.23 ~ 14.01

铁矿一般产在阿尔卑斯型超镁铁质杂岩体中,呈扁平、铅笔或不规则状(Thayer, 1964)。豆荚状铬铁矿在全球的分布不均一,主要存在于沿喜马拉雅—阿尔卑斯造山带的希腊、土耳其、阿尔巴尼亚、阿伊朗、巴基斯坦等,西太平洋的菲律宾、新喀里多尼亚,古巴、乌拉尔、哈萨克斯坦等显生宙蛇绿岩中。此外,亦有研究在现代太平洋(Arai et al., 1998)、西南印度洋(Betchaida et al., 2014; Morishita et al., 2007)、大西洋洋脊;芬兰、中国辽西、遵化(李江海等, 2002)等元古宙、太古宙蛇绿岩中发现豆荚状铬铁矿,但一般规模较小。

豆荚状铬铁矿主要有 4 种分类方案,第一种是

根据铬铁矿体在蛇绿岩中的产出位置将其分为产于 Moho 面以下地幔橄榄岩中的铬铁矿体和 Moho 面以上地幔过渡带中的铬铁矿体,前者多为赋存于方辉橄榄岩中具有纯橄榄岩包壳的豆荚状矿体,后者一般分布在厚层纯橄榄岩中,此类矿石多为浸染状和条带状,且矿石品位较低;第二种是 Cassard 等通过对 New Caledonia 铬铁矿的研究根据豆荚状铬铁矿的构造形态特征将铬铁矿体划分为不整合矿体、次整合矿体和整合矿体 3 种类型;第三种是根据豆荚状铬铁矿的矿石构造将其分为致密块状、豆状、反豆状、浸染状、条带状、脉状等不同类型;第四种是根据豆荚状铬铁矿中铬尖晶石的矿物化学特

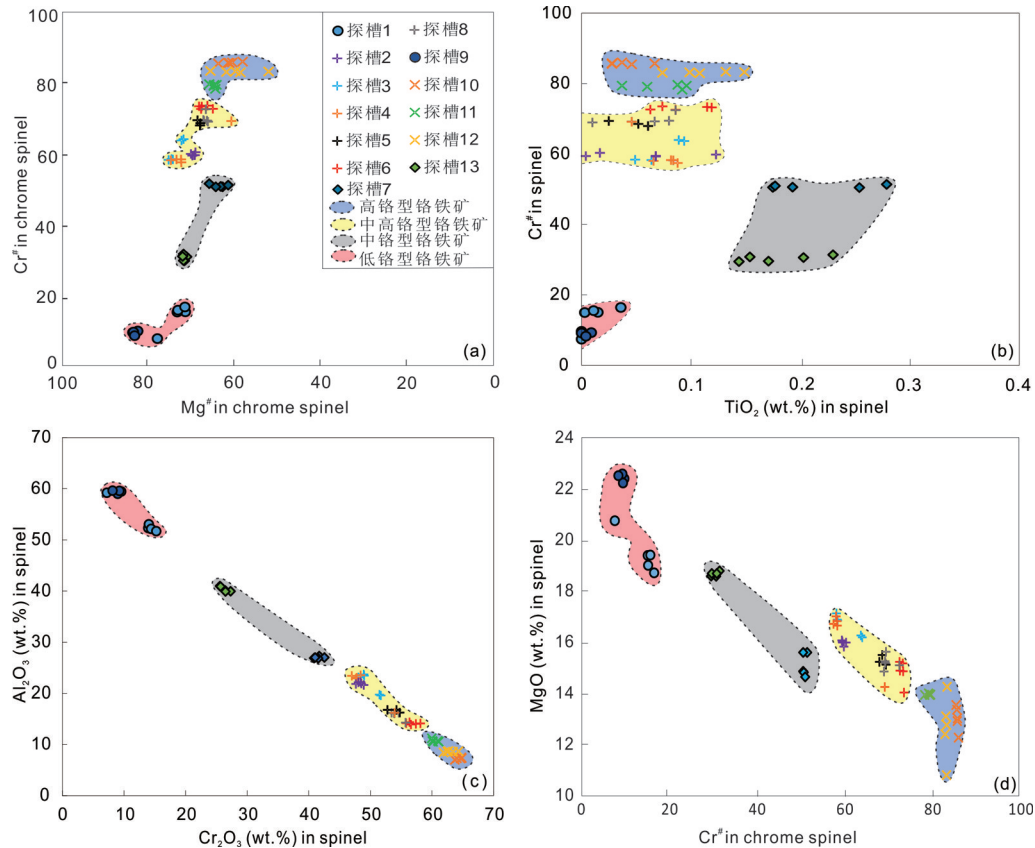


图12 丁青蛇绿岩铬铁矿中铬尖晶石的成分图解

Fig.12 Cr-spinel composition of chromitites in Dingqing ophiolite

征,可将铬铁矿体分为高铬型($\text{Cr}^\#$ 为 60~80 或 Cr_2O_3 含量为 45%~60%)与高铝型($\text{Cr}^\#$ 为 20~60 或 $\text{Al}_2\text{O}_3 > 25\%$) (Zhou et al., 1994)。罗布莎铬铁矿属于高铬型,而萨尔托海铬铁矿属于高铝型,亦有研究报道在同一蛇绿岩岩体中产出高铬型与高铝型的铬铁矿,如西藏普兰、古巴的 Sagua de Tánamo 区域 (González-Jiménez et al., 2011; 熊发挥等, 2013)。

根据野外产出、矿石构造和矿物化学成分特征,丁青铬铁矿可分为4种类型。

第一种类型为高铬型铬铁矿。 $\text{Cr}^\#$ 值为 78~86, 平均值 83; $\text{Mg}^\#$ 值 52~66, 平均值 62; Cr_2O_3 含量 60.06%~64.94%, 平均 62.69%; Al_2O_3 含量 7.00%~11.20%, 平均值 8.85%; TiO_2 值 0.03%~0.15%, 平均值 0.08%。矿体呈脉状产出, 规模较小; 矿体走向北东向或南东向, 与岩体走向一致或者斜交; 围岩为条带状或透镜状纯橄榄岩, 与矿体呈直接接触关系; 矿石具脉状构造。矿石主要由铬尖晶石和蛇纹石组成, 具塑性活化结构和蚀变结构; 铬尖晶石呈

他形粒状产出, 含量约 60%, 粒度 0.5~3 mm, 平均约 1.8 mm。此类铬铁矿的矿物化学投图主要落在图 12a、12b、12c、12d 的蓝色区域。

第二种类型为中高铬型铬铁矿。 $\text{Cr}^\#$ 值为 60~74, 平均值 65; $\text{Mg}^\#$ 值 61~69, 平均值 69; Cr_2O_3 含量 47.05%~58.21%, 平均值 51.97%; Al_2O_3 含量 13.89%~23.66%, 平均值 18.82%; TiO_2 含量 0.00%~0.12%, 平均值 0.07%。矿体呈豆荚状、透镜状或不规则团块状产出, 规模较大; 矿体走向北东向或南东向, 与岩体走向一致或者近垂直; 围岩为薄壳状纯橄榄岩, 与铬铁矿体主要为直接接触关系; 矿石具块状构造。矿石主要由铬尖晶石和蛇纹石组成, 具塑性活化结构、残碎结构、碎裂结构和蚀变结构; 铬尖晶石呈他形粒状产出, 含量约 85%, 粒度 0.5~2.5 mm, 平均约 1.5 mm; 铬铁矿中发育较多橄榄岩或辉石包体, 但都已经发生蛇纹石化。此类铬铁矿的矿物化学投图主要落在图 12a、12b、12c、12d 的黄色区域。

第三种类型为中铬型铬铁矿。 $\text{Cr}^\#$ 值 30~51, 平

表 3 丁青蛇绿岩铬铁矿体中铬尖晶石的电子探针分析结果(%)

Table 3 Representative microprobe analyses of chromian spinel from the Dingqing ophiolite chromitite (%)

探槽号	岩性	样品编号	测点号	SiO ₂	Al ₂ O ₃	TiO ₂	Cr ₂ O ₃	ΣFeO	MnO	MgO	CaO	Na ₂ O	K ₂ O	Total	Mg#	Cr ⁺
1	铬铁矿石	1-1	1	0.04	59.18	0	7.22	10.82	0.08	20.76	0	0.05	0	98.54	77.9	7.57
			2	0.02	52.28	0.02	13.96	13.67	0.13	19.02	0	0	0	99.39	71.43	15.19
			3	0.02	53.02	0	14.05	12.66	0.13	19.4	0	0	0	99.62	73.34	15.09
			4	0.01	52.11	0.01	14.42	12.77	0.07	19.42	0.01	0	0.01	99.17	73.17	15.66
			5	0.01	51.69	0.04	15.28	13.43	0.12	18.73	0.01	0.03	0	99.63	71.52	16.55
2	铬铁矿石	2-1	1	0.01	21.62	0.02	49	12.84	0.11	15.99	0	0	0.01	99.6	69.1	60.33
			2	0.02	21.79	0.07	47.73	12.79	0.28	16	0	0	0	98.68	69.33	59.5
			3	0.01	22.19	0	48.5	12.82	0.18	16.03	0	0.03	0.01	99.76	69.23	59.46
			4	0	21.88	0.12	48.59	12.15	0.17	15.84	0	0	0	98.75	70.13	59.83
			5	0.01	22.13	0.07	48.14	12.55	0.19	16.08	0	0.01	0.01	99.18	69.8	59.34
3	铬铁矿石	3-1	1	0	23.1	0.06	48.12	10.5	0.2	16.9	0	0	0.02	98.89	74.3	58.29
			2	0.03	23.45	0.05	49.07	10.43	0.16	16.86	0	0	0	100.06	74.62	58.4
			3	0.01	23.66	0.08	49.01	10.15	0.16	17.14	0	0	0.01	100.21	75.3	58.15
			4	0	19.55	0.09	51.76	11.43	0.15	16.2	0	0	0.02	99.2	71.84	63.98
			5	0.01	19.73	0.09	51.53	11.27	0.29	16.28	0.02	0	0	99.22	72.31	63.66
4	铬铁矿石	4-1	1	0.02	23.53	0.07	48.5	10.39	0.24	17.02	0	0	0.01	99.78	74.76	58.03
			2	0.02	23.01	0.08	47.87	11	0.16	16.84	0	0	0	98.99	73.47	58.25
			3	0	23.4	0.09	47.05	11.45	0.11	16.73	0.02	0	0	98.85	72.4	57.43
			4	0.04	22.9	0.08	47.73	11.63	0.25	16.66	0	0.03	0.01	99.32	72.45	58.3
			5	0	16.17	0.05	54.03	16.46	0.19	14.26	0	0	0.01	101.17	60.77	69.15
5	铬铁矿石	5-1	1	0	16.23	0.03	54.84	12.38	0.17	15.13	0	0	0	98.77	68.59	69.39
			2	0	16.73	0.05	54.32	13.09	0.29	15.51	0	0	0	99.99	67.95	68.54
			3	0.03	16.75	0.06	52.85	12.98	0.26	15.24	0	0	0.01	98.18	68.02	67.91
6	铬铁矿石	6-1	1	0.04	14.02	0.12	57.45	12.63	0.14	14.87	0	0	0	99.27	68.27	73.32
			2	0.05	14.34	0.09	56.42	13.28	0.14	15.24	0	0.01	0.01	99.58	67.78	72.52
			3	0.03	14.14	0.06	55.9	14.46	0.11	14.9	0	0	0	99.6	65.06	72.62
			4	0.05	14.07	0.07	58.21	13.06	0.19	14.04	0	0.01	0	99.71	66.32	73.51
			5	0	13.89	0.12	56.67	13.06	0.25	15.18	0	0	0	99.17	67.63	73.23
7	铬铁矿石	7-2	1	0.05	26.86	0.18	40.93	16.08	0.21	14.87	0	0	0	99.18	62.81	50.55
			2	0	27.28	0.19	41.75	15.58	0.25	14.83	0	0	0.01	99.89	63.21	50.65
			3	0.03	26.99	0.28	42.61	14.83	0.23	15.61	0	0.01	0.01	100.59	65.9	51.43
			4	0	26.81	0.18	41.58	16.52	0.17	14.65	0	0	0.01	99.91	61.52	50.99
			5	0.05	27	0.25	41.09	15.88	0.2	15.61	0	0	0.02	100.1	64.38	50.52
8	铬铁矿石	8-1	1	0	16.16	0.08	54.68	13.64	0.24	15.64	0	0	0	100.43	67.27	69.42
			2	0.01	16.12	0.05	53.91	13.44	0.22	15.27	0	0	0.01	99.03	67.11	69.17
			3	0.1	16.17	0.01	53.51	14.02	0.14	14.87	0.04	0	0	98.85	66.18	68.94
			4	0	16.06	0.07	53.97	13.77	0.19	15.2	0	0	0	99.27	66.4	69.27
			5	0.03	14.24	0.09	55.79	13.68	0.24	15.11	0	0	0.01	99.19	66.66	72.45
9	铬铁矿石	9-1	1	0.02	59.43	0	9.59	8.65	0.1	22.41	0	0.02	0.02	100.23	82.48	9.76
			2	0.07	59	0	9.02	8.23	0.08	22.6	0	0	0.01	99	83.61	9.3
			3	0.05	59.56	0.01	9.27	8.12	0.1	22.24	0	0.02	0	99.38	83.48	9.46
			4	0.01	59.61	0	8.16	8.17	0.03	22.53	0	0	0.01	98.53	83.22	8.41

续表3

探槽号	岩性	样品编号	测点号	SiO ₂	Al ₂ O ₃	TiO ₂	Cr ₂ O ₃	ΣFeO	MnO	MgO	CaO	Na ₂ O	K ₂ O	Total	Mg [#]	Cr [#]
10	铬铁矿石	10-1	1	0	7.26	0.03	64.12	15.17	0.24	13.37	0	0.01	0.01	100.21	61.22	85.57
			2	0.03	7	0.04	63.79	15.95	0.36	12.28	0	0	0.01	99.46	58.15	85.94
			3	0.01	7.24	0.03	64.73	15.21	0.33	13.04	0	0	0	100.58	60.55	85.71
			4	0.01	7.44	0.05	64.86	13.81	0.28	13.56	0	0	0	100.01	63.82	85.39
			5	0.08	7.3	0.07	64.94	14.86	0.35	12.93	0	0	0	100.53	61.52	85.64
11	铬铁矿石	11-1	1	0.05	10.52	0.09	61.17	13.34	0.32	13.96	0	0.05	0	99.03	65.9	79.6
			2	0	10.5	0.04	60.27	13.94	0.29	13.95	0	0.02	0.01	99.03	64.21	79.38
			3	0.04	10.66	0.06	60.14	13.78	0.18	14.01	0	0	0.02	99.03	64.86	79.09
			4	0	10.65	0.1	61.02	13.65	0.27	13.98	0	0	0	99.03	64.74	79.36
			5	0.01	11.2	0.09	60.06	13.85	0.14	13.95	0	0	0.03	99.03	64.5	78.25
12	铬铁矿石	12-1	1	0	8.65	0.13	64.41	13.43	0.21	14.27	0.02	0	0	101.12	65.64	83.31
			2	0.06	8.41	0.1	61.97	18.08	0.47	10.81	0.02	0	0	99.92	52.13	83.17
			3	0.04	8.7	0.11	62.76	15.88	0.29	12.41	0	0.01	0	100.19	58.69	82.88
			4	0	8.58	0.15	63.49	15.41	0.4	12.77	0.01	0	0	100.8	59.85	83.23
			5	0.01	8.57	0.07	62.56	14.5	0.3	13.11	0	0	0.01	99.13	61.93	83.05
13	铬铁矿石	13-1	1	0.03	40.09	0.2	26.48	13.81	0.14	18.6	0	0	0.01	99.34	71.11	30.71
			2	0.02	40.94	0.14	25.63	13.37	0.17	18.6	0	0	0	98.86	71.63	29.58
			3	0	40.88	0.17	25.71	13.21	0.13	18.7	0	0.01	0	98.8	71.87	29.67
			4	0.03	39.93	0.23	27.34	13.5	0.2	18.8	0.01	0	0	100.05	71.85	31.48
			5	0.03	39.9	0.15	26.53	13.23	0.16	18.7	0	0	0	98.7	72.04	30.84

均值41;Mg[#]值65~72,平均值68;Cr₂O₃含量25.63%~42.61%,平均值33.96%;Al₂O₃含量26.81%~40.94%,平均值33.67%;TiO₂含量0.14%~0.28%,平均值0.20%。矿体呈星点状-浸染状弥散分布于条带状纯橄榄岩内,矿体规模较大;围岩为条带状纯橄榄岩,铬铁矿呈直接接触关系;矿体产状南东,与岩体走向近于平行;矿石具星点状-浸染状构造。矿石主要由铬尖晶石和蛇纹石组成,具塑性活化结构、残碎结构和蚀变结构;铬尖晶石呈他形粒状产出,含量约30%,粒度0.25~1.5 mm,平均约0.6 mm;铬铁矿中未见橄榄岩或辉石包体存在。此类铬铁矿的矿物化学投图主要落在图12a、12b、12c、12d的灰色区域。

第四种类型为低铬型铬铁矿。Cr[#]极低,介于9.23~14.01,平均值为11.89;Mg[#]值变化在71.43~83.61,平均为77.79;TiO₂含量为0.00%~0.04%,平均值为0.01%;铬尖晶石Cr₂O₃含量在7.22%~15.28%,平均值为11.22%;Al₂O₃含量为51.69%~59.61%,平均值为56.21%。矿体呈条带状产出,规模较小;矿体走向南东向,与岩体走向近于平行;围岩为条带状纯橄榄岩,与铬铁矿呈直接接触关系,外围方辉

橄榄岩具辉石定向结构;矿石具浸染条带状构造。矿石主要由铬尖晶石和蛇纹石组成,少量橄榄石,具塑性活化结构、残碎结构和蚀变结构;铬尖晶石呈他形粒状产出,含量约35%,粒度0.5~2.5 mm,平均约1.5 mm;铬铁矿中发育较多橄榄岩或辉石包体,但大都已经发生蛇纹石化。此类铬铁矿的矿物化学投图主要落在图12a、12b、12c、12d的粉红色区域。

综上所述,4种类型的铬铁矿的野外产状、矿石构造和矿物化学特征均明显不同,可能对应不同的成因。

8 结 论

(1)丁青蛇绿岩体中发现并标定铬铁矿矿点83个。其中东岩体矿点27个;西岩体矿点56个。

(2)丁青东、西两个岩体内部均发现有高铬型或中高铬型铬铁矿(高铬型铬铁矿)和中铬型(高铝型铬铁矿)同时赋存在同一个岩体内,这是首次在班公湖—怒江带蛇绿岩中发现。

(3)低铬型铬铁矿Cr[#]极低,介于9~14,平均值为12;TiO₂含量为0.00%~0.04%,平均值为0.01%。低铬型铬铁矿与其他3种类型铬铁矿具有明显不同的野外产出、构造和矿物化学特征,也区别于目前

国内外报道过的铬铁矿,认为可能是一种新的铬铁矿产出类型。

(4)根据丁青铬铁矿野外产出特征分为4种产出类型;根据矿石构造主要分为块状、脉状、浸染状和浸染条带状4种类型;根据矿石中铬尖晶石矿物化学分为高铬型、中高铬型、中铬型和低铬型4种类型。这3种分类方案具有很好的对应关系,认为可能代表了不同的成因。根据丁青铬铁矿野外产出、矿石构造和矿物化学特征提出一种新的铬铁矿划分方案,即高铬型、中高铬型、中铬型和低铬型铬铁矿。

致谢:感谢西藏矿业教授级高工巴登珠和中国冶金地质总局第二地质勘察院穆小平、施杨术、赵凯等人在野外工作中的耐心指导、支持与帮助。中国地质大学(北京)罗照华教授、中国地质科学院地质研究所刘飞和邱添助理研究员在论文撰写全过程中提供的思路,给予的支持、帮助与宝贵的修改意见;电子探针分析是在中国地质科学院地质研究所电子探针实验室毛小红助理研究员辅助下完成,在此一并致以诚挚的谢意。

References

- Bao Peisheng. 2009. Further discussion on the genesis of the podiform chromite deposits in the ophiolites—questioning about the rock/melt interaction metallogeny[J]. *Geological Bulletin of China*, 28(12): 1741–1761(in Chinese).
- Betchaida D. Payot, Shoji Arai, Henry J B. Dick, Natsue Abe, Yuji Ichiyama. 2014. Podiform chromitite formation in a low-Cr/high-Al system: An example from the Southwest Indian Ridge (SWIR)[J]. *Mineralogy and Petrology*, 108(4): 533–549.
- Girardeau J, Marcoux J, Allègre C J, Bassoulet J P, Tang Youking, Xiao Xuchang, Zao Yougong, Wang Xibin. 1984. Tectonic environment and geodynamic significance of the Neo-Cimmerian Donqiao ophiolite, Bangong–Nujiang suture zone, Tibet[J]. *Nature*, 305: 27–31.
- González–Jiménez J M, Proenza J A, Gervilla F, Melgarejo J C, Blanco–Moreno J A, Ruiz–Sanchez R, Griffin W L. 2011. High–Cr and high–Al chromitites from the Sagua de Tánamo district, Mayarí–Cristal Ophiolitic Massif (eastern Cuba): Constraints on their origin from mineralogy and geochemistry of chromian spinel and platinum–group elements[J]. *Lithos*, 125(1): 101–121.
- Huang Guicheng, Xu Deming, Lei Yijun, Li Lijuan. 2007. Chromite prospects in the Daba–Xiugugabu ophiolite zone southwestern Tibet[J]. *Geology in China*, 34(4): 668–674(in Chinese with English abstract).
- Lai Shengmin, Yang Jingsui, Xiong Fahui, Liu Zhao, Tian Yazhou, Zhou Wenda, Zhang Lan, Chen Yanhong, Gaojian. 2015. Mineralogy and PGE features of Zedang peridotites in eastern Yarlung Zangbo suture, Tibet[J]. *Geology in China*, 42(5): 1515–1534(in Chinese with English abstract).
- Li Hongsheng. 1988. Early Jurassic(Late Pliensbachian) radiolaria from the Dengqen area, Xizang(Tibet)[J]. *Acta Micropalaentologica Sinica*, 5(3): 323–330(in Chinese with English abstract).
- Li Jianghai, Niu Xianglong, Chen Zheng, Feng Jun, Huang Xiongnan. 2002. The discovery of podiform chromite in west Liaoning and its implication for plate tectonics[J]. 18(2): 187–192(in Chinese).
- Li Pu. 1955. A preliminary understanding of the geology of eastern Tibet[J]. *Chinese Science Bulletin*(7): 62–71(in Chinese).
- Lian Dongyang, Yang Jingsui, Xiong Fahui, Liu Fei, W Yunpeng. 2015. Platinum–group element characteristics of the peridotite and podiform chromitite from Dajiweng ophiolite of the western segment of Yarlung–Zangbo suture zone, Tibet[J]. *Geology in China*, 42(2): 525–546(in Chinese with English abstract).
- Lin Liang. 2015. Formation Age and Geochemical Characteristics of the Dingqing Ophiolite, Tibet[D]. Beijing: University of Chinese Academy of Sciences(in Chinese with English abstract).
- Liu Chuanzhou, Wu Fuyuan, Simon A. Wilde, Yu Liangjun, Li Jiliang. 2010. Anorthitic plagioclase and pargasitic amphibole in mantle peridotites from the Yungbwa ophiolite (southwestern Tibetan Plateau) formed by hydrous melt metasomatism[J]. *Lithos*, (114): 413–422.
- Qian Wenbin, Qian Qing, Yue Guoli, Li Qiusheng, Zhang Qi, Zhou Meifu. 2002. The geochemical characteristics of fore–arc ophiolite from Dingqing area, Tibet[J]. *Acta Petrologica Sinica*, 18(3): 392–400(in Chinese with English abstract).
- Qiang Bazhaxi, Xie Yaowu, Wu Yanwang, Xie Chaoming, Li Qiuli, Qiu Junqiang. 2009. Zircon SIMS U–Pb dating and its significance of cumulate gabbro from Dengqen ophiolite, eastern Tibet, China[J]. *Geological Bulletin of China*, 28(9): 1253–1258(in Chinese with English abstract).
- She Yuwei, Zhu Xiangkun, He Yuan, Ma Jiangxiong, Sun Jian. 2017. The new discovery of the podiform chromitite in the Xigaze ophiolite, Yarlung Zangbo suture zone, Tibet[J]. *Geology in China*, 44(3): 610–611(in Chinese with English abstract).
- Shoji Arai, Kyoko Matsukage. 1998. Petrology of a chromitite micropod from Hess Deep, equatorial Pacific—a comparison between abyssal and alpine–type podiform chromitites[J]. *Lithos*, 43(1): 1–14.
- Thayer T P. 1964. Principal features and origin of podiform chromite deposits, and some obserbations on the Guleman–Soridag district, Turkey[J]. *Economic Geology*, 59: 1497–1524.
- Tomoaki Morishita, Jinichiro Maeda, Sumio Miyashita, Hidenori Kumagai, Takeshi Matsumoto, Henry J.B. Dick. 2007. Petrology of local concentration of chromian spinel in dunite from the slow–spreading Southwest Indian Ridge[J]. *European Journal of*

- Mineralogy, 19(6): 871–882.
- Wang Baodi, Wang Liquan, Chung Sunlin, Chen Jianlin, Yin Fuguang, Liu Han, Li Xiaobo. 2016. Evolution of the Bangong – Nujiang Tethyan ocean: Insights from the geochronology and geochemistry of mafic rocks within ophiolites[J]. *Lithos*, 245: 18–33.
- Wang Xibin, Bao Peisheng. 1987. The genesis of podiform chromite deposits—A case study the Luobosa chromite deposit, Tibet[J]. *Acta Geologica Sinica*, (2): 166–181(in Chinese with English abstract).
- Wang Yujing, Wang Jianping, Liu Yanming, Li Qiusheng, Pei Fang. 2002. Characteristics and age of the Dingqing ophiolite in Xizang (Tibet) and their geological significance[J]. *Acta Micropalaeontologica Sinica*, 19(4): 417–420(in Chinese with English abstract).
- Wei Zhenquan, Xia Bin, Zhou Guoqing, Zhou Lifeng, Wang Ran, Hu Jingren, Chen Guojie. 2007. Geochemical characteristics and its origin for mid–ocean ridge superposing oceanic island of chongbe ophiolitic melange, Dingqing, Xizang(Tibet) [J]. *Geological Review*, 53(2): 187–197(in Chinese with English abstract).
- She Yuwei, Zhu Xiangkun, He Yuan, Ma Jiangxiong, Sun Jian. The new discovery of the podiform chromitite in the Xigaze ophiolite, Yarlung Zangbo suture zone, Tibet[J]. *Geology in China*, 2017, 44(3): 610–611(in Chinese with English abstract).
- Xiong Fahui, Yang Jingsui, Ba Dengzhu, Liu Zhao, Xu Xiangzhen, Feng Guanying, Niu Xiaolu, X Jifeng. 2014. Different type of chromitite and genetic model from Luobusa ophiolite, Tibet[J]. *Acta Petrologica Sinica*, 30(8): 2137–2163(in Chinese with English abstract).
- Xiong Fahui, Yang Jingsui, Gao Jian, Lai Shengmin, Chen Yanhong, Zhang Lan. 2016. Feature of Zedong podiform chromitite, eastern Yarlung–Zangbo suture zone in Tibet.[J]. *Acta Petrologica Sinica*, 32(12): 3635–3648(in Chinese with English abstract).
- Xiong Fahui, Yang Jingsui, Liu Zhao, GuoGuolin, Chen Songyong, Xu Xiangzhen, Li Yuan, L Fei. 2013. High–Cr and high–Al chromitite found in western Yarlung–Zangbo suture zone in Tibet[J]. *Acta Petrologica Sinica*, 29(6): 1878–1908(in Chinese with English abstract).
- Xiong Fahui, Yang Jingsui, Robinson P T, Gao jian, Chen Yanhong, Lai Shengming. 2017. Petrology and geochemistry of peridotites and podiform chromitite in the Xigaze ophiolite, Tibet: Implications for a suprasubduction zone origin[J]. *Journal of Asian Earth Sciences*, 146: 56–75.
- Xiong Fahui, Yang Jingsui, Robinson P T, Xu Xiangzhen, Liu Zhao, Li Yuan, LinJinyang, Chen Songyong. 2015. Origin of podiform chromitite, a new model based on the Luobusa ophiolite, Tibet[J]. *Gondwana Research*, 27: 525–542.
- Yang Jingsui, Bai Wenji, Fang Qingsong, Rong He. 2008. Ultrahigh–pressure minerals and new minerals from the Luobusa ophiolitic chromitites in Tibet: A review[J]. *Acta Geoscientica Sinica*, 29(3): 263–274(in Chinese with English abstract).
- Yang Jingsui, Ba Dengzhu, Xu Xiangzhen, L Zhaoli. 2010. A restudy of podiform chromite deposits and their ore–prospecting vista in China[J]. *Geology in China*, 37(4): 1141–1150(in Chinese with English abstract).
- Yang Jingsui, Larissa Dobrzhinetskaya, Bai Wenji, Robinson P T, Zhang Junfeng, Harry W. Green. 2007. Diamond– and coesite–bearing chromitites from the Luobusa ophiolite, Tibet[J]. *Geology*, 35(10): 875–878.
- Yang Jingsui, Robinson P T, Yildirim Dilek. 2014. Diamonds in ophiolites: A little– known diamond occurrence[J]. *Elements*, 10: 123–126.
- Yang Jingsui, Xiong Fahui, Guo Guolin, Liu Fei, Liang Fenghua, Chen Songyong, Li Zhaoli, Zhang Liwen. 2011. The Dongbo Ultramafic massif: A mantle peridotite in the western part of the Yarlung Zangbo suture zone, Tibet, with excellent prospects for a major chromite deposit[J]. *Acta Petrologica Sinica*, 27(11): 3207–3222(in Chinese with English abstract).
- You Zaiping. 1997. $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$ Geochronology of Dengqen ophiolitic melange in Xizang[J]. *Tibet Geology*, (2): 24–30(in Chinese with English abstract).
- Zhang Qi. 1983. The new information about ophiolite in Dengqen County, Tibet[J]. *Scientia Geologica Sinica*, 1: 101–102(in Chinese with English abstract).
- Zhang Qi, Yang Ruiying. 1985. The geological significance of plutonic intrusion of boninitic series from Dingqing, Xizang[J]. *Chinese Science Bulletin*, 16: 1243(in Chinese).
- Zhang Qi, Yang Ruiying. 1987. The geochemical characteristics of intrusion of boninitic series from Dingqing, Xizang[J]. *Acta Petrologica Sinica*, (2): 66–76(in Chinese with English abstract).
- Zhang Qizhi, Ba Dengzhu, Xiong Fahui, Yang Jingsui. Discussion on genesis process and deep prospecting breakthrough of Luobusa chromitite, Tibet[J]. *Geology in China*, 2017, 44(2): 224–241(in Chinese with English abstract).
- Zheng Haixiang, Pan Guitang, Xu Yaorong, Wang Peisheng. 1982. Some new information about the ultramafics along Nujiang Tectonic Belt—A complete ophiolite suite[C]// *Geological Articles of the Qinghai–Xizang Plateau*. Beijing: Geological Publishing House(in Chinese).
- Zheng Yiyi. 1982. Discovery of an ophiolite– melange association in Dengqen area, Xizang(Tibet) [C]// *Geological Articles of the Qinghai–Xizang Plateau*. Beijing: Geological Publishing House, 177–188(in Chinese).
- Zou Guangfu. 1993. The characteristic of rock geochemistry and origin for Dingqing ophiolite in Tibet[J]. *Tibet Geology*, (2): 46–58(in Chinese with English abstract).
- Zhou Meifu, Robinson P T. 1994. High–Cr and high–Al podiform chromitites, western China: Relationship to partial melting and melt/rock reaction in the Upper Mantle[J]. *International Geology*

Review, 36: 378–686.

附中文参考文献

- 鲍佩声. 2009. 再论蛇绿岩中豆荚状铬铁矿的成因——质疑岩石/熔体反应成矿说[J]. 地质通报, 28(12): 1741–1761.
- 黄圭成, 徐德明, 雷义均, 李丽娟. 2007. 西藏西南部达巴—休古嘎布绿岩带铬铁矿的找矿前景[J]. 中国地质, 34(4): 668–674.
- 来盛民, 杨经绥, 熊发挥, 刘钊, 田亚洲, 徐向珍, 周文达, 张岚, 陈艳红, 高健. 2015. 西藏雅鲁藏布江缝合带泽当地幔橄榄岩的矿物化学和铂族元素特征[J]. 中国地质, 42(5): 1515–1534.
- 李红生. 1988. 西藏丁青地区早侏罗世放射虫[J]. 微体古生物学报, 5(3): 323–330.
- 李江海, 牛向龙, 陈征, 冯军, 黄雄南. 2002. 辽西豆荚状铬铁矿的发现及其意义[J]. 岩石学报, 18(2): 187–192.
- 李璞. 1955. 西藏东部地质的初步认识[J]. 科学通报, (7): 62–71.
- 连东洋, 杨经绥, 熊发挥, 刘飞, 王云鹏. 2015. 雅鲁藏布江缝合带西段达机翁地幔橄榄岩及铬铁矿的铂族元素特征[J]. 中国地质, 42(2): 525–546.
- 林靛. 2015. 西藏丁青蛇绿岩的形成时代与岩石地球化学特征[D]. 北京: 中国科学院大学.
- 刘文斌, 钱青, 岳国利, 李秋生, 张旗, 周美付. 2002. 西藏丁青弧前蛇绿岩的地球化学特征[J]. 岩石学报, 18(3): 392–400.
- 强巴扎西, 谢尧武, 吴艳旺, 谢超明, 李秋立, 邱军强. 2009. 藏东丁青蛇绿岩中堆晶辉长岩锆石 SIMS U–Pb 定年及其意义[J]. 地质通报, 28(9): 1253–1258.
- 余宇伟, 朱祥坤, 何源, 马健雄, 孙剑. 2017. 西藏雅鲁藏布构造带日喀则蛇绿岩中新发现豆荚状铬铁矿化[J]. 中国地质, 44(3): 601–611.
- 王希斌. 1987. 豆荚状铬铁矿床的成因——以西藏自治区罗布莎铬铁矿床为例[J]. 地质学报, (2): 166–181.
- 王玉净, 王建平, 刘彦明, 李秋生, 裴放. 2002. 西藏丁青蛇绿岩特征、时代及其地质意义[J]. 微体古生物学报, 19(4): 417–420.
- 韦振权, 夏斌, 周国庆, 钟立峰, 王冉, 胡敬仁, 陈国结. 2007. 西藏丁青宗白蛇绿混杂岩地球化学特征及其洋中脊叠加洋岛的成因[J]. 地质评论, 53(2): 187–197.
- 熊发挥, 杨经绥, 巴登珠, 刘钊, 徐向珍, 冯光英, 牛晓露, 许继峰. 2014. 西藏罗布莎不同类型铬铁矿的特征及成因模式讨论[J]. 岩石学报, 30(8): 2137–2163.
- 熊发挥, 杨经绥, 高健, 来盛民, 陈艳红, 张岚. 2016. 西藏雅鲁藏布江缝合带东段泽当豆荚状铬铁矿特征[J]. 岩石学报, 32(12): 3635–3648.
- 熊发挥, 杨经绥, 刘钊, 郭国林, 陈松永, 徐向珍, 李源, 刘飞. 2013. 西藏雅鲁藏布江缝合带西段发现高铬型和高铝型豆荚状铬铁矿体[J]. 岩石学报, 29(6): 1878–1908.
- 杨经绥, 巴登珠, 徐向珍, 李兆丽. 2010. 中国铬铁矿床的在研究及找矿前景[J]. 中国地质, 37(4): 1141–1150.
- 杨经绥, 白文吉, 方青松, 戎合. 2008. 西藏罗布莎蛇绿岩铬铁矿中的超高压矿物和新矿物(综述)[J]. 地球学报, 29(3): 263–274.
- 杨经绥, 熊发挥, 郭国林, 刘飞, 梁凤华, 陈松永, 李兆丽, 张隶文. 2011. 东波超镁铁岩体: 西藏雅鲁藏布江缝合带西段一个甚具铬铁矿前景的地幔橄榄岩体[J]. 岩石学报, 27(11): 3207–3222.
- 游再平. 1997. 西藏丁青蛇绿混杂岩 $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$ 年代学[J]. 西藏地质, (2): 24–30.
- 张旗. 1983. 丁青蛇绿岩新知[J]. 地质科学, (1): 101–102.
- 张旗, 杨瑞英. 1985. 西藏丁青蛇绿岩中玻镁安山岩类的深成岩及其地质意义[J]. 科学通报, (16): 1243–1243.
- 张旗, 杨瑞英. 1987. 西藏丁青蛇绿岩中玻镁安山岩类侵入岩的地球化学特征[J]. 岩石学报, (2): 66–76.
- 章奇志, 巴登珠, 熊发挥, 杨经绥. 2017. 西藏罗布莎豆荚状铬铁矿床深部找矿突破与成因模式讨论[J]. 中国地质, 44(2): 224–241.
- 郑海翔, 潘桂棠, 徐跃荣, 王培生. 1982. 怒江构造带超基性岩新知——一个完整的蛇绿岩套的确定[C]//青藏高原地质文集, 北京: 地质出版社.
- 郑一义. 1982. 西藏丁青地区蛇绿岩—混杂岩的发现[C]//青藏高原地质文集. 北京: 地质出版社.
- 邹光富. 1993. 西藏丁青蛇绿岩岩石地球化学特征及其成因意义[J]. 西藏地质, (2): 46–58.