

张岚, 杨经绥, 熊发挥, 等. 雅鲁藏布缝合带巴尔蛇绿岩边部石英菱镁岩成因[J]. 中国地质, 2015, 42(5): 1443–1456.

Zhang Lan, Yang Jingsui, Xiong Fahui, et al. Origin of listwanite from Baer ophiolite, Yarlung Zangbo suture zone[J]. Geology in China, 2015, 42(5): 1443–1456 (in Chinese with English abstract).

雅鲁藏布缝合带巴尔蛇绿岩边部石英菱镁岩成因

张 岚^{1,2} 杨经绥² 熊发挥² 刘 飞² 周文达^{3,2}

(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, 大陆构造与动力学国家重点实验室, 中国科学院地质研究所, 北京 100037; 3. 中国地质大学地球科学学院, 湖北 武汉 430074)

摘要: 石英(滑石)菱镁岩是基性岩、超基性岩与富 CO₂ 流体反应形成的一套硅化-碳酸盐化蚀变岩, 常伴生金、汞、菱镁矿、碱金属矿化而在国外备受关注, 但国内相关研究较薄弱。巴尔蛇绿岩位于西藏阿里地区, 石英菱镁岩主要出露在蛇绿岩体东北边界, 出露厚度约 20 m, 近北西西向延伸数千米。本文系统研究了雅鲁藏布缝合带西段巴尔蛇绿岩边部石英菱镁岩矿物学及地球化学特征。根据尖晶石镜下特征, 划分为两个阶段: 一阶段石英菱镁岩中尖晶石稳定存在, 二阶段石英菱镁岩中尖晶石几乎全部蚀变(代表更强程度蚀变作用)。石英菱镁岩主要地球化学组成为 SiO₂、MgO 及 CO₂, 8 件样品主量元素含量变化较大, SiO₂/MgO 比值波动较大, 反映石英菱镁岩形成为非等化学过程。蛇纹石化橄榄岩与石英菱镁岩有着相似微量元素分布规律, 表明同源性, 但两者仍有较明显差异: 两阶段石英菱镁岩 LREE 都较地幔橄榄岩略富集, 从地幔橄榄岩到两阶段石英菱镁岩, HREE 先亏损再略富集。微量元素标准图解中, Sr 在橄榄岩与石英菱镁岩中都为正异常, 其含量随蚀变强度增强而增加。此外, 两阶段石英菱镁岩均无 Au、Hg 矿化。

关键词: 巴尔石英菱镁岩; 矿物学; 地球化学; 岩石成因

中图分类号: P588.32⁴ 文献标志码: A 文章编号: 1000-3657(2015)05-1443-14

Origin of listwanite from Baer ophiolite, Yarlung Zangbo suture zone

ZHANG Lan^{1,2}, YANG Jing-sui², XIONG Fa-hui², LIU Fei², ZHOU Wen-da^{3,2}

(1. School of Earth Sciences and Mineral Resources, China University of Geosciences, Beijing 100083, China; 2. CARMA, State Key Laboratory for Continental Tectonics and Dynamics, Institute of Geology, Chinese Academy of Geological Sciences, Beijing 100037, China; 3. Faculty of Earth Sciences, China University of Geosciences, Wuhan 430074, Hubei, China)

Abstract: Listwanite is a suite of silica-carbonate alteration products which are formed when CO₂-bearing hydrothermal fluids meet and react with serpentinized mafic and ultramafic rocks. This alteration product is of great importance for its economic significance. Gold, mercury, magnesite and base metal deposits are often associated with listwanite. In China, Not enough attention has been paid to the petrogenesis of listwanite and related mineralization. This paper reports the study of listwanite occurring along

收稿日期: 2015-06-16; 改回日期: 2015-07-06

基金项目: 国家自然科学基金重点项目(40930313)、中国地质调查局工作项目(12120114061801、12120114057701、12120114061501) 资助。

作者简介: 张岚, 男, 1991 年生, 硕士生, 矿物岩石矿床学方向; E-mail: 1127426580@qq.com。

通讯作者: 杨经绥, 男, 1950 年生, 研究员, 博士生导师, 从事青藏高原和造山带的岩石大地构造研究; E-mail: yangjingsui@163.com。

the northeast edge of Baer ophiolite in the western part of the Yarlung Zangbo suture (YZSZ). Baer ophiolite lies in Ngari Prefecture of southwest Tibet. The Baer listwanite crops out along the northeast boundary of the ophiolite with a width of ca. 20 meters and stretches a few kilometers in NWW direction. Based on the features of spinel under optical microscope, the authors recognized two stages of listwanite: Stage I listwanite contains spinel relicts while Stage II listwanite rarely contains spinel relicts. This means Stage II listwanite experienced more intense alteration. Geochemically, Baer listwanite is mainly composed of SiO_2 , MgO and CO_2 . 8 samples (containing 3 Stage I samples and 5 Stage II samples) show variation of major oxides, and the MgO/SiO_2 ratios are not consistent, which implies that the listwanization was not an iso-chemical process. Baer peridotite and two stages of listwanites show similar trace elements distribution patterns. Both stages of listwanites show little enrichment of the LREE related to the protolith. From peridotite to two stages of listwanites, the behavior of HREE might have experienced depletion followed by slight enrichment. All samples show positive Sr anomalies and their values go up stage by stage. The values of Au and Hg in both stages of listwanites show that they have not been subjected to Au and Hg mineralization.

Key words: Baer listwanite; mineralogy; geochemistry; petrogenesis

About the first author: ZHANG Lan, male, born in 1991, master candidate, majors in mineralogy, petrology and mineral deposits; E-mail: 1127426580@qq.com.

About the corresponding author: YANG Jing-sui, male, born in 1950, professor, supervisor of doctor candidates, mainly engages in the study of petrology and tectonics of Tibet and orogenic belts; E-mail: yangjsui@163.com.

石英菱镁岩(滑石菱镁岩, listwanite, silica-carbonate alteration)最早由 Rose (1837)^[1]在研究乌拉尔地区蛇纹岩碳酸盐化-硅化蚀变时提出,以产于 Listvenya 山最具代表性而得名,主要矿物有:石英、碳酸盐矿物、少量铬云母、浸染状黄铁矿和其他副矿物,其定义初衷是为了明确超基性岩碳酸盐化蚀变是否发生碱金属元素交代作用^[2]。由于缺乏统一定义,石英菱镁岩一词在使用过程中其涵盖范畴逐渐扩大,并不再强调是否发生碱金属元素交代。Buckman (2000)^[3]认为石英菱镁岩包括了超基性岩碳酸盐化过程中所有富碳酸盐相到富二氧化硅的相,其主要矿物是滑石、菱镁矿和二氧化硅矿物,通常伴生少量绿泥石、铬云母、硫化物、其他碳酸盐矿物和蛇纹石残余^[4],并常被由石英、碳酸盐矿物和黄铁矿组成的细脉所穿插^[5], Ash (2001)^[6]提出应把石英菱镁岩当作一套在成因上与同期热液事件相关,因原岩组成和蚀变差异而形成的蚀变岩石系列。

超基性岩石石英菱镁岩化作用常与造山带中花岗岩产生的 CO_2 流体有关,其产状常受先期断裂系统限制,边界断裂蚀变最常发育^[3],沿断裂呈狭长带状产出的石英菱镁岩蚀变矿物组合常形成特征环带构造^[7]。受成岩元素在流体中溶解-沉淀条件控制,成岩作用并不都发生在超基性岩体内部,蛇纹岩围岩中常见石英菱镁岩呈岩脉产出^[4, 8]。石英菱镁岩地质意义在于其常伴生金、铜、银等金属

矿化现象^[9, 10]。与超基性岩碳酸盐化蚀变岩伴生金矿化最著名的例子是太古宙科马提岩碳酸盐化形成的金矿脉,这也是世界上黄金的主要来源^[11]。国内石英菱镁岩伴生金矿化现象也有报道:如新疆萨尔托海石英菱镁岩^[12, 3, 13],西藏雅江带东段罗布莎石英菱镁岩^[8]。雅鲁藏布缝合带西段众多岩体常有石英菱镁岩产出,受构造破坏更强呈带状产出北亚带蛇绿岩其产出更为普遍,其中巴尔蛇绿岩边部石英菱镁岩产出面积较大、露头好。本文对巴尔石英菱镁岩进行了细致野外观察,并在室内进行了详细的矿物学及地球化学研究,揭示了巴尔石英菱镁岩为方辉橄榄岩与富 CO_2 热液反应形成,但并未发现与该类岩石有关的常见矿化。

1 地质背景

青藏高原主要由源于冈瓦纳大陆4个近东西走向狭长块体组成(图1-a),由北向南分别为松潘-甘孜地块、羌塘地块、拉萨地块和喜马拉雅构造带,分别被代表古、中、新特提斯洋残余的金沙江缝合带(JSSZ)、班公-怒江缝合带(BNSZ)和雅鲁藏布缝合带(YZSZ)所分隔^[14]。雅江带(YZSZ)以断续分布的蛇绿岩为主要标志,该带大致沿雅鲁藏布江近E-W向延伸约2000 km,略向西南突出呈弧形展布,分别在东、西构造节转为近S-N向延展,被认为是新特提斯古大洋盆开启、消减、闭合过程中形

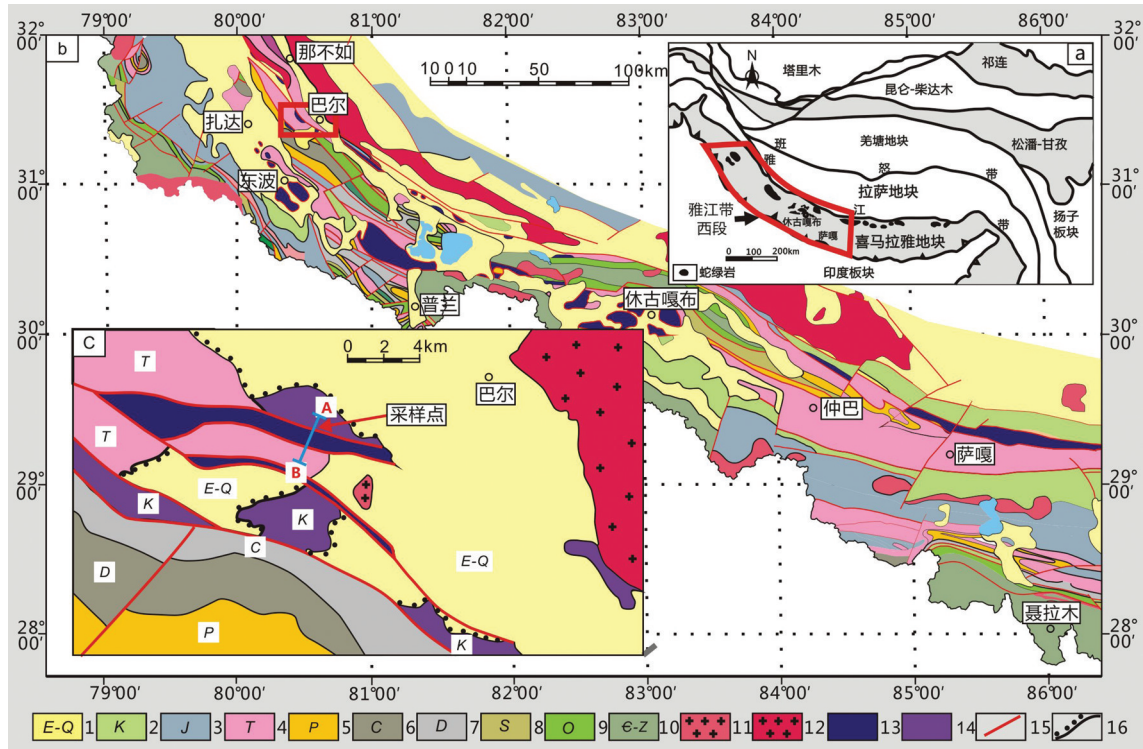


图1 青藏高原构造格架、雅鲁藏布缝合带蛇绿岩分布简图(a)及雅鲁藏布缝合带西段地质简图(b)和巴尔地区区域地质图(c, 据①及[26])

1—第四系-古近系;2—白垩系;3—侏罗系;4—三叠系;5—二叠系;6—石炭系;7—泥盆系;8—志留系;9—奥陶系;10—寒武系—震旦系;11—喜山期花岗岩;12—燕山期花岗岩;13—超基性岩体;14—蛇绿混杂岩;15—断层;16—不整合面

Fig.1 Geological sketch map of the Tibetan Plateau showing major tectonic units and the distribution of the YZSZ ophiolites (a); geological sketch map of the western part of YZSZ (b); detailed geological map of the Baer ophiolite (c, after ① and reference [26])
1—Quaternary—Eogene; 2—Cretaceous; 3—Jurassic; 4—Triassic; 5—Permian; 6—Carboniferous; 7—Devonian; 8—Silurian; 9—Ordovician; 10—Cambian—Sinian; 11, 12—Granite; 13—Ultramafic rocks; 14—Ophiolitic melange; 15—Faults; 16—Unconformity

成大洋岩石圈残余及印度板块与欧亚大陆缝合线^[15-17]。根据蛇绿岩的空间展布特征,雅鲁藏布缝合带被分为东、中、西三段:西段从萨嘎以西至中印边境,中段自昂仁至仁布,东段自曲水到墨脱^[18]。随着对雅江蛇绿岩研究工作不断深入,以往研究较薄弱的西段蛇绿岩也进行了较深入研究,并对新特提斯洋盆演化提供了新的制约^[19-24]。雅鲁藏布江缝合带北侧发育一套早白垩世蛇绿岩洋壳建造,南侧出露一套千枚岩、板岩、放射虫燧石岩、变基性火山岩和变辉绿岩为主的浅变质-火山岩建造^[25]。缝合带以南为由寒武纪至始新世特提斯海相沉积组成的特提斯喜马拉雅被动陆缘沉积岩,也是喜马拉雅造山带最北构造单元,其南以藏南拆离系为底界,覆

盖于高喜马拉雅构造带之上。

巴尔蛇绿岩位于西藏阿里地区扎达县城东约65 km(图1-b),地处219国道与705县道交汇处,交通条件便利,也是雅江带西段北亚带一个较大蛇绿岩体,岩体长轴走向近北西西,延伸约20 km,出露宽度1~4 km,总体呈西宽东窄。巴尔蛇绿岩主要组成为含单斜辉石方辉橄岩,基性岩单元如橄长堆晶岩、玄武岩及辉绿岩出露较少。地幔橄岩呈构造岩片产出,围岩有早—中三叠世弱变质碳酸盐岩、碎屑岩及白垩纪混杂岩,混杂岩基质为灰黑色板岩夹砂岩,岩块有硅质岩、灰岩、超基性岩和砂砾岩。区内第四纪沉积物出露面积较大,未见蛇绿岩与北侧冈底斯岩基接触关系(图1-c)。

① 宜昌地质矿产研究所.西藏雅鲁藏布江西段地质矿产图.2006.

2 野外产状

巴尔蛇绿岩野外信手剖面如图2(图1-c中A-B剖面),该处蛇绿岩出露厚度约1.5 km,主体岩性为地幔橄榄岩,风化面多为黄褐色-黑褐色,新鲜面灰绿色,岩体裂隙广泛分布并常伴生强烈蛇纹石化作用,岩体中部出露辉绿岩脉(图3-a)。石英菱镁岩沿蛇绿岩体东北边界断裂产出,岩石新鲜面为橙蓝色(图3-d,e),风化面棕红色并常发育蜂窝状构造(图3-f),其严格沿断裂产出的特点可能表明石英菱镁岩形成于侵位过程中或岩体就位之后。超基性岩碳酸盐化程度越靠近边界其强度越大,形成蚀变环带(图2-b,c)。本文识别出3个蚀变带:石英菱镁岩带,厚度5~20 m,代表较完全碳酸盐化作用,几乎无橄榄岩原生硅酸盐矿物残留;蚀变蛇纹岩带出露厚度与石英菱镁岩带相当,代表橄榄岩较完全的水合作用但局部仍可见辉石骰状突起,蚀变蛇纹岩带内磁铁矿细脉和碳酸盐细脉普遍发育;蚀变橄榄岩带是巴尔蛇绿岩主体,发育弱碳酸盐化蚀变及局部较强烈蛇纹石化作用。

3 矿物学特征

蚀变橄榄岩带主要次生蚀变是蛇纹石化作用(图4-a)和弱碳酸盐化作用,其主要组成含单斜辉石方辉橄榄岩为块状构造,熔融残余结构,主要矿物有橄榄石(65%~75%),斜方辉石(15%~25%),含少量单斜辉石(1%~2%)和尖晶石(1%~2%)。蚀变矿物主要为带状分布的蛇纹石、绿泥石和星点状分布的磁铁矿,他形尖晶石常磁铁矿化,外围常包裹有绿泥石。在弱蛇纹石化样品中,橄榄石颗粒边部常见大量裂隙(图4-b),这可能与橄榄石辉石蛇纹石化导致岩石体积膨胀有关;而在蛇纹石化作用更普遍的样品中,橄榄石、辉石颗粒中无裂隙发育,岩石整体表现蛇纹石韧性行为。

蚀变蛇纹岩带主要矿物为蛇纹石,细粒磁铁矿和菱镁矿(图4-c,d),地幔橄榄岩原生矿物少见,偶残留岛状橄榄石、具绢石结构蚀变辉石及蚀变尖晶石。蚀变蛇纹岩带内主要发育两种细脉:细粒他形菱镁矿脉和细黑色粒磁铁矿脉。尖晶石含量在蚀变蛇纹岩带内含量较蚀变橄榄岩带降低,并能见到尖

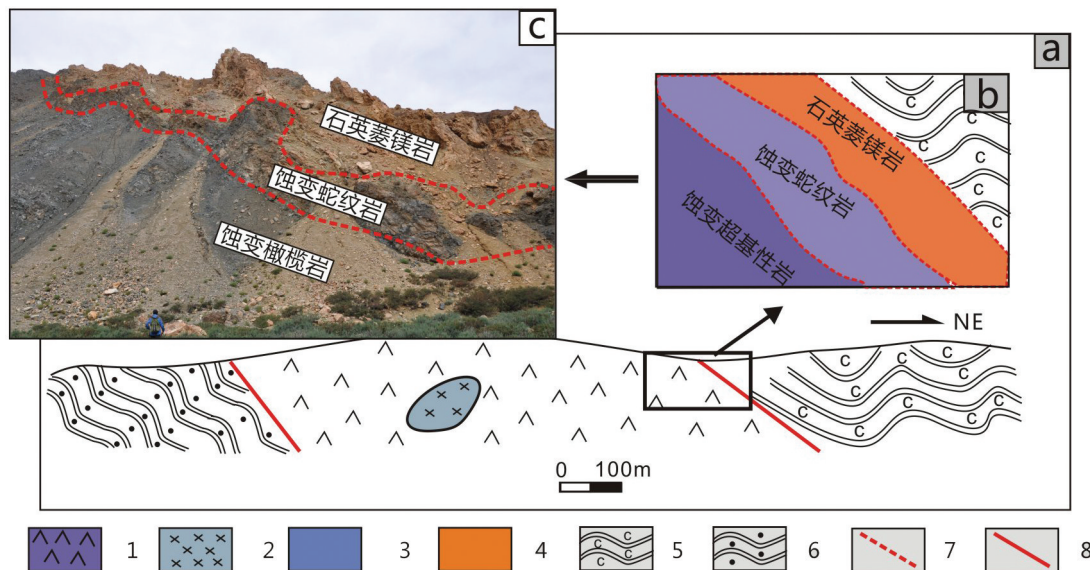


图2 巴尔蛇绿岩野外信手剖面图(a)及蚀变超基性岩与白垩纪混杂岩接触带上的蚀变环带构造(b,c)
 1—蛇纹石化橄榄岩;2—辉绿岩;3—蚀变蛇纹岩带;4—石英菱镁岩;5—白垩纪混杂岩;6—三叠纪砂质板岩;7—岩性过渡界线;8—断裂
 Fig.2 Geological profile of A-B from Fig. 1c (a); close-up view of the northern boundary fault, south of which alteration halos occur (b, c)
 1—Serpentinized Cpx-bearing harzburgite; 2—Dolerite; 3—Altered serpentinite; 4—Listwanite; 5—Cretaceous melange; 6—Triassic sandy slate; 7—Lithologic boundary; 8—Fault contact

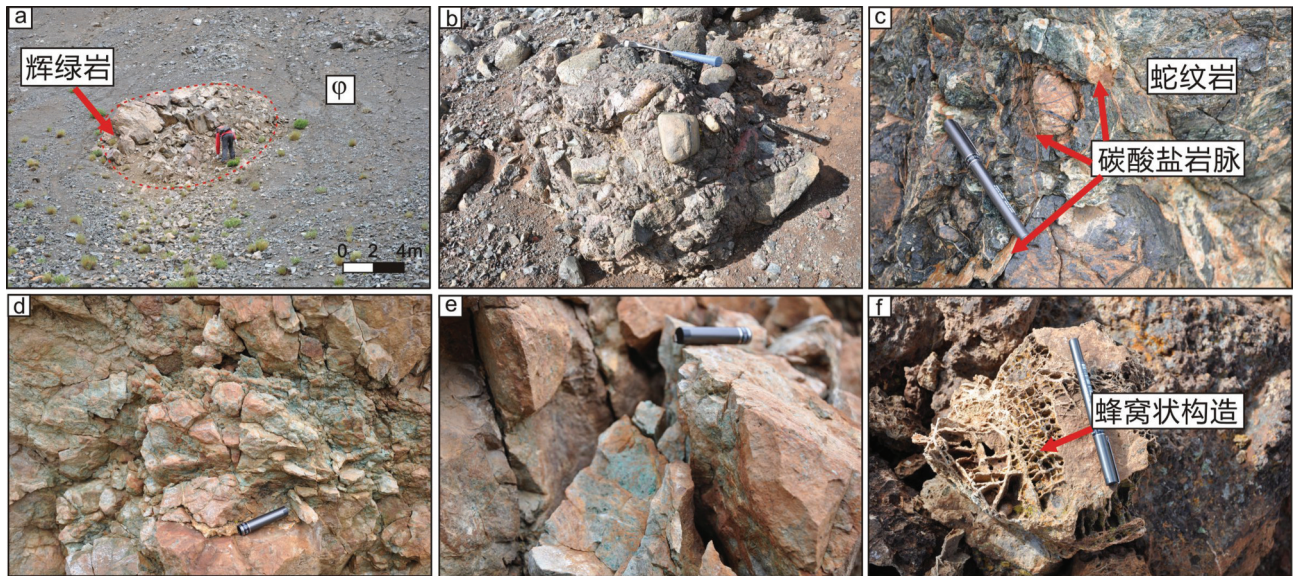


图3 巴尔蛇绿岩及石英菱镁岩野外照片

a—巴尔蛇绿岩中出露的辉绿岩透镜体(5 m×8 m); b—巴尔蛇绿岩主体含单斜辉石方辉橄榄岩,裂隙处蛇纹石化作用强烈; c—蛇纹岩带,偶见新鲜橄榄岩残留,菱镁矿脉沿着裂隙分布; d, e—巴尔蛇绿岩边部角砾状石英菱镁岩; f—石英菱镁岩风化后形成“蜂窝状”构造

Fig. 3 Field views of Baer ophiolite and listwanite

a—Dolerite lenses inside serpentinized harzburgite(5 m×8 m); b—Fresh harzburgite blocks found inside serpentinite matrix; c—Serpentinite crosscut by carbonate (magnesite) veins; d, e—Listwanites breccia occurring along the northeast boundary fault of the ophiolite; f—Characteristic honeycomb structure resulting from differential weathering

晶石完全磁铁矿化的现象。

石英菱镁岩代表蚀变超基性岩较完全的碳酸盐化作用,根据镜下尖晶石特征,划分两个阶段石英菱镁岩:一阶段石英菱镁岩中尖晶石稳定存在,二阶段石英菱镁岩中尖晶石几乎全部蚀变。一阶段石英菱镁岩呈土黄色,二氧化硅矿物较少,主要矿物为他形碳酸盐矿物(菱镁矿)、含少量滑石,石英在一阶段石英菱镁岩主要以细脉状产出且切穿碳酸盐脉,非晶质褐色条带往往产在碳酸盐矿物条带内部,可能由蚀变蛇纹岩带内磁铁矿脉发生氧化反应形成。一阶段石英菱镁岩含有少量滑石,并保留了蛇纹石矿物向滑石转变的证据(图4-e)。二阶段石英菱镁岩呈橙蓝色,主要由他形一半自形菱镁矿和石英组成(图5-c, d),尖晶石残余极少见,石英主要有两种产状:半自形粒状和放射状集合体,放射状石英集合体在正交偏光镜下形成“十字消光”。

4 地球化学及矿物化学

4.1 测试分析方法

本研究共完成了8件石英菱镁岩样品全岩分析,包括主量元素及部分微量元素(包括稀土元

素)。测试工作在国家地质实验测试中心完成,主量元素分析使用X-射线荧光光谱法(XRF),微量元素分析采用等离子质谱(PE300D)方法,Au元素分析采用等离子质谱法(X-series),Hg元素分析采用原子荧光光谱法。电子探针分析在中国地质科学院大陆构造与动力学国家重点实验测试完成,仪器型号为日本电子公司JXA-8100、能谱仪Inca Enemy型电子探针,探针束流20 nA,加速电压15.0 kV,电子束斑5 μm。

4.2 矿物化学

蚀变蛇纹岩带和石英菱镁岩带样品背散射图像见图6,主要矿物成分分析结果见表1。蚀变蛇纹岩带内蛇纹石背散射图像显示明暗两种:暗色蛇纹石外围常被亮色蛇纹石包围,前者高SiO₂(平均值44.5% vs. 40.7%)但低FeO含量(平均值1.8% vs. 5.3%)。斜方辉石在蛇纹石化过程中仍保留原生解理结构,成分分析总量平均缺失12%(总含量变化范围为:84.8%~90.4%(矿物化学及全岩地球化学中%均代表重量百分比),SiO₂含量基本保持新鲜斜方辉石含量,发生了Mg、Fe、Al丢失,这表明斜方辉石一定程度水化作用并不会完全破坏其硅酸盐

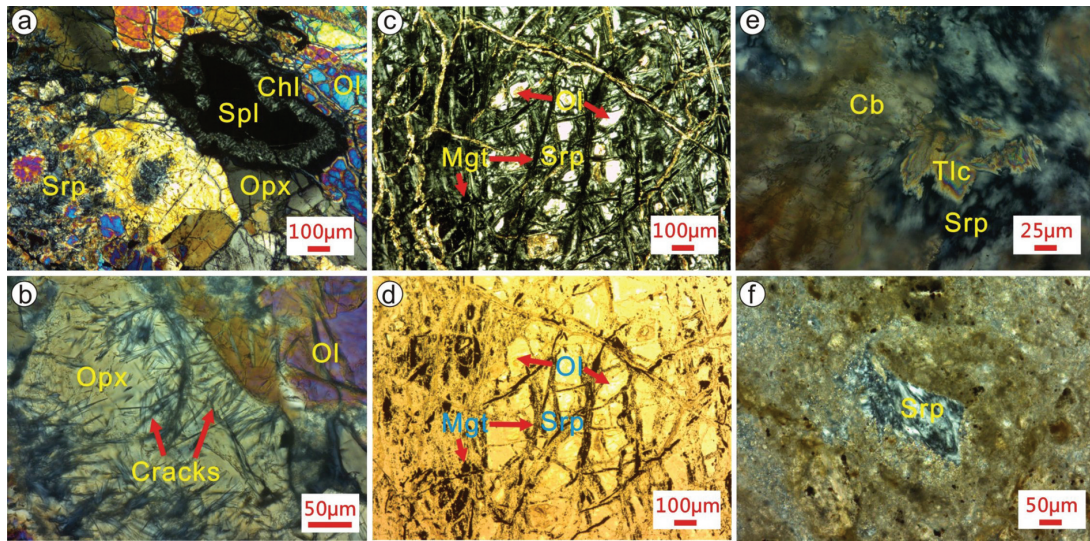


图4巴尔蛇绿岩及石英菱镁岩镜下照片

a—蚀变橄榄岩带中蛇纹石化作用；b—弱蚀变橄榄岩内橄榄石和辉石内部发育大量裂隙；c、d—蚀变蛇纹岩带保留橄榄石残留，菱镁矿脉和磁铁矿脉发育，c为正交镜，d为单偏光镜；e——阶段石英菱镁岩中保留了蛇纹石向滑石转变证据；f——阶段石英菱镁岩中蛇纹石残余；Srp—蛇纹石；Spl—尖晶石；Chl—绿泥石；Opx—斜方辉石；Ol—橄榄石；Mgt—磁铁矿；Cb—碳酸盐矿物；Tlc—滑石

Fig. 4 Photomicrographs of Baer ophiolite and listwanite

a—Photomicrograph of partially serpentinized cpx-bearing harzburgite; b—A profusion of cracks along serpentine veins in partially serpentinized peridotite; c,d—Mesh structure olivine relicts in the serpenitite matrix with well-developed magnesite and magnetite veins; (c), crossed nicols, (d), plainlight; e—Evidence of serpentine transform to talc in stage 1 listwanite; f—Serpentine relicts in stage 1 listwanite, Srp—Serpentine, Spl—Spinel, Chl—Chlorite, Opx—Orthopyroxene, Ol—Olivine, Mgt—Magnetite, Cb—Carbonate minerals, Tlc—Talc

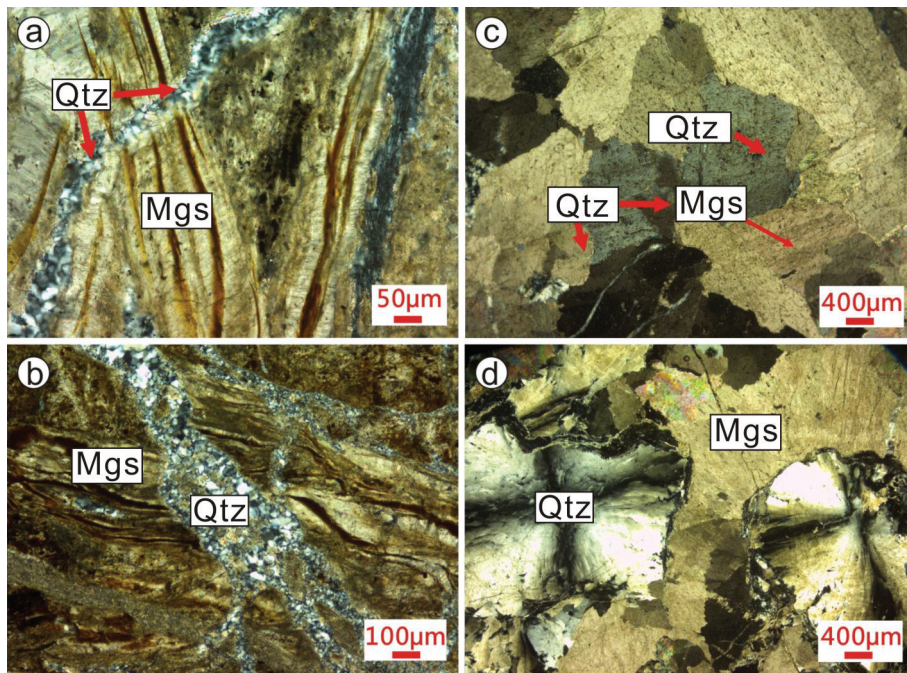


图5石英菱镁岩镜下特征

一阶段：a,b—菱镁矿呈条带状结构产出，褐色条带发育在菱镁矿内部，他形细粒石英脉穿插其间；二阶段：c—他形粗粒石英和菱镁矿共生；d—他形粗粒菱镁矿晶体与放射状石英共生；Mgs—菱镁矿；Qtz—石英

Fig. 5 Microphotographs of listwanites from the Baer ophiolites, two phases recognizable

Phase 1: a, b—Banded texture of magnesite with dark brown stripe inside, anhedral, crosscut by fine-grained quartz veins; Phase 1: c—Coarse-grained anhedral-subhedral magnesite and quartz; d—Radial texture of quartz intergrowth with subhedral magnesite, Mgs—Magnesite, Qtz—Quartz

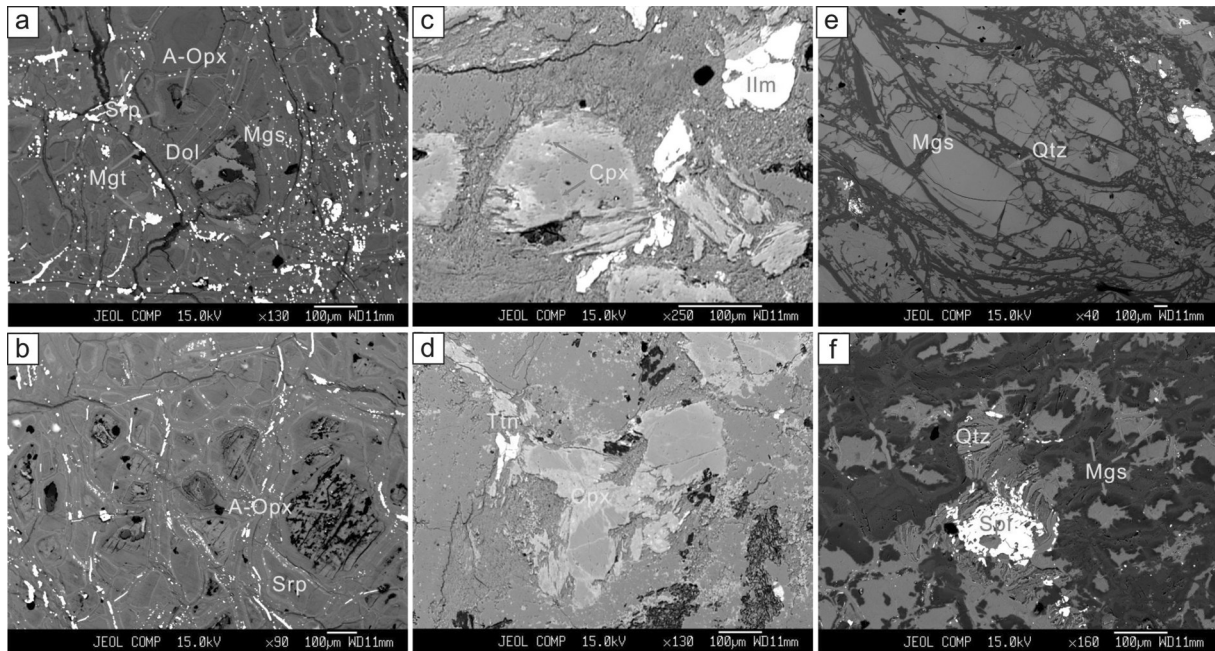


图6 巴尔蛇纹石化橄榄岩及石英菱镁岩背散射图像

a、b、c、d为蚀变蛇纹岩带样品,e、f为一阶段石英菱镁岩样品,其中Srp—蛇纹石,Dol—白云石,Mgt—磁铁矿,A-Opx—蚀变斜方辉石,Mgs—菱镁矿,Cpx—单斜辉石,Ttn—榍石,Spl—尖晶石,Qtz—石英

Fig.6 Back-scattered electron (BSE) images of Baer serpentinized peridotite and listwanite

Fig.6a, 6b, 6c, 6d are from altered serpentinite band, Fig. 6e, 6f are from stage 1 listwanite, Srp—Serpentine, Dol—Dolomite, Mgt—Magnetite, A—Opx—Altered orthopyroxene, Mgs—Magnesite, Cpx—Clinopyroxene, Ttn—Titanite, Spl—Spinel, Qtz—Quartz

格架,易迁移元素会不同程度迁出。单斜辉石具有成分核边差异,核部FeO含量较低,MgO含量较高。蚀变蛇纹石带内产出他形粒状具碎裂结构尖晶石、榍石(图6-d)和钛铁矿(图6-c),其中榍石成分变化范围大,菱镁矿和白云石均发生有不同程度Fe类质同象作用,菱镁矿中FeO含量为5.1%,而白云石中FeO含量为1.2%。石英菱镁岩带矿物组成较为简单,一阶段石英菱镁岩中菱镁矿在背散射图像上可以看出明暗两种,FeO含量变化范围从4.1%~7.0%,带内尖晶石破碎较蚀变蛇纹岩带更严重。电子探针分析发现一种高硅高镁矿物(图6-e主体),其成分图像显示其含量稳定分布,推测可能为斜方辉石进一步蚀变产物。

4.3 全岩地球化学

为更好限定石英菱镁岩地球化学特征,本文对比了巴尔蛇绿岩主体含单斜辉石方辉橄榄岩地球化学数据^[26]。8件石英菱镁岩样品主要元素显示了较大变化,如SiO₂含量最高值39.8%,最低值31.1%,但主要组成都是SiO₂、MgO及CO₂,高烧失量是石英菱镁岩重要特征,烧失量中CO₂占绝大比

例,其中CO₂变化范围是:20.73%~30.59%,平均26.79%;H₂O:0.80%~2.32%,平均1.44%。石英菱镁岩中低Si、Ca、K、Al、Na和高Mg含量显示其原岩为超基性岩,其中Al₂O₃含量变化范围为:0.35%~2.43%,平均值为1.21%;CaO含量变化范围为:0.42%~3.03%,平均值为1.01%;MgO:22.90%~28.62%,平均26.04%;K₂O含量变化范围为:0.04%~0.08%,平均值为0.59%;Na₂O含量变化范围为:0.05%~0.1%,平均值为0.07%。12YB-1~3是一阶段石英菱镁岩,而12YB-4~8是二阶段石英菱镁岩。两阶段石英菱镁岩平均值相比较:二阶段石英菱镁岩较高的有:SiO₂(35.49% vs. 34.93%)、Al₂O₃(1.69% vs. 0.41%)、FeO(5.26% vs. 4.01%)、CaO(1.32% vs. 0.51%)及H₂O(1.62% vs. 1.13%);而MgO(25.35% vs. 27.19%)、CO₂(25.57% vs. 28.8%)及Fe₂O₃(0.14% vs. 0.31%)含量二阶段石英菱镁岩段较低。

矿物学和地球化学研究发现石英菱镁岩系统具有明显不均一性,富CO₂热液与蛇纹石化橄榄岩反应过程中,CO₂会以CO₃²⁻的形式在合适物理化学环境中与Mg²⁺、Fe²⁺、Ca²⁺离子结合成碳酸盐矿物。

表1 巴尔石英菱镁岩蚀变蛇纹岩带和石英菱镁岩带矿物组成
Table 1 Mineral composition of Baer altered serpentinite and listwanite

岩性	石英菱镁岩	石英菱镁岩	石英菱镁岩	石英菱镁岩	石英菱镁岩	石英菱镁岩	石英菱镁岩	石英菱镁岩
矿物类型	Qtz	Qtz	Mgs	Mgs	Mgs	Mgs	X 矿物	X 矿物
SiO ₂	99.07	98.60	2.85	3.61	4.10	1.86	75.32	73.22
Na ₂ O	0.06	0.02	-	0.05	0.03	0.01	0.01	0.03
Cr ₂ O ₃	-	0.00	0.03	0.02	-	0.02	0.02	0.03
K ₂ O	0.02	0.01	0.04	0.01	-	0.00	0.15	0.22
MgO	0.08	0.11	38.70	38.71	38.10	38.56	11.21	11.88
Al ₂ O ₃	0.30	0.15	0.13	0.09	0.13	0.02	1.90	2.31
MnO	0.03	-	0.10	0.10	0.07	0.11	-	0.01
CaO	0.01	0.03	0.43	0.19	0.19	0.22	0.23	0.31
FeO	0.15	0.23	4.94	4.15	5.10	6.99	1.41	1.79
TiO ₂	-	-	0.01	-	-	0.01	0.00	0.02
NiO	-	-	0.05	0.18	0.19	0.14	0.51	0.47
Total	99.72	99.14	47.26	47.11	47.91	47.94	90.76	90.29
岩性	石英菱镁岩	石英菱镁岩	石英菱镁岩	石英菱镁岩	蚀变蛇纹岩	蚀变蛇纹岩	蚀变蛇纹岩	蚀变蛇纹岩
矿物类型	X 矿物	X 矿物	Spl	Spl	Ilm	Ilm	Mgs	Dol
SiO ₂	69.60	68.92	0.06	-	0.03	0.79	1.25	1.92
Na ₂ O	0.13	0.15	0.02	0.05	-	0.06	0.02	0.07
Cr ₂ O ₃	0.03	0.01	35.25	35.08	0.05	0.08	0.01	0.02
K ₂ O	0.59	0.54	0.01	-	0.02	-	0.01	0.02
MgO	15.02	15.97	9.32	9.87	0.08	0.09	37.86	22.00
Al ₂ O ₃	3.05	2.99	25.02	24.59	0.01	0.00	0.00	-
MnO	0.03	0.02	0.30	0.32	2.18	1.87	0.39	0.52
CaO	0.23	0.21	-	-	0.21	0.71	0.96	26.97
FeO	1.84	2.01	29.38	30.42	45.23	43.13	5.08	1.22
TiO ₂	-	-	0.12	0.06	53.22	52.63	-	-
NiO	0.09	0.10	0.06	0.10	-	0.03	0.17	0.01
Total	90.59	90.90	99.54	100.49	101.01	99.40	45.74	52.73
岩性	蚀变蛇纹岩	蚀变蛇纹岩	蚀变蛇纹岩	蚀变蛇纹岩	蚀变蛇纹岩	蚀变蛇纹岩	蚀变蛇纹岩	蚀变蛇纹岩
矿物类型	暗色 srp	暗色 srp	暗色 srp	暗色 srp	暗色 srp	亮色 srp	亮色 srp	亮色 srp
SiO ₂	45.30	44.03	44.56	45.39	43.57	41.34	39.57	41.16
Na ₂ O	0.00	0.01	0.04	0.01	0.00	-	-	-
Cr ₂ O ₃	0.00	0.04	0.01	0.02	0.04	-	0.06	0.00
K ₂ O	-	0.02	0.03	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01
MgO	39.39	39.07	39.28	39.13	37.93	39.98	39.37	39.70
Al ₂ O ₃	0.14	0.36	0.76	0.41	0.41	0.18	0.13	0.18
MnO	0.06	0.07	0.07	0.03	0.07	0.07	0.07	0.03
CaO	0.05	0.08	0.04	0.09	0.09	0.02	0.13	0.04
FeO	1.79	1.85	2.19	1.69	1.77	5.01	6.32	5.20
TiO ₂	-	-	-	-	0.00	0.01	-	-
NiO	0.28	0.22	0.12	0.32	0.25	0.26	0.25	0.25
Total	87.01	85.73	87.09	87.09	84.14	86.88	85.91	86.56
岩性	蚀变蛇纹岩	蚀变蛇纹岩	蚀变蛇纹岩	蚀变蛇纹岩	蚀变蛇纹岩	蚀变蛇纹岩	蚀变蛇纹岩	蚀变蛇纹岩
矿物类型	亮色 srp	亮色 srp	A-Opx	A-Opx	A-Opx	A-Opx	A-Opx	A-Opx
SiO ₂	40.92	41.32	54.61	55.75	53.79	55.34	55.89	53.63
Na ₂ O	0.01	-	0.11	0.06	0.20	0.03	0.09	0.05
Cr ₂ O ₃	0.02	0.01	0.02	0.48	0.22	0.00	-	0.30
K ₂ O	-	-	0.20	0.09	0.35	0.07	0.15	0.04
MgO	39.80	39.84	25.58	25.76	25.24	26.88	26.57	31.83
Al ₂ O ₃	0.16	0.08	0.09	0.07	0.19	0.21	0.51	0.89
MnO	0.02	0.04	0.03	-	0.02	0.04	-	0.06
CaO	0.04	0.02	0.30	0.18	0.37	0.22	0.16	0.24
FeO	5.09	4.62	5.03	5.13	3.76	3.33	4.28	2.30
TiO ₂	0.01	-	0.01	0.06	-	-	-	0.01
NiO	0.24	0.28	0.63	0.67	0.63	0.72	0.53	0.14
Total	86.32	86.21	86.61	88.22	84.76	86.83	88.19	89.49

续表 1

岩性	蚀变蛇纹岩	蚀变蛇纹岩	蚀变蛇纹岩	蚀变蛇纹岩	蚀变蛇纹岩	蚀变蛇纹岩	蚀变蛇纹岩	蚀变蛇纹岩
矿物类型	A-Opx	A-Opx	A-Opx	Ttn	Ttn	Ttn	Spl	Spl
SiO ₂	57.50	56.50	56.24	24.94	8.30	13.94	0.03	0.04
Na ₂ O	0.09	0.02	0.01	0.03	0.03	0.03	0.00	0.02
Cr ₂ O ₃	0.55	-	0.01	0.06	0.02	0.02	43.61	42.58
K ₂ O	0.11	0.05	0.07	-	0.00	0.04	-	0.00
MgO	27.36	26.64	26.96	0.08	0.06	0.03	11.57	10.52
Al ₂ O ₃	1.30	0.23	0.22	1.53	0.50	0.77	21.88	21.48
MnO	-	-	0.01	0.70	2.09	1.54	0.31	0.34
CaO	0.10	0.19	0.18	21.86	7.27	11.82	-	-
FeO	3.25	4.34	4.47	9.69	33.03	25.09	21.53	24.82
TiO ₂	0.00	0.01	-	42.00	49.36	46.51	0.09	0.02
NiO	0.13	0.60	0.64	0.05	-	-	0.04	0.06
Total	90.41	88.56	88.81	100.94	100.66	99.79	99.06	99.88
岩性	蚀变蛇纹岩	蚀变蛇纹岩	蚀变蛇纹岩	蚀变蛇纹岩	蚀变蛇纹岩	蚀变蛇纹岩	蚀变蛇纹岩	蚀变蛇纹岩
矿物类型	A-Cpx	A-Cpx	A-Cpx	A-Cpx	A-Cpx	A-Cpx	A-Cpx	A-Cpx
SiO ₂	51.77	51.40	53.99	51.89	52.03	52.76	53.07	53.34
Na ₂ O	0.27	0.32	0.17	0.30	0.27	0.63	0.97	1.14
Cr ₂ O ₃	0.32	0.31	0.08	0.02	0.32	0.01	0.10	0.02
K ₂ O	-	-	0.00	0.01	0.00	0.01	-	0.01
MgO	16.71	16.71	18.52	16.94	17.14	10.59	11.25	10.95
Al ₂ O ₃	3.91	3.81	1.98	3.88	3.77	1.51	2.65	2.32
MnO	0.15	0.14	0.21	0.17	0.13	0.50	0.42	0.51
CaO	21.04	21.15	18.77	20.07	19.95	22.69	21.57	22.00
FeO	5.55	5.54	5.37	6.64	4.95	10.65	9.87	9.11
TiO ₂	0.49	0.40	0.33	0.48	0.48	0.09	0.15	0.18
NiO	-	0.03	0.03	0.01	0.00	0.01	0.01	0.03
Total	100.21	99.80	99.46	100.40	99.04	99.44	100.07	99.60

注:Qtz-石英,Mgs-菱镁矿,X-矿物-蚀变矿物,Spl-尖晶石,Ilm-钛铁矿,Dol-白云石,Srp-蛇纹石,A-Opx-蚀变斜方辉石,A-Cpx-蚀变单斜辉石,Ttn-榍石。

随着碳酸盐化程度逐渐加强,硅酸盐矿物中SiO₂形成独立矿物相。与方辉橄榄岩相比,石英菱镁岩中主要氧化物含量常被动亏损,如SiO₂、MgO, Si和Mg亏损程度不一致可能表明系统发生了Mg元素流失,二阶段石英菱镁岩MgO流失现象更为明显(方辉橄榄岩中平均SiO₂/MgO比值1.08,一阶段为1.29,二阶段为1.41)。相对于原岩方辉橄榄岩,石英菱镁岩中K₂O+Na₂O含量却有异常高值。

巴尔石英菱镁岩与Atlin石英菱镁岩有着相似的矿物学转变过程^[27],我们引用Atlin石英菱镁岩数据对比,在全岩氧化物对MgO图解中,只有MnO和Fe₂O_{3total}与Atlin趋势较为一致,其他均明显偏离。在MgO-H₂O和CO₂-H₂O图解中(图7-h, I),蛇纹石化橄榄岩硅化、碳酸盐化岩石中水含量逐渐降低,这与矿物脱水反应相关。

稀土元素球粒陨石标准化图解显示地幔橄榄岩

与一阶段石英菱镁岩轻稀土元素配分较一致,与二阶段石英菱镁岩重稀土元素配分较一致,而一阶段石英菱镁岩重稀土明显亏损(图9)。二阶段石英菱镁岩表现出MREE亏损的“勺状”曲线特征而一阶段石英菱镁岩则为轻稀土富集左倾斜特征。两阶段石英菱镁岩稀土总量低,分别变化于 $1.21 \times 10^{-6} \sim 1.37 \times 10^{-6}$ 、 $1.92 \times 10^{-6} \sim 2.60 \times 10^{-6}$,LREE/HREE比值分别变化于1.12~1.38、0.27~0.81,(La/Yb)_N分别变化于2.72~3.84、0.36~1.63。二阶段石英菱镁岩相对于一阶段稀土总量增加,尤其是重稀土明显富集。

含单斜辉石方辉橄榄岩与石英菱镁岩微量元素原始地幔标准化后显示相似整体排布规律,均显示Th、Nb亏损和U、Ti富集,表明相互间亲缘性。与方辉橄榄岩相比,石英菱镁岩中大离子亲石元素Rb、Ba、K、Sr和高场强元素P、Ti, Ti发生明显富集,其中Sr含量从橄榄岩到两相石英菱镁岩逐阶段增加。石英菱镁岩

表2 巴尔石英菱镁岩岩石化学成分(主量元素: %)
Table 2 Chemical composition of Baer listwanite (major elements: %)

样品号	12YB-1	12YB-2	12YB-3	12YB-4	12YB-5	12YB-6	12YB-7	12YB-8
SiO ₂	32.51	38.95	33.32	31.13	39.16	34.59	32.73	39.82
Al ₂ O ₃	0.35	0.47	0.41	1.14	1.34	1.7	1.84	2.43
Fe ₂ O ₃	0.05	0.26	0.63	0.16	0.11	0.16	0.11	0.14
FeO	3.95	3.93	4.15	5.23	4.65	5.01	5.3	6.09
CaO	0.43	0.42	0.67	3.03	1.52	0.5	0.71	0.83
MgO	28.62	25.37	27.58	25.99	24.45	26.33	27.1	22.9
K ₂ O	0.04	0.04	0.06	0.07	0.06	0.08	0.08	0.04
Na ₂ O	0.1	0.07	0.08	0.05	0.07	0.07	0.06	0.07
TiO ₂	<0.01	<0.01	0.01	0.02	0.02	0.04	0.04	0.03
MnO	0.08	0.09	0.09	0.11	0.09	0.07	0.09	0.1
P ₂ O ₅	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01
H ₂ O+	1.2	1.04	1.16	0.8	1.74	1.56	1.68	2.32
CO ₂	30.59	27.36	28.5	30.02	24.81	26.23	26.04	20.73
LOI	32.78	29.31	31.95	32.6	28.51	30.51	31.57	26.38
Total	98.92	98.92	98.96	99.54	99.99	99.07	99.64	98.84

Rb、Ba、Th含量值明显较橄榄岩高,且一阶段含量较二阶段高,可能发生了先富集后亏损的过程。

5 讨 论

通过详细野外及室内工作,本文在巴尔蛇绿岩北边界划分出3个蚀变带:蚀变橄榄岩带、蚀变蛇纹岩带以及石英菱镁岩带(包括两阶段石英菱镁岩)。各个蚀变带特征矿物组合和结构构造都是橄榄岩不同程度水合作用、碳酸盐化作用在特定部位的反映:蚀变橄榄岩带代表弱蛇纹石化作用,蚀变蛇纹岩带代表较完全蛇纹石化作用以及弱碳酸盐化作用,一阶段石英菱镁岩仍保留少量硅酸盐矿物,而二阶段石英菱镁岩中基本缺失硅酸盐矿物,地幔岩原生矿物硅酸盐格架已经被破坏,形成独立矿物相石英,而原岩中主要阳离子Mg²⁺、Fe²⁺、Ca²⁺与CO₃²⁻结合形成碳酸盐矿物。在蚀变蛇纹岩带,次生蛇纹石矿物和磁铁矿含量达到最大值;物理破坏和化学蚀变使得原生地幔岩矿物中最耐热液蚀变的尖晶石在二阶段石英菱镁岩中消失;碳酸盐矿物(主要是菱镁矿)粒度及自形程度逐渐增加,二阶段石英菱镁岩中石英大量出现,粒度明显增加。

尽管巴尔石英菱镁岩系统中主量元素间表现

出一定线性规律,但与被认为是等化学过程的Atlin石英菱镁岩系统对比其变化趋势明显偏离,这种偏离可能是由巴尔石英菱镁岩系统Mg²⁺相对SiO₂流失导致。巴尔石英菱镁岩K₂O含量范围0.04%~0.08%,平均0.06%;Na₂O含量范围在0.05%~0.1%间变化,平均0.07%,P₂O₅含量为0.01%,而巴尔地幔橄榄岩中平均K₂O、P₂O₅含量不到0.01%,Na₂O平均含量为0.048%,K、Na、P元素很可能由蚀变热液带入该系统,热液来源可能与区内中酸性侵入体有关。与世界上很多石英菱镁岩一样,巴尔石英菱镁岩系统不是一个等化学体系^[30]。地幔橄榄岩与两阶段石英菱镁岩有着相似微量元素排布特征,表明其同源性。碳酸盐矿物是常含有较高Sr,笔者的数据也表明随着碳酸盐化作用加强,岩石中含量逐步增加,因此,Sr相对含量可以作为碳酸盐化程度的微量元素标志。地幔橄榄岩LREE在蛇纹石化的过程中基本保持稳定^[31,32],一阶段石英菱镁岩LREE配分形式与地幔橄榄岩仍类似,但强烈的碳酸盐化作用会彻底改变其分布特征。

Barnes等^[1]1973年研究表明石英菱镁岩产出主要受蚀变热液pH值控制:CO₂溶于水后形成较低pH环境,而蛇纹石会消耗H⁺离子形成高pH环境,释

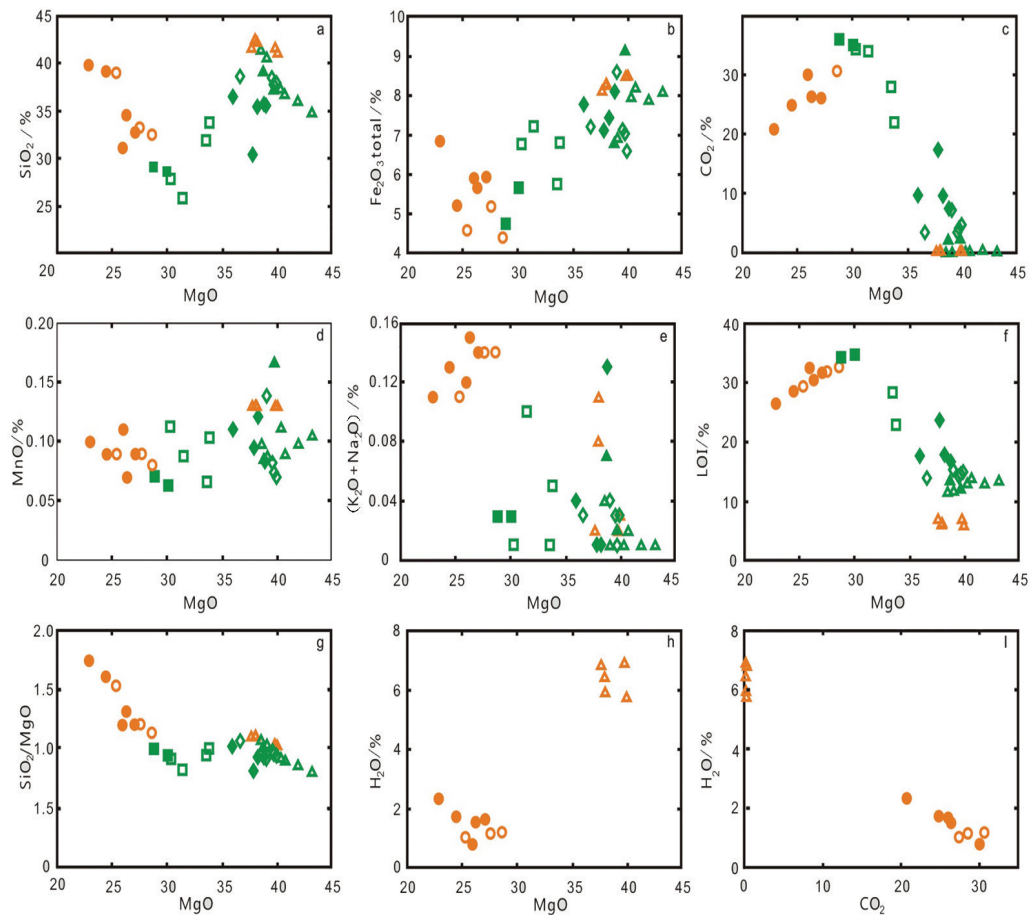


图7 巴尔及Atlin石英菱镁岩系统全岩氧化物对MgO图解(a~g)

橙色空心三角形代表含单斜辉石方辉橄榄岩,橙色空心圆圈是一阶段石英菱镁岩,橙色实心圆圈是二阶段石英菱镁岩,数据来源于表2和[26, 27];阿特林地区相关研究数据由绿色图形表示,三角形代表方辉橄榄岩,正方形代表石英菱镁岩;

h,i—巴尔石英菱镁岩H₂O—MgO及H₂O—CO₂图解

Fig.7 Whole-rock oxides plotted versus MgO from Baer and Atlin listwanite system, Canada(a~g)

Orange color represents Baer ophiolite whereas green color denotes Atlin ophiolite; open orange triangles represent Cpx-bearing harzburgite; open orange circles are listwanite with spinel relicts (Stage I), and solid orange circles are listwanites without spinel relicts (Stage II). Data are from Table 2 and [26, 27]; green color shapes represent Atlin ophiolite; triangles stands for harzburgite, whereas squares signifies listwanite; h, i—MgO versus H₂O, H₂O versus CO₂ for listwanites from the Baer ophiolite

放 Mg²⁺、Fe²⁺、SiO⁴⁻, 形成有利于碳酸盐矿物沉淀较高 pH 环境。一阶段石英菱镁岩中石英含量较低, 可能代表成岩时较高 pH 环境; 二阶段石英菱镁岩由于其离边界断裂更近, 热液中 CO₂ 活度大, 形成 pH 值较低流体, 往往会溶解先前形成的碳酸盐矿物并导致 SiO₂ 矿物沉淀。另一个控制反应进行的重要因素是蚀变流体迁移能力, 超基性岩水化和碳酸盐化反应常常伴随岩石体积增加^[27], 蛇纹石化反应导致的体积增加和蛇纹石矿物较为韧性的矿物学行为会阻碍流体的迁移, 限制了大规模石英菱镁岩

的形成。

石英菱镁岩有着重要的经济价值, 常伴生金、汞、菱镁矿和碱金属元素矿化。世界上有很多知名的金矿与石英菱镁岩伴生^[33], 美国加利福尼亚与石英菱镁岩伴生汞矿床提供了美国 85 % 的汞产量^[34]。巴尔两阶段石英菱镁岩 Au、Hg 都没有发生矿化现象(表 3), 由于原岩组成、压力、温度、蚀变流体 pH 值等众多因素控制石英菱镁岩是否矿化^[35], 虽然本研究中 3 个样品均未发生矿化, 但雅江西段蛇绿岩众多岩体中石英菱镁岩及其围岩仍具有较大

表3 巴尔石英菱镁岩岩石化学成分(微量元素: 10^{-6})
Table 3 Chemical composition of Baer listwanite (trace elements: 10^{-6})

样品号	12YB-1	12YB-2	12YB-3	12YB-4	12YB-5	12YB-6	12YB-7	12YB-8
岩石类型	一阶段石英菱镁岩				二阶段石英菱镁岩			
La	0.14	0.15	0.15	0.10	0.12	0.07	0.15	0.21
Ce	0.29	0.31	0.29	0.19	0.23	0.15	0.32	0.33
Pr	0.03	0.03	0.04	0.02	0.03	0.02	0.05	0.06
Nd	0.14	0.15	0.18	0.10	0.15	0.11	0.22	0.22
Sm	0.04	0.04	0.05	0.05	0.04	0.03	0.06	0.04
Eu	0.01	0.01	0.01	0.03	0.02	0.01	0.02	0.02
Gd	0.04	0.03	0.06	0.08	0.08	0.08	0.11	0.07
Tb	0.00	0.01	0.01	0.02	0.01	0.02	0.02	0.01
Dy	0.04	0.04	0.06	0.14	0.13	0.14	0.16	0.09
Ho	0.01	0.01	0.01	0.04	0.03	0.04	0.04	0.02
Er	0.02	0.02	0.04	0.10	0.09	0.11	0.12	0.06
Tm	0.00	0.00	0.01	0.02	0.02	0.02	0.02	0.01
Yb	0.02	0.03	0.04	0.12	0.14	0.14	0.17	0.09
Lu	0.00	0.00	0.01	0.02	0.02	0.02	0.02	0.01
Y	0.42	0.37	0.42	0.90	0.91	0.97	1.11	0.72
ΣREE	1.21	1.21	1.37	1.93	2.03	1.92	2.60	1.97
LREE	0.65	0.70	0.72	0.49	0.59	0.41	0.82	0.88
HREE	0.57	0.51	0.65	1.44	1.44	1.52	1.77	1.09
LREE/HREE	1.14	1.38	1.12	0.34	0.41	0.27	0.46	0.81
(La/Yb) _N	3.84	3.22	2.72	0.54	0.59	0.36	0.62	1.64
δEu	0.37	1.20	0.44	1.36	1.23	0.75	0.66	1.01
δCe	1.00	1.03	0.94	0.95	0.92	0.86	0.92	0.71
V	7.71	12.47	12.36	36.90	33.75	44.20	44.26	48.58
Cr	684	2067	1548	1457	1500	1805	1709	1994
Ni	1809	1561	1536	816	1127	1177	1089	1097
Rb	3.51	5.06	8.66	3.43	2.48	4.59	4.18	1.33
Sr	10.05	12.96	13.36	373.03	202.08	40.47	65.60	138.50
Zr	0.87	0.72	0.70	0.42	0.61	0.53	1.91	0.72
Nb	0.10	0.13	0.07	0.05	0.08	0.06	0.11	0.10
Ba	14.61	15.74	14.75	7.61	10.49	10.80	10.17	6.34
Hf	0.02	0.02	0.02	0.03	0.02	0.02	0.07	0.02
Ta	0.01	0.02	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01
Th	0.04	0.04	0.05	0.03	0.02	0.01	0.04	0.05
U	0.06	0.03	0.09	0.01	0.02	0.01	0.02	0.03
Sc	6.33	5.65	6.37	9.52	9.40	10.30	10.28	9.56
Cu	2.38	2.78	4.35	16.52	15.69	21.72	23.88	31.30
Zn	18.14	24.97	20.72	34.92	36.85	39.41	34.91	61.14
Co	64.26	64.36	66.11	38.77	47.37	50.67	46.87	42.94
Au(ng/g)	15.9	8.86		12.5				
Hg(μg/g)	0.122	0.073		0.03				

的Au和Hg找矿潜力。

6 结 论

巴尔石英菱镁岩是巴尔方辉橄榄岩在开放体

系中与富CO₂热液反应形成的一套蚀变岩,主要发生了CO₂、Mg流出和K、Na、P流入,三个蚀变环带分别记录了不同程度水合作用和碳酸盐化作用。石英菱镁岩全岩Sr含量可以作为判断碳酸盐化程

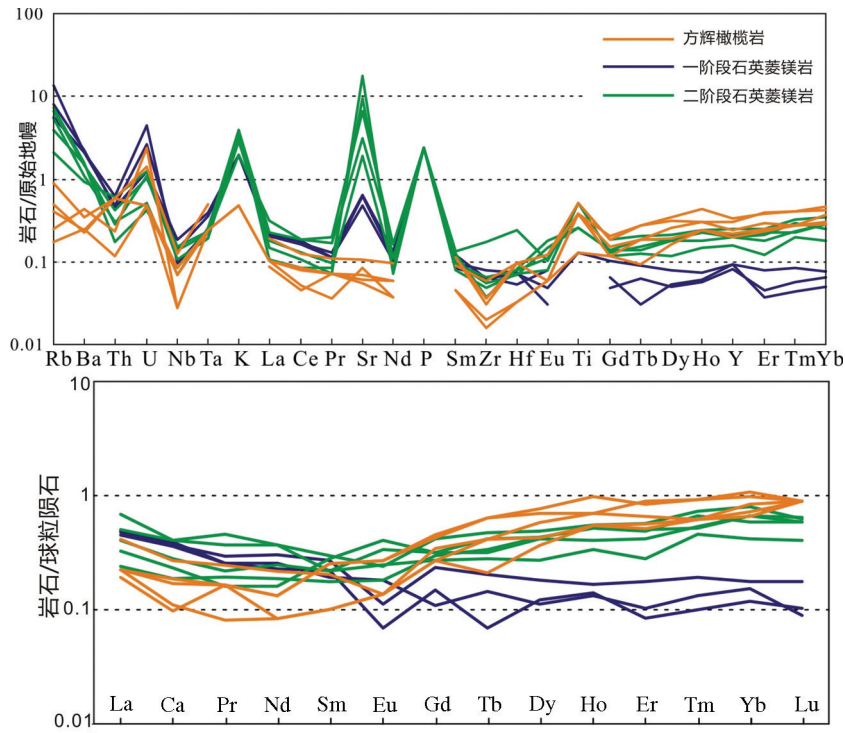


图8 巴尔蛇绿岩含单斜辉石方辉橄橄榄岩和石英菱镁岩微量元素原始地幔标准化图解(原始地幔值据 [28]和稀土元素球粒陨石标准化图解据文献 [29])

Fig. 8 Primitive mantle-normalized trace elements patterns and chondrite-normalized REE patterns for peridotites and listwanites from the Baer ophiolite. Yellow lines represent Cpx-bearing harzburgite; blue lines represent Stage I listwanite; green lines stand for Stage II listwanite (chondrite data after [28] and primitive mantle data after [29])

度的微量元素标志。巴尔石英菱镁岩没有发育金和汞矿化现象,但其仍具一定找矿前景。

参考文献(References):

[1] Rose G. Mineralogisch-geognostische Reise nach dem Ural, dem Altai und dem Kaspischen Meere. Volume 1: Reise nach dem nördlichen Ural und dem Altai. Berlin, C.W. Eichhoff(Verglag der Sanderschen Buchhandlung), 1837.
 [2] Hall C, Zhao R. Listwanite and related rocks: Perspective on terminology and mineralogy with reference to an occurrence at Cregganbaun, Co. Mayo, Republic of Ireland[J]. Mineralium Deposita, 1995, 30: 303-313.
 [3] Buckman S. Tectonics and Mineralization of West Junggar, NW China[D]. The University of Hong Kong: 2000.
 [4] Paul Robinson, John Malpas, Zhou Meifu, et al. Geochemistry and origin of listwanites in the Sartohay and Luobusa Ophiolites, China[J]. International Geology Review, 2005, 47: 177-202.
 [5] Boyle R W. The geochemistry of gold and its deposits. Geological Survey of Canada Bulletin, 1979, 280: 103.
 [6] Ash C H. Ophiolite-related gold quartz veins in the North American Cordillera: British Columbia[J]. Geological Survey Bulletin, 2001, 108: 40.

[7] Goncharenko A I. Auriferous listwanites as a new type of mineralization in the northern part of the Kuznetsk Alatau[J]. Izvestiya Tomskogo Politeknicheskogo Instituta, 1970, 239: 110-114.
 [8] Zhang L, Yang J S, Paul T, et al. Origin of listwanite in the Luobusa ophiolite, Tibet, Implications for chromite stability in hydrothermal systems[J]. Acta Geologica Sinica, 2015, 89(02): 402-417.
 [9] Barnes I, O'Neill J R, Rapp J B, et al. Silica-carbonate alteration of serpentinite: Wall rock alteration in Mercury Deposits of the California Coast Ranges[J]. Economic Geology, 1973, 68: 388-398.
 [10] Tuysuz N, and Erler A. Geochemistry and evolution of listwanites in the Kagizman region (Kars, NE-Turkey) [J]. Chemie der Erde, 1993, 53: 315-329.
 [11] Van Schalkwyk J F. Archean lode gold hosted by carbonatized serpentinite; incompatible field compositions? [Meeting abstract]. International Mineralogical Association, 1994, 422.
 [12] Hu H M. Geology and genesis of the Qi-1 gold deposit in West Junggar, Xinjiang, China: Journal of Changchun University of Earth Sciences, 1989, 19: 53-62.
 [13] 邱添 朱永峰. 新疆萨尔托海石英菱镁岩中发育的韧性剪切带及其对金矿的控制[J]. 岩石学报, 2015, 28(7): 2250-2256.
 Qiu Tian, Zhu Yong Feng. Identification of a ductile shear zone in quartz nagnesitite and its controlling on gold deposits in the

- Sarthohay region, western Junggar, Xinjiang[J]. *Acta Petrologica Sinica*, 2012, 28(7): 2250–2256(in Chinese with English abstract).
- [14] Yin A, Harrison T M. Geologic evolution of the Himalayan–Tibetan orogen[J]. *Annu. Rev. Earth Planet Sci.*, 2000, 28: 211–280.
- [15] Nicolas A, Girardeau J, Marcoux J, et al. The Xigaze ophiolite (Tibet): A peculiar oceanic lithosphere[J]. *Nature*, 1981, 294: 414–417.
- [16] Allègre C J, Coutillot V, Tapponnier P, et al. Structure and evolution of the Himalaya–Tibet Orogenic Belt[J]. *Nature*, 1984, 56: 173–184.
- [17] Tapponnier P, Mercier J L, Proust F, et al. The Tibetan side of the India–Eurasia collision[J]. *Nature*, 1981, 294: 405–410.
- [18] 潘桂棠, 陈智梁, 李兴振. 东特提斯地质构造形成演化[M]. 北京: 地质出版社, 1997: 1–191.
- Pan Guitang, Chen Zhiliang, Li Xingzhen. Geological–tectonic Evolution in the Eastern Tethys[M]. Beijing: Geological Publishing House, 1997: 1–191(in Chinese).
- [19] 熊发挥, 杨经绥, 梁凤华, 等. 西藏雅鲁藏布江缝合带西段东波蛇绿岩中锆石 U–Pb 定年及地质意义[J]. *岩石学报*, 2011, 27(11): 3223–3238.
- Xiong Fahui, Yang Jingsui, Liang Fenghua, et al. Zircon U–Pb ages of the Dongbo ophiolite in the western Yarlung Zangbo suture zone and their geological significance[J]. *Acta Petrologica Sinica*, 27(11): 3223–3238(in Chinese with English abstract).
- [20] 牛晓露, 杨经绥, 陈松永, 等. 雅鲁藏布江西段东波超镁铁岩体经历了俯冲带流体的改造: 来自铅族元素的证据[J]. *中国地质*, 2013, 40(3): 756–766.
- Niu Xiaolu, Yang Jingsui, Chen Songyong, et al. The reformation of the Dongbo ultramafic rock mass in the western part of the Yarlung Zangbo suture zone by subduction–related fluids: Evidence from the platinum–group elements(PGE)[J]. *Geology in China*, 2013, 40(3): 756–766(in Chinese with English abstract).
- [21] 刘飞, 杨经绥, 陈松永, 等. 雅鲁藏布江缝合带西段基性岩地球化学和 Sr–Nd–Pb 同位素特征: 新特提斯洋内俯冲的证据[J]. *中国地质*, 2013, 40(3): 742–755.
- Liu Fei, Yang Jingsui, Chen Songyong, et al. Geochemistry and Sr–Nd–Pb isotopic composition of mafic rocks in the western part of Yarlung Zangbo suture zone: Evidence for intra–oceanic supra–subduction within the Neo–Tethys[J]. *Geology in China*, 2013, 40(3): 742–755(in Chinese with English abstract).
- [22] 吴珍汉, 叶培盛, 杨艳. 西藏阿里推覆构造与蛇绿岩构造侵位[J]. *中国地质*, 2013, 40(1): 182–190.
- Wu Zhenhan, Ye Peisheng, Yang Yan. The Ngari thrust system and tectonic emplacement of ophiolites in western Tibet[J]. *Geology in China*, 2013, 40(1): 182–190(in Chinese with English abstract).
- [23] 连东洋, 杨经绥, 熊发挥, 等. 雅鲁藏布江蛇绿岩带西段达机翁地幔橄榄岩组成特征及其形成环境分析[J]. *岩石学报*, 2014, 030(08): 2164–2184(in Chinese with English abstract).
- Lian Dongyang, Yang Jingsui, Xiong Fahui, et al. Composition characteristics and tectonic setting of the Dajiweng peridotite in the western Yarlung–Zangbo ophiolitic belt[J]. *Acta Petrologica Sinica*, 2014, 30(8): 2164–2184(in Chinese with English abstract).
- [24] Liu Fei, Yang Jingsui, Yildirim Dilek, et al. Geochronology and geochemistry of basaltic lavas in the Dongbo and Purang ophiolites of the Yarlung–Zangbo Suture zone: Plume–influenced continental margin–type oceanic lithosphere in southern Tibet[J]. *Gondwana research*, 2015, 27(02): 701–718.
- [25] 王希斌, 鲍佩声. 西藏蛇绿岩[M]. 北京: 地质出版社, 1987: 1–336.
- Wang Xibing, Bao Peisheng. Tibet Ophiolite[M]. Beijing: Geological Publishing House, 1987, 1–191(in Chinese).
- [26] 李源, 杨经绥, 刘钊, 等. 西藏雅鲁藏布江缝合带西段巴尔地幔橄榄岩成因及构造意义[J]. *岩石学报*, 2011, 027(11): 3239–3254.
- Li Yuan, Yang Jingsui, Liu Zhao, et al. The origins of Baer ophiolitic peridotite and its implication in the Yarlung Zangbo suture zone, southern Tibet[J]. *Acta Petrologica Sinica*, 2011, 27(11): 3239–3254(in Chinese with English abstract).
- [27] Hansen L D, Dipple G M, Gordon T, et al. Carbonated serpentinite (listwanite) at Atlin, British Columbia: A geological analogue to carbon dioxide sequestration[J]. *The Canadian Mineralogist*, 2005, 43: 225–239.
- [28] Sun S S, McDonough W F. Chemical and isotope systematics of oceanic basalts: Implications for mantle composition and processes[C]//Saunders A D, Norry, M J (eds.). *Magmatism in Ocean Basins*. Geological Society Publication, 1989, 42: 313–345.
- [29] Boynton W V. Geochemistry of the earth elements: Meteorite studies[J]. *Rare Earth Element Geochemistry*. Elsevier, 1984: 63–114.
- [30] Shelock R L, Logan M A V, Jowett E C. Silica carbonate alteration of serpentinite, implications for the association of precious metal and mercury mineralization in the Coast Ranges[J]. *Soc. Econ. Geol.*, 1993, 16: 90–116.
- [31] Niu Y. Bulk–rock major and trace element compositions of abyssal peridotites: Implications for mantle melting, melt extraction and post–melting processes Beneath mid–ocean ridges[J]. *Journal of Petrology*, 2004, 45: 2423–2458.
- [32] Paulick H, Bach W, Godard M, et al. Geochemistry of abyssal peridotites (Mid–Atlantic Ridge, 15° 20'N, ODP Leg 209): Implications for fluid/rock interaction in slow spreading environments[J]. *Chemical Geology*, 2006, 234: 179–210.
- [33] Aydal D. Gold–bearing listwaenites in the Arag Massif, Kastamonu, Turkey[J]. *Terra Nova*, 1990, 2: 43–52.
- [34] Davis F F. Economic mineral deposits in the Coast Ranges[C]//Baily E H (ed). *Geology of Northern California*. California Division of Mines and Geology Bulletin, 1966: 315–322.
- [35] Buisson G, Leblanc M. Gold–bearing listwaenites (carbonatized ultramafic rocks) from ophiolite complexes[C]//Gallagher M J, Ixer R A, Neary C R, et al(eds). *Metallogeny of basic and ultrabasic rocks*. Inst. Min. and Metall., 1986: 121–131.