

<http://www.geojournals.cn/dzxb/ch/index.aspx>

雅鲁藏布江蛇绿岩再研究:从地质调查到矿物记录

王成善^{1,2)}, 李亚林²⁾, 刘志飞³⁾, 李祥辉²⁾, 唐菊兴²⁾, REJEAN Hebert⁴⁾,
COTE Dubois⁴⁾, VARFALVY V⁴⁾, HUOT F⁵⁾

1) 中国地质大学, 北京, 100083; 2) 成都理工大学油气藏地质与开发工程国家重点实验室, 610059
3) 同济大学, 上海, 200092; 4) Département de géologie et de génie géologique, Université Laval, Québec,
Canada, GIK 7P; 5) Institute Universités Européen de la Mer, UMR6538, Plouzané, France, 29280

内容提要: 蛇绿岩带出现于全球大多数碰撞构造带上, 通常是板块缝合带的标志, 西藏雅鲁藏布江缝合带蛇绿岩带对于此种概念模型是毫无争议的。根据近年来现代洋壳和蛇绿岩研究成果以及分析技术, 在20世纪80年代中法合作项目研究成果基础上, 笔者再次对西起日喀则拉孜、东至泽当金鲁, 长约500 km的雅鲁藏布江缝合带蛇绿岩进行了研究。在野外调查基础上, 对雅鲁藏布江蛇绿岩中500多个尖晶石样品的地球化学特征进行了分析研究, 以探讨蛇绿岩的成因及其动力学背景, 提出雅鲁藏布江蛇绿岩带属于超俯冲作用(suprasubduction)的产物, 与近年来其他研究成果的认识一致。

关键词: 雅鲁藏布江; 蛇绿岩; 尖晶石; 超俯冲作用

标志着特提斯洋最终消亡场所的西藏雅鲁藏布江蛇绿岩带, 不仅为数千千米洋壳消亡的重建提供了证据, 也为恢复板块碰撞造山过程提供了证据, 一直为国际地学界所关注(Nicolas et al., 1981; 李光岑等, 1984; Girdeau J et al., 1985a b; Zhou M F et al., 1996), 尤其是在20世纪80年代中期, 以中法合作项目为代表进行研究, 取得了大量研究成果, 把蛇绿岩带解释为形成于特提斯洋中脊的洋壳残余(李光岑等, 1984)。近年来, 随着大洋钻探计划的深入实施, 对现代大洋有了更为深入地了解, 国内外若干个研究群体分别开展了对雅鲁藏布江蛇绿岩带的进一步深入研究(白文吉等, 1999, 2001; Wan Xiaoqiao et al., 1998; Zhou M F et al., 1996; Zyabrev et al., 1999; 周肃等, 2001; Isabella et al., 2002; Aitchison et al., 2000; 夏斌等, 2001; Davis et al., 2002)。从1998年开始, 我们实施了以雅鲁藏布江缝合带为研究目标的“雅鲁藏布江蛇绿岩再研究”中加合作项目, 通过1998、1999和2001年历时3年的野外考察, 研究范围西到日喀则拉孜地区, 东至泽当金鲁地区, 东西延伸约500 km(图1)。尽管前人在该地区对蛇绿岩地球化学研究已取得许多研究成果, 并得

出一些重要认识, 但是对蛇绿岩矿物组成及其地球化学特点研究较少。本文根据近年来现代洋壳和蛇绿岩研究成果, 运用现代分析技术, 在野外调查基础上, 结合雅鲁藏布江蛇绿岩矿物地球化学特点分析, 同时对蛇绿岩成因及其动力学背景进行了探讨。

1 区域地质背景

雅鲁藏布江缝合带是一个复杂的地质体系, 其北为拉萨地体, 主要由古生代到白垩纪海相沉积地层组成, 后期被规模巨大的碱性-钙碱性的深成岩体和喷出岩侵入改造, 被称为冈底斯深成杂岩体或冈底斯岩浆弧, 这些与特提斯洋壳向欧亚大陆之下俯冲有关的岩浆活动从120Ma或从晚侏罗世就已开始(王成善等, 1999)。缝合带之南为喜马拉雅地体, 可进一步划分为南、北两带, 南带由早古生代—第三纪海相地层组成, 其间几乎没有重大沉积间断, 最高海相地层的时代已达始新世末期普里亚本阶(Wang C S et al., 2002)。最近研究发现, 这些台地相或稳定型沉积的地层已被碰撞阶段的变形作用所破坏, 造成地层的大量重复和缺失。喜马拉雅北带主体由三叠纪地层组成, 但新近的成果证实该带直到古新

注: 本文为国家自然科学基金项目(编号 40272101)资助的成果。

收稿日期: 2004-05-18; 改回日期: 2005-02-26; 责任编辑: 郝祥国。

作者简介: 王成善, 男, 1951年生。1981年于成都地质学院获学士学位。现为中国地质大学教授, 长期从事青藏高原地质研究。通讯地址: 100083, 北京市学院路, 中国地质大学地学院; 电话: 010-82321612; Email: wcs@cdut.edu.cn。

世才结束海相沉积。

雅鲁藏布江缝合带体系包含了若干个不同的地质单元,最南部为一套以晚三叠复理石为主,其中含有二叠-三叠系巨大外来灰岩岩块以及晚侏罗世-白垩纪放射虫硅质岩和少量基性或超基性岩岩块(图2),西藏区域地质志(1990)把它当作正常地层对待,称之为修康群,尹集祥等(1988)认为属于沉积混杂岩。我们认为它应该是一个巨大的俯冲增生楔,向西可与印度河缝合带的 Lamayuru 杂岩对比,向南与喜马拉雅南带被拉孜-浪卡子断裂所分隔。再向北出露柳区群(柳区组)砾岩,其分布局限于拉孜到白郎长约150 km 范围内,被认为是斜向走滑盆地沉积,是在印度于欧亚大陆最终碰撞之前的沉积(Davis et al, 2002)。柳曲群以北出露原嘎学组硅质泥岩-放射虫硅质岩与层状玄武岩组合的地质体,以拉孜、洞拉、夏鲁、白郎、得吉林和泽当出露宽度最大(图2),其南北两侧均为断层。根据早期放射虫的鉴定,将其时代定为晚侏罗世-早白垩世(肖序常, 1984),被认为是特提斯洋向北俯冲消亡过程中被刮下来的残体(王希斌等, 1984)。最近的研究认为,它

完全由向北倾斜的叠瓦状构造岩片组成,每一岩年龄向南变新(Matsouka et al, 2001),被称为白郎地体(Aitchison et al, 2000)。Ziabrev (2000, 2002)根据放射虫生态和时代对白郎地体沉积历史重建后认为,它可能从晚三叠纪开始接受沉积,然后从晚 Aptian 开始伴随一个洋内的俯冲作用增生,起码直到 Campanian 才结束。由此看来,白郎地体属于俯冲作用形成的一个增生体,但对其原始构造背景分歧较大。目前主要有三种看法,属于太平洋型的洋内海山(余光明等, 1990)、洋内岛弧体系的俯冲杂岩体和广阔的洋内环境(Aitchison et al, 2000; Ziabrev, 2000),但依据都不足。继续向北则是本文重点研究的蛇绿岩带,然后是著名的日喀则弧前盆地。经过王成善等(1999)、Einsele 等(1994)和 Wan Xiaoqiao 等(1998)的详细工作已证实,该盆地是由一个复式向斜组成,其沉积时代从 Albian 晚期到 Coniaian 晚期,地层厚度从前人认为的6000~12000 m(尹集祥, 1988; Durr, 1993)到现在的4100 m(向斜北翼)~2000 m(向斜的南翼)(王成善等, 1999)。位于雅鲁藏布江缝合带体系最北侧的地质单元是夹持在日

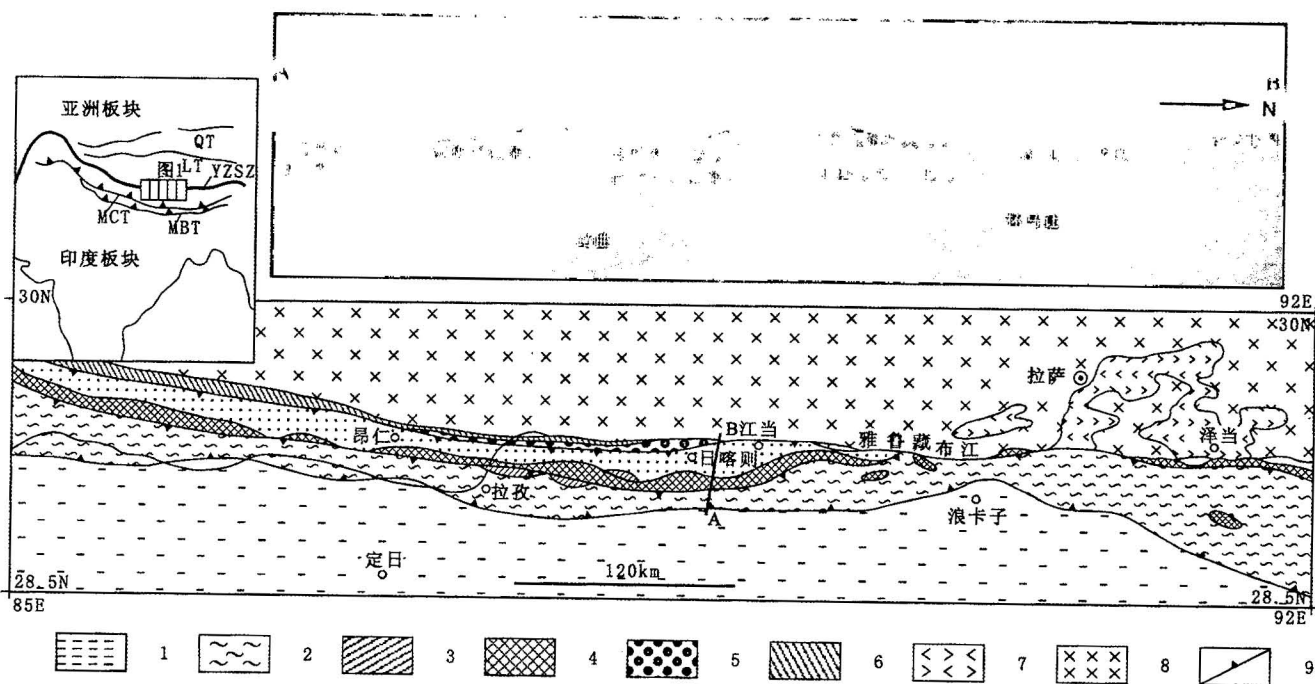


图1 雅鲁藏布江缝合带地质及地貌景观图

Fig. 1 The landscape and simplified geological map of the Yarlung Zangbo suture belt

- 1—喜马拉雅地体(特提斯沉积); 2—混杂岩带; 3—柳区群; 4—蛇绿岩; 5—恰布林组; 6—秋乌组; 7—桑日群; 8—拉萨地体;
9—逆冲断层; MCT—主中央断层; MBT—主边界断层; YZSZ—雅鲁藏布江缝合带; LT—拉萨地体; QT—羌塘地体; AB—剖面位置
1—Himalaya terrane (Tethys sediments); 2—melange zone; 3—Liuqu Group; 4—ophiolite massifs; 5—Qiabulin Formation;
6—Qiuwu Formation; 7—Sangri Group; 8—Lhasa terrane; 9—thrust; MCT—main central thrust; MBT—main boundary thrust;
YZSZ—the Yarlung Zangbo suture zone; LT—lhasa terrane; QT—Qiangtang terrane; AB—geologic profile

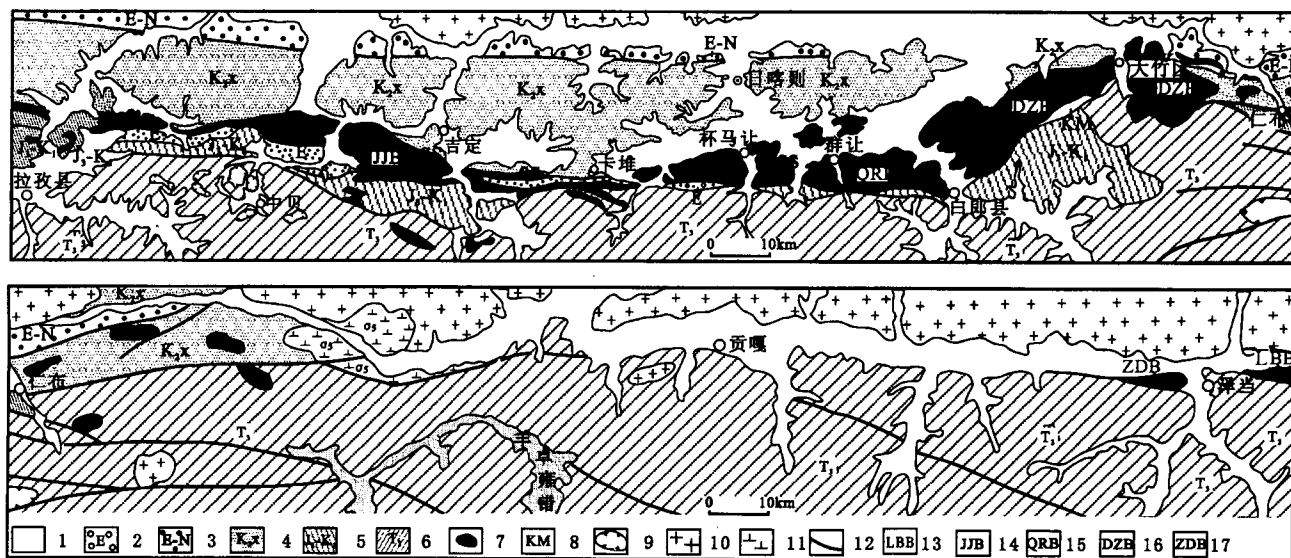


图2 拉孜—泽当地区雅鲁藏布江蛇绿岩带地质简图(据王希斌等, 1984修改)

Fig. 2 The geological map of the Yarlung Zangbo ophiolitic belt in Lhazi—Zedang region (after Wang et al., 1984)

- 1—第四系;2—柳区群;3—第三系;4—日喀则群;5—嘎学组(白朗地体);6—上三叠统;7—蛇绿岩(未分);8—混杂沉积;9—混杂岩中的外来岩块;10—花岗岩;11—花岗闪长岩;12—断层;13—罗布莎岩块;14—吉定岩块;15—群让岩块;16—大竹区岩块;17—泽当岩块
1—Quaternary;2—Liuqu Group;3—Qiabulin—Qiuwu Formation;4—Xigaze Group;5—Gaxue Formation;6—upper Trassic;7—ophiolite (undivided);8—melanges;9—exotic blocks of melange;10—granites;11—granodiorite;12—faults;13—Luobusha massif;14—Jiding massif;15—Qunrang massif;16—Dazhuqu massif;17—Zedang massif

喀则弧前盆地的浊积岩地层和冈底斯岩浆弧之间的恰布林组砾岩,它是一套极其特殊的地层,大量证据显示其物源主要来自现今我们还未知的蛇绿岩,因此将其称为古蛇绿岩(Wang C S et al, 2000)。

2 雅鲁藏布江蛇绿岩带地质特征

前人的研究和我们的调查都发现雅鲁藏布江蛇绿岩带是一极其复杂的地质体,不同块体的特征沿走向上差别较大,没有任何一个单一块体能够代表雅鲁藏布江蛇绿岩带的成因。所以,从西向东笔者将所调查的6个不同地区蛇绿岩块体的特征分别进行了总结和命名,分别是拉孜、吉定、群让、大竹区、泽当和罗布莎岩块(图2)。

拉孜岩块:分布于中贝以西的拉孜一带,东西长约25~30km,南北宽3~5km,由于受岩块边后期剪切带变形和新生代沉积覆盖,总体呈不完整的残块状出露。岩块主要由地幔部分纯橄榄岩、二辉橄榄岩和部分地壳岩组成,地幔岩部分发生蛇纹岩化,蛇纹石化明显受块体块体内发育的剪切带控制,地幔岩中叶理主要为 NWW-SEE 走向,叶理面上可见向 SEE 倾伏的线理构造,同时在地幔岩内发育大量变形强烈的辉长辉绿岩侵入体。地幔岩被上覆火山岩覆盖,火山岩褶皱变形强烈,褶皱轴主体近 EW 向,

同时可见地幔岩中高温叶理受后期构造影响发生弯曲现象。

吉定岩块:位于吉定到扎果一带,东西长约40 km,南北最宽约8 km。该蛇绿岩块体部分或全部由具有斜方辉石条带的上地幔蛇纹岩化由粗到细粒斜辉辉橄榄岩组成,上部厚的辉绿岩床(脉)侵入于不均一的辉长岩、枕状熔岩和薄层放射虫硅质岩中。在橄榄岩内 NW-SE 走向的高温塑性叶理和线理表现出显著的褶曲构造,在橄榄岩内的剪切带发育大量辉绿辉长质的侵入体,镁铁质岩块中测得的线理与面理构造与塑性变形面理不一致,表明在剪切过程中曾发生旋转变形,靠近剪切带可见铜矿化。

群让岩块:分布于路布日到白郎一带,东西长约50km,南北最宽7km,其间被河谷切割成5个岩块。最西部的杯马让岩块由粗粒二辉橄榄岩组成,局部表现出比其他岩块尖晶石和辉石更加富集的特点。该地幔岩体上部构造极其复杂,内被各种变形的辉长辉绿岩侵入,席状岩床发育,并被火山岩覆盖。地壳岩层部分褶皱变形强烈,褶皱轴主体 NW-SE 向,部分 NE-SW 向;位于中间的群让岩块中未发现上地幔-下地壳转换带岩层,也无辉长质地壳部分,相反辉绿质和火山质地壳岩发育且厚度较大,地幔岩部分由粒状二辉橄榄岩、斜辉橄榄岩、纯橄岩组成,

高温叶理和线理受后期构造影响,产状变化较大。

大竹区岩块:分布于白郎到大竹卡一带,东西长 45 km,南北最宽 15 km,除西部的次级块体发生强烈混杂岩化外。大竹区岩块表现为完整的蛇绿岩层序,地幔部分主要由斜辉橄榄岩、纯橄橄榄岩和二辉橄榄岩组成。从原始粒状结构到糜棱岩化的二辉橄榄岩、斜辉橄榄岩和纯橄岩中叶理主要为 NE-SW 向,且平行于侵入的辉长岩叶理产状,这种叶理的方位斜切呈东西向的岩石莫霍界面。

泽当岩块:泽当岩块由厚的地幔岩石组合序列组成,与火山岩部分呈断层接触,缺失地壳辉长(岩)质部分,地幔层序由新鲜的粗粒-碎斑状糜棱岩化二辉橄榄岩和斜辉橄榄岩组成。在 1999 和 2001 年我们发现了一个不甚明显的长石富集带。地幔斜辉橄榄岩与长石富集带间关系还不清楚,但野外研究发现长石富集带作为一构造岩片夹于南部蛇绿混杂岩和北部上地幔岩之间。叶理主要为 NW-SE 向,并可见到向 SE 倾伏的面状线理,蛇纹岩化与剪切带密切相关,受剪切带控制。最近,Mc Dermid 等(2002)根据对位于泽当附近的火山杂岩体研究后,认为它是洋岛弧的产物,并将其命名为泽当地体,呈构造断片就位于泽当蛇绿岩带和拉萨地体之间,其岩石组合为玻安质枕状熔岩、玄武-安山质火山岩和火山碎屑岩、英安岩、流纹岩。后期侵入的安山质岩脉和火山角砾中的角闪石矿物 $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$ 时代为 $152\pm 3.3\text{ Ma}$ 和 $156\pm 0.3\text{ Ma}$ 。

罗布莎岩块:罗布莎岩块南北分别以断层带与沉积混杂岩和蛇纹质混杂岩接触,东西长 42 km,南北最宽不超过 4 km(白文吉等, 1999, 2001)。主要由粗粒上地幔斜辉橄榄岩和少量纯橄橄榄岩组成,岩块富铬铁矿并构成中国最大的铬铁矿床,铬铁矿的出现可能与纯橄岩的接触变质带有关(Zhou 等, 1996),铬铁矿多呈粒状团块、瘤状和条带状的豆荚状产出。该岩块同样被后期辉长辉绿岩脉所截切,Sm-Nd 等时年龄测定为 $177\pm 31\text{ Ma}$,显示该岩墙形成于中侏罗世(周肃等, 2001),反映出该岩块为雅鲁藏布江蛇绿岩带内形成最早的一个岩体。

上述分析表明,蛇绿岩带在走向上是不均一的,表明其地质过程也是复杂的,没有一条单个一条横剖面能代表整个蛇绿岩带的组成与结构构造(图 2),同时由于受后期构造影响对其原始结构很难予以准确解释。矿物记录可以限定蛇绿岩地球动力学环境,目前在使用的矿物数据中,尖晶石已被证明是动力学研究最有效的指示器(Arai, 1994)。因此,本次研

究中重点开展了蛇绿岩中尖晶石地球化学特征研究,并在此基础上对其所反映的动力学环境进行分析,以弥补在该方面研究的不足。

3 矿物(尖晶石)地球化学纪录及动力学环境

除了 Mercier (1980)、Girardeau 等(1985a)和 Zhou 等(1996)做了少量工作外,白文吉等(1999, 2001)对罗布莎岩体的超高压矿物和作为矿石矿物的铬尖晶石作了详细地研究,并发现了金刚石。从整体角度讲,对雅鲁藏布江蛇绿岩矿物化学特征研究还比较弱。本次研究采集了 76 件基性和超基性岩的样品,500 多件尖晶石矿物分析均在加拿大 Laval 大学完成,所用分析设备使用 SX-100 型电子探针分析仪,测试分析主要用纯氧化物的初始相作为标准的天然相,在 15 kV 电位和 20 nA 下,计时 10 秒完成测试。由于样品岩石类型,样品采集地点和其分析数据均可在线获得(<http://www.gelolsoc.org.uk/SUP18194>),本文未列出。

分析结果表明,雅鲁藏布江蛇绿岩中的尖晶石具有复杂的组成,其跨度范围包括目前整个地球上已发现的尖晶石组成范围。大多数铝质尖晶石的 $\text{Cr}/(\text{Cr}+\text{Al})$ 值为 0~0.13 左右,并多出现于群让蛇绿岩块的二辉橄榄岩中。铬尖晶石主要出现于罗布莎岩块纯橄岩中,其 $\text{Cr}/(\text{Cr}+\text{Al})$ 值为 0.94。在这两种单元之间演化出两种不同成因的主岩系趋势,一种趋势是 $\text{Mg}/(\text{Mg}+\text{Fe})$ 比相对持续减少的罗布莎演化趋势(图 3a);另一种趋势是随着 $\text{Cr}/(\text{Cr}+\text{Al})$ 值增加, $\text{Mg}/(\text{Mg}+\text{Fe})$ 值显著降低的大竹区演化趋势,类似岛弧蛇绿岩(Varfalvy et al., 1996; Bedard et al., 1998)和现代大西洋中脊蛇绿岩特征(Komor et al., 1990)。

我们用现代深海钻探所获得的尖晶石组成资料,对与蛇绿岩有关现代环境进行了分区,在这些图区上将所获得的雅鲁藏布江蛇绿岩中的尖晶石化学成分进行投点(图 3b)。可以看出,雅鲁藏布江蛇绿岩中尖晶石的投点大部分都在 Dick 等(1984)的正常洋脊玄武岩区之外。这些认识显然不同于以前对于日喀则蛇绿岩形成于大洋中脊环境的观点(Nicolas et al., 1981; Girardeau, et al., 1985a)。笔者进一步对雅鲁藏布江蛇绿岩带中尖晶石 TiO_2 组分进行研究后,得出了同样的结论(图 4),研究发现本区大多数尖晶石贫 TiO_2 ,仅大竹区岩块中的尖晶石 TiO_2 组分与 Arai (1992)所述的 MORB 成分相似,

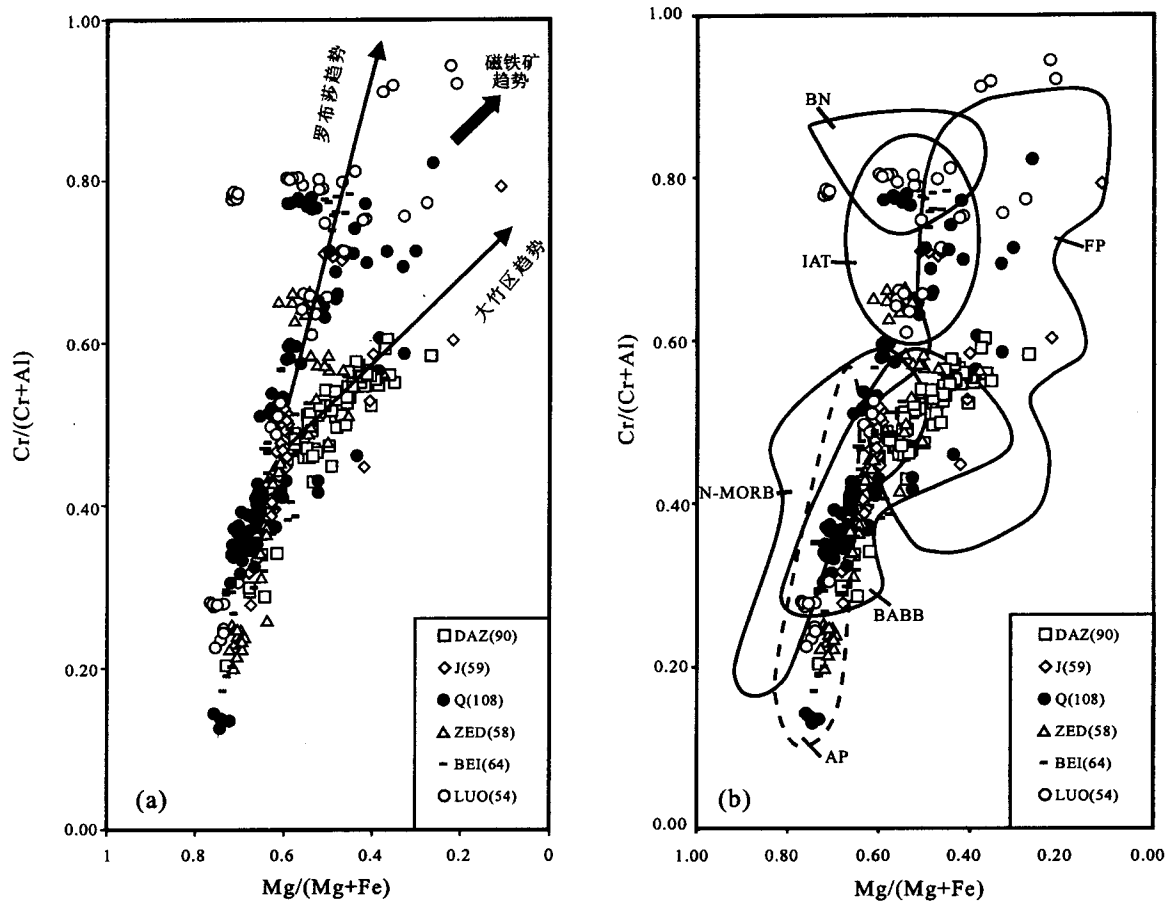


图3 雅鲁藏布江蛇绿岩尖晶石 $\text{Cr}/(\text{Cr}+\text{Al})$ - $\text{Mg}/(\text{Mg}+\text{Fe})$ 与构造环境投影图

Fig. 3 Diagram of spinel $\text{Cr}/(\text{Cr}+\text{Al})$ - $\text{Mg}/(\text{Mg}+\text{Fe})$ and tectonic settings in the Yalung Zangbo ophiolites

DAZ—大竹区地区; J—吉定地区; Q—群让地区群让岩块; ZED—泽当地区; BEI—群让地区杯马让岩块; LUO—罗布莎地区; BN—玻安岩; N-MORB—正常洋中脊玄武岩; AP—深海橄榄岩; FP—弧前橄榄岩; IAT—岛弧玄武岩; BABB—弧后玄武岩(图b据 Hbbert et al., 2003)

DAZ—Dazhuqu area; J—Jiding area; Q—Qunrang block in Qunrang area; ZED—Zedang area; BEI—Beimarang block in Qunrang area;

LUO—Luobusha area; BN—boninites; N-MORB—abyssal basalts; AP—abyssal peridotites; EP—fore-arc peridotites;

IAT—arc-related lava; BABB—back-arc basalts (after Dick, 1984; Ishii, 1992; Allan, 1994)

TiO_2 这种分配模式与岛弧及安山质岩浆相似。

4 总结与讨论

综上所述,雅鲁藏布江蛇绿岩岩块具有复杂的非均一特点,这种不均一性不仅表现在岩性上,也表现在成因上。矿物地球化学成分能够帮助我们很好地了解蛇绿岩套的地球动力学背景,尖晶石是其中最有效的地球动力学指示器(Arai, 1994)。雅鲁藏布江蛇绿岩中尖晶石的投点大部分都在 Dick 等(1984)的正常洋脊玄武岩区之外,几乎与岛弧有关的各种环境都与之有关,这也与前述的各个蛇绿岩岩块的特征、层序甚至年龄都不相同比较吻合。本文研究比较重要的发现就是尖晶石的成分显示了两种演化趋势,不但显示富 Al 的端元组分,也显示了富

Cr 的端元组分。这种特殊的演化模式可能是多种作用的结果,包括部分熔融、尖晶石-硅酸盐固相线再平衡、氧逸度($f\text{O}_2$)变化和地幔熔融相互作用等所造成。而对尖晶石组分起影响的这些作用又与动力学环境有关。例如,超级俯冲带环境比洋中脊环境情况更为复杂,卷入的岩浆组分和流体有更复杂的组成和变化范围。根据研究区尖晶石组成,表明尖晶石主要源于弧后、岛弧以及弧前岩浆结晶而成。尽管这些组成解释了 Cr 端元组分(罗布莎趋势),但不能给出 Al 端元组分(大竹区趋势)的合理解释。Arai 等(2003)认为 Al 端元组分反映了大洋岩石圈的痕迹,但我们认为,拉斑玄武质岩浆对尖晶石成分及组成具有调整能力。我们的这种结论是与 20 世纪 80 年代中期法国学者的认识相矛盾,但与 Zhou 等

(1996)和 Aitchison 等(2000)的结论相吻合。雅鲁藏布江蛇绿岩尖晶石的 TiO_2 组分也反映了超级俯冲带成因,绝大多数尖晶石极为贫 TiO_2 ($<0.2\%$),仅大竹区岩块的尖晶石 TiO_2 含量与 Arai(1992)总结的大洋中脊环境的特征相一致。值得注意的是大竹区岩体是至今唯一发现存在有与下部地壳有关的含长石的岩相,这种岩相与拉斑玄武系列更具亲源性,可能属于低压分馏环境。Arai(1992)等根据尖晶石 Fe^{3+} 组成计算,得出了蛇绿岩中尖晶石成分与不同地质背景,如:洋底和岛弧环境等的对应关系。其中,岛弧岩浆演化是在非常高的 $f\text{O}_2$ 条件下引起 Fe 的氧化,如果把雅鲁藏布江蛇绿岩的尖晶石组成投入到 Al-Cr-Fe^{3+} 图解时,也会发现其分布与岛弧和弧前尖晶石非常相似。如前所述,当 $\text{Cr}/(\text{Cr}+\text{Al})$ 大于 0.5 时, Fe^{3+} 组成显著增加,其特点与阿曼地区蛇绿岩类似 (Pearce et al, 1981)。另外,陈根文等 (2003)对群让岩块中得几蛇绿岩研究也发现,蛇绿

岩中样品具有高硅、高镁、低钛的特点,岩石中 Zr、Yb 和 Y 的含量也相对较低,具有明显的玻安岩特征,为日喀则蛇绿岩属于弧前环境提供了直接证据。根据这些岩石的地球化学性质,我们认为研究区蛇绿岩在早期经历过较高程度的部分熔融的残余,在含水条件下再发生部分熔融形成的,叠合有弧前、弧后和岛弧的特点,表明雅鲁藏布江蛇绿岩起源于 Pearce(1984)所提出的超俯冲环境。

参 考 文 献

- 白文吉, 方青松, 张仲明, 等. 1999. 西藏雅鲁藏布江蛇绿岩罗布莎地幔橄辉岩的成因. 岩石矿物学杂志, 18(3):192~206.
- 白文吉, 杨经绥. 2001. 西藏罗布莎蛇绿岩铬铁矿中金刚石的研究. 地质学报, 35(3):403~406.
- 王成善, 刘志飞. 1999. 西藏日喀则弧前盆地与雅鲁藏布江缝合带. 北京:地质出版社, 112~200.
- 王希斌, 曹佑功, 郑海翔. 1984. 西藏雅鲁藏布江(中段)蛇绿岩组合层序及特提斯洋壳演化模式. 见:李光岑, Mercier J L 主编. 1984. 中法喜马拉雅考察成果1980. 北京:地质出版社, 181~221.
- 西藏地质矿产局. 1990. 西藏区域地质志. 北京:地质出版社, 137~159.
- 夏斌, 陈根文, 梅厚均, 等. 2001. 西藏吉定蛇绿岩铂族元素地球化学及其对地幔过程的制约. 中国科学(D), 31(7):578~585.
- 肖序常, 高延林. 1984. 西藏雅鲁藏布江缝合带中段高压低温变质带的新认识. 见:喜马拉雅地质文集编集委员会. 喜马拉雅地质 II, 中法合作喜马拉雅地质考察1981年成果之一. 北京:地质出版社, 1~18.
- 尹集祥, 孙晓兴, 闻传芬, 等. 1988. 西藏南部吉隆县党拉至萨嘎县(加加)地段中生代地层. 见:中国科学院地质研究所所刊, (3):80~95.
- 周肃, 莫宣学, Mahoney J J, 张双全. 2001. 西藏罗布莎蛇绿岩中辉长辉绿岩 Sm-Nd 定年及 Pb, Nd 同位素特征. 科学通报, 46(16):1387~1390.
- 陈根文, 夏斌, 钟志洪. 2003. 西藏得几蛇绿岩中玻安岩的地球化学特征及其地质意义. 矿物学报, 23(1):91~96.
- 李光岑, J L 麦尔西叶, 编. 1981. 中法喜马拉雅考察成果(1980). 北京:地质出版社, 1~419.
- 余光明, 王成善. 1990. 西藏特提斯沉积地质. 北京:地质出版社, 52~53.

References

- Aitchison J C, Badengzhu, Davis, A M, Liu J, Luo H, Malpas J, McDermid I, Wu H, Ziabrev S, Zhou M F. 2000. Remnants of a Cretaceous intra-oceanic subduction system within the Yarlung-Zangbo suture (southern Tibet). Earth and Planetary Science Letters, 183: 231~244.
- Arai S. 1994. Characterization of spinel peridotites by olivine-spinel compositional relationships: a review and interpretation. Chemical Geology, 113: 191~204.

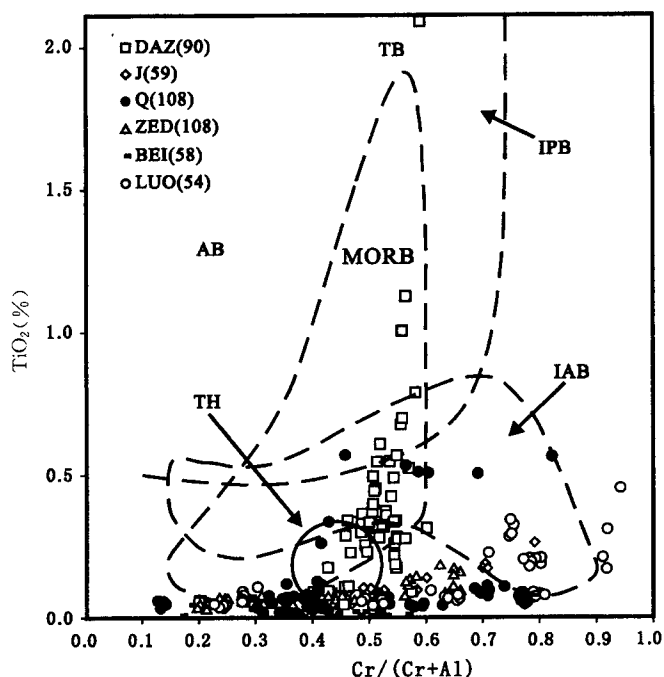


图4 雅鲁藏布江蛇绿岩中尖晶石 TiO_2 - $\text{Cr}/(\text{Cr}+\text{Al})$ 图解

Fig. 4 TiO_2 - $\text{Cr}/(\text{Cr}+\text{Al})$ diagram of spinels in the Yalung Zangbo ophiolites %

TB—拉斑玄武岩; IPB—板内玄武岩; IAB—岛弧玄武岩; AB—碱性玄武岩; TH—辉橄岩; MORB—洋脊玄武岩(图解据 Arai, 1992; TH 据 Constantin, 1999; 其他符号同图3)

TB—Tholeiitic basalts; IPB—intra-plate basalts; IAB— island-arc basalts; AB—alkaline basalts; TH—terevaka harzburgite; MORB—middle ocean ridge basalts; (diagram after Arai, 1992; TH after Constantin, 1999; The symbols are same as Fig. 3)

- Bedard J H, Hebert R. 1998. Formation of chromitites by assimilation of crustal pyroxenites and gabbros into peridotitic intrusions: North Arm Mountain Massif, Bay of Islands ophiolite, Newfoundland, Canada. *Journal of Geophysical Research*, 103: 5165~5184.
- Bureau of Geology and Mineral Resources of Xizang Autonomous Region. 1990. Regional Geology of Xizang (Tibet) Region. Beijing: Beijing: Geological Publishing House, 137~159.
- Chen G W, Xia Bin, Zhong Z H. 2003. Geochemical characteristics and geological significance of boninites in Deji ophiolite, Tibet. *Acta Mineralogica Sinica*, 23(1): 91~96.
- Davis A M, Aitchison J C, Badengzhu, Luo H, Zyabrev S. 2002. Paleogene island arc collision-related conglomerates, Yarlung Tsangpo suture zone, Tibet. *Sedimentary Geology*, 150: 247~273.
- Dick H J B, Bullen T. 1984. Chromian spinel as a petrogenetic indicator in abyssal and alpine-type peridotites and spatially associated lavas. *Contributions to Mineralogy and Petrology*, 86: 54~76.
- Dürr S B. 1993. The mid to early late Cretaceous Xigaze forearc basin (south Tibet): Sedimentary evolution and provenance of sediments. *Tübinger Geowissenschaftliche Arbeiten A*, 15: 119.
- Einsele G, Liu B, Dürr S, Frisch, W Liu G, Luterbacher H P, Ratschbacher L, Ricken W, Wendt J, Wetzel A, Yu G, Zheng H. 1994. The Xigaze fore-arc basin: evolution and facies architecture (Cretaceous, Tibet): *Sedimentary Geology*, 90: 1~32.
- Girardeau J, Mercier J C C, Wang Xibin. 1985a. Petrology of the mafic rocks of the Xigaze ophiolite, Tibet: *Contributions to Mineralogy and Petrology*, 90: 309~321.
- Girardeau J, Mercier J C C, Zao Yougong. 1985b. Structure of the Xigaze ophiolite, Yarlung Zangbo suture zone, southern Tibet, China: Genetic implications: *Tectonics*, 4: 267~288.
- Girdeau J, Mercier J C C, Cao Yougong. 1985. Structure of the Xigaze ophiolite, Yarlun Zangbo suture zone, southern Tibet, China: Genetic implications. *Tectonics*, 4: 267~288.
- Isabella R C, McDermid, Jonathan C. Aitchison, Aileen M, Davis T, Mark Harrison, Grove M. 2002. The Zedong terrane: a Late Jurassic intra-oceanic magmatic arc within the Yarlung-Tsangpo suture zone, southeastern Tibet. *Chemical Geology*, 187: 267~277.
- Li Guangqin, J L Mercier. 1981. Sino-French cooperative investigation in Himalayas. Beijing: Geological Publishing House, 143~168.
- Matsuoka A, Kobayashi K, Nagahashi T, Yang Q, Wang Y J, Takei M, Zeng Q G. 2001. Early Middle Jurassic (Aalenian) radiolarian fauna from the Xialu chert in the Yarlung Zangbo Suture Zone, southern Tibet. In: Metcalfe I, Smith J M B, Morwood M, Davidson I eds. *Faunal and Floral Migrations and Evolution in SE Asia-Australasia*. Balkema Lisse, 105~110.
- McDermid I, Aitchison J C, Davis A M, Harrison T M, Grove M. 2002. The Zedong terrane: a Late Jurassic intra-oceanic magmatic arc within the Yarlung-Zangbo suture zone, southeastern Tibet. *Chemical Geology*, 187: 267~277.
- Mercier J L, Li G C. 1980. Mission Franco-chinoise Himalaya-Tibet, 1980, Editions du center National de la recherche scientifique, Paris, 385~392.
- Nicolas A, Girardeau J, Marcoux J, Dupre B, Wang Xibin, Zheng Haixiang, Zao Yougong, Xiao Xuchang. 1981. The Xigaze ophiolite: A peculiar oceanic lithosphere. *Nature*, 294: 414~417.
- Pearce J A, Alabaster T, Shelton A, Searle M P. 1981. The Oman ophiolite as a cretaceous arc-basin complex: evidence and implications. *Phil. Trans. Royal Society of London*, 3: 299~317.
- Pearce J, A Lippard S, Roberts S. 1984. Characteristics and tectonics significance of suprasubduction zone ophiolites. In Kokelaar B P, Howells M F eds. *Marginal Basin Geology*. Geological Society, London, Special Publication, 16: 77~94.
- McDermid R C, Jonathan C, Aileen M. 2002. The Zedang terrane: A late Jurassic intra-oceanic magmatic arc within the Yarlung-Tsangpo suture zone, southeastern Tibet. *Chemical Geology*, 187: 267~177.
- Varfalvy V, Hebert R, Bedard J H. 1996. Interactions between melt and upper-mantle peridotites in the North Arm Mountain massif, Bay of islands ophiolite, Newfoundland, Canada: Implications for the genesis of boninitic and related magmas. *Chemical Geology*, 129: 71~90.
- Wan Xiaoqiao, Wang Luo, Wang Chengshan, Jansa L. 1998. Discovery and significance of Cretaceous fossils from the Xigaze forearc basin, Tibet. *Journal of Asian Earth Sciences*, 16: 217~223.
- Wang C S, Liu Z F, He'rbert R. 2000. The Yarlung Zangbo paleo-ophiolite, southern Tibet: implications for dynamic evolution of the Yarlung-Zangbo Suture Zone. *Journal of Asian Earth Sciences*, 18: 651~661.
- Wang Xibin, Cao Yougong, Zheng Haixiang. 1984. Ophiolite assemblage and sequence of the middle Yarlung Zangbo River in Xizang (Tibet) and a model of ocean crust evolution. Editor: Li Guangcen, J L Mercier, Sino-French cooperative investigation in Himalayas. Beijing: Geological Publishing House, 181~221.
- Wang C S, Li X H, Hu X M, Jansa L F. 2002. Latest marine horizon north of Qomolangma (Mt Everest): implications for closure of Tethys seaway and collision tectonics. *Terra Nova*, 14, 114~120.
- Wang C S, Liu Z F, et al. 1999. Xigaze Forearc Basin and Yarlung Zangbo Suture Zone, Tibet. Beijing: Geological Publishing House, 237.
- Xia Bin, Chen Genwen, Mei Houjun, et al. 2001. PGE geochemistry of the Jiding ophiolite in Tibet and its constraints on the mantle processes. *Science In China(D)*, 31(7): 578~585.
- Xiao X C, Gao Y L. 1984. A new recognition of high-pressure and low temperature metamorphic belt in the Middle ophiolite zone in Yalung Zangbo River. Beijing: Geological Publishing House. *Himalayan Geology*, 1~18.
- Yin J X, Sun X X, Wen C F. 1988. Mesozoic stratigraphy along the

- highway from Dangla pass in Gying County to Saga Countu in South Xizang. *Journal of Geological institute in China*, (3):80~95.
- Yu G M, Wang C S. 1990. *Sedimentary Geology of the Xizang (Tibet) Tethys*. Beijing: Geological Publishing House, 1~40.
- Zhou M F, Robinson P T, Malpas J, Li Z. 1996. Podiform chromitites in the Luobusa Ophiolite (southern Tibet); implications for melt-rock interaction and chromite segregation in the upper mantle. *Journal of Petrology*, 37: 3~21.
- Zhou Su, Mo Xuanxue, Mahoney J J, Zhang Shuangquan. 2001. The Pb-Nd isotope and Sm-Nd ages characteristics of diabase and gaboros in Robusha area, Tibet. *Chinese science Bulletin*, 46 (16):1387~1390.
- Ziabrev S V, Aitchison J C, Badengzhu. 2000. Oceanic deposits in the Yarlung-Tsangpo suture zone: structural setting, radiolarian ages and their tectonic implications, 15th Himalaya-Karakorum-Tibet workshop, Chengdu 15th HKT abstracts. *Earth Science Frontiers*, 7: 118.
- Ziabrev S V. 2002. Tectonic evolution of Dazhuqu and Bainang terranes Yarlung-Zangbo suture, Tibet as constrained by radiolarian biostratigraphy. PhD thesis, University of Hong Kong, 1~56.
- Zyabrev S V, Aitchison J C, Ba dengzhu, Davis A M, Luo H, Malpas J. 1999. Radiolarian biostratigraphy of supra-ophiolite sequences in the Xigaze area, Yarlung-Tsangpo suture, Southern Tibet (preliminary report); *Radiolaria*, 17: 13~19.

Yarlung-Zangbo Ophiolites Revisited: from Geological Survey to Mineral Records

WANG Chengshan^{1,2)}, LI Yalin²⁾, LIU Zhifei³⁾, Liu Xianghui²⁾, TANG Juxing²⁾,
REJEAN Hebert⁴⁾, COTE Dubois⁴⁾, VARFALVY V⁴⁾, HUOT F⁵⁾

1) *China University of Geosciences, Beijing*, 100083; 2) *State Key Laboratory on Oil and Gas Exploitation, Chengdu University of Technology, Chengdu*, 610059; 3) *Tongji University, Shanghai*, 200092; 4) *Département de géologie et de génie géologique, Université Laval, Québec, Canada, GIK 7P*; 5) *Institute Universitèes Européen de la Mer, UMR6538, Plouzané, France*, 29280

Abstract

Ophiolites belt occur in most of collisional chains around the world and generally mark the suture zone between plates of geological distinctive origins. The Yarlung-Zangbo ophiolites suture zone and related ophiolites are no exception to this concept. Previous extensive survey was conducted during the 1980 Sino-French Cooperative Investigation of the Himalayas. Progress in the ophiolite research field and new developments in the study of modern oceanic crust guided us in the recent field investigation. Our investigated segment spans from Lhazhi, Xigaze to Jinlu, Zedong that makes a stripe some 500 km long. Based on the field survey, we analyzed geochemical characteristics of more than 500 spinel samples from the Yarlung-Zangbu ophiolites, in order to present and discuss geneses and geodynamics of the Yarlung-Zangbu ophiolites. Mineral chemistry has revealed that the Yarlung-Zangbu ophiolites are the product of suprasubduction. This conclusion is similar to that of other related researched in recent years.

Key words: Yarlung-Zangbo River; ophiolite; spinel; suprasubduction