

doi: 10.12029/gc20190102

罗照华. 2019. 雅鲁藏布江蛇绿岩的侵位机制: 一个新的分析模型[J]. 中国地质, 46(1): 21-31.

Luo Zhaohua. 2019. The emplacement of the Yarlung Zangbo ophiolites: A new analytical model[J]. Geology in China, 46(1): 21-31(in Chinese with English abstract).

雅鲁藏布江蛇绿岩的侵位机制: 一个新的分析模型

罗照华

(中国地质大学地质过程与矿产资源国家重点实验室, 北京 100083)

摘要: 蛇绿岩侵位机制是板块构造理论中一直没有得到合理阐释的科学问题, 制约了许多次级问题的解决。本文综述了已发表的关键资料和地质观察, 提出了一个新的分析模型。蛇绿岩带的长距离延伸表明其形成过程与板块汇聚过程紧密相关; 冈底斯岩浆弧的两期弧岩浆活动暗示汇聚板块边缘的构造性质曾经发生过转换; 前人报道的玻安岩缺乏充分的地质学、岩石学和矿物学约束; 强还原晶体群的普遍性暗示蛇绿岩侵位过程与大规模流体活动有关。据此, 本文提出了一个由流体协助的蛇绿岩侵位模型, 认为俯冲板块回卷、断离、流体-岩石圈相互作用、大洋岩石圈穹隆等过程是蛇绿岩侵位的基本控制因素。

关键词: 蛇绿岩侵位机制; 玻安岩; 强还原晶体群; 深部流体; 雅鲁藏布江; 西藏

中图分类号: P588.14

文献标志码: A

文章编号: 1000-3657(2019)01-0021-11

The emplacement of the Yarlung Zangbo ophiolites: A new analytical model

LUO Zhaohua

(State Key Laboratory of Geological Processes and Mineral Resources, China University of Geosciences, Beijing 100083, China)

Abstract: The emplacement mechanism of ophiolites is a scientific problem in the plate tectonics which has not been clearly explained till now, and such a situation restricts resolving many secondary questions. In this paper, a new analytical model is proposed on the basis of combination of the key published data and the field observations. The large length of the ophiolite belt suggests a close relation between its formation and the converging plate process; the two phases of arc magmatism in the Gandise magmatic arc indicate translation of the tectonic features at the converging plate edges; there are not sufficient geological, petrological and mineralogical constraints in the previous reports about boninite; the universal discovery of the strongly reduced crystal populations suggests that the obduction process of ophiolite was related to the large scale activity of the deep fluids. Accordingly, a new model of ophiolite emplacement is proposed and called fluid-assisting model, in which the processes such as roll-back and break-off of the subducted plate, fluid-lithosphere interaction, and oceanic lithosphere dome seem to have been the essential factors controlling ophiolite emplacement.

Key words: emplacement mechanism of ophiolite; boninite; strongly reduced crystal population; deep fluid; Yarlung Zangbo; Tibet

收稿日期: 2018-07-22; 改回日期: 2019-01-17

基金项目: 中国地质调查局地质大调查项目(121201102000150069-01, 1212011220921)资助。

作者简介: 罗照华, 1956年生, 男, 教授, 博士生导师, 矿物学、岩石学、矿床学专业, 从事火成岩岩石学、区域岩石大地构造研究;

E-mail: luozh@cugb.edu.cn。

About the author: LUO Zhaohua, male, born in 1956, professor, supervisor of doctor candidates, engages in the study of igneous petrology and regional geotectonics.

1 引 言

术语蛇绿岩在地学文献中频繁援引,缘于蛇绿岩的构造意义、似是而非的形成过程、难以理解的仰冲机制、与铬铁矿密切相关。近年来,杨经绥及其合作者在橄榄岩中发现了大量强还原矿物(杨经绥等,2013),为蛇绿岩的成因蒙上了一层新的神秘面纱。因此,尽管术语蛇绿岩已经提出200多年,有关蛇绿岩成因的问题依然争论不休(吴福元等,2014)。这些争议涉及到镁铁质岩石与超镁铁质岩石的成因联系、镁铁质岩石的形成过程、蛇绿岩组成单元之间及其与沉积地层的接触关系,甚至涉及到常用判别准则的有效性。尽管如此,绝大多数作者倾向于认为蛇绿岩分布在板块缝合带上,因而蛇绿岩的定位机制成为不可回避的重要科学问题,后者又与蛇绿岩的成因属性紧密联系在一起。这两个问题的相互缠绕以及关于地质过程识别准则的争议使得蛇绿岩问题变得更加错综复杂。

雅鲁藏布江蛇绿岩带呈近东西向延绵约2000 km,是中国大陆研究最为详尽的蛇绿岩带。然而,与国外的蛇绿岩带相比,雅鲁藏布江蛇绿岩的研究程度明显较低。早期的研究者主要聚焦于蛇绿岩地质学和岩石学分析,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;张浩勇等,1996)。随着研究的深入,地球化学方法被越来越多地引入来解释蛇绿岩的成因,并由此推断蛇绿岩的形成环境(吴福元等,2014)。结果,提出了越来越多的成因模型,包括N-MORB型、IAT-CAB型(弧型)和OIB型(Hébert et al., 2012),甚至“大陆岩石圈伸展型”(吴福元等,2014)。然而,新模型的提出不仅没有导致蛇绿岩问题的解决,反而涌现了更多难解的科学问题。导致这种状况的主要原因在于只有很少作者探讨过蛇绿岩的侵位机制(梁凤华等,2011)。据此,本文综合前人的相关研究成果,结合自己的观测资料,提出一个新的分析模型,试图阐明雅鲁藏布江蛇绿岩的侵位机制。

2 地质背景

雅鲁藏布江蛇绿岩带以不连续分布的蛇绿岩杂岩体为特征,不仅规模巨大,而且所赋岩体众多。据不完全统计,有大小岩体(群)161个(江万等,2014),按地域可将其划分为西、中、东三段(张浩勇等,1996)。雅鲁藏布江蛇绿岩带北侧为冈底斯岩基带或岩浆弧,沿岩基带分布有众多矿产地,其中包括超大型斑岩铜矿床;南侧为特提斯岩系,被新生代S型花岗岩侵入切割(图1a)。此外,蛇绿岩有时也与超高压变质岩(如榴辉岩)伴生(Hébert et al., 2012)。因此,雅鲁藏布江蛇绿岩带被普遍认为标志着特提斯洋最终消亡场所(王成善等,2005),是印度板块与欧亚板块之间碰撞的印记。

以蛇绿岩为标记的雅鲁藏布江缝合带(YZSZ)向东至东构造结附近南拐与缅甸东北部的密支那蛇绿岩(杨经绥等,2012)或印度—缅甸交界处的Naga Hill蛇绿岩相连(Acharyya, 2007),向西过喀喇昆仑—噶尔曲右旋走滑断层与印度河缝合带相接(Hébert et al., 2012)。再往西,该缝合带有可能延伸到伊朗、土耳其、阿尔巴尼亚等国(熊发挥,2018,私人通讯),估计总长度超过10000 km。因此,可以说雅鲁藏布江蛇绿岩带是地球上出露规模最大的蛇绿岩带的不可忽略组成部分。雅鲁藏布江蛇绿岩的第二个特点是橄榄岩中普遍赋存有铬铁矿体(Xiong et al., 2015),其中铬铁矿晶体可以划分为富Cr和富Al两种不同类型(Zhou and Robinson, 1994)。因此,雅鲁藏布江蛇绿岩带产出有中国最大的铬铁矿矿床——罗布莎铬铁矿(图1b,章奇志等,2017),也是中国最有铬铁矿找矿潜力的蛇绿岩带,尽管多数岩体中尚未发现有工业意义的矿体,如泽当岩体(图1c)。第三个特点是几乎所有进行过重砂研究的橄榄岩中都发现有大量强还原矿物晶体群(杨经绥等,2013; Xiong et al., 2015),特别是金刚石等被认为形成深度大于150 km的矿物。类似的晶体群也见于其他蛇绿岩中(杨经绥等,

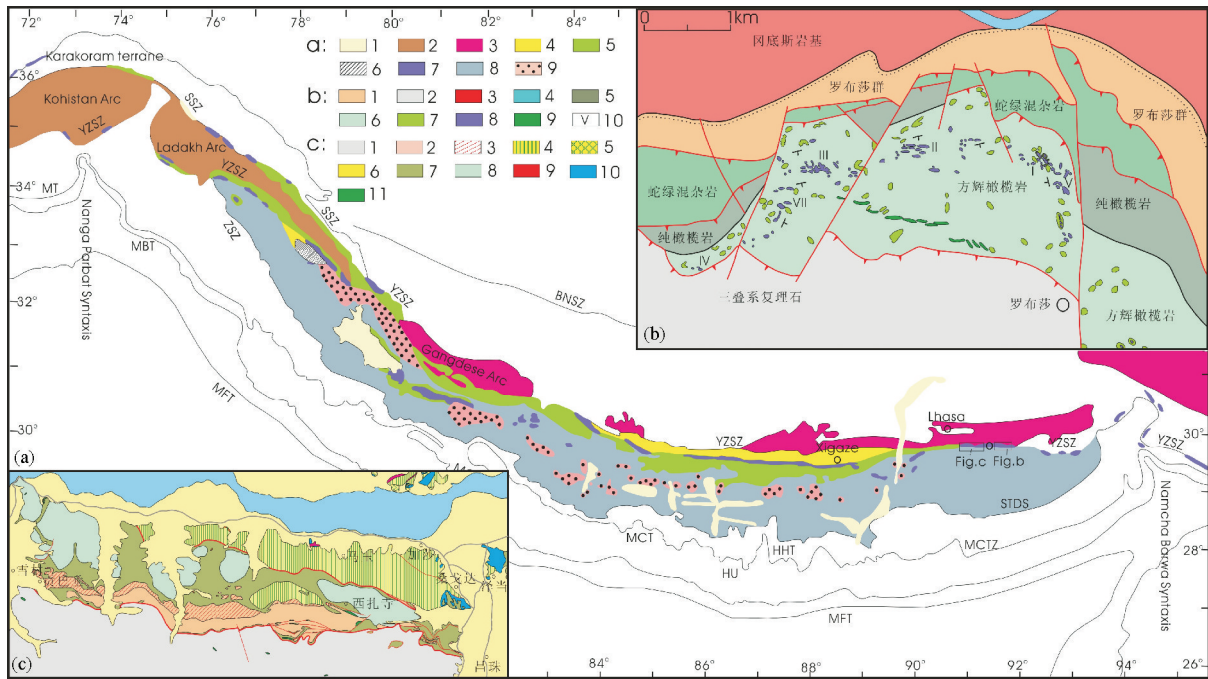


图1 雅鲁藏布江缝合带(YZSZ)蛇绿岩的地质特征

a—YZSZ地质结构(据 Hébert et al., 2012, 重绘): 1—山间盆地和裂谷; 2—拉达克—科西斯坦弧; 3—冈底斯弧; 4—日喀则盆地; 5—雅鲁藏布江缝合带; 6—榴辉岩; 7—蛇绿岩; 8—特提斯岩系; 9—片麻岩穹隆。b—罗布莎岩体地质特征(据白文吉等, 1999, 重绘): 1—罗布莎群; 2—三叠系复理石; 3—冈底斯岩基; 4—蛇绿混杂岩; 5—纯橄橄榄岩; 6—方辉橄橄榄岩; 7—纯橄橄榄岩透镜体; 8—铬铁矿体; 9—辉长岩—辉石岩; 10—铬铁矿群编号。c—泽当岩体地质特征(据西藏自治区地质局第二地质大队, 1979, 重绘): 1—三叠系复理石; 2—白垩纪被动陆缘沉积; 3—蛇绿混杂岩; 4—白垩纪弧火山岩; 5—侏罗系; 6—第四系; 7—强蛇纹石化绿色橄橄榄岩; 8—强蛇纹石化褐色橄橄榄岩; 9—花岗岩; 10—辉绿岩; 11—堆晶角闪辉长岩

Fig. 1 Geology of the ophiolites in the Yarlung Zangbo suture zone

a—Geological structure of YZSZ (after Hébert et al., 2012): 1—Intermountain basin and rift; 2—Ladak—Kositan arc; 3—Gandise arc; 4—Xikaze basin; 5—Yarlung Zangbo suture zone; 6—Eclogite; 7—Ophiolite; 8—Tethyan series; 9—Gneiss dome. b—Robusha intrusive body (modified after Bai Wenji et al., 1999): 1—Robusha Group; 2—Triassic flysch; 3—Gandise basement; 4—Ophiolite melange; 5—Pure peridotite; 6—Gabbro—pyroxene; 7—Pure peridotite lens; 8—Chromite; 9—Gabbro—pyroxene; 10—Chromite group number. c—Zedang intrusion (after No. 2 Geological Party of Geological Bureau of Tibet, 1979): 1—Triassic flysch; 2—Cretaceous passive continental margin deposits; 3—Ophiolitic melange; 4—Cretaceous arc volcanic rocks; 5—Jurassic; 6—Quaternary; 7—Strongly serpentinized green peridotite; 8—Strongly serpentinized brown peridotite; 9—Granite; 10—Diabase; 11—Cumulate amphibole gabbro

2013),暗示强还原晶体群是蛇绿岩的普遍特征。

与蛇绿岩带平行、总体分布在雅鲁藏布江以北的是冈底斯造山带(图1a)。冈底斯带被认为是一个复合造山带,经历石炭—二叠纪、早中三叠世、晚三叠世、早中侏罗世、晚侏罗世—早白垩世、晚白垩世—始新世六次造弧增生作用和相关的弧—陆、陆—陆碰撞作用并最终定型于新生代晚期(潘桂棠等, 2006)。根据潘桂棠等(2006),冈底斯带的构造演化很可能受班公湖—怒江特提斯洋向南、雅鲁藏布洋向北的双向俯冲的制约,因而是寻找斑岩型铜矿的有利场所。冈底斯带的桑日火山岩((192.7±1.3) Ma~(93.7±1.2) Ma, 康志强等, 2015)和林子宗火山岩((70.0 ± 0.7) Ma~(59.6 ± 0.7) Ma, 谢冰晶等,

2013)之间存在一个火山喷发间断,而深成岩可划分成俯冲型花岗岩类(127~70Ma)、同碰撞花岗岩类(65~45 Ma)、同碰撞—后碰撞强过铝花岗岩(56~8 Ma, 主要在该带北侧及东、西段)、含铜斑岩带(18~12 Ma),也展示了脉动式岩浆活动的特点(莫宣学等, 2005; 唐菊兴等, 2017)。此外,班公湖—怒江洋的闭合时间被认为始于晚侏罗世、完成于大约99 Ma(郭铁鹰等, 1991; 邱瑞照, 2002)。据此,可以认为冈底斯带在90~70 Ma间经历了一个以岩浆活动不发育为特征的地球动力学转换阶段,暗示了冈底斯带岩石圈的冷却过程。据此,蛇绿岩规模大、产铬铁矿床和强还原矿物晶体群是与蛇绿岩成因有关的三个一级科学问题,而冈底斯带的演化历史

则可以用来限定蛇绿岩的形成环境。因此,任何与蛇绿岩成因和侵位有关的模型都不能回避这四个问题。

3 雅鲁藏布江蛇绿岩的构造属性

传统上,蛇绿岩被归纳为地幔橄榄岩系、堆晶岩系和玄武质火山岩系或者地幔橄榄岩系、火成岩系和深海沉积岩系(如深海硅质岩)组成的杂岩,即所谓的斯坦曼三位一体(Dilek, 2003)。这样的岩石组合与大洋岩石圈类似,因而蛇绿岩在经典板块构造理论中被认为代表了消失的大洋岩石圈。地球化学研究对这种观点提出了挑战,因为一些蛇绿岩中的火成岩系具有俯冲带印记(Pearce, 2003)。深海钻探对SSZ型蛇绿岩的概念提供了支持,玻安岩、钙碱性玄武岩及玄武岩中单斜辉石先于斜长石结晶被作为识别SSZ型蛇绿岩的岩石学证据(Pearce, 1984)。此外,SSZ型蛇绿岩中的地幔岩被认为主要是方辉橄榄岩,而洋脊型蛇绿岩的地幔岩为方辉橄榄岩+二辉橄榄岩组合(Pearce, 2003)。因此,可以认为蛇绿岩多样性的认识已经得到确认,且这种多样性与蛇绿岩形成构造环境紧密联系在一起。可见,识别蛇绿岩的构造属性成为蛇绿岩研究的一项重要任务。

对雅鲁藏布江蛇绿岩的认识也经历了类似的转换过程,早期普遍认为它们属于大洋岩石圈残片(李光岑等, 1984; 张浩勇等, 1996),近年来,越来越多的作者提出了SSZ型蛇绿岩的认识(陈根文等, 2003; Hébert et al., 2012; Dai et al., 2013)。遗憾的是,SSZ型蛇绿岩的观点主要依据不完整的地球化学数据,缺乏相应的地质学、岩石学和矿物学证据支持。例如,一些作者(陈根文等, 2003; Dai et al., 2013)声称在日喀则蛇绿岩中发现了玻安岩,并据此将其归属为SSZ型蛇绿岩,进而推断蛇绿岩的侵位机制。雅鲁藏布江缝合带的其他地区也报道有玻安岩(郑来林等, 2003; 邱瑞照等, 2004; 白文吉等, 2005)。由此,SSZ型属性似乎是雅鲁藏布江蛇绿岩的普遍特征。但是,他们的主要依据是火成岩地球化学参数,特别是微量元素含量和比值。这样的研究手法隐含了至少三个假设前提:(1)火成岩的平均化学性质可以作为岩石成因的判别标志,少量样品的分析结果与大量样品的统计特征相符;

(2)微量元素和同位素可以用来独立识别火成岩的成因,而主量元素则往往因后期蚀变而失去成因指示意义;(3)火成岩形成构造环境的地球化学印记不会因岩浆过程而受到改变。前提(1)显然不成立,因为判别图解的构建是基于大量样品分析(Pearce, 2003)。前提(2)也不合理,因为主量元素才是岩石地球化学的本质特征,且许多主量元素在热液蚀变过程中也具有惰性地球化学行为。前提(3)涉及的问题较多,包括源区物质结构、岩浆过程中挥发分的输入与逃逸、元素在晶体-熔体-流体之间的分配系数等等,因而存在诸多的不确定因素。据此,火成岩地球化学数据的解释必须受到地质学、岩石学和矿物学证据的约束(罗照华等, 2017)。

据此,本文对Dai et al. (2013)和陈根文等(2003)发表的数据进行推演,以检验“玻安岩”认识的可靠性。首先,假定前人发现的“玻安岩”是原生岩浆固结的产物,因而它们应当与源区地幔岩残留矿物保持热力学平衡。实验表明,玄武质岩浆中橄榄石-熔体之间的 $Fe^{2+}-Mg$ 分配系数 $K_D = 0.3$,在富铁岩浆中可达0.4,与 $P-T$ 无关(Filiberto and Dasgupta, 2011)。如果这一认识也适应于玻安质岩浆,则可以利用全岩化学推测源区残留矿物相的成分。假定 $K_D = 0.3$,亏损型地幔橄榄岩中橄榄石为 $Fo=89-92$,则原生岩浆的 Fe/Mg 摩尔比值为0.41~0.29,相应的 $Mg^{\#}=70-77$ 。由图2可见,Izu-Bonin-Mariana弧和Tonga弧的许多玻安岩样品符合上述假定,即 $K_D=0.3$ 的实验结果同样可以用来说明玻安质岩浆与地幔橄榄岩的平衡。日喀则岩墙和熔岩样品的 $Mg^{\#}$ 显然大大低于70~77,因而可以排除它们作为原生岩浆固结产物的可能性。

图2预测的Izu-Bonin-Mariana弧和Tonga弧源区橄榄石成分投点有一部分超出地幔橄榄岩的成分范围,可以解释为玻安质岩浆发生了橄榄石的加入或移出。据此,进一步利用 $Mg^{\#}$ -氧化物图解来判断日喀则“玻安岩”岩浆发生分离结晶作用的可能性。由图3可见,与典型玻安岩相比,日喀则“玻安岩”以低 $Mg^{\#}$ 和高 Al_2O_3 、 Na_2O 为特征,似乎可以解释为富Mg矿物(镁质橄榄石和斜方辉石)的分离结晶作用。但是,样品投点的高度离散性很难将其与同源岩浆演化联系在一起。特别是, Al_2O_3 随着 $Mg^{\#}$ 的降低而减少,如果认为富Mg矿物的分离结晶控

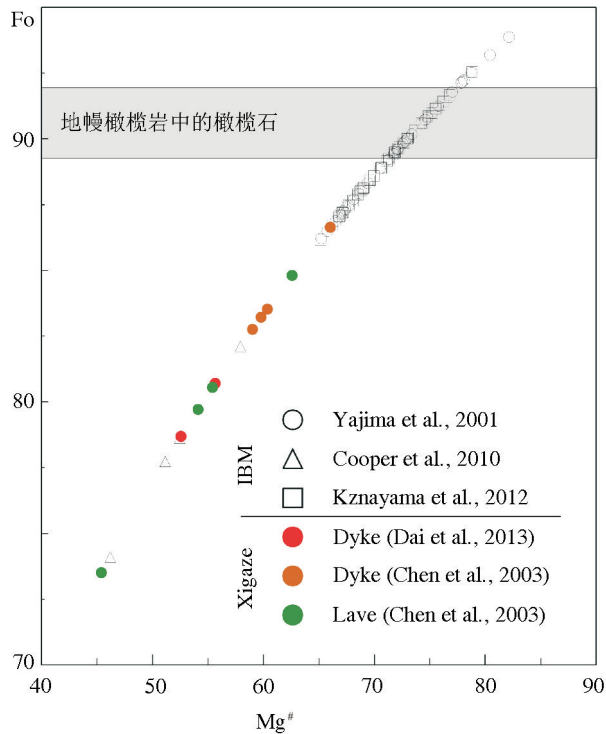


图2 利用火成岩全岩化学预测的源区残留橄榄石牌号
IBM—Izu-Bonin-Mariana 弧和 Tonga 弧的玻安岩;
Xigaze—日喀则蛇绿岩中的岩墙和熔岩

Fig.2 The deduced Fo content of olivine in the source relicts using the whole rock chemical compositions of igneous rocks IBM-Boninite in Izu-Bonin-Mariana and Tonga arc; Xigaze-Dykes and lavas in the Xigaze ophiolite

制了岩浆液体血统线的变化趋势,必然同时也发生了斜长石的分离结晶。这样的推论与玻安质岩浆中单斜辉石先于斜长石结晶的认识不符。据此,本文不认为前人报道的“玻安岩”可以作为SSZ型蛇绿岩的证据。这一认识与鲍佩声等(2015)的认识一致,他们认为雅鲁藏布江蛇绿岩中不存在典型的玻安岩。据此,本文赞同前人关于雅鲁藏布江蛇绿岩形成于洋中脊环境的认识(如李光岑等,1984;张浩勇等,1996;鲍佩声等,2009,2015;张旗,2015)。

4 强还原晶体群的约束

就在作者们为雅鲁藏布江蛇绿岩的构造属性争论不休之际,近十年来杨经绥及其合作者在铬铁矿体中发现了大量强还原晶体群或深部矿物群,包括自然元素类、合金类、碳化物类、氮化物类、氧化物类、硫(砷、碲)化物类和硅酸盐类矿物,多达70~80种(杨经绥等,2008a)。这些发现引起了国际学

术界的广泛关注,不仅对于澄清铬铁矿床和蛇绿岩的成因具有重要意义,也为地球深部物质组成和深部地质过程的研究打开了一个新的窗口。特别需要指出的是,这种强还原晶体群不仅产于铬铁矿体中,而且产于方辉橄榄岩中(杨经绥等,2008b);不仅产于雅鲁藏布江蛇绿岩中,也产于中国和世界其他许多蛇绿岩中(杨经绥等,2007;徐向珍等,2008;杨经绥等,2011)。这表明,强还原晶体群的存在是一种普遍现象(杨经绥等,2012)。由此引出了两个基本问题:(1)强还原深部晶体群主要产于铬铁矿体中,暗示二者有某种成因联系,为什么围岩橄榄岩中也可以见到这样的晶体群?(2)铬铁矿床和强还原晶体群为什么产于蛇绿岩的橄榄岩单元而不在其他岩性单元(火成岩和深海沉积岩)中?这样,似乎构成了一个事件链,将强还原晶体群、铬铁矿、橄榄岩和蛇绿岩紧密联系在一起,而不是仅仅考虑蛇绿岩中的火成岩单元。

越来越多的证据表明,强还原晶体群形成于岩石圈之下的深部环境,甚至地幔过渡带(杨经绥等,2008b)。这些矿物的形成过程尚未得到深入研究。但是,已经可以肯定某些深部矿物(如铂族金属矿物)的形成时间比蛇绿岩侵位时间早得多(Griffin et al., 2016)。这些矿物之间呈极端热力学不平衡,暗示它们不是形成于同一种环境中。例如,González-Jiménez et al.(2014a)提出,铬铁矿中的铂族矿物至少有以下三种成因:(1)铂族矿物记录了多次不同熔体混合期间的结晶作用和铬铁矿中的物理捕获;(2)铬铁矿中的有些铂族矿物是铬铁矿母熔体迁移期间从围岩橄榄岩中清扫出来的;(3)有些铂族矿物是从渗透先存铬铁矿的流体/熔体中沉淀的。那么,这些热力学不平衡晶体群是如何被保存的呢?一个合理的设想是它们具有极快的上升速度和封闭速度(即不同成因的共存晶体难以达到热力学平衡)。遗憾的是,目前还无法估算强还原矿物晶体的上升速度和封闭速度。但是,金刚石的存在提供了一个与金伯利岩岩浆上升速度对比的理由。根据金伯利岩中金云母的Ar-Ar剖面,Kelley and Wartho(2000)提出金伯利岩岩浆从源区达到近地表仅需要数小时至数天。假定岩浆起源于150 km或更深处,意味着岩浆上升速度达到>4.17~0.17m/s。这个估算值与根据橄榄岩包体和橄

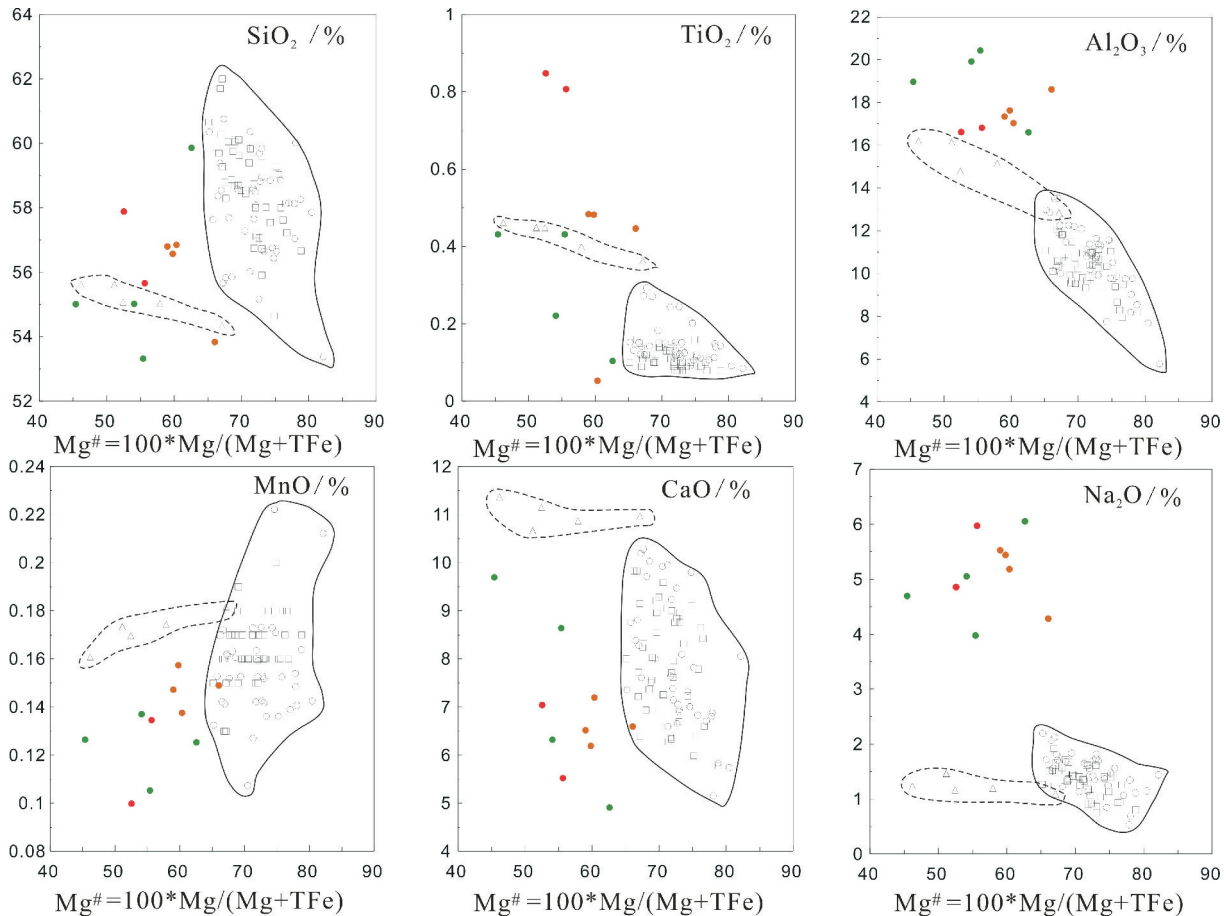


图3 日喀则“玻安岩”与Izu-bonin-Mariana弧和Tonga弧玻安岩的比较(图例同图2)

Fig.3 A comparison of the boninites from Xigaze and Izu-bonin-Mariana and Tonga arcs legends as for Dif. 2)

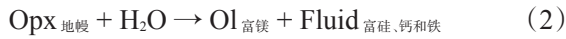
橄榄石捕虏晶估算的岩浆上升速度(0.1~>4 m/s, Brett et al., 2015)相近,也与圣海伦斯火山1980—1982年喷发期间岩浆上升速度(Rutherford, 2008)相当。据此,可以认为包括金刚石在内的强还原晶体群的保留要求有极快的上升速率。

值得注意的是,强还原矿物的搬运介质可能是流体而不是熔体。一方面,尽管方辉橄榄岩与玻安岩和拉斑玄武质熔体形成铬铁矿的模型(Zhou and Robinson, 1994)得到广泛引用,铬铁矿体或其附近并未见到相应熔体的固结产物;另一方面,如果部分强还原矿物是从地幔橄榄岩中“清扫”出来的(González-Jiménez et al., 2014b),则这种“清扫”介质应当以低黏度为特征。据此,本文推测强还原晶体群或者从强还原流体中析出,或者是流体携带的先存地幔矿物晶体。由此可见,无论是哪一种机制,铬铁矿体和橄榄岩中强还原晶体群的产出都与

流体过程密切相关。高镁橄榄石的发现支持这种认识。由梁风华等(2014)发表的电子探针数据可以看出,铬铁矿中的橄榄石具有高达 Fo_{98} 的成分,其 $Mg^{\#}$ 值明显高于地幔岩和苦橄岩及其他幔源火成岩中的橄榄石。类似的富Mg橄榄石成分也见于橄榄石主晶与蛇纹石脉之间的反应边(Fo_{98}),被认为是流体-橄榄石反应的产物(Majumdar et al., 2016)。橄榄石(Fo_{91})与富Si、Al、Ca、Na、Cl流体在800 °C和800 MPa条件下的反应实验表明,这样的流体-橄榄石相互作用可以生成富Mg橄榄石(Fo_{97})和单斜辉石+角闪石(Grant et al., 2016)。据此,可以认为高镁橄榄石是地幔岩橄榄石在低于其固相线温度条件下与流体反应的结果(李重, 2018):



类似地,高温流体也可与橄榄岩中的斜方辉石(2)和尖晶石(3)反应:



换句话说,方辉橄榄岩中的所有先存矿物都可与高温流体发生反应。流体-尖晶石反应(3)可以生成铬铁矿,并使流体富含Mg和Al₂O₃;流体-斜方辉石反应(2)可以产生富镁橄榄石,并使流体富含Si、Al、Na和Fe,表明自然过程与Grant et al.(2016)的实验过程类似。因此,高Mg橄榄石的产出指示了流体-方辉橄榄岩反应,无需硅酸盐熔体的参与(罗照华等,2018)。

反应(1)~(3)的总效果是斜方辉石消失和尖晶石转变为铬铁矿,可以作为包壳橄榄岩的形成机制(罗照华等,2018)。此外,生成物流体中还可能溶解有一定数量的流体Si、Mg、Ca、Al、Fe,在合适的条件下有可能从中析出单斜辉石、角闪石、石榴子石、长石、石英、滑石、蛇纹石等;如果反应物流体中含有CO₂,则有可能形成菱镁矿。这样的推测与区内透辉石岩、滑石菱镁片岩、“象牙玉”(微晶长英质岩石)、蛇纹岩脉的产出特征一致。

据此,可以认为强还原晶体群的产出指示了大规模深部流体活动,这是讨论蛇绿岩成因时必须考虑的问题。弧火山岩浆系统以强烈的岩浆混合作为特征(Hildreth, 2007),难以支持深部流体的快速上升。据此,本文不认为雅鲁藏布江蛇绿岩属于SSZ型蛇绿岩。

5 蛇绿岩侵位新模型

前人关于蛇绿岩侵位机制的讨论一般没有关注流体过程的影响,习惯上认为橄榄岩中的蛇纹石脉是后期热液活动的产物。然而,方辉橄榄岩中强还原晶体群的发现(杨经绥, 2008b)暗示蛇纹石脉可能是同侵位的。如图4a所示,蛇纹石脉呈网状脉动式侵入于方辉橄榄岩中,岩脉边部呈暗色,中心呈绿色。用磁性笔检测,暗色部分显磁性,而绿色部分无磁性。显微镜下,暗色部分可见大量粉尘状磁铁矿,而绿色部分则可见芝麻状纳米级水钙铝榴石集合体(图4b),

重砂分析发现有铬铁矿、金红石、石榴子石、辉石、锆石等等。据此,可以认为暗色边缘是流体-橄榄石反应(Ol + H₂O = Serp + Mt)的结果,而绿色部分则是多相流体流固结的产物。据此,可以说这类蛇纹石脉并不是后期热液蚀变的产物,而与铬铁矿成矿作用密切相关。假定铬铁矿床的形成与大规模流体活动有关,蛇纹石脉就是逃逸贫矿流体析出的产物。

与蛇绿岩侵位有关的第二个重要因素是岩圈的力学性质和抬升剥蚀。图4表明蛇纹石脉是沿着脆性破裂贯入的,暗示了橄榄岩的刚性力学性质或者多相流体流具有极高的上升速度。罗布莎矿区的铬铁矿体展布受断裂构造控制(张浩勇等,

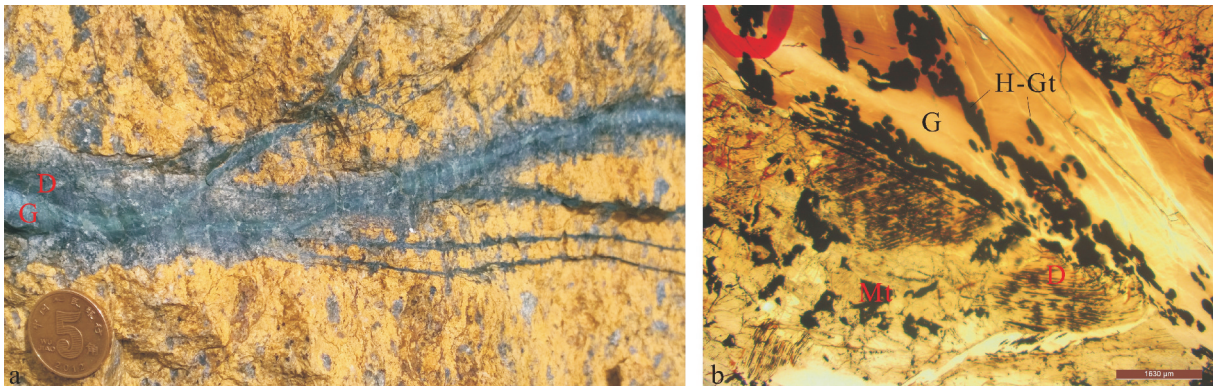


图4 罗布莎方辉橄榄岩中的蛇纹石脉照片

a—露头特征;b—显微照片;D—暗色蛇纹石脉;G—绿色蛇纹石脉;Mt—磁铁矿;H-Gt—水钙铝榴石集合体

Fig.4 The photographs of the serpentine veins from harzburgite in Luobusha peridotite

a—Outcrop characteristics; b—Microphotograph; D—Dark serpentine veins; G—Green serpentine veins; Mt—Magnetite; H-Gt—Hydroaluminous garnet aggregates

1996), 可以作为岩石圈地幔具有刚性特点的证据; 而强还原晶体群的大量产出则可以作为多相流体流高速上升和快速排气的证据。此外, 流体相分离成蒸气和液体的过程一般发生在浅部地壳(罗照华等, 2009), 这将有利于大规模成矿作用的发生。据此, 成矿作用有可能发生在蛇绿岩侵位过程中或侵位之后, 但不太可能发生在侵位之前。如果是这样, 大洋岩石圈的抬升剥蚀可能与深部流体的大规模上涌有关。据此, 可以认为深部流体对岩石圈抬

升至少有两个方面的贡献: (1) 流体聚集于岩石圈屏蔽层之下, 产生可推动岩石圈向上运动的流体超压; (2) 流体沿着裂隙和孔隙注入岩石圈, 可有效降低岩石圈的平均密度, 增加地幔橄榄岩的浮力, 从而实现大洋岩石圈隆升。

综上所述, 可以构建一个由流体协助的蛇绿岩侵位模型。冈底斯岩基带的性质暗示新特提斯大洋岩石圈至少在早白垩世就已经开始向亚洲大陆板块之下俯冲, 即冈底斯带具有大陆边缘弧的性

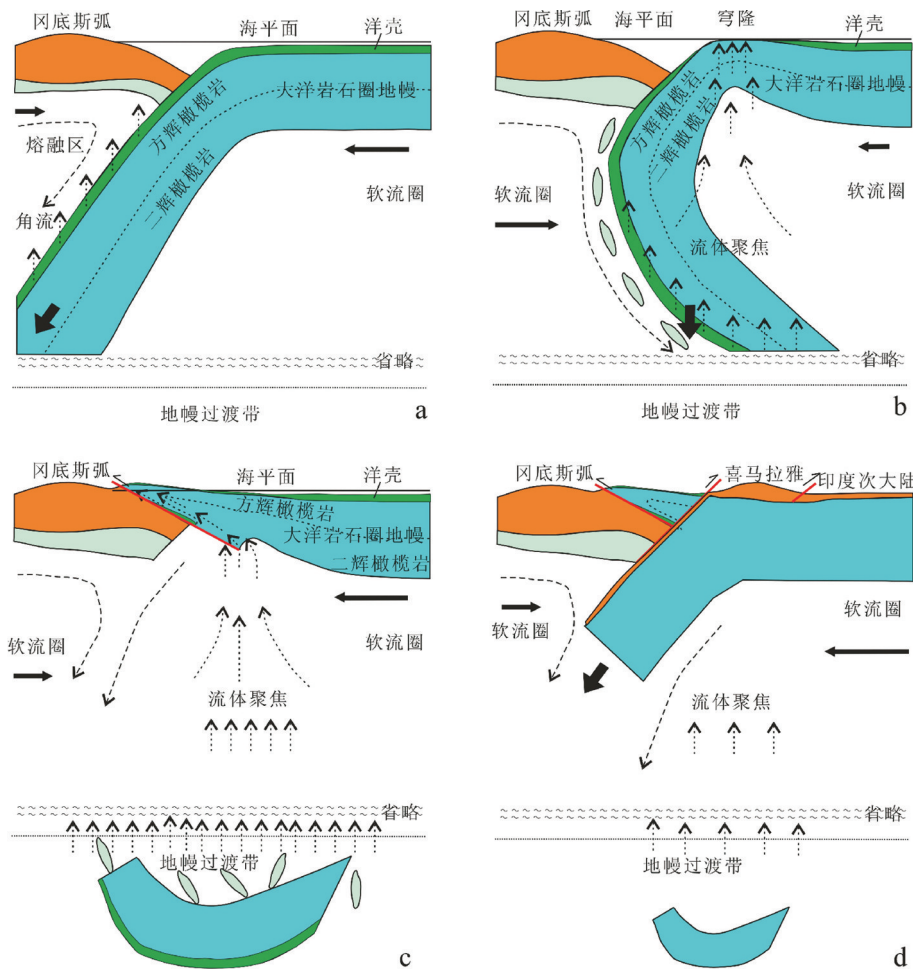


图5 雅鲁藏布江蛇绿岩侵位模型

a—特提斯洋岩石圈向亚洲大陆俯冲, 形成冈底斯岩浆弧的雏形; b—俯冲大洋岩石圈回卷, 导致流体-大洋岩石圈相互作用, 大洋岩石圈隆升, 以及大陆岩石圈地幔块体进入软流圈; c—俯冲板片断裂并沉陷到地幔过渡带, 触发过渡带中的强还原流体大规模上升, 同时发生大洋岩石圈构造侵位; d—大陆岩石圈碰撞, 反冲断裂产生, 印度大陆板块向亚洲大陆板块俯冲

Fig.5 A new emplacement model of ophiolites from the Yarlung Zangbo belt

a—Tethys Ocean lithosphere subducted to the Asian continent, forming the prototype of the Gandise magmatic arc; b—Subduction Ocean lithosphere rolled back, resulting in fluid-oceanic lithosphere interaction, oceanic lithosphere uplift, and the mantle block of the continental lithosphere entering asthenosphere; c—Subduction plate fractured and subsided to the mantle transition zone, triggering a large-scale rise of the strong reductive fluid in the transition zone, with ocean lithospheric tectonic emplacement; d—Continental lithospheric collision resulting in thrust faults, with the Indian continental plate subducted to the Asian continental plate

质,类似于现今的安第斯岩浆弧(图5a)。如果板块运动确实受软流圈对流驱动,这种俯冲样式实际上暗示了大陆软流圈的动能小于特提斯软流圈。这时,俯冲板片脱水反应产生的流体可输入到大陆软流圈和岩石圈,并触发地幔交代作用、绝热隆升、注水熔融,进而导致地壳的部分熔融。这样的过程导致了冈底斯岩基带锥形的产生,岩石圈力学性质弱化。此后,可能是大陆软流圈的反弹,导致其动能大于特提斯软流圈。结果,俯冲大洋板片发生回卷(roll-back)。在这种情况下,如果俯冲板块(如洋壳部分)继续发生脱水反应,所产生的流体将向大洋而不是大陆岩石圈运动(图5b)。这将导致大陆岩石圈的冷却和力学性质强化,造山带岩浆活动中止;同时导致大洋岩石圈力学性质弱化和平均密度减小,进而发生隆升。

数值模拟表明,蛇绿岩的侵位要求热异常和高强度大陆基底流变学(Duretz et al., 2016)。俯冲板块的回卷大幅减少了对大陆岩石圈的热(流体)输入,可以满足高强度基底流变学的要求;大洋岩石圈力学性质弱化,也可以满足数值模型中的“热异常”要求。换句话说,深部流体具有高于岩石圈的温度,流体-岩石圈相互作用必然使岩石圈出现热异常;流体也可以溶解岩石圈物质,进一步使岩石圈力学性质弱化和具有更大浮力。众所周知,大洋平均水深5000 m、大洋地壳平均厚度为10 km,意味着大洋岩石圈的地幔部分要抬升15 km以上才能侵位到陆地。因此,蛇绿岩侵位机制是板块构造理论中一个长期没有得到解决的关键科学问题。图5b可以解释大洋岩石圈隆升的部分原因,因而流体-岩石圈相互作用可能是蛇绿岩侵位的重要因素之一。此外,大洋岩石圈力学性质的弱化有可能进一步导致俯冲岩石圈被重力拉断(断离)。缺少高密度岩石圈向下拖拽的、有浮力的大洋岩石圈将在板块动能和大洋软流圈的驱动下构造侵位到大陆边缘(图5c)。同时,下沉到地幔过渡带的断离大洋岩石圈块体将触发那里的强还原流体(如 CH_4 流体)大规模上升。此外,氧逸度较高的大洋岩石圈可以导致过渡带中的强还原流体被氧化,发生 $\text{CH}_4 + 2\text{O}_2 = \text{CO}_2 + 2\text{H}_2\text{O}$ 反应,进而触发地幔岩的氧化还原熔融(Litasov et al., 2014)。但是,由于流体具有低的密度和黏度,以及熔体和流体的混溶程度随压力减小

而降低,流体将沿着优势通道以更快的速度上升。同时,流体上升过程中不仅可以“清扫”出地幔岩中的粒间微粒晶体,也可以析出部分晶体(流体晶),形成高速上升的多相流体流。这种流体流可以利用蛇绿岩侵位过程中产生的构造裂隙(图5c),反过来也润滑构造界面,使蛇绿岩侵位过程更容易。这可能是铬铁矿体的空间展布受断裂构造控制(张浩勇等,1996;江万等,2014)的原因。这样的解释也有利于蛇绿岩侵位之前大洋岩石圈板块运动加速的认识(Agard et al., 2007)。

蛇绿岩侵位之后,再次出现大洋岩石圈的高度水平大大低于大陆的情况,因而大洋岩石圈继续向大陆俯冲,直到大洋关闭(图5d)。此后,印度被动大陆边缘的沉积岩系仰冲到蛇绿岩地体之上,而岩石圈主体部分则继续向亚洲大陆俯冲。显然,这种解释与梁风华等(2011)类似,但有明显区别,因为梁风华等(2011)认为蛇绿岩侵位过程中经历过早期由北而南仰冲和晚期由南而北倒转推覆两期构造运动。但是,本文提出的模型更容易解释蛇绿岩侵位和冈底斯带在蛇绿岩侵位后再次出现大规模弧岩浆活动的机制。

6 结 论

雅鲁藏布江蛇绿岩带的侵位机制是长期没有得到解决的重要科学问题,并制约了与其相关的其他科学问题的阐明。本文回顾了雅鲁藏布江蛇绿岩带的主要地质特征,玻安岩问题和强还原晶体群,主要得出了以下认识。

(1)雅鲁藏布江蛇绿岩带是新特提斯洋巨型缝合带的标志之一,如此巨大规模的缝合带必然与大洋消亡和大陆碰撞联系在一起。据此,雅鲁藏布江蛇绿岩更可能是MOR型而不是SSZ型。

(2)前人报道的玻安岩缺乏充分的证据,建议不匆忙将雅鲁藏布江的某些蛇绿岩归属为SSZ蛇绿岩。

(3)强还原晶体群的发现及其形成条件的研究为蛇绿岩的构造属性增添了新的约束,表明蛇绿岩的侵位可能与大规模流体活动有关。

致谢:感谢杨经绥院士提供了一个认识蛇绿岩的机会。野外地质调查和论文撰写期间得到江秀敏、刘晓、李重等帮助,在此表示感谢!

References

- Acharyya S K. 2007. Collisional emplacement history of the Naga–Andaman ophiolites and the position of the eastern Indian suture[J]. *J. Asian Earth Sci.*, 29(2/3): 229–242.
- Agard P, Jolivet L, Vrielynck B, Burov E, Monié P. 2007. Plate acceleration: The obduction trigger? [J]. *Earth and Planetary Science Letters*, 258: 428–441.
- Brett R C, Russell J K, Andrews G D M, Jones T J. 2015. The ascent of kimberlite: Insights from olivine[J]. *Earth and Planetary Science Letters*, 424: 119–131.
- Brown R J, Manya S, Buisman I, Fontana G, Field M, Mac Niocaill C, Sparks R S J, Stuart F M. 2012. Eruption of kimberlite magmas: Physical volcanology, geomorphology and age of the youngest kimberlitic volcanoes known on earth (the Upper Pleistocene/Holocene Igwisi Hills volcanoes, Tanzania) [J]. *Bull. Volcanol*, 74: 1621–1643.
- Cooper L B, Plank T A, Arculus R J, Hauri E H, Hall P S, Parman S W. 2010. High–Ca boninites from the active Tonga arc[J]. *J. Geophys. Res.*, B115.
- Dai J G, Wang C S, Polat A, Santosh M, Li Y L, Ge Y K. 2013. Rapid forearc spreading between 130 and 120 Ma: Evidence from geochronology and geochemistry of the Xigaze ophiolite, southern Tibet[J]. *Lithos*, 172–173: 1–16.
- Dilek Y. 2003. Ophiolite concept and its evolution[J]. *Geological Society of America, Special Paper* 373: 1–16.
- Duret T, Agard P, Yamato P, Ducassou C, Burov E B, Gerya T V. 2016. Thermo–mechanical modeling of the obduction process based on the Oman Ophiolite case[J]. *Gondwana Research*, 32: 1–10.
- Filiberto J, Dasgupta R. 2011. Fe^{2+} –Mg partitioning between olivine and basaltic melts: Applications to genesis of olivine–phyric shergottites and conditions of melting in the Martian interior[J]. *Earth and Planetary Science Letters*, 304: 527–537.
- González–Jiménez J M, Griffin W L, Gervilla F, Proenza J A, O'Reilly S Y, Pearson N J. 2014a. Chromitites in ophiolites: How, where, when, why? Part I. A review and new ideas on the origin and significance of platinum–group minerals[J]. *Lithos*, 189: 127–139.
- González–Jiménez J M, Griffin W L, Proenza J A, Gervilla F, O'Reilly S Y, Akbulut M, Pearson N J, Arai S[J]. 2014b. Chromitites in ophiolites: How, where, when, why? Part II. The crystallization of chromitites[J]. *Lithos.*, 189: 140–158.
- Grant T B, Harlov D E, Rhede D. 2016. Experimental formation of pyroxenite veins by reactions between olivine and Si, Al, Ca, Na, and Cl–rich fluids at 800 °C and 800 MPa: Implications for fluid metasomatism in the mantle wedge[J]. *American Mineralogist*, 101: 808–818.
- Griffin W L, Afonso J C, Belousova E A, Gain S E, Gong X H, González–Jiménez J M, Howell D, Huang J X, McGowan N, Pearson N J, Satsukawa T, Shi R, Williams P, Xiong Q, Yang J S, Zhang M, O'Reilly S Y. 2016. Mantle recycling: Transition zone metamorphism of Tibetan ophiolitic peridotites and its tectonic implications[J]. *Journal of Petrology*, 57(4): 655–684.
- Hébert R, Bezard R, Guilmette C, Dostal J, Wang C S, Liu Z F. 2012. The Indus–Yarlung Zangbo ophiolites from Nanga Parbat to Namche Barwa syntaxes, southern Tibet: First synthesis of petrology, geochemistry, and geochronology with incidences on geodynamic reconstructions of Neo–Tethys[J]. *Gondwana Research*, 22(2): 377–397.
- Hildreth W. 2007. Quaternary magmatism in the Cascades: Geological perspectives[J]. *USGS Professional Paper*, 1744, 1–125
- Kanayama K, Umino S, Ishizuka O. 2012. Eocene volcanism during the incipient stage of Izu–Ogasawara arc: Geology and petrology of the Mukojima Island Group, the Ogasawara Islands[J]. *The Island Arc*, 21: 288–316.
- Kelley S P, Wartho J A. 2000. Rapid kimberlite ascent and the significance of Ar–Ar ages in xenolith phlogopites[J]. *Science*, 289: 609–611.
- Litasov K D, Shatskiy A, Ohtani E. 2014. Melting and subsolidus phase relations in peridotite and eclogite systems with reduced C–O–H fluid at 3–16 GPa[J]. *Earth and Planetary Science Letters*, 391: 87–99.
- Majumdar A S, Hövelmann J, Vollmer C, Berndt J, Mondal S K, Putnis A. 2016. Formation of Mg–rich olivine pseudomorphs in serpentinized dunite from the Mesoproterozoic Nuasahi massif, eastern India: Insights into the evolution of fluid composition at the mineral–fluid interface[J]. *Journal of Petrology*, 57(1): 3–26.
- Rutherford M J. 2008. Magma ascent rates[J]. *Reviews in Mineralogy and Geochemistry*, 69: 241–271.
- Tang Juxing, Wang Liqiang, Wang Guozhi, Lang Xinghai, Wang Xiongwu, Zheng Wenbao, Gao Yiming, Ying Lijuan, Huang Yong, Luo Maocheng, Chen Wei, Tang Xiaoqian, Zhang Juncheng, Leng Qiufeng, Li Na, Zhao Fufeng, Zhang Tingtingting, Yao Xiaofeng, Kang Haoran, Cai Huihui, Yang Chao, Duan Jilin, Lin Xin, Tang Pan. 2017. Lithochemical and chronological test dataset of Mesozoic and Cenozoic porphyry metallogenic system in the eastern section of the Gangdise Metallogenic Belt, Tibet[J]. *Geology in China*, 44(S1): 64–71(in Chinese with English abstract).
- Yajima K and Fujimaki H. 2001. High–Ca and low–Ca boninites from Chichijima, Bonin (Ogasawara) archipelago, Jap[J]. *Magazine Min. Petrol. Sci.*, 30: 217–236.
- Zhang Qizhi, Ba Dengzhu, Xiong Fahui, Yang Jingsui. 2017. Discussion on genesis process and deep prospecting breakthrough of Luobusa chromitite, Tibet[J]. *Geology in China*, 44(2): 224–241 (in Chinese with English abstract).
- Zhou M F, 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(7): 678-686.

附中文参考文献

- 白文吉, 杨经绥, 方青松, 任玉峰, 颜秉刚, 戎合. 2005. 西藏罗布莎蛇绿岩的Os-Ir-Ru合金及其中玻安岩质包体的研究[J]. *地质学报*, 79(6): 814-822.
- 鲍佩声, 苏犁, 王军, 翟国庆. 2015. 雅鲁藏布江蛇绿岩[M]. 北京: 地质出版社, 267.
- 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*, 8(12): 1741-1761.
- 陈根文, 夏斌, 钟志洪, 王国强, 王核, 赵太平, 汪劲草, 张莉, 漆亮, 李荪蓉. 2003. 西藏得几蛇绿岩体中玻安岩的地球化学特征及其地质意义[J]. *矿物学报*, 23(1): 91-96.
- 方青松, 白文吉. 1981. 西藏首次发现含金刚石的阿尔卑斯型岩体[J]. *地质论评*, 27(5): 455-457.
- 郭铁鹰, 梁定益, 张益智, 等. 1991. 西藏阿里地质[M]. 武汉: 中国地质大学出版社, 464.
- 江万. 2014. 西藏罗布莎铬铁矿总结研究[R]. 中国地质科学院地质力学研究所, 146.
- 康志强, 付文春, 田光昊. 2015. 西藏桑日县地区中生代火山岩地层序——基于锆石U-Pb年龄及地球化学数据[J]. *地质通报*, 34(2/3): 318-327.
- 李重. 2018. 西藏罗布莎铬铁矿包壳纯橄岩特征对流体扩散的指示意义[D]. 北京: 中国地质大学(北京) 硕士学位论文, 60.
- 梁风华, 许志琴, 巴登珠, 徐向珍, 刘飞, 熊发挥, 贾毅. 2011. 西藏罗布莎—泽当蛇绿岩体的构造产出与侵位机制探讨[J]. *岩石学报*, 27(11): 3255-3268.
- 罗照华, 卢欣祥, 陈必河, 等. 2009. 透岩浆流体成矿作用导论[M]. 北京: 地质出版社, 177.
- 罗照华, 江秀敏, 刘晓, 李重, 吴宗昌, 井文超. 2019. 蛇绿岩型铬铁矿床包壳纯橄岩中的流体过程印记: 来自西藏雅鲁藏布江缝合带罗布莎和泽当岩体的地质学、岩石学和橄榄石晶体化学证据[J]. *地学前缘*, 26(1): 272-285.
- 罗照华. 2017. 为什么火成岩地球化学需要地质学岩石学和矿物学证据约束? [J]. *地球科学与环境学报*, 39(3): 326-343.
- 莫宣学, 董国臣, 赵志丹, 周肃, 王亮亮, 邱瑞照, 张风琴. 2005. 西藏冈底斯带花岗岩的时空分布特征及地壳生长演化信息[J]. *高校地质学报*, 11(3): 281-290.
- 潘桂棠, 莫宣学, 侯增谦, 朱弟成, 王立全, 李光明, 赵志丹, 耿全如, 廖忠礼. 2006. 冈底斯造山带的时空结构及演化[J]. *岩石学报*, 22(3): 521-533.
- 邱瑞照, 蔡志勇, 李金发. 2004. 青藏高原西部蛇绿岩中玻安岩(boninite)及其地质意义[J]. *现代地质*, 18(3): 305-308.
- 邱瑞照. 2002. 青藏高原西部火成岩与新特提斯构造演化[D]. 北京: 中国地质大学(北京), 99.
- 唐菊兴, 王立强, 王国芝, 郎兴海, 汪雄武, 郑文宝, 高一鸣, 应立娟, 黄勇, 罗茂澄, 陈伟, 唐晓倩, 张俊成, 冷秋锋, 李娜, 赵甫峰, 张婷婷, 姚晓峰, 康浩然, 蔡惠慧, 杨超, 段吉琳, 林鑫, 唐攀. 2017. 西藏冈底斯成矿带东段中、新生代斑岩成矿系统岩石地球化学与年代学测试数据集[J]. *中国地质*, 44(S1): 64-71.
- 王成善, 李亚林, 刘志飞, 李祥辉, 唐菊兴, Hebert R J, Dubois C, Varfalv Y V, Huo T F. 2005. 雅鲁藏布江蛇绿岩再研究: 从地质调查到矿物记录[J]. *地质学报*, 79(3): 323-330.
- 吴福元, 刘传周, 张亮亮, 张畅, 王建刚, 纪伟强, 刘小驰. 2014. 雅鲁藏布蛇绿岩——事实与臆想[J]. *岩石学报*, 30(2): 293-325.
- 谢冰晶, 周肃, 谢国刚, 田明中, 廖忠礼. 2013. 西藏冈底斯中段孔隆至丁仁勒地区林子宗群火山岩锆石 SHRIMP 年龄和地球化学特征的区域对比[J]. *岩石学报*, 29(11): 3803-3814.
- 徐向珍, 杨经绥, 巴登珠, 陈松永, 方青松, 白文吉. 2008. 雅鲁藏布江蛇绿岩带的康金拉铬铁矿中发现金刚石[J]. *岩石学报*, 24(7): 1453-1462.
- 杨经绥, 白文吉, 方青松, 孟繁聪, 陈松永, 张仲明, 戎合. 2007. 极地乌拉尔蛇绿岩铬铁矿中发现金刚石和一个异常矿物群[J]. *中国地质*, 34(5): 950-952.
- 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*, 19(3): 263-274.
- 杨经绥, 徐向珍, 李源, 李金阳, 戎合, 巴登珠, 张仲明. 2011. 西藏雅鲁藏布江缝合带的普兰地幔橄辉岩中发现金刚石及其意义[J]. *岩石学报*, 27(11): 3207-3222.
- 杨经绥, 徐向珍, 戎合, 牛晓露. 2013. 蛇绿岩地幔橄辉岩中的深部矿物: 发现与研究进展[J]. *矿物岩石地球化学通报*, 32(2): 159-170.
- 杨经绥, 许志琴, 段向东, 李静, 熊发挥, 刘钊, 蔡志慧, 李化启. 2012. 缅甸密支那地区发现侏罗纪的SSZ型蛇绿岩[J]. *岩石学报*, 28(6): 1710-1730.
- 杨经绥, 张仲明, 李天福, 任玉峰, 徐向珍, 巴登珠, 白文吉, 方青松, 陈松永, 戎合. 2008. 西藏罗布莎铬铁矿体围岩方辉橄辉岩中的异常矿物[J]. *岩石学报*, 24(7): 1545-1552.
- 张浩勇, 巴登珠, 郭铁鹰, 莫宣学, 薛君治, 阮桂甫, 王志宜. 1996. 西藏自治区曲松县罗布莎铬铁矿床研究[M]. 拉萨: 西藏人民出版社, 181.
- 张旗. 2015. 日喀则蛇绿岩研究中的几个问题[J]. *岩石学报*, 31(1): 37-46.
- 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.
- 郑来林, 耿全如, 欧春生, 王小伟. 2003. 藏东南迦巴瓦地区雅鲁藏布江蛇绿混杂岩中玻安岩的地球化学特征和地质意义[J]. *地质通报*, 22(11/12): 908-911.