

中国蛇绿岩清理

——兼论蛇绿岩研究的新思路

张旗¹⁾, 任纪舜²⁾, 赵磊²⁾, 焦守涛^{3,4)}, 王跃⁵⁾, 王振²⁾

1) 中国科学院地质与地球物理研究所, 北京, 100029;

2) 中国地质科学院地质研究所, 北京, 100037; 3) 中国地质调查局发展研究中心, 北京, 100037;

4) 自然资源部地质信息工程技术创新中心, 北京, 100037;

5) 中国地质大学(北京)地球科学与资源学院, 北京, 100083



内容提要: 中国蛇绿岩研究取得了很大的成绩,也存在许多问题。文中简要评述了日喀则、三江、青海、北秦岭、中亚造山带、东北以及中国南方蛇绿岩的若干问题,指出中国划归入蛇绿岩的地质体(组合)太多了,把许多可能不是蛇绿岩的地质体(组合)也当成了蛇绿岩。当前需要做的是去伪存真,对中国蛇绿岩进行一次认真的清理。文中指出,地幔橄榄岩无疑是蛇绿岩最重要的成员,它来自洋壳下。世界上还有另一类来自陆壳下的地幔岩,被称为“造山橄榄岩”。因此,地幔橄榄岩并非蛇绿岩所独有。此外,有越来越多的数据表明,在许多不同的构造背景下都可以出现类似 MORB(大洋中脊玄武岩)地球化学性质的玄武岩,例如洋岛、岛弧、大陆溢流玄武岩、板内玄武岩以及太古宙(拉斑玄武岩和科马提岩)等。因此,不能简单地认为一个地区只要有了地幔橄榄岩和 MORB 就是蛇绿岩了。文中回顾了蛇绿岩研究的两个发展阶段:前一个阶段以 1972 年的彭罗斯会议为标志,开启了蛇绿岩研究的新篇章,当时的学术界主要关注蛇绿岩的岩石学和地球化学问题,关心蛇绿岩的岩石组合。新的阶段是从 20 世纪后期逐渐发展起来的,于近期取得了突出的进展。笔者等强调指出,蛇绿岩(野外出露更多的是蛇绿混杂岩)即蛇绿岩套,它不仅包括一个特定的岩石组合,还包括深海沉积。文中肯定了中外学术界在蛇绿岩构造研究方面获得的许多新发现、新思路和新进展。此外,大数据和地球物理方法也是非常有意义的。蛇绿岩是一个复杂体系,不确定的问题相当多。它们的解决需要构造地质学家、地层学家、古生物学家、岩石学家、地球化学家、年代学家以及地球物理学家的共同努力。

关键词: 中国;蛇绿岩;填图;大数据;地球物理

中国蛇绿岩研究已经积累了相当多的资料,笔者等认为,当前中国蛇绿岩研究的一个重要问题可能是:中国划归入蛇绿岩的地质体(组合)太多了,把一些可能不是蛇绿岩的地质体(组合)当成了蛇绿岩,为此,笔者等建议对中国蛇绿岩作一次清理,去伪存真,捋清中国蛇绿岩的面貌,这对于推进蛇绿岩的研究和中国大地构造的研究都是非常有益的。

如何清理,按照什么标志? 问题很多,学术界分歧较大。其中最关键的可能是蛇绿岩的定义,这里的代表性见解主要有两种:一种坚持 1972 年彭罗斯会议的定义仍然有效(张旗, 2014, 2021a);另一种

认可 Dilek (2003) 提出的蛇绿岩新见解(张进等, 2012)。

蛇绿岩不同于花岗岩、辉长岩、橄榄岩,蛇绿岩不是一个岩石名称而是一套岩石组合的术语,蛇绿岩即蛇绿岩套。蛇绿岩套不单包括火成岩部分(地幔橄榄岩、堆晶岩、辉长岩、辉绿岩、玄武岩等),还包括沉积岩(深海远洋沉积),并多以蛇绿混杂岩形式产出。早先的研究,关注蛇绿岩套的岩石组合比较多,关注蛇绿岩套的沉积岩和混杂岩较少,导致的结果是夸大了蛇绿岩的数量,把一些可能不是蛇绿岩的地质体(组合)也包括进来了。例如有不少人

注:本文为中国地质调查局地质调查项目(编号:DD20190358、DD20221646)、中国科学院地质与地球物理研究所岩石圈演化国家重点实验室项目(编号:81300001)、国家重点研发计划项目(编号:2018YFC1505501、2016YFC0600510)和国家自然科学基金资助项目(编号:41872253)的成果。

收稿日期:2021-11-11;改回日期:2022-03-02;网络首发:2022-03-20;责任编辑:章雨旭。Doi: 10.16509/j.georeview.2022.03.025

作者简介:张旗,男,1937年生,研究员,主要从事岩石学和地球化学研究;Email: zq1937@126.com。通讯作者:任纪舜,男,1935年生,中国科学院院士,主要从事大地构造学研究;Email: renjishun@cags.ac.cn。

以为,有了地幔橄榄岩和 MORB 这两条标准就是蛇绿岩了。殊不知地幔橄榄岩有来自洋壳下的还有来自陆壳下的;MORB 地球化学性质也不是洋中脊玄武岩所特有的,许多大陆溢流玄武岩、大陆玄武岩也具有 N-MORB 的特征(张旗,2021a)。由于陆壳下的地幔和洋壳下的地幔很难区分,而 MORB 并非只产于洋中脊环境,因此,仅重视这两个标准就是不够的了。在这种情况下,多考虑深海沉积就是必须的了。

笔者等认为,蛇绿岩有各种各样不同的见解很正常。但是,蛇绿岩代表消失的洋盆,可能是蛇绿岩最重要的含义,从这个标志出发来看待中国的蛇绿岩问题,恢复在中国大陆上已经消失的洋盆,可能是我们最需要关注的问题。

文中还结合蛇绿岩研究讨论了蛇绿岩研究的新进展,指出蛇绿岩本质上是一个构造问题而非单纯的岩石和地球化学问题。蛇绿岩研究经历了两个阶段,笔者等回顾了蛇绿岩研究取得的许多新进展,指出大数据和地球物理方法在蛇绿岩研究中具有重要的作用。

1 中国蛇绿岩研究简要评述

1.1 日喀则蛇绿岩

日喀则蛇绿岩是中国保存最好的蛇绿岩,也是研究程度最高的。许多人认为是蛇绿岩仰冲的结果。日喀则蛇绿岩不仅岩石组合保存好,还有非常典型的深海沉积和混杂岩(蛇绿混杂岩,张旗,

2015)。有人以为,既然日喀则是保存很好的蛇绿岩,那么,延伸数千米的整个日喀则(喜马拉雅)蛇绿岩带都是蛇绿岩了,情况可能并不是这样。据笔者等了解,日喀则蛇绿岩可以分为东、中、西三段(图 1),典型的蛇绿岩出露于以日喀则为中心的中段,西段阿里地区的蛇绿岩可能是有问题的,东段罗布莎地区也都不是蛇绿岩(张旗和周国庆,2001)。西段出露规模巨大的地幔橄榄岩,可是从岩石组合、混杂岩几个方面考虑,它与日喀则蛇绿岩是有一定区别的,推测可能是陆壳下挤上来的,并非典型的蛇绿岩的成员(张旗和周国庆,2001)。其次,日喀则蛇绿岩还有一个著名的不同于蛇绿岩定义的“席状岩床群”,是法国人提出来的(Nicolas et al., 1981; Girardeau et al., 1985; Girardeau and Mercier, 1988)。它是岩床还是熔岩流?这是附着在日喀则蛇绿岩上的一个疮疤,因为,蛇绿岩中在玄武岩层之下不可能有岩床群这个单元,个别的岩床侵入是可能的,但是,形成厚度近 1 km 的岩床群是不可能的。因此,熔岩流是可能的,岩床群是不合理的。再次,日喀则存在席状岩墙群,岩墙群的规模,与上下岩石的关系一直不清楚。日喀则白朗地区有玻安岩,似属洋内弧环境,不远处的大竹卡又具弧后特征,二者是什么关系?也是一个需要解决的问题。

1.2 三江特提斯蛇绿岩

三江地区文献报道的蛇绿岩达 6 条之多:昌宁—孟连、金沙江、哀牢山、甘孜—理塘、澜沧江、高黎贡山等。哀牢山蛇绿岩带在双沟出露最好,由于

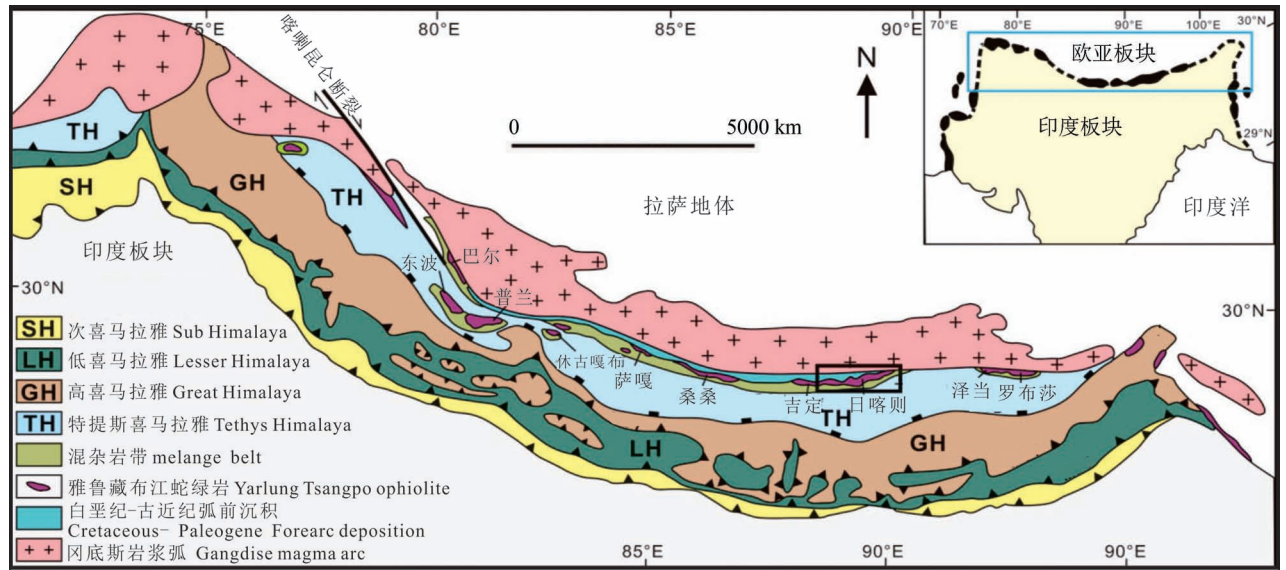


图 1 雅鲁藏布江蛇绿岩带概略构造图(据杨胜标等, 2017)

Fig. 1 Sketch of the tectonic map of the Yarlung Zangpo ophiolite zone (after Yang Shengbiao et al., 2017&)

笔者等对双沟蛇绿岩的否定(张旗, 2021a)可能波及整个哀牢山构造带,使该带可能不具有一个成熟洋盆的记录。甘孜—理塘蛇绿岩虽然有混杂岩,但可能主要是后期的构造混杂而非蛇绿混杂岩(王连城等, 1985),这个问题还需要今后深入研究。澜沧江带问题最多(包括云南的雅口、半坡等, Zhai Qingguo et al., 2019),迄今为止,有参考价值的资料很少。

高黎贡山构造带位于云南西部,东为保山地块,西为腾冲地块,两个地块古生代发展史不同(图2),因此,高黎贡山是一条重要的构造界线,在这个带内产出蛇绿岩是有可能的。在高黎贡山的南段潞西地区的三台山出露有十几个地幔橄榄岩块体,大多数强烈蛇纹石化了,构造侵位于中生界浅变质的砂岩、千枚岩中(夹厚约几厘米的泥砂质硅质岩)。三台山除了地幔橄榄岩外找不到任何与蛇绿岩有关的证据,也见不到深海沉积与混杂堆积(张旗等, 1992, 2020a)。

三江地区最发育的当属昌宁—孟连蛇绿岩带。铜厂街蛇绿混杂岩为该带的代表,此外还有金沙江带混杂岩、深海沉积及洋岛玄武岩等(张之孟和金蒙, 1979; 张旗等, 1985, 1992; 吴浩若, 1993; 钟大赉, 1998)。因此,按照目前的资料,三江地区可能只有昌宁—孟连和金沙江的蛇绿岩带比较可靠。三江地区最近有不少早古生代蛇绿岩的报道,于是人们开始讨论所谓原特提斯蛇绿岩问题。对此,笔者等认为还须进一步研究,以确定其真伪。

1.3 青海蛇绿岩

最近,关于青海蛇绿岩的报道比较多(边千韬等, 1997; Konstantinovskai et al., 2003; Bian Qiantao et al., 2004; Guo Anlin et al., 2007; Li Wangye et al., 2007; Jia Lihui et al., 2018; Li Dian et al., 2019; Yu Miao et al., 2020; Tan Jun et al., 2020; 王秉璋等, 2000; Li Ruibao et al., 2021),如阿尔金、东昆仑、可可西里、阿尼玛卿、柴北缘、南祁连、拉脊山等(上述有些是同一条带的不同称呼)。笔者等早先评论指出,清水泉、柴北缘不是蛇绿岩(张旗和周国庆, 2001),最近发现,可可西里、阿尼玛卿存在的问题也比较多。柴北缘蛇绿岩经历了超高压变质作用,国外学者一般不认为这是一条蛇绿岩带,最近也得到了国内若干学者的响应(Bodinier and Godard, 2014; Xiong Qing et al., 2015; Zheng Jianping et al., 2019)。这条带从柴北缘延伸到北秦岭,连带上述与超高压变质作用有关的镁铁—超

镁铁岩可能都不是蛇绿岩,而属于造山橄榄岩(Bodinier and Godard, 2014; 张旗等, 2020a)。

青海蛇绿岩研究的程度已经有很大的提高,但是,如上所述,有些蛇绿岩还存在一些问题。文献报道的个别蛇绿岩,仅有辉长岩和玄武岩出露,围岩主要是浅海相的碎屑岩,这样的情况是很难确定它是否是蛇绿岩的。此外,有些报道的蛇绿混杂岩可能主要是后期强烈的构造混杂而非蛇绿岩混杂。一般来说,与超高压变质作用相伴的镁铁—超镁铁岩可能不是蛇绿岩,显然,所谓深俯冲作用也是可疑的(任纪舜等, 2019)。还有晚古生代和早古生代蛇绿岩的问题,如同三江地区一样,我们必须先找到一个早古生代蛇绿岩的实体,才能继续这样的讨论,而不是仅凭几个年龄数据。

1.4 中亚造山带蛇绿岩

中亚造山带位于西伯利亚和华北、塔里木陆块之间,从元古宙一直持续到晚古生代,其间有蛇绿岩是毫无疑问的。中亚造山带早古生代蛇绿岩没有问题,问题出在晚古生代,焦点是洋盆持续的时间究竟有多久? 蛇绿岩经历了什么? 经过多年的研究,不断地分析、探讨、对比,最后筛选出两种主要的学术见解:第一种主张洋盆是早石炭世以前甚至更早闭合的;第二种主张洋盆闭合在早二叠世以后甚至三叠纪。按照波普尔的理论,上述两种理论都是试探性理论,属于猜测,猜想和假说(卡尔·波普尔, 1963)。关键是,如果洋盆已经闭合,那闭合之后出现的镁铁—超镁铁岩以及 MORB 等等,一般就不属于蛇绿岩了(张继恩等, 2021a, b)。因此,一个镁铁—超镁铁岩是否蛇绿岩,有时就不是只研究蛇绿岩岩石组合就能够解决的问题,而是需要多方面证据的支持,地质背景和地质演化史是其中尤其重要的一个方面(任纪舜等, 2019),忽略了这个要素,很多问题就搞不清楚了。因为,蛇绿岩说到底主要是一个构造问题而非单纯的岩石地化问题。

中亚造山带地幔橄榄岩非常发育,它们统统是来自洋壳下的吗? 有没有来自陆壳下的? 如果有,那是造山橄榄岩而非蛇绿岩(张旗等, 2020a),贺根山可能就存在这个问题(详见后述)。此外,该区还有大量关于岛弧岩浆岩的地球化学研究的报道,问题是:具有岛弧地球化学特征的岩石不一定是产于岛弧,来自陆壳下的岩浆岩(火山岩和侵入岩)也同样可以具有岛弧的许多特征(例如 $Th > Ta$)。因为,岛弧的特征主要来源于有陆壳物质的加入,夏林圪等(2008, 2009)对中亚造山带石炭纪—二叠纪火山

岩已做过深入的研究,认为它们并不是岛弧火山岩,而是古亚洲洋闭合后伸展环境下形成的。

1.5 北秦岭蛇绿岩

北秦岭位于华北地台与扬子地台之间,其间可能存在一个洋盆(任纪舜,2004;任纪舜等,2019)。但是,可能出现与是否出现是两回事,就像三江地区高黎贡山构造带一样。北秦岭蛇绿岩有两大支柱:丹凤群和松树沟地幔橄榄岩。许多人相信丹凤群相当于蛇绿岩,实际上问题相当多。从岩石学的角度,丹凤群更像一套岛弧系列的岩石组合(张旗和周国庆,2001)。张旗和周国庆(2001)赞同松树沟地幔橄榄岩等是蛇绿岩,但张旗等(2020a)修正了认识,认为松树沟地幔橄榄岩更像造山橄榄岩而非蛇绿岩。

北秦岭可能属于蛇绿岩的是被学术界忽视的宽坪群蛇绿混杂岩(张宗清和张旗,1995;张旗和周国庆,2001)。不赞成宽坪群是蛇绿岩的理由很多,一个重要的原因可能是宽坪群没有地幔橄榄岩出露。据笔者等考察,在宽坪群的北宽坪地区,原广东坪组即有明显的混杂岩特征(张宗清和张旗,1995;张旗和周国庆,2001)。在北宽坪地区,混杂岩的基质主要由绿片岩相岩石组成,褶皱十分强烈,类似于铜厂街蛇绿混杂岩中基质的组成及构造特征。绿片岩主要由钠长阳起片岩、绿泥钠长阳起片岩、绿帘钠长阳起片岩和绿泥绿帘阳起片岩等组成,恢复的原岩相当于基性岩(玄武岩或辉长岩),地球化学成分相当

于 N-MORB(张宗清和张旗,1995;张旗和周国庆,2001)。

宽坪群是否是蛇绿混杂岩的关键在于混杂岩的基质中有没有蛇绿岩的成员。从图 2 看,宽坪群的格局为云母石英片岩和绿片岩—斜长角闪岩为主的杂乱无章分布以及大量的大理岩作为块体产于其中,这显然是混杂堆积的表现。图 2 中灰岩块体很多,很大,大多数位于山顶部,其底部可见与绿片岩及绢云母石英片岩构造接触,接触处绿片岩强烈挤压褶皱(张宗清和张旗,1995;张旗和周国庆,2001)。

存在地幔橄榄岩固然是判断蛇绿岩的一个有力证据,但是,地幔橄榄岩是否蛇绿岩还需要研究。而蛇绿混杂岩这个证据,比有没有地幔橄榄岩更重要。毕竟,把洋壳物质与陆壳物质混杂在一起,提供了洋盆闭合与大陆碰撞的事实。

1.6 中国南方蛇绿岩

中国南方根据目前的资料,仅赣东北蛇绿岩可以确定,其余均存在问题。如安徽、福建、广西等地。安徽歙县伏川蛇绿岩,它可能更像一个造山橄榄岩而非蛇绿岩(张旗和周国庆,2001;张旗,2014;张旗等,2020a)。因为,除地幔橄榄岩外,伏川缺少与地幔橄榄岩配套的所有组合。例如,文献中报道的伏川辉长岩,并不是一个岩石单元,火山岩是中酸性的多而基性的少,深海沉积与混杂堆积问题也比较多(张旗和周国庆,2001;张旗,2014)。伏川蛇绿岩争

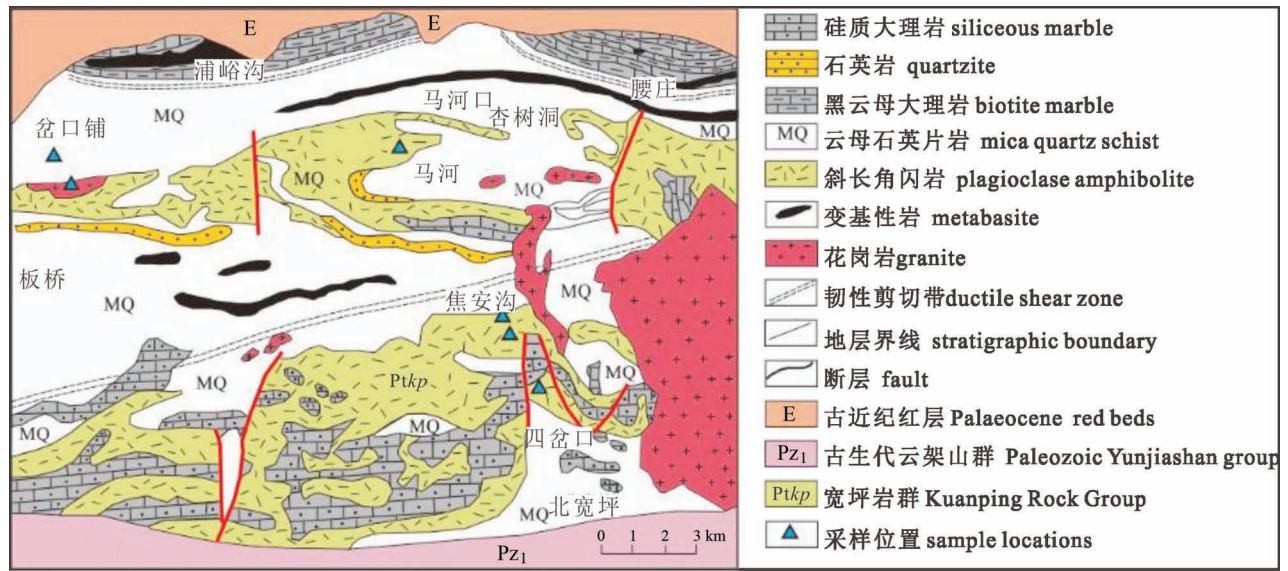


图 2 陕西商州北宽坪—板桥一带地质图(张寿广等,1991)

Fig. 2 Schematic geological map of Northern Kuanping and Banqiao area in the Shangzhou City, Shaanxi Province (after Zhang Shouguang et al. , 1991&)

论多年了,建议是否先填一个图,我们再来讨论它是否蛇绿岩的问题。右江地区有一个八布蛇绿岩(钟大赉等,1988),是笔者早先认可的。它产于板内环境,应当不是蛇绿岩,而是来自陆壳下的造山橄榄岩。

1.7 东北东部的蛇绿岩

松辽盆地之东,东北东部的蛇绿岩研究难度较大,研究程度较低。需指出的是,从地质背景看,把黑龙江群当成蛇绿岩,在佳木斯地块西侧划出一个中生代缝合带(刘永江等,2019),是不可能的。饶河镁铁—超镁铁岩也不是蛇绿岩,是典型的夏威夷式的海山组合(张旗和周国庆,2001;Sun Mingdao et al., 2018)。

2 讨论

2.1 蛇绿岩的定义

这是一个老生常谈的话题了,仍然存在许多争论(Dilek, 2003; Dilek and Furnes, 2011; 史仁灯, 2005; 张进等, 2012; 张旗, 2014, 2021a)。笔者等认为,1972年彭罗斯会议关于蛇绿岩的定义基本上仍然是适用的(Anonymous, 1972)。据赵宗溥(1984)介绍,早在1927年,斯泰因曼(Steinmann)即开启了用“蛇绿岩”一词代表主要由蛇纹石化橄榄岩和少量辉长岩、玄武岩组成的岩石群体,并强调它与深海沉积物,如放射虫隧石和黏土,紧密共生。1955年,赫斯(Hess)建议将蛇纹岩、基性火山岩和隧石岩的组合称为斯泰因曼的“三位一体”,表示其紧密的共生关系(赵宗溥,1984)。1972年的彭罗斯会议以特罗斯蛇绿岩为代表,具体化了斯泰因曼的“三位一体”概念。斯泰因曼把蛇绿岩从一个岩石的术语扩展成为一个具有一定构造含义的岩石组合的术语。他认为,超基性岩(地幔橄榄岩)是蛇绿岩最重要的成员,其次为辉长岩、辉绿岩、细碧岩,或苏长岩和有关岩石,包括深海沉积物(如燧石、放射虫硅质岩、远海黏土和含伊丁虫的石灰岩等)。

蛇绿岩组合有它特有的层序,如彭罗斯会议的总结。但是,多年来的研究发现,蛇绿岩的这个组合并不是唯一的,许多其他的构造背景产出的镁铁—超镁铁岩也可以有类似的组合,例如夏威夷海山。据Borgia等(1992)研究,夏威夷火山岩可能是以火山岩片叠置在洋壳之上的。他们将夏威夷火山岩剖面从上向下分成3个带,即:表层带、过渡带和深部带。表层带(SRZ)深度0~2 km,由熔岩流、岩墙和张性破裂带组成;过渡带(IRZ)厚2~5 km,由玄武

岩岩墙向下变为席状岩墙杂岩组成,变质可达绿片岩相,由于侵蚀作用,IRZ岩墙带已经在Maui、Oahu、Kauai等火山岛出现。深部带(DRZ)深5~10 km,根据异常高的重力异常和P波速度推测,深部带是由苦橄岩、辉长岩类的镁铁—超镁铁岩构成的(Borgia et al., 1992; 张旗和周国庆,2001)。这个剖面是否与蛇绿岩的上部剖面有点类似?黑龙江饶河就有这样一个剖面,有人认为饶河剖面是蛇绿岩,其实它是一个出露于陆壳上的典型的洋岛组合:下部为镁铁—超镁铁质的堆晶岩、向上为辉长岩,也是堆晶岩,再向上为辉绿岩和玄武岩,顶部为含放射虫硅质岩(张旗和周国庆,2001)。

除了洋岛以外,造山橄榄岩也有这样的层序,例如笔者等在四川义敦依科—叶青地区见到的一个堆晶岩剖面,从下向上有橄榄岩、单辉橄榄岩、辉石岩和辉长岩等,但未见与其相伴的玄武岩。有辉绿岩墙群出露,但侵入于围岩三叠纪火山沉积岩中,地球化学显示为OIB的特征(张旗等,1990, 1992; 张旗和周国庆,2001; 张旗,2014)。

因此,作为一个岩石组合的术语,蛇绿岩不应当仅限于火成岩本身,还应当包括沉积岩和混杂岩以及变质岩,它应当具有一定的构造含义。斯泰因曼的“三位一体”是比较确切地反映了蛇绿岩套这个概念的。与蛇绿岩伴生的深海沉积不是可有可无,而是须臾不可缺少的。与浅海沉积或陆相沉积伴生的地幔橄榄岩,它可能是蛇绿岩(地幔橄榄岩不是原地的,是从外地推覆过来的),也可能不是蛇绿岩(地幔橄榄岩是原地的)。不是蛇绿岩是什么?是大陆岩石圈地幔(即造山橄榄岩)。

2.2 蛇绿岩与造山橄榄岩

早先认为,地幔橄榄岩是蛇绿岩所独有的,于是见到地幔橄榄岩就以为是蛇绿岩了。这个问题国外研究比较多(主要是欧洲的学者),还提出了几种不同的认识,如陆壳亚类(Nicolas and Jackson, 1972)、造山橄榄岩(Menzies, 1984; Lorand et al., 2000)、山根带杂岩(Dentex, 1969)和地幔核杂岩(Doblas and Oyarzun, 1989)等。随着对这种类型岩体研究的日益深入,上述许多术语被淘汰了,仅“造山橄榄岩(orogenic peridotite)”被大多数学者所接受,其含义也逐渐明确:它不是蛇绿岩,虽然在某些地方保存了一些大洋地壳曾经出现的迹象,表明该类橄榄岩与蛇绿岩之间可能存在某种过渡的特征(张旗等, 2020a)。笔者等在三江地区考察时也发现过这种类型的橄榄岩,是产于陆壳下的,由于该类型地幔橄榄

岩在川西义敦地区相当发育,遂称其为“义敦型”(张旗等,1987,1990,1992),后来鉴于国际上“造山橄榄岩”这个术语的流行,我们也赞同采用这个术语(张旗等,2020a)。

研究表明,造山橄榄岩的形成大体经历了两个阶段:①大陆伸展减薄形成裂谷或撕裂阶段,陆壳下的地幔橄榄岩挤入;②伸展变为挤压背景,地幔橄榄岩被挤出。有些地幔橄榄岩经历了上述两个阶段(如阿尔卑斯)。如果地壳伸展之后没有转变为挤压,就不存在第二个阶段,例如产于红海的 Zabargad,例如川西的“义敦型”岩体。义敦型岩体是早白垩世的(130 Ma 左右,据张维介绍),围岩主要是三叠纪的浅海相火山沉积岩,不像裂谷背景,只是伸展减薄,剪切拉张撕裂可能是地幔橄榄岩挤出的主要机制。因此,造山橄榄岩并不统统经历过造山阶段,有些可能是裂谷背景的,有些可能是伸展减薄背景的。

造山橄榄岩不是蛇绿岩,虽然在某些地方保存了一些海洋地壳曾经出现的迹象,表明该类橄榄岩与蛇绿岩之间可能存在某种过渡的特征(Nicolas and Jackson, 1972; Ernst, 1978; Nicolas, 1984; Ishiwatari, 1985; Bonatti and Michael, 1989; Snow and Schmidt, 1999; Bodinier et al., 1991; Lorand et al., 2000; Muntener et al., 2005; Bodinier and Godard, 2014)。在岩石组合上它与蛇绿岩有一些类似之处,区别在于蛇绿岩是洋壳组合,而造山橄榄岩是陆壳下的地幔及其部分熔融物的组合(张旗等, 2020b)。例如在阿尔卑斯山有许多橄榄岩出露,露头非常好,如 Val Malenco、Mt Avic、Aosta 山谷、Lanzo, reithorn, Zermatt-Saas、Erro—Tobbio 和利古里亚东部和外部利古里亚的橄榄岩等,许多人认为上述橄榄岩是蛇绿岩(Bodinier et al., 1986; Borghini et al., 2007; Rampone et al., 2008; Piccardo and Gurnieri, 2011)。但是,它们与真正的蛇绿岩不同,主要是缺乏与橄榄岩伴生的玄武岩,它们也不同于经历过高压和超高压变质作用的造山橄榄岩,它们中常有辉长岩、铁辉长岩、具 MORB 的岩墙以及酸性岩的侵入。这些镁铁质岩石被解释为与特提斯西部海洋增生开始相关的胚胎地壳(Bodinier et al., 1986; Kaczmarek and Muntener, 2008)。

又如产于红海中的 Zabargad 岛的橄榄岩也不是蛇绿岩。Zabargad 橄榄岩产于红海(埃及),但与红海的形成无关,而是泛非时期形成的地幔橄榄岩(吴福元等,2014),该岩体的许多特征更加类似于

造山橄榄岩而非蛇绿岩。如以尖晶石(角闪石)二辉橄榄岩为主,角闪石的广泛出现展示经历了反复的地幔和地壳流体的多重交代事件(Dupuy et al., 1991; Agrimier et al., 1993; Piccardo et al., 1993; Brooker et al., 2004),类似于大别饶铍寨橄榄岩的特征(张旗等,1995)。围岩主要是壳源的地壳麻粒岩(而非红海深海沉积),被认为来自陆壳下的大陆岩石圈地幔(Piccardo et al., 1988, 1993; Bonatti, 1990; Dupuy et al., 1991)。

中国也有造山橄榄岩,如安徽饶铍寨岩体,主要由角闪橄榄岩组成,角闪石大多为自形晶,有的互成三连点结构,平行橄榄石和斜方辉石长轴方向生长,角闪石有变形弯曲,波状消光,说明角闪石不是后期进入的,具有交代地幔的特征(张旗等,1995, 2020a; 支霞臣等,2004)。

Bodinier 和 Godard(2014)对造山橄榄岩有一个综述性的评论,他们公布了基于当时所认识的造山橄榄岩的全球分布图,在这个图中,他们把中国的大别、苏鲁、北秦岭、柴达木北缘、阿尔金与超高压变质作用伴生的镁铁—超镁铁岩归入了造山橄榄岩的范畴(张旗等,2020a)。

鉴于蛇绿岩具有重要的构造意义,故不少人非常热衷于发现更多的蛇绿岩;由于一些人之前的研究对造山橄榄岩不了解,因此,也可能把某些造山橄榄岩当成了蛇绿岩(如本文第二节所述的若干实例)。在这种情况下,对中国蛇绿岩的清理就是必须的了。如何清理?建议加强对蛇绿岩证伪的研究。为此,对于中国早先报道的蛇绿岩,我们要去一个一个仔细鉴别,去寻找不利于蛇绿岩的证据,剔除那些似是而非的蛇绿岩,还中国蛇绿岩一个清白。这样,我们才能捋清中国已经消失的洋盆的面貌,提高中国大地构造研究的深度。

2.3 MORB 问题

MORB 主要出现在全球洋脊系统,全球洋脊系统环绕全球,总长超过 60000 km。海脊火山活动约占地球上所有火山活动的 75%(Crisp, 1984)左右,但由于大部分火山活动发生在海平面以下几千米,绝大多数 MORB 被深深地隐藏起来了。通常认为, MORB 的温度与洋壳形成过程有关,原始岩浆成分主要受地幔温度的控制,热的地幔导致更程度的熔融,形成更厚的洋壳,洋脊深度也更浅。主元素成分主要与扩张速率和地幔成分的变化有关,高度不相容微量元素和同位素在很大程度上受地幔非均质性的控制(Langmuir, 2018)。MORB 的初始岩浆可

能是富含橄榄石的苦橄质玄武岩,形成在深度约 30~75 km ($P < 1.0 \sim 2.5$ GPa) 的尖晶石橄榄岩稳定区域 (Best, 2003)。MORB 形成的主要条件是:高温、低压、高程度部分熔融、亏损或弱亏损地幔、无水或缺水条件。尤其 N-MORB,大多是在高温低压条件下高程度部分熔融的产物 (Pearce et al., 1984; Fodor and Vetter, 1984; Best, 2003; Tsybulyaev et al., 2021)。洋中脊最适合上述条件,所以洋中脊产出的玄武岩大多数是 MORB,其他构造背景由于不同于洋中脊这个特殊的背景,故 MORB,尤其 N-MORB 很少,一旦其他构造背景出现上述条件,也是可以有 MORB,甚至 N-MORB 产出的。例如世界上最大的 Ontong Java 大火成岩省(洋底高原)、加勒比海大火成岩省,甚至连 Gorgona 岛的科马提岩都是强烈亏损 LREE 的 (Dürkefelden et al., 2019)。此外,与造山橄榄岩伴生的 MORB (N-MORB、P-MORB、E-MORB) 也是常见的 (Hartmann and Wedepohl, 1993; Weyer et al., 2003; Brooker et al., 2004; Pelletier and Müntener, 2006; Wu Tao et al., 2014; Sanfilippo et al., 2017)。太古宙的拉斑玄武岩和科马提岩也有不少是 MORB 甚至 N-MORB 的 (Frei and Rosing, 2001; Komiya et al., 2002, 2004; Wang Zhihong et al., 2004; Kerrich et al., 2007; Pearce, 2007; Polat et al., 2011; Hazarika et al., 2015)。最近发表的文献有越来越多证据说明, MORB 并非蛇绿岩所独有,因此,以 MORB 作为标志来鉴别就成问题了。例如,双沟的玄武岩就具有 N-MORB 和 E-MORB 地球化学特征,但是,双沟玄武岩不属于蛇绿岩 (张旗, 2021a)。国内外许多实例也说明了这个问题。因此,我们的思想也应当与时俱进,国内蛇绿岩划分过多,与这个问题是不无关系的。我们不能再简单地认为:只要见到 MORB 就是蛇绿岩了。

2.4 蛇绿岩研究历史的简要回顾

全球蛇绿岩研究,如果从方法论角度,大体经历了 2 个阶段:

(1) 以塞浦路斯、岛湾、阿曼等蛇绿岩为代表,以彭罗斯会议的定义为标志,开启了蛇绿岩研究的新阶段。在这个阶段,研究的主要方向是对蛇绿岩岩石组成及其相互之间关系以及对蛇绿岩形成构造背景的探讨。以 Pearce 为代表的学者提出的一系列判别图 (Pearce and Cann, 1973; Pearce and Norry, 1979; Pearce et al. 1984; Wood, 1980; Shervais, 1982),带动了蛇绿岩岩石学和地球化学

的发展。这个阶段的巅峰期大概在 20 世纪末叶,进入 21 世纪,随着判别图的失效而渐渐没落。然而地球化学却异军突起,取得了飞速的进步。近期,由于越来越多的陆壳下地幔岩研究的深入,采用岩石学和地球化学方法研究蛇绿岩也捉襟见肘 (张旗, 2021a)。

(2) 岩石学和地球化学研究遇到的瓶颈,迫使科学家去探寻蛇绿岩新的研究方法。蛇绿岩遇到的瓶颈主要体现在 3 个方面:①陆壳下地幔橄榄岩的发现(即俗称的造山橄榄岩),引发了与洋壳下地幔橄榄岩混淆的问题,这个问题目前还没有好的解决方法;②玄武岩构造环境判别图的失效;③MORB 可以出现在不同的构造环境, MORB 不是蛇绿岩所独有的。

由于蛇绿岩本质上主要是一个构造问题,人们在探索中需要回到野外去。在蛇绿岩套的研究中,无疑构造地质学是最重要的。基于上述认识,经过许多学者的不懈努力,发现采用大比例尺构造—岩相填图的方法对蛇绿岩,尤其对经常出现的蛇绿混杂岩的研究更有效。这个方法早在 20 世纪后期即已开启,主要应用于对美国西部和日本蛇绿岩的研究,中国则是最近率先从中亚造山带和东昆仑地区的研究开始的 (Cowan, 1985; 王连城等, 1985; Wahrhaftig and Murchev, 1987; Isozaki et al., 1990; Kimura and Mukai, 1991; Hacker et al., 1993; Elder, 2011; Zhang Ji'en et al., 2011a, b, 2018; 张克信等, 2011, 2020; Wakita, 2012, 2015; Kusky et al., 2013; Zhao Lei and He Guoqi, 2013, 2014; Wakabayashi, 2015, 2021; 李荣社等, 2016; 都厚远等, 2017; Wang Bo et al., 2017; Zhong Yun et al., 2017; 杨亚琦等, 2018; 张继恩等, 2018, 2021a, b; 闫臻等, 2018, 2020; Zheng Rongguo et al., 2019; Raymond, 2019; Yang Yaqi et al., 2019, 2020; Song Shuaihua et al., 2020; 脇田浩二, 2021)。

2.5 蛇绿岩研究的新进展

科学是发展的,科学研究需要与时俱进。早先的认识是在早先的水平上提出来的,经过多年的研究,早先的研究可能正确,也可能不正确,可能需要修改或更新,这是非常正常的现象。最近,蛇绿岩研究取得许多新进展,其中不少是非常可喜的。

2.5.1 蛇绿混杂岩填图研究的新进展

早先的蛇绿岩研究,大家主要关注蛇绿岩的岩石组合,彭罗斯会议的决议强调的也是这个概念。经过几十年的研究,发现地幔橄榄岩不仅洋盆里面

有,陆壳下也有,如阿尔卑斯西段的 Lanzo、Finero、Balmuccia、Baldissero,西班牙南部的 Ronda,红海的 Zabargad,委内瑞拉的 Horoman,中国的阿尔金—柴达木盆地北缘—北秦岭—大别山—苏鲁等(张旗等,2020a 及其所附的参考文献)。于是,与蛇绿岩相伴的深海沉积和混杂岩就越发显得重要。认真、细微和准确地野外观察无疑是蛇绿岩研究的第一要务。最近,张继恩、赵磊、闫臻、李荣社和张克信等在这方面进行了有益的探索(张克信等,2011;李荣社等,2016;张继恩等,2018, 2021a, b; 闫臻等,2018, 2020;杨亚琦等,2018),他们对蛇绿混杂岩进行了超大比例尺岩性—构造精细填图,是应当予以推广的好方法。这样,再加上在野外研究基础上的室内分析研究,有可能使蛇绿岩研究向前迈进一大步。这里特别要注意的是,观察一定要力求准确,不要把蛇绿混杂岩扩大化,不要把不是蛇绿岩混杂岩的岩石、地层也当成混杂岩的成分,归入蛇绿混杂岩。

2.5.2 年代学在识别蛇绿岩中的作用

早先大家主要关注年代学能够给出精确的定年资料。殊不知,在蛇绿岩识别中年代学研究也能起到举足轻重的作用。例如在双沟蛇绿岩研究中,与地幔橄榄岩伴生的有辉长岩和玄武岩,年代学研究表明,辉长岩是泥盆—石炭纪的,而玄武岩却是早三叠世的,说明同样具有 MORB 特征的辉长岩和玄武岩产出的时代相差久远,应当具有不同的含义。如果认为玄武岩是蛇绿岩的成员,则辉长岩就不是;如果辉长岩是蛇绿岩的成员,玄武岩则不是。辉长岩与玄武岩没有任何关系。研究表明,它们都不是蛇绿岩的成员,双沟不存在蛇绿岩,双沟玄武岩与地幔橄榄岩是不同时期岩浆活动的产物(张旗,2021a)。

Jian Ping 等(2012)、黄波等(2016)对贺根山蛇绿岩的时代进行了研究,发现贺根山存在两期不同的年龄数据,早期是早石炭世—晚泥盆世的,晚期是早白垩世的。他们认为,早期的与贺根山蛇绿岩有关,后期是洋盆关闭以后岩浆活动的产物。

对于蛇绿岩来说,年代学研究主要关注蛇绿岩的形成时代和侵位时代。蛇绿岩的形成时代一般用深海沉积中的微体化石或/和火成岩的年代学测定加以确定,而侵位的时间大体相当于洋盆闭合陆块碰撞的时代,这要根据综合因素来考虑,需要不同专业的研究互相配合,关键是要在野外厘清碰撞前后地质体之间的相互关系,准确鉴定碰撞后最老地层或地质体的年代。

2.5.3 大数据研究的进展

在蛇绿岩地球化学研究中,判别图是学术界期望的一个方法,可惜这个方法已经失效了。失效的原因是早先的判别图是根据若干地区的局部数据,按照归纳的方法总结出来的,不具有全称陈述的含义(张旗,2021b, c)。判别图只能说明过去,不能应用于未来,这是判别图本身的局限性导致的。而大数据方法,尤其采用全数据模式,就避免了归纳法的不足,使判别图能够应用于任何场景(张旗,2021b, c)。岩石学和地球化学应用于解决蛇绿岩构造环境问题之所以受局限,还因为按照目前的认识,只有玄武岩判别图比较可靠,而辉长岩、安山岩、苦橄岩等无法加以利用。大数据研究解决了这个问题,按照目前大数据研究的结果,不仅玄武岩可以判别环境(张旗等,2020b),辉长岩、安山岩也可以判别环境,且判别效果并不比玄武岩差,甚至效果还要好一些(图 3 至图 5)。

此外,有些矿物也有判别效果,甚至包括橄榄石,虽然目前的效果还不是很好(焦守涛等,2018;罗应等,2018;李玉琼等,2018;刘欣雨等,2019; Han Shuai et al., 2020)。大数据挽救了判别图,使采用地球化学确定混杂岩中不同块体的性质有了新的进展。

2.5.4 地球物理探测研究

地球物理方法对蛇绿岩研究很有用,这是笔者等在撰写本文时才体会到的。Jiang Mei 等(2015)对罗布莎进行了地震反射和大地电磁调查,发现含铬超镁铁质岩是由多条向南倾斜的断层推覆到冈底斯岩基南缘的构造片。超镁铁质岩体最大厚约 4 km,其下为印度板块的上地壳。发现在 20~50 km 深度之间有许多椭圆形低电阻率体,其下部可能靠近雅鲁藏布江附近 65 km 深度处的莫霍面,推测该低阻体源于中、下地壳部分熔融体,与雅鲁藏布缝合带深部构造活动和地幔物质上升有关。

徐新学等(2011)对贺根山和锡林浩特板块缝合带进行了详细的研究,大地电磁测深反演结果表明,该剖面以贺根山和锡林浩特缝合带为界分为壳幔结构差异较大的四个构造单元,其中的锡林浩特缝合带南壳内高导层埋深约在 25 km,存在深达 90 km 的高阻块体(图 6)。邵济安等(2020)对上述资料进行了深入的分析,指出贺根山岩块是有根的,它贯穿地壳,直达上地幔高导层,是地幔底辟上涌形成的。邵济安等(2020)回顾了长期以来学术界对贺根山镁铁—超镁铁岩存在的不同认识,指出解决问

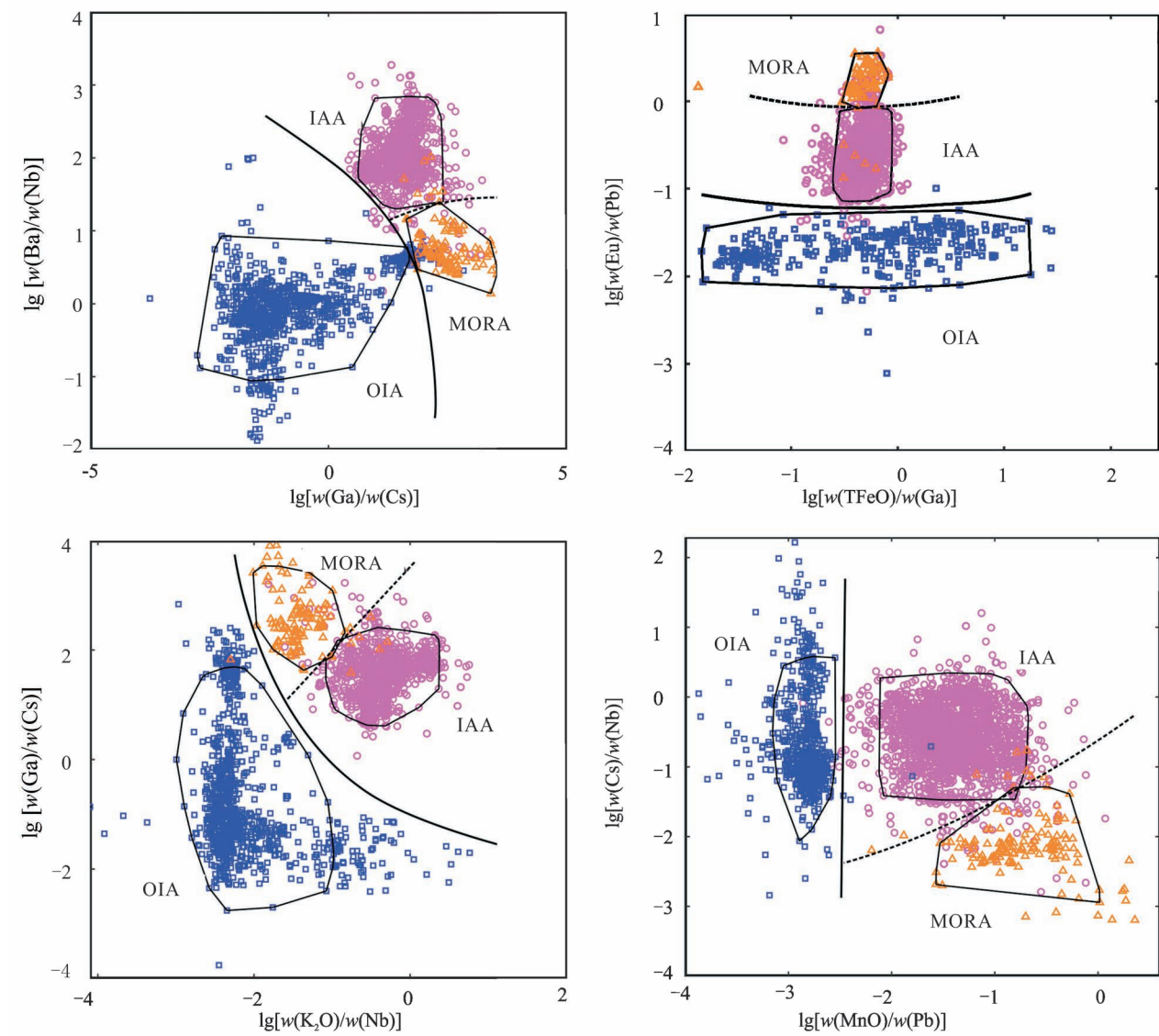


图 3 全球安山岩构造环境判别图(刘欣雨等,2019)

Fig. 3 Andesite tectonic environment discrimination map by global data (after Liu Xinyu et al. , 2019&)

图中粗实线示不同构造环境的安山岩大体完全可以分开的界线;粗虚线示基本上(90%以上)可以分开的界线。

MORA—大洋中脊安山岩;OIA—洋岛安山岩;IAA—岛弧安山岩

The thick solid line in the figure shows the roughly completely separable boundary between andesites in different tectonic environments. The thick dashed line shows the borderline that is essentially (90% or more) separable. MORA— mid-ocean ridge andesite, OIA— oceanic island andesite, IAA— island-arc andesite

题的关键之一是弄清镁铁—超镁铁岩的深部产状,这需要来自地球物理观测数据的依据。他们基于航磁和重力数据判断,贺根山岩块可能是从深部上来的,推测可能是在地幔底辟上涌的背景下,幔源熔—流体沿着岩石圈断裂持续上升而到达浅表的(邵济安等,2020)。

黄竺等(2015)在贺根山铬铁矿中发现了金刚石、碳硅石、自然铬等 30 多种地幔矿物,推测它们来自上地幔深部。杨经绥等(2013)在讨论西藏等地

发现的蛇绿岩型金刚石和铬铁矿深部成因时,也曾提到它们是被上涌的地幔柱带至浅部。图 6 证明,邵济安等(2020)对贺根山蛇绿岩的认识是可信的。

蛇绿岩研究中如何发挥地球物理方法的作用,是一个新问题,这是一项跨界的研究,需要探索的东西还很多。

3 结论

(1)中国蛇绿岩研究取得了很大的成绩,但也

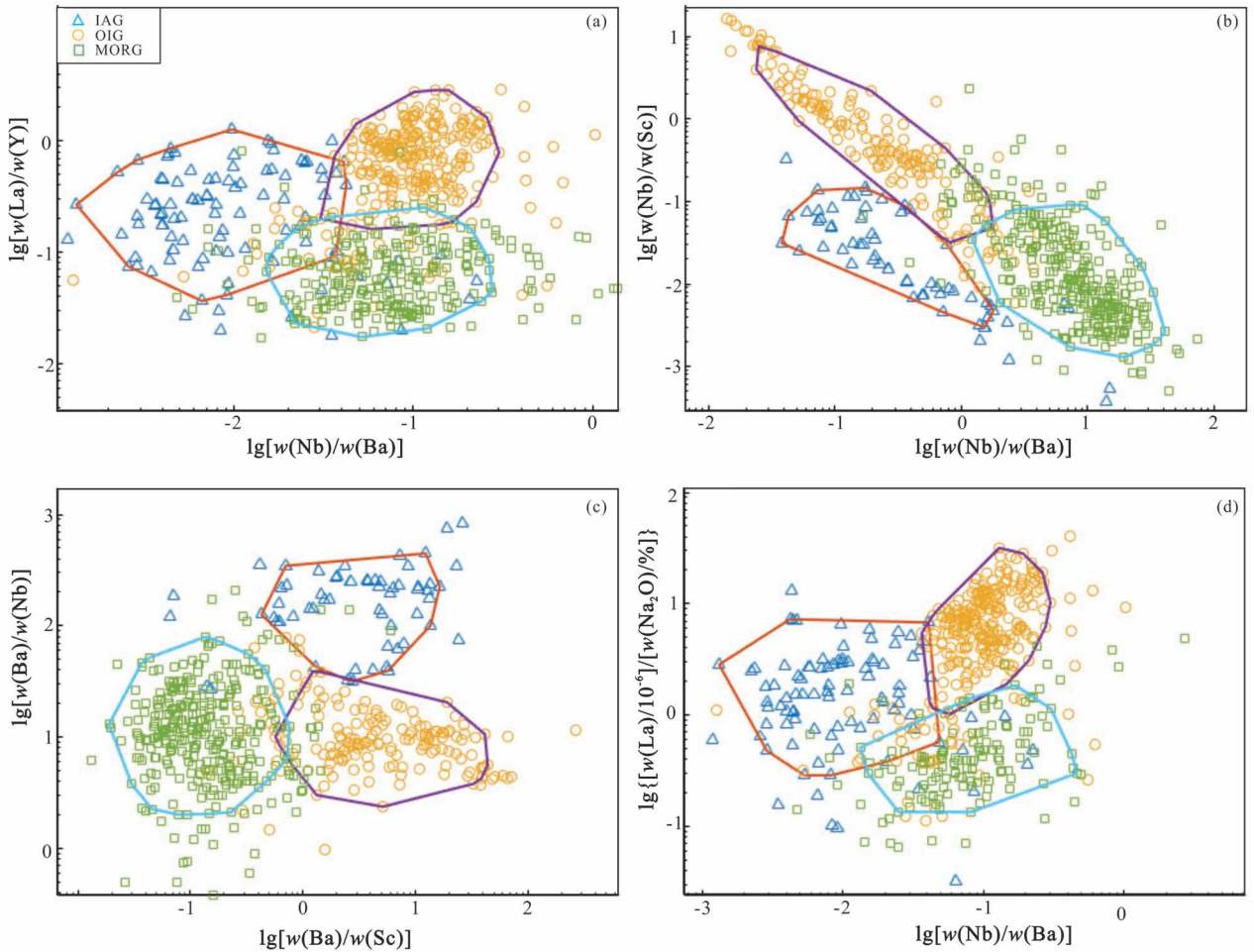


图 4 全球辉长岩构造环境判别图(据 Han Shuai et al. , 2020)

Fig. 4 Gabbro tectonic environment discrimination map by global data (from Han Shuai et al. , 2020)

IAG—岛弧辉长岩;OIG—洋岛辉长岩;MORG—大洋中脊辉长岩

IAG— island-arc gabbro, OIG— oceanic island gabbro, MORG— mid-ocean ridge gabbro

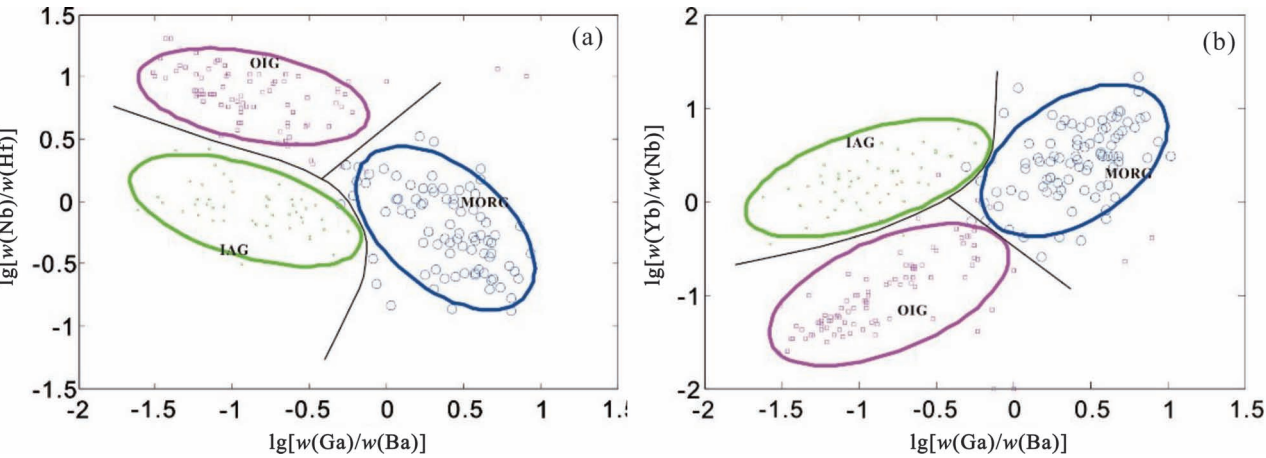


图 5 全球辉长岩构造环境判别图(据杜君等,未刊资料)

Fig. 5 Gabbro tectonic environment discrimination map by global data (after Du Jun et al. , not published)

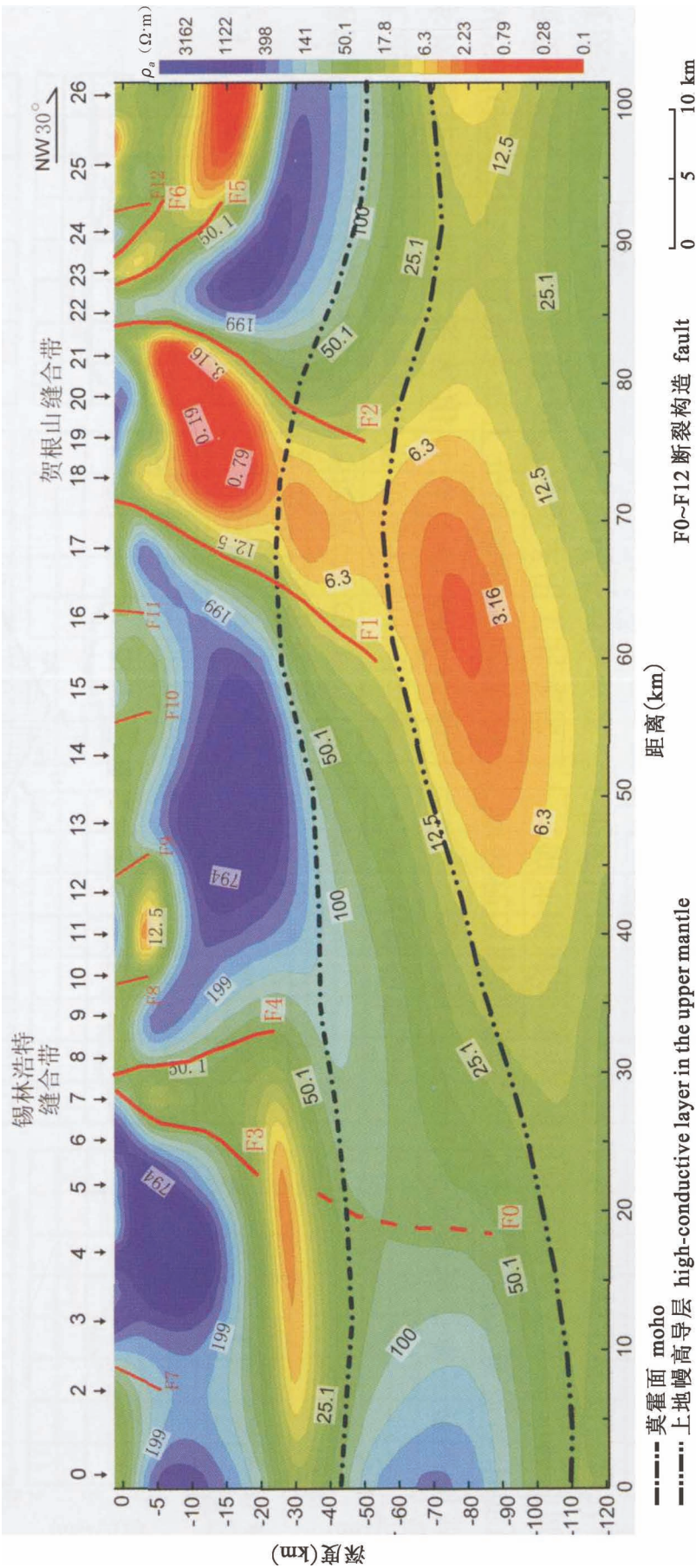


图6 内蒙锡林浩特—东乌旗剖面壳-幔电性结构二维反演模型 (据徐新学等, 2011)

存在许多问题。关键是识别出的蛇绿岩带太多,把许多不是蛇绿岩的地质体(组合)也当成了蛇绿岩。当前需要做的是去伪存真,对中国蛇绿岩进行一次认真地清理,还中国蛇绿岩一个真实的面貌。

(2)地幔橄榄岩是蛇绿岩最重要的成员,来自洋壳下。世界上还有另一类来自陆壳下的地幔岩,被称为造山橄榄岩。因此,地幔橄榄岩并非蛇绿岩所独有。此外,有越来越多的数据表明,MORB(洋中脊玄武岩)也不仅仅出现在洋中脊,在其他许多不同的构造背景下都可以出现。因此,不能简单地认为一个地区只要有了地幔橄榄岩和 MORB 就是蛇绿岩了。蛇绿岩是消失的洋盆记录,蛇绿岩即蛇绿岩套,斯泰因曼的“三位一体”的概念仍然是合适的。

(3)文中回顾了蛇绿岩研究的两个发展阶段:前一个阶段以 1972 年的彭罗斯会议为标志,开启了蛇绿岩研究的新篇章,当时的学术界主要关注蛇绿岩的岩石学和地球化学问题,关心蛇绿岩的岩石组合。新的阶段是从 20 世纪后期逐渐发展起来的,于近期取得了突出的进展。笔者等强调指出,蛇绿岩本质上是一个构造问题而非单纯的岩石和地球化学问题,当然,这里不是排斥岩石学和地球化学的作用。蛇绿岩即蛇绿岩套,一般多以蛇绿混杂岩形式出现,因此,它不仅包括一个特定的岩石组合,还包括深海沉积和混杂岩。文中肯定了中外学术界在蛇绿岩构造研究方面获得的许多新发现、新思路和新进展。认为大

比例尺野外填图是一个值得推广的好方法。此外,大数据与地球物理方法也是非常有意义的。蛇绿岩是一个复杂体系,不确定的问题相当多。它需要构造地质学家、地层学家、古生物学家、岩石学家、地球化学家、年代学家以及地球物理学家的共同努力。

(4)中国蛇绿岩需要证伪,清理就是证伪。早先的研究,30~40年前的认识,从今天来看,肯定有不完善的地方,需要改进的地方。我们必须与时俱进,必须随着科学的进步而改变我们的思路和研究的方法。专家、权威的认识不一定可信,一切均可以怀疑,均需要证伪,包括我们去塞浦路斯、阿曼考察,也不是去顶礼膜拜,也是可以怀疑,可以证伪的。不然,科学就不能发展了。

总之,蛇绿岩非常复杂,蛇绿岩与非蛇绿岩很难区别。中国蛇绿岩研究任重而道远。笔者等的上述见解非常粗鄙简陋,所提出的一些认识不是结论而是猜测。笔者等只是提出了一些想法,一个思路,仅供大家参考。

致谢: 研究中与中国科学院地质与地球物理研究所林伟研究员、张继恩副研究员,中国地质科学院刘建辉研究员、北京大学邵济安教授以及西北大学陈亮教授等进行了讨论。感谢张拴宏研究员和另一位审稿专家的评论和建议。

参 考 文 献 / References

(The literature whose publishing year followed by a “&” is in Chinese with English abstract; The literature whose publishing year followed by a “#” is in Chinese without English abstract)

边千韬, 郑祥身, 李红生, 沙金庚. 1997. 青海可可西里地区蛇绿岩的时代及形成环境. 地质论评, 43(4): 347~355.

都厚远, 陈家富. 2017. 西准噶尔和布克赛尔古洋盆的厘定——来自布克赛尔蛇绿混杂岩的锆石 U - Pb 年代学及地球化学证据. 地质学报, 91(12): 2638~2650.

黄波, 付冬, 李树才, 葛梦春, 周文孝. 2016. 内蒙古贺根山蛇绿岩形成时代及构造启示. 岩石学报, 32(1): 158~176.

黄竺, 杨经绥, 朱永旺, 熊发挥, 刘钊, 张仲明. 2015. 内蒙古贺根山蛇绿岩的铬铁矿中发现金刚石等深部地幔矿物. 中国地质, 42(5): 1493~1514.

焦守涛, 周永章, 张旗, 金维浚, 刘艳鹏, 王俊. 2018. 基于 GEOROC 数据库的全球辉长岩大数据的大地构造环境智能判别研究. 岩石学报, 34(11): 3189~3194.

李荣社, 计文化, 辜平阳. 2016. 造山带(蛇绿)构造混杂岩带填图方法. 武汉: 中国地质大学出版社: 1~128.

李玉琼, 杜雪亮, 金维浚, 杜君, 张旗, 王金荣, 马蓁. 2018. 大洋中脊、洋岛、岛弧玄武岩中橄榄石的对比研究. 地质科学, 53(4): 1228~1239.

刘欣雨, 张旗, 张成立. 2019. 大数据方法建立大洋安山岩构造环境判别图. 地质通报, 38(12): 1963~1970.

刘永江, 冯志强, 蒋立伟, 金巍, 李伟民, 关庆彬, 温泉波, 梁琛岳. 2019. 中国东北地区蛇绿岩. 岩石学报, 35(10): 3017~3047.

罗应, 袁方林, 金维浚, 刘学龙, 张昌振, 刘欣雨, 张旗, 余海军. 2018. 全球苦橄岩与太古宙科马提岩对比: 全数据模式的启示. 地质科学, 53(4): 1267~1284.

卡尔·波普尔. 1963. 猜想与反驳: 科学知识的增长. 傅季重, 纪树立, 周昌忠, 蒋戈为. 1986 年译. 上海: 上海译文出版社: 1~560.

任纪舜. 2004. 昆仑—秦岭造山系的几个问题. 西北地质, (1): 1~5.

任纪舜, 朱俊宾, 李崇, 刘仁燕. 2019. 秦岭造山带是印支碰撞造山带吗? 地球科学, 44(5): 1476~1486.

邵济安, 张丽莉, 周新华, 张履桥, 唐克东. 2020. 贺根山镁铁—超镁铁岩与缝合带的关系——来自地球物理的证据. 地球物理学报, 63(5): 1867~1877.

史仁灯. 2005. 蛇绿岩研究进展、存在问题及思考. 地质论评, 51(6): 681~693.

Wakabayashi J. 2021. 弧前构造带结构特征: 来自加利福尼亚弗朗西斯科杂岩、海岸山脉蛇绿岩和大峡谷群的证据. 田忠华. 译. 张继恩, 陈艺超. 校. 地质科学, 56(2): 357~394.

王秉璋, 张智勇, 张森琦, 朱迎堂, 曹生秀. 2000. 东昆仑东端苦海—赛什塘地区晚古生代蛇绿岩的地质特征. 地球科学, 25(6): 592~596.

王连城, 李达周, 张旗, 张魁武. 1985. 四川理塘蛇绿混杂岩: 一个以火山岩为基质的蛇绿混杂岩. 岩石学报, 1(2): 17~27.

吴浩若. 1993. 滇西北金沙江带早石炭世深海沉积的发现. 地质科学, 28(4): 395~397.

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. 岩石学报, 30(2): 293~325.

夏林圻, 夏祖春, 徐学义, 李向民, 马中平. 2008. 天山及邻区石炭纪—早二叠世裂谷火山岩岩石成因. 西北地质, 41(4): 1~68.

夏林圻, 夏祖春, 徐学义, 李向民, 马中平. 2009. 天山石炭纪火山岩系中含有富 Nb 岛弧玄武岩吗? 地学前缘, 16(6): 303~317.

脇田浩二. 2021. OPS 混杂岩概念及其填图方法: 以日本 Mino 和 Chichibu 侏罗纪增生杂岩为例. 陈艺超. 译. 张继恩, 王军鹏. 校. 地质科学, 56(2): 395~429.

徐新学, 李俊健, 刘俊昌, 辛建伟, 代涛, 牛永强, 张丽. 2011. 内蒙古锡林浩特—东乌旗剖面壳—幔电性结构研究. 地球物理学报, 54(5): 1301~1309.

闫臻, 王宗起, 付长垒, 牛漫兰, 计文化, 李荣社, 祁生胜, 毛晓长. 2018. 混杂岩基本特征与专题地质填图. 地质通报, 37(2/3): 167~191.

闫臻, 付长垒, 张继恩, 牛漫兰, 祁生胜, 曹泊, 孙毅, 李秀才, 刘建峰. 2020. 混杂岩地质调查与填图方法. 北京: 地质出版社: 1~80.

杨经绥, 徐向珍, 张仲明, 戎合, 李源, 熊发挥, 梁风华, 刘钊, 刘飞, 李金阳, 李兆丽, 陈松永, 郭国林, Robinson P. 2013. 蛇绿岩型金刚石和铬铁矿深部成因. 地球学报, 34(6): 643~653.

杨胜标, 李源, 杨经绥, 李瑞保, 董天赐, 裴磊. 2017. 西藏日喀则白马让蛇绿岩: 亚洲大陆边缘的小洋盆. 岩石学报, 33(12): 3766~3782.

杨亚琦, 赵磊, 徐芹芹, 郑荣国, 牛宝贵. 2018. 新疆西准噶尔北部和布克赛尔蛇绿混杂岩的厘定及其洋盆闭合时代限定. 地质学报, 92(2): 98~312.

张继恩, 陈艺超, 肖文交, 陈振宇, 宋帅华. 2018. 洋底凸起地质体及其对造山带中蛇绿岩组分的贡献. 岩石学报, 34(7): 1977~1990.

张继恩, 陈艺超, 肖文交, 闫臻. 2021a. 蛇绿岩与蛇绿混杂带结构.

地质科学, 56(2): 560~595.

张继恩, 王军鹏, 田忠华, 戴紧根, 冯志强, 陈艺超. 2021b. 《增生楔与混杂带》专辑序言. 地质科学, 56(2): 355~356.

张进, 邓晋福, 肖庆辉, 陆松年, 潘桂棠, 张智勇, 冯艳芳. 2012. 蛇绿岩研究的最新进展. 地质通报, 31(1): 1~12.

张克信, 殷鸿福, 朱云海, 王国灿, 陈能松, 侯光久. 2011. 造山带混杂岩区地质填图理论、方法与实践: 以东昆仑造山带为例. 武汉: 中国地质大学出版社: 1~175.

张克信, 李仰春, 王丽君, 王嘉轩, 徐亚东, 王永和, 辛后田, 赵小明, 尹福光, 李智佩, 谷永昌, 杨祝良, 付俊彧. 2020. 造山带混杂岩及相关术语. 地质通报, 39(6): 765~782.

张旗, 李达周, 张魁武. 1985. 云南省云县铜厂街蛇绿混杂岩的初步研究. 岩石学报, 1(3): 1~14.

张旗, 张魁武, 李达周. 1987. 横断山区基性—超基性岩的类型. 岩石学报, (3): 46~53.

张旗, 李达周, 张魁武, 赵大升. 1990. 义敦型镁铁—超镁铁岩的主要特征及其与蛇绿岩的对比. 岩石学报, 6(3): 33~42.

张旗, 张魁武, 李达周. 1992. 横断山区镁铁—超镁铁岩. 北京: 科学出版社: 1~216.

张旗, 马宝林, 刘若新, 赵大升, 樊祺诚, 李齐, 李秀云. 1995. 一个消减带之上的大陆岩石圈地幔残片——安徽饶铍寨超镁铁岩的地球化学特征. 中国科学(B辑), 25: 867~873.

张旗, 周国庆. 2001. 中国蛇绿岩. 北京: 科学出版社: 182.

张旗. 2014. 镁铁—超镁铁岩的分类及其构造意义. 地质科学, 49(3): 982~1017.

张旗. 2015. 日喀则蛇绿岩研究中的几个问题. 岩石学报, 31(1): 37~46.

张旗, 张维, 姜丽莉, 石玉若, 焦守涛, 王存智, 王振. 2020a. 造山蛇绿岩及其意义. 地质通报, 39(10): 1489~1506.

张旗, 李明超, 陈万峰, 金维浚, 焦守涛, 刘欣雨, 韩帅. 2020b. 岩石大地构造学说的兴起、没落与新生. 大地构造与成矿学, 44(2): 289~296.

张旗. 2021a. 蛇绿岩研究之检讨与反思: 以“双沟蛇绿岩”为例. 岩石学报, 37(4): 9657~9673.

张旗. 2021b. 波普尔科学哲学理论简介. 甘肃地质, 30(2): 1~13.

张旗. 2021c. 演绎、归纳、证伪和大数据: 科学研究的方法论. 甘肃地质, 30(3): 1~18.

张寿广, 万渝生, 刘国惠, 从曰祥, 赵子然. 1991. 北秦岭宽坪群变质地质. 北京: 北京科学技术出版社: 1~119.

张之孟, 金蒙. 1979. 川西南乡城——得荣地区的两种混杂岩及其构造意义. 地质科学, (3): 205~214.

张宗清, 张旗. 1995. 北秦岭晚元古代宽坪蛇绿岩中变质基性火山岩的地球化学特征. 岩石学报, 11(S1): 165~177.

赵宗溥. 1984. 蛇绿岩与大陆缝合线. 地质科学, (4): 359~371.

支霞臣, 靳永斌, 孟庆, 高天山. 2004. 大别山北部饶拔寨超镁铁岩体微量元素地球化学. 岩石学报, 20(2): 463~472.

钟大赉, 吴根耀, 季建清, 张旗, 丁林. 1988. 滇东南发现蛇绿岩. 科学通报, 43(13): 1365~1370.

钟大赉. 1998. 滇川西部古特提斯造山带. 北京: 科学出版社: 1~231.

Agrinier P, Mével C, Bosch D, Javoy M. 1993. Metasomatic hydrous fluids in amphibole peridotites from Zabargad Island (Red Sea). Earth and Planetary Science Letters, 120: 187~205.

Anonymous. 1972. Penrose field conference on ophiolites. Geotimes, 17(12): 24~25.

Best M G. 2003. Igneous and metamorphic petrology. Blackwell Science Ltd: Blackwell Publishing Company.

Bian Qiantao, Zheng Xiangshen, Li Hongsheng, Sha Jingeng. 1997&. Age and tectonic setting of ophiolite in the Hoh Xil region, Qinghai Province. Geological Review, 43(4): 347~355.

Bian Qiantao, Li Dihui, Pospelov I, Yin Leiming, Li Hongsheng, Zhao Dasheng, Chang Chengfa, Luo Xiaoquan, Gao Shanlin, Astrakhsantsev O, Chamo N. 2004. Age, geochemistry and tectonic setting of Buqingshan ophiolites, North Qinghai—Tibet Plateau, China. Journal of Asian Earth Sciences, 23: 577~596.

Bodinier J L, Guiraud M, Dupuy C, Dostal J. 1986. Geochemistry of basic dykes in the Lanzo Massif (Western Alps): Petrogenetic and geodynamic implications. Tectonophysics, 128: 77~95.

Bodinier J L, Menzies M A, Thirlwall M. 1991. Continental to oceanic mantle transition——REE and Sr—Nd isotopic geochemistry of the Lanzo lherzolite massif. Orogenic lherzolites and mantle processes. Journal of Petrology, (20): 191~210.

Bodinier J L, Godard M. 2014. Orogenic, ophiolitic, and abyssal peridotites. In: Holland H D, Turekian K K, eds. Treatise on Geochemistry. 2nd ed. Amsterdam: Elsevier. 103~167.

Bonatti E, Michael P J. 1989. Mantle peridotites from continental rifts to ocean basins to subduction zones. Earth and Planetary Science Letters, 91: 297~311.

Bonatti E. 1990. Subcontinental mantle exposed in the Atlantic Ocean on St. Peter—Paul islets. Nature, 345: 800~802.

Borghini G, Rampone E, Crispini L, De Ferrari R, Godard M. 2007. Origin and emplacement of ultramafic—mafic intrusions in the Erro—Tobbio mantle peridotite (Ligurian Alps, Italy). Lithos, 94: 210~229.

Borgia A, Treves B, Keynes M. 1992. Volcanic plates overriding the ocean crust: structure and dynamics of Hawaiian volcanoes. In: Parson et al eds, Ophiolites and Their Modern Oceanic Analogues. London: Geol. Soc. Publ. House: 277~299.

Brooker R A, James G H, Blundy J D. 2004. Trace elements and Li isotope systematics in Zabargad peridotites: evidence of ancient subduction processes in the Red Sea mantle. Chemical Geology, 212: 179~204.

Cowan D S. 1985. Structural styles in Mesozoic and Cenozoic mélanges in the western Cordillera of North America. Geological Society of America Bulletin, 96(4): 451~462.

Crisp J A. 1984. Rates of magma emplacement and volcanic output. J. Volcanol Geotherm Res., 20(3~4): 177~211.

Dentex E. 1969. Origin of ultramafic rocks, their tectonic settings and history: A contribution to the discussion of the paper “The origin of ultramafic and ultrabasic rocks” by Wyllie P J. Tectonophy, 7: 457~488.

Dilek Y. 2003. Ophiolite concept and its evolution. In: Dilek Y and Newcomb S (Eds.), Ophiolite Concept and the Evolution of Geological Thought. Geological Society of America Special Paper, 373: 1~16.

Dilek Y, Furnes H. 2011. Ophiolite genesis and global tectonics: Geochemical and tectonic fingerprinting of ancient oceanic lithosphere. Geological Society of American Bulletin, 123(3~4): 387~411.

Doblas M, Oyarzun M. 1989. “Mantle core complexes” and Neogene extensional detachment tectonics in the western Betic Cordilleras, Spain: an alternative model for the emplacement of the Ronda peridotite. Earth and Planetary Science Letters, 93: 76~84.

Du Houyuan, Chen Jiafu. 2017&. The determination of Hoboksar ancient oceanic basin in West Junggar: Evidence from zircon U—Pb age and geochemistry of the Hoboksar ophiolitic mélange. Acta Geologica Sinica, 91(12): 2638~2650.

Dupuy C, Mevel C, Bodinier J L, Savoyant L. 1991. The Zabargad

- peridotite: Evidence for multi-stage metasomatism during Red Sea rifting. *Geology*, 19: 722~725.
- Dürkefeld A, Hoernle K, Hauff F, Werner R, Garbe-Schönberg D. 2019. Second-stage caribbean large igneous province volcanism: The depleted icing on the enriched cake. *Chemical Geology*, 509: 45~63.
- Elder W P. 2011. *Geology of the Golden Gate Headlands. Geology and Natural History of the San Francisco Bay Area: A2001 NAGT Field-Trip Guidebook*, 61~86.
- Ernst W G. 1978. Petrochemical study of lherzolitic rocks from the Western Alps. *Journal of Petrology*, 19: 341~392.
- Fodor R V, Vetter S K. 1984. Rift-zone magmatism: Petrology of basaltic rocks transitional from CFB to MORB, southeastern Brazil margin. *Contrib. Mineral. Petrol.*, 88: 307~321.
- Frei R, Rosing M T. 2001. The least radiogenic terrestrial leads; implications for the early Archean crustal evolution and hydrothermal—metasomatic processes in the Isua Supracrustal Belt (West Greenland). *Chemical Geology*, 181: 47~66.
- Girardeau J, Mercier J C C, Wang X B. 1985. Petrology of the mafic rocks of the Xigaze ophiolite, Tibet. Implications for the genesis of the oceanic lithosphere. *Contrib. Mineral. Petrol.*, 90: 309~321.
- Girardeau J, Mercier J C C. 1988. Petrology and texture of the ultramafic rocks of the Xigaze ophiolite (Tibet): constraints for mantle structure beneath slow-spreading ridges. *Tectonophysics*, 147: 33~58.
- Guo Anlin, ZhangGuowei, Sun Yangui, Zheng Jiankang, Liu Ye, Wang Jianqi. 2007. Geochemistry and spatial distribution of OIB and MORB in A'nyemaqen ophiolite zone: Evidence of Majiuxueshan ancient ridge—centered hotspot. *Science in China, Ser. D: Earth Sciences*, 50: 197~208.
- Hacker B R, Ernst W G, McWilliams M O. 1993. Genesis and evolution of a Permian—Jurassic magmatic arc/accretionary wedge, and reevaluation of terranes in the central Klamath Mountains. *Tectonics*, 12(2): 387~409.
- Han Shuai, LiMingchao, Zhang Qi, Song Lingguang. 2020. An automated method to generate and evaluate geochemical tectonic discrimination diagrams based on topological theory. *Minerals*, 10(1): 62: 1~25.
- Hartmann G, Wedepohl K H. 1993. The composition of peridotite tectonites from the Ivrea Complex, northern Italy: Residues from melt extraction. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 57: 1761~1782.
- Hazarika B, Malpe D B, Aradhi K K. 2015. Geochemical characteristics of amgaon mafic rocks, western bastar craton, central india; Emphasis on their palaeotectonic evolution. *Journal of Applied Geochemistry*, 17: 182~189.
- Huang Bo, Fu Dong, Li Shucui, Ge Mengchun, Zhou Wenxiao. 2016. The age and tectonic implications of the Hegenshan ophiolite in Inner Mongolia. *Acta Petrologica Sinica*, 32(1): 158~176.
- Huang Zhu, Yang Jingsui, Zhu Yongwang, Xiong Fahui, Liu Zhao, Zhang Zhongming. 2015. The discovery of diamonds and deep mantle minerals in chromitites of Hegenshan ophiolite, Inner Mongolia. *Geology in China*, 42(5): 1493~1514.
- Ishiwatari A. 1985. Alpine ophiolites: product of low-degree mantle melting in a Mesozoic transcurrent rift zone. *Earth Planet. Sci. Lett.*, 76: 93~108.
- Isozaki Y, Maruyama S, Furuoka F. 1990. Accreted oceanic materials in Japan. *Tectonophysics*, 181(1~4): 179~205.
- Jia Lihui, Meng Fancong, Feng Huibin. 2018. The Wenquan ultramafic rocks in the Central East Kunlun Fault zone, Qinghai—Tibet Plateau—crustal relics of the Paleo-Tethys ocean. *Miner. Petrol.*, 112: 317~339.
- Jian Ping, Kröner A, Windley B F, Shi Yuruo, Zhang Wei, Zhi Liqiao, Yang Weiran. 2012. Carboniferous and Cretaceous mafic—ultramafic massifs in Inner Mongolia (China): A SHRIMP zircon and geochemical study of the previously presumed integral “Hegenshan ophiolite”. *Lithos*, 142~143: 48~66.
- Jiang Mei, Peng Miao, YangJingsui, Tan Handong, Qian Rongyi, Zhang Yuwen, Xu Lehong, Zhang Lishu, Li Qingqing. 2015. Seismic reflection and magnetotelluric profiles across the Luobusa ophiolite: Evidence for the deep structure of the Yarlung Zangbo suture zone, southern Tibet. *Journal of Asian Earth Sciences*, 110: 4~9.
- Jiao Shoutao, Zhou Yongzhang, Zhang Qi, Jin Weijun, Liu Yanpeng, Wang Jun. 2018. Study on intelligent discrimination of tectonic settings based on global gabbro data from GEOROC. *Acta Petrologica Sinica*, 34(11): 3189~3194.
- Kaczmarek M A, Muñtner O. 2008. Juxtaposition of melt impregnation and high-temperature shear zones in the upper mantle; field and petrological constraints from the Lanzo peridotite (Northern Italy). *Journal of Petrology*, 49: 2187~2220.
- Kerrick R, Polat A, Xie Q L. 2007. Geochemical systematics of 2.7 Ga Kirojivis Group (Abitibi), and Manitouwadge and Winston Lake (Wawa) Fe-rich basalt—rhyolite associations: Backarc rift oceanic crust? *Lithos*, 101: 1~23.
- Kimura G, Mukai A. 1991. Underplated units in an accretionary complex: Mélange of the Shimanto belt of eastern Shikoku, Southwest Japan. *Tectonics*, 10(1): 31~50.
- Komiya T, Maruyama S, Hirata T, Yurimoto H. 2002. Petrology and geochemistry of MORB and OIB in the Mid-Archean North Pole Region, Pilbara Craton, Western Australia: Implications for the composition and temperature of the Upper Mantle at 3.5 Ga. *International Geology Review*, 44: 988~1016.
- Komiya T, Maruyama S, Hirata T, Yurimoto H, Nohda S. 2004. Geochemistry of the oldest MORB and OIB in the Isua Supracrustal Belt, southern West Greenland: Implications for the composition and temperature of early Archean upper mantle. *Island Arc*, 13: 47~72.
- Konstantinovskaia E A, Brunel M, Malavieille J. 2003. Discovery of the Paleo-Tethys residual peridotites along the Anyemaqen—Kunlun suture zone (North Tibet). *C. R. Geoscience*, 335: 709~719.
- Kusky T M, Windley B F, Safonova I, Wakita K, Wakabayashi J, Polat A, Santosh M. 2013. Recognition of ocean plate stratigraphy in accretionary orogens through Earth history: A record of 3.8 billion years of sea floor spreading, subduction, and accretion. *Gondwana Research*, 24(2): 501~547.
- Langmuir C H. 2018. Mid-Ocean Ridge Basalts (MORB). In: White W M. (eds) *Encyclopedia of Geochemistry. Encyclopedia of Earth Sciences Series*. Springer, Cham. https://doi.org/10.1007/978-3-319-39312-4_252
- Li Dian, Wang Genhou, Gao Jinhan, Yuan Guoli, Zhou Jie, Fang Daren, Zhang Li, Gong Yidong, Zhao Haichao. 2019. The continental subduction in the evolution of central Qiangtang mélange belt and its tectonic significance. *International Geology Review*, 61: 1~28.
- Li Ruibao, Pei Xianzhi, Wei Bo, Li Zuochen, Pei Lei, Chen Guochao, Chen Youxin, Liu Chengjun. 2021. Middle Cambrian—Early Ordovician ophiolites in the central fault of the East Kunlun Orogen: Implications for an epicontinental setting related to Proto-Tethyan Ocean subduction. *Gondwana Research*, 94: 243~258.
- Li Rongshe, Ji Wenhua, Gu Pingyang. 2016. Mapping method of

- (ophiolite) mélange in orogenic belt. Wuhan: China University of Geosciences Press; 1~128.
- Li Wangye, Li Shuguang, Guo Anlin, Sun Yangui, Zhang Guowei. 2007. Zircon SHRIMP U-Pb ages and trace element geochemistry of the Kuhai gabbro and the Dur'ngoi diorite in the southern east Kunlun tectonic belt, Qinghai, Western China and their geological implications. *Science in China Ser D: Earth Sciences*, 50(Supp. II): 331~338.
- Li Yuqiong, Du Xueliang, Jin Weijun, Du Jun, Zhang Qi, Wang Jinrong, Ma Zhen. 2018&. A comparative study of olivine in mid-ocean ridge basalt (MORB), ocean island basalt (OIB) and island arc basalt (IAB). *Chinese Journal of Geology*, 53(4): 1228~1239.
- Liu Xiaohan, Hsu K J, Ju Yitai, Li Guangwei, Liu Xiaobin, Wei Lijie, Zhou Xuejun, Zhang Xingang. 2012. New interpretation of tectonic model in south Tibet. *Journal of Asian Earth Sciences*, 56: 147~159.
- Liu Xinyu, Zhang Qi, Zhang Chengli. 2019&. The establishment of oceanic andesites tectonic environment discrimination diagrams with big data method. *Geological Bulletin of China*, 38(12): 1963~1970.
- Liu Yongjiang, Feng Zhiqiang, Jiang Liwei, Jin Wei, Li Weimin, Guan Qingbin, Wen Quanbo, Liang Chenyue. 2019&. Ophiolite in the eastern Central Asian Orogenic Belt, NE China. *Acta Petrologica Sinica*, 35(10): 3017~3047.
- Lorand J P, Schmidt G, Palme H, Kratz K L. 2000. Highly siderophile element geochemistry of the Earth's mantle: new data for the Lanzo (Italy) and Ronda (Spain) orogenic peridotite bodies. *Lithos*, 53: 149~164.
- Luo Ying, YuanFanglin, Jin Weijun, Liu Xuelong, Zhang Changzhen, Liu Xinyu, Zhang Qi, Yu Haijun. 2018&. The comparison of global picrite and Archean komatiite: implications from the whole data model. *Chinese Journal of Geology*, 53(4): 1267~1284.
- Menzies M A. 1984. Chemical and isotopic heterogeneities in orogenic and ophiolitic peridotites. In: *Ophiolites and Oceanic Lithosphere*. Oxford, London: Blackwell Sci., Publ.; 231~240.
- Müntener O, Piccardo G B, Polino R, Zanetti A. 2005. Revisiting the Lanzo peridotite (NW-Italy): 'Astenospherization' of ancient mantle lithosphere. *Ophiolite*, 30: 111~124.
- Nicolas A, Jackson E D. 1972. Repartition en deux province des peridotites deschaines alpines longeant la Mediterranee: Implications geotectoniques. *Schweiz. Petrogr. Mitt.*, 52: 479~495.
- Nicolas A. 1984. Lherzolites of the western Alps: A structural review. In: *Kimberlites, II: The Mantle and Crust—Mantle Relationship*. Amsterdam: Elsevier; 333~346.
- Nicolas A, Girardeau J, Marcoux J, Dupre B, Wang Xibin, Cao Yougong, Zheng Haixiang, Xiao Xuchang. 1981. The Xigaze ophiolite (Tibet): A peculiar oceanic lithosphere. *Nature*, 294(5840): 414~417.
- Pearce J A, Cann J R. 1973. Tectonic setting of basic volcanic rocks determined using trace element analyses. *Earth and Planetary Science Letters*, 19(2): 290~300.
- Pearce J A, Norry M J. 1979. Petrogenetic implications of Ti, Zr, Y and Nb variations in volcanic rocks. *Contributions to Mineralogy and Petrology*, 69(1): 33~47.
- Pearce J A, Lippard S J, Roberts S. 1984. Characteristics and tectonic significance of suprasubduction zone ophiolites. In: *Kokelaar B P and Howells M F. eds. Marginal Basin Geology*. Geological Society, London Special Publication, 16: 77~94.
- Pearce J A. 2007. Geochemical fingerprinting of oceanic basalts with applications to ophiolite classification and the search for Archean oceanic crust. *Lithos*, 100: 14~48.
- Pelletier L, Müntener O. 2006. High-pressure metamorphism of the Lanzo peridotite and its oceanic cover, and some consequences for the Sesia—Lanzo zone (northwestern Italian Alps). *Lithos*, 90: 111~130.
- Piccardo G B, Messiga B, Vannucci R. 1988. The Zabargad peridotite—pyroxenite association: Petrologic constraints to the evolutive history. *Tectonophysics*, 150: 135~162.
- Piccardo G B, Rampone E, Vannucci R, Shimizu N, Ottolini L, Bottazzi P. 1993. Mantle processes in the sub-continental lithosphere: The case study of the rifted spinelherzolites from Zabargad (Red Sea). *European Journal of Mineralogy*, 5: 1039~1056.
- Piccardo G B, Guamieri L. 2011. Gabbro—norite cumulates from strongly depleted MORB melts in Alpine—Apennine ophiolites. *Lithos*, 124: 200~214.
- Polat A, Appel P W U, Fryer B J. 2011. An overview of the geochemistry of Eoarchean to Mesoarchean ultramafic to mafic volcanic rocks, SW Greenland: Implications for mantle depletion and petrogenetic processes at subduction zones in the early Earth. *Gondwana Research*, 20: 255~283.
- Rampone E, Piccardo G B, Hofmann A W. 2008. Multi-stage melt—rock interaction in the Mt. Maggiore (Corsica, France) ophiolitic peridotites: Microstructural and geochemical evidence. *Contributions to Mineralogy and Petrology*, 156: 453~475.
- Raymond L A. 2019. Perspectives on the roles of mélanges in subduction accretionary complexes: A review. *Gondwana Research*, 74: 68~89.
- Ren Jishun. 2004&. Some problems on the Kunlun—Qinling orogenic system. *Northwestern Geology*, 37(1): 1~5.
- Ren Jishun, Zhun Junbin, Li Chong, Liu Renyan. 2019&. Is the Qinling Orogen an Indosinian collisional orogenic belt? *Earth Science*, 44(5): 1476~1486.
- Sanfilippo A, Tribuzio R, Ottolini L, Hamada M. 2017. Water, lithium and trace element compositions of olivine from Lanzo South replacive mantle dunites (Western Alps): New constraints into melt migration processes at cold thermal regimes. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 214: 51~72.
- Shao Ji'an, Zhang Lili, Zhou Xinhua, Zhang Lüqiao, Tang Kedong. 2020&. The relationship between mafic—ultramafic rocks and suture zone in Hegenshan, Inner Mongolia—Evidence from geophysical data. *Chinese Journal of Geophysical*, 63(5): 1867~1877.
- Shervais J W. 1982. Ti—V plots and the petrogenesis of modern and ophiolitic lavas. *Earth & Planetary Science Letters*, 59: 101~118.
- Shi Rendeng. 2005&. Comment on the progress in and problems on ophiolite study. *Geological Review*, 51(6): 681~693.
- Snow J E, Schmidt G. 1999. Proterozoic melting in the northern peridotite massif, Zabargad island: Os isotopic evidence. *Terra Nova*, 11: 45~50.
- Song Shuaihua, Xiao Wenjiao, Windley B F, Collins A S, Chen Yichao, Zhang Ji'en, Schulmann K, Han Chunming, Wan Bo, Ao Songjian, Zhang Zhiyong, Song Dongfang, Li Rui. 2020. Late Paleozoic Chingiz and Saur arc amalgamation in West Junggar (NW China): Implications for accretionary tectonics in the southern Altaids. *Tectonics*, 39(7): e2019TC005781.
- Sun Mingdao, Xu Yigang, Chen Hanlin. 2018. Subaqueous volcanism in the Paleo-Pacific Ocean based on Jurassic basaltic tuff and pillow basalt in the Raohe Complex, NE China. *Science China Earth Sciences*, 61: 1042~1056.

- Tan Jun, Wei Junhao, Zhao Xinfu, Zhao Shaoqing, Liu Yan, Zhang Fei, Liu Xiaoyang. 2020. Late paleozoic to early mesozoic paleo-Tethys tectonic evolution of central NE Tibetan Plateau: Insights from the Zhiduo mafic—ultramafic complex. *Lithos*, 364 ~ 365: 105534.
- Tsybulayev S V, Savko K A, Samsonov A V, Korish E H. 2021. Paleoproterozoic OIB- and MORB-type rift volcanics of the Kursk Block, Eastern Sarmatia. *Petrology*, 29: 114~147.
- Wahrhaftig C, Murchey B. 1987. Marin Headlands, California: 100-million-year record of sea floor transport and accretion. // Geological Society of America Centennial Field Guide, Volume 1—Cordillera Section: 263~268.
- Wakabayashi J. 2015. Anatomy of a subduction complex: Architecture of the Franciscan complex, California, at multiple length and time scales. *International Geology Review*, 57(5~8): 669~746.
- Wakabayashi J. 2021&. Architecture of an exhumed forearc region: Franciscan complex, coast range ophiolite, and Great Valley Group of California. *Chinese Journal of Geology*, 56(2): 357~394.
- Wakita K. 2012. Mappable features of mélanges derived from ocean plate stratigraphy in the Jurassic accretionary complexes of Mino and Chichibu terranes in Southwest Japan. *Tectonophysics*, 568~569: 74~85.
- Wakita K. 2015. OPS mélange: A new term for mélanges of convergent margins of the world. *International Geology Review*, 57(5~8): 529~539.
- Wakita K. 2021&. Concept of OPS mélange and its field mapping technique for ancient accretionary complexes: Using some examples mainly from Jurassic accretionary complexes of the Mino and Chichibu belts in Japan. Translated by Chen Yichao, Proofread by Zhang Jien and Wang Junpeng. *Chinese Journal of Geology*, 56(2): 395~429.
- Wang Bo, Zhai Yazhong, Kapp P, Jong K D, Zhong Linglin, Liu Hongsheng, Ma Yuzhou, Gong Hujun, Geng Hongyan. 2017. Accretionary tectonics of back-arc oceanic basins in the South Tianshan: Insights from structural, geochronological, and geochemical studies of the Wuwamen ophiolite mélange. *GSA Bulletin*, 130: 284~306.
- Wang Bingzhang, Zhang Zhiyong, Zhang Senqi, Zhu Yingtang, Cao Shengxiu. 2000&. Geological features of Lower Paleozoic ophiolite in Kuhai—Saishitang region, eastern section of Eastern Kunlun. *Earth Science—Journal of China University of Geosciences*, 25(6): 592~596.
- Wang Liancheng, Li Dazhou, Zhang Qi, Zhang Kuiwu. 1985&. Ophiolitic mélange in Litang, Sichuan Province. *Acta Petrologica Sinica*, 1(2): 17~27.
- Wang Zhihong, Wilde S A, Wang Kaiyi, Yu Liangjun. 2004. A MORB—arc basalt—adakite association in the 2.5 Ga Wutai greenstone belt: Late Archean magmatism and crustal growth in the North China Craton. *Precambrian Research*, 131: 323~343.
- Weyer S, Munker C, Mezger K. 2003. Nb/Ta, Zr/Hf and REE in the depleted mantle: implications for the differentiation history of the crust—mantle system. *Earth and Planetary Science Letters*, 205: 309~324.
- Wood D A. 1980. The application of a Th—Hf—Ta diagram to problems of tectonomagmatic classification and to establishing the nature of crustal contamination of basaltic lavas of the British Tertiary Volcanic Province. *Earth & Planetary Science Letters*, 50(1): 11~30.
- Wu Haoru. 1993&. Discovery of Early Carboniferous deep-sea sediments from Jinsha belt, NW Yunnan. *Scientia Geologica Sinica*, 28(4): 395~397.
- Wu Fuyuan, Liu Chuazhou, Zhang Liangliang, Zhang Chang, Wang Jiangang, Liu Xiaochi. 2014&. Yarlung Zangbo ophiolite: A critical updated view. *Acta Petrologica Sinica*, 30(2): 293~325.
- Wu Tao, Xiao Long, MaChangqian, Pirajno F, Sun Yi, Zhan Qiongyao. 2014. A mafic intrusion of ‘‘arc affinity’’ in a post-orogenic extensional setting: A case study from Ganluogou gabbro in the northern Yidun Arc Belt, eastern Tibetan Plateau. *Journal of Asian Earth Sciences*, 94: 139~156.
- Xia Linqi, Xia Zuchun, Xu Xueyi, Li Xiangmin, Ma Zhongping. 2008&. Petrogenesis of Carboniferous—Early Permian Rift—Related volcanic rocks in the Tianshan and its Neighboring areas, Northwestern China. *Northwestern Geology*, 41(4): 1~68.
- Xia Linqi, Xia Zuchun, Xu Xueyi, Li Xiangmin, Ma Zhongping. 2009&. Do the Tianshan Carboniferous volcanic successions contain Nb-enriched arc basalts? *Earth Science Frontiers*, 16(6): 303~317.
- Xiong Qing, Griffin W L, Zheng Jianping, O'Reilly S Y, Pearson N J. 2015. Episodic refertilization and metasomatism of Archean mantle: evidence from an orogenic peridotite in North Qaidam (NE Tibet, China). *Contrib. Mineral Petrol.*, 169: 1~24.
- Xu Xinxue, Li Junjian, Liu Junchang, Xin Jianwei, Dai Tao, Niu Yongqiang, Zhang Li. 2011&. The crust—upper mantle electrical structure along Xilinhot—Dongwuqi section. *Chinese Journal of Geophysics*, 54(5): 1301~1309.
- Yan Zhen, Wang Zongqi, Niu Manlan, Ji Wenhua, Li Rongshe, Qi Shengsheng, Mao Xiaochang. 2018&. Characteristics and thematic geological mapping of mélange. *Geological Bulletin of China*, 37(2/3): 167~191.
- Yan Zhen, Fu Changlei, Zhang Jien, Niu Manlan, Qi Shengsheng, Cao Bo, Sun Yi, Li Xiucui, Liu Jianfeng. 2020&. Methods in geological survey and mapping of mélange. Beijing: Geological Publishing House: 1~80.
- Yang Jingsui, Xu Xiangzhen, Zhang Zhongming, Rong He, Li Yuan, Xiong Fahui, Liang Fenghua, Liu Zhao, Liu Fei, Lin Jinyang, Li Zhaoli, Chen Songyong, Guo Guolin, Robinson P. 2013&. Ophiolite-type diamond and deep genesis of chromitite. *Acta Geoscientia Sinica*, 34(6): 643~653.
- Yang Shengbiao, Li Yuan, Yang Jingsui, Li Ruibao, Dong Tianci, Pei Lei. 2017&. Baimarang ophiolite in Xigaze, Tibet: A small ocean basin close to the Asian continental margin. *Acta Petrologica Sinica*, 33(12): 3766~3782.
- Yang Yaqi, Zhao Lei, Xu Qinqin, Zheng Rongguo, Niu Baogui. 2018&. Determination of the Hebukesai ophiolitic mélange in the northern part of West Junggar and its tectonic implications. *Acta Geologica Sinica*, 92(2): 98~312.
- Yang Yaqi, Zhao Lei, Xu Qinqin, Zheng Rongguo, Liu Jianhua, Zhang Jin. 2019. Early Paleozoic tectonic evolution of the northern West Junggar (NW China): Constraints from Early Cambrian—Middle Silurian felsic plutons of the Chagantaolegai ophiolitic mélange. *Lithos*, 350~351: 105225.
- Yang Yaqin, Zhao Lei, Zheng Rongguo, Xu Qinqin, Liu Jianhua, Zhang Jin. 2020. Contents lists available at Science Direct Journal of Asian Earth Sciences journal homepage: An Early Ordovician fossil seamount of the Hongguleleng—Balkybay Ocean in the northern West Junggar terrane (NW China) and its implications for the ocean evolution. *Journal of Asian Earth Sciences*, 194: 104066.
- Yu Miao, Dick J M, Feng Chengyou, Li Bin, Wang Hui. 2020. The tectonic evolution of the East Kunlun Orogen, northern Tibetan Plateau: A critical review with an integrated geodynamic model. *Journal of Asian Earth Sciences*, 191: 104168.

- Zhai Qingguo, Chung Sunlin, Tang Yue, Hu Peiyuan, Jin Xiaochi, Wang Jun, Wang Haitao, Wang kuolung, Lee Haoyang. 2019. Late Carboniferous ophiolites from the southern Lancangjiang belt, SW China; Implication for the arc-back-arc system in the eastern Paleo-Tethys. *Lithos*, 344~345: 134~146.
- Zhang Ji'en, Xiao Wenjiao, Han Chunming, Ao Songjian, Yuan Chao, Sun Min, Geng Hongyan, Zhao Guochun, Guo Qianqian, Ma Chong. 2011a. Kinematics and age constraints of deformation in a Late Carboniferous accretionary complex in western Junggar, NW China. *Gondwana Research*, 19(4): 958~974.
- Zhang Ji'en, Xiao Wenjiao, Han Chunming, Mao Qigui, Ao Songjian, Guo Qianqian, Ma Chong. 2011b. A Devonian to Carboniferous intra-oceanic subduction system in western Junggar, NW China. *Lithos*, 125(1~2): 592~606.
- Zhang Ji'en, Chen Yichao, Xiao Wenjiao, Chen Zhenyu, Song Shuaihua. 2018#. Buoyant units on oceanic crust and their contributions to components of ophiolitic mélanges in orogenic belts. *Acta Petrologica Sinica*, 34(7): 1977~1990.
- Zhang Ji'en, Xiao Wenjiao, Luo Jun, Chen Yichao, Windley B F, Song Dongfang, Han Chunming, Safonova I. 2018. Collision of the Tacheng block with the Mayile-Barleik-Tangbale accretionary complex in western Junggar, NW China; Implication for Early-Middle Paleozoic architecture of the western Altai. *Journal of Asian Earth Sciences*, 159: 259~278.
- Zhang Ji'en, Chen Yichao, Yan Zhen. 2021a#. Architecture of ophiolite and ophiolitic mélange. *Chinese Journal of Geology*, 56(2): 560~595.
- Zhang Ji'en, Wang Junpeng, Dai Jingen, Feng Zhiqiang, Chen Yichao. 2021b#. Preface to the album "accretionary prism and mélange". *Chinese Journal of Geology*, 56(2): 355~356.
- Zhang Jin, Deng Jinfu, Xiao Qinghui, Lu Songnian, Pan Guitang, Zhang Zhiyong, Feng Yanfang. 2012#. New advances in the study of ophiolites. *Geological Bulletin of China*, 31(1): 1~12.
- Zhang Kexin, Yin Hongfu, Zhu Yunhai, Wang Guocan, Chen Nengsong, Hou Guangjiu. 2011#. Theory, method and practice of geological mapping in mélange area of orogenic belt. Wuhan: China University of Geosciences Press, 1~175.
- Zhang Kexin, Li Yangchun, Wang Lijun, Wang Jiaxuan, Xu Yadong, Wang Yonghe, Xin Houthian, Zhao Xiaoming, Yin Fuguang, Li Zhipei, Gu Yongchang, Yang Zhuliang, Fu Junyun. 2020#. The division of mélanges in the orogenic belt and its associated terminologies. *Geological Bulletin of China*, 39(6): 765~782.
- Zhang Qi, Li Dazhou, Zhang Kuiwu. 1985#. Preliminary study on Tongchangjie ophiolite mélange from Yun County, Yunnan Province. *Acta Petrologica Sinica*, 1(3): 1~14.
- Zhang Qi, Zhang Kuiwu, Li Dazhou. 1987#. The classification of basic and ultrabasic rocks from Hengduan region. *Acta Petrologica Sinica*, 3(3): 48~56.
- Zhang Qi, Li Dazhou, Zhang Kuiwu, Zhao Dasheng. 1990#. The characteristics of Yidun-type mafic-ultramafic rocks and their comparison with ophiolites. *Acta Petrologica Sinica*, 6(3): 33~42.
- Zhang Qi, Zhang Kuiwu, Li Dazhou. 1992#. Mafic-ultramafic Rocks in the Hengduan Mountains region. Beijing: Science Press; 1~216.
- Zhang Qi, Ma Baolin, Liu Ruoxin, Zhao Dasheng, Fan Qicheng, Li Qi, Li Xiuyun. 1995#. Relics of continental lithospheric mantle above a subduction zone: Geochemical characteristics of the Raobazhai ultramafic rocks in Anhui Province. *Science in China (Series B)*, 25: 867~873.
- Zhang Qi, Zhou Guoqing. 2001#. Ophiolites of China. Beijing: Science Press; 182.
- Zhang Qi. 2014#. Classifications of mafic-ultramafic rocks and their tectonic significance. *Chinese Journal of Geology*, 49(3): 982~1017.
- Zhang Qi. 2015#. Some problems on the Xigaze ophiolite. *Acta Petrologica Sinica*, 31(1): 37~46.
- Zhang Qi, Zhang Wei, Jiang Lili, Jiao Shoutao, Wang Cunzhi, Wang Zhen. 2020 a#. Orogenic peridotite and its significance. *Geological Bulletin of China*, 39(10): 1489~1506.
- Zhang Qi, Li Mingchao, Chen Wanfeng, Jin Weijun, Jiao Shoutao, Liu Xinyu, Han Shuai. 2020b#. The rise, fall and reborn of the petro-tectonic theory. *Geotectonica et Metallogenia*, 44(2): 289~296.
- Zhang Qi. 2021a#. Review and reflection on ophiolite research: Taking Shuanggou ophiolite as an example. *Acta Petrologica Sinica*, 37(4): 9657~9673.
- Zhang Qi. 2021b#. A brief introduction to Popper's Philosophy of science. *Gansu Geology*, 30(2): 1~13.
- Zhang Qi. 2021c#. Deduction, induction, falsification, and big data method: Methodology of scientific research. *Gansu Geology*, 30(3): 1~18.
- Zhang Shouguang, Wan Yusheng, Liu Guohui, Cong Yuexiang, Zhao Ziran. 1991#. Metamorphic geology of Kuanping Group in North Qinling. Beijing: Beijing Science and Technology Press, 1~119.
- Zhang Zhimeng, Jin Meng. 1979#. Two kinds of mélange and their significance in Xiangcheng-Derong area, Southwestern Sichuan. *Scientia geologica sinica*, (3): 205~214.
- Zhang Zongqing, Zhang Qi. 1995#. Geochemistry of Metamorphosed Late Proterozoic Kuanping ophiolite in the Northern Qinling, China. *Acta Petrologica Sinica*, 11(S1): 165~177.
- Zhao Lei, He Guoqi. 2013. Tectonic entities connection between west Junggar (NW China) and East Kazakhstan. *J. Asian Earth Sci.*, 72: 25~32.
- Zhao Lei, He Guoqi. 2014. Geochronology and geochemistry of the Cambrian (~518 Ma) Chagantaolegai ophiolite in northern West Junggar (NW China): constraints on spatiotemporal characteristics of the Chingize-Tarbagatai megazone. *Int. Geol. Rev.*, 56: 1181~1196.
- Zhao Zongfu. 1984#. Ophiolite and continental suture. *Scientia Geologica Sinica*, (4): 359~371.
- Zheng Jianping, Xiong Qing, Zhao Yi, Li Wenbo. 2019. Subduction-zone peridotites and their records of crust-mantle interaction. *Science China Earth Sciences*, 62(7): 1033~1052.
- Zheng Rongguo, Zhao Lei, Yang Yaqi. 2019. Geochronology, geochemistry and tectonic implications of a new ophiolitic mélange in the northern West Junggar, NW China. *Gondwana Research*, 74: 237~250.
- Zhi Xiachen, Jin Yongbin, Meng Qing, Gao Tianshan. 2004#. Trace element geochemistry of Raobazhai ultramafic complex, North Dabie Mountain. *Acta Petrologica Sinica*, 20(2): 463~472.
- Zhong Dalai, Wu Genyao, Ji Jianqing, Zhang Qi, Ding Lin. 1988#. Ophiolites were found in Southeastern Yunnan. *Science Bulletin*, 43(13): 1365~1370.
- Zhong Dalai. 1998#. Paleo-Tethyan Orogenic Belt in West Sichuan and West Yunnan. Beijing: Science Press; 1~231.
- Zhong Yun, Liu Weiliang, Xia Bin, Liu Jingnan, Guan Yao, Yin Zhenxing, Huang Qiangtai. 2017. Geochemistry and geochronology of the Mesozoic Lanong ophiolitic mélange, northern Tibet: Implications for petrogenesis and tectonic evolution. *Lithos*, 292-293: 111~131.

Review of ophiolites in China

—Discuss on a new method for the study of ophiolites

ZHANG Qi¹⁾, REN Jishun²⁾, ZHAO Lei²⁾, JIAO Shoutao^{3, 4)}, WANG Yue⁵⁾, WANG Zhen²⁾

1) *Institute of Geology and Geophysics, Chinese Academy of Sciences, Beijing, 100029;*

2) *Chinese Academy of Geological Sciences, Beijing, 100037a;*

3) *Development Research Center of China Geological Survey, Beijing, 100037;*

4) *Technology Innovation Center of Geological Information, MNR, Beijing, 100037;*

5) *School of Earth Sciences and Resources, China University of Geosciences (Beijing), Beijing, 100083*

Abstract: China's ophiolite research has made many achievements, and there are many problems. The article briefly reviews several issues in Xigaze, Sanjiang, Qinghai, North Qinling, Central Asian orogenic belts, northeast and southern China ophiolite belts, and points out that China's ophiolite belts are divided too much. Considering many that may not be ophiolite as ophiolite. What needs to be done now is to remove the falsehood and carry out a serious clean-up of the Chinese ophiolite. The article pointed out that the mantle peridotite is undoubtedly the most important member of the ophiolite, which comes from under the ocean crust. There is another type of mantle from under the continental crust in the world, called orogenic peridotite. Therefore, the mantle peridotite is not unique to ophiolite. In addition, more and more data show that MORB does not only appear in mid-ocean ridges, but also in many other tectonic environments, such as ocean islands, island arcs, continental overflow basalts, intraplate basalts, and Archaean (Tholeiite and Komatiite), etc. Therefore, it cannot be simply considered that mantle peridotite and MORB are exposed in a region is ophiolite. The article reviewed the two development stages of ophiolite research: the previous stage was marked by the Penrose Conference in 1972, which opened a letter chapter to ophiolite research. At that time, the academic circles were mainly concerned with the petrology and geochemistry of ophiolite, as well as the rock assemblage of ophiolite. The new stage has gradually developed from the latter part of the last century, and outstanding progress has been made recently. The author emphasizes that the ophiolite (more ophiolite mélange outcropped in the wild) is the ophiolite suite, which includes not only a specific rock combination, but also deep-sea deposits and mixed accumulations. The article affirmed the many new discoveries, new ideas and new developments in the study of ophiolite structures by Chinese and foreign academic circles. In addition, the geophysical methods introduced by Shao Ji'an are meaningful. Ophiolite is a complex system with many uncertain issues. It requires the joint efforts of structural geologists, stratigraphers, paleontologists, petrologists, geochemists, geochronologists and geophysicists.

Keywords: China; ophiolite; cleanup; geological mapping; geophysics; method

Acknowledgements: This study was supported by the Chinese Geological Survey (No. DD20190358), State Key Laboratory of Lithospheric Evolution, Institute of Geology and Geophysics, Chinese Academy of Sciences (No. 81300001), the National Key Research and Development Program of China (Nos. 2018YFC1505501, 2016YFC0600510), and the Natural Science Foundation of China (No. 41872253)

First author: ZHANG Qi, male, born in 1937, professor, is mainly engaged in petrology and geochemistry; Email: zq1937@126.com

Corresponding author: REN Jishun, male, born in 1935, professor, is mainly engaged in tectonics; Email: renjishun@cags.ac.cn

Manuscript received on: 2021-11-11; Accepted on: 2022-03-02; Network published on: 2022-03-20

Doi: 10.16509/j.georeview.2022.03.025

Edited by: ZHANG Yuxu