

·基础地质·

蛇绿岩研究的最新进展

张 进¹, 邓晋福², 肖庆辉³, 陆松年⁴, 潘桂棠⁵, 张智勇³, 冯艳芳³

ZHANG Jin¹, DENG Jin-fu², XIAO Qing-hui³, LU Song-nian⁴,

PAN Gui-tang⁵, ZHANG Zhi-yong³, FENG Yan-fang³

1. 中国地质科学院地质研究所, 北京 100037;

2. 中国地质大学(北京), 北京 100083;

3. 中国地质调查局发展研究中心, 北京 100037;

4. 中国地质调查局天津地质矿产研究所, 天津 300170;

5. 中国地质调查局成都地质矿产研究所, 四川 成都 610082

1. *Institute of Geology, Chinese Academy of Geological Sciences, Beijing 100037, China;*

2. *China University of Geosciences, Beijing 100083, China;*

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

4. *Tianjin Institute of Geology and Mineral Resources, China Geological Survey, Tianjin 300170, China;*

5. *Chengdu Institute of Geology and Mineral Resources, China Geological Survey, Chengdu 610082, Sichuan, China*

摘要:关于蛇绿岩的形成、定义和分类争论了近 200 年。早期蛇绿岩被认为是成因联系的几种岩石的组合,发育在优地槽的核部。在板块构造中它被看作形成于洋脊的古洋壳残片。经过几十年的研究,发现导致蛇绿岩多样性的因素很多,一个新的定义和分类方案被提出。新定义强调了蛇绿岩形成的构造环境,认为在威尔逊旋回的各个阶段都会形成性质不同的蛇绿岩,并根据生成环境将蛇绿岩分为两大类,即与俯冲作用无关和与俯冲作用相关的蛇绿岩,两大类型还可以划分出不同的亚类。这些类型的蛇绿岩有其特有的地球化学、岩石学指标和内部结构。最近的研究还发现蛇绿岩产生的主要时段与全球超大陆的形成、裂解,以及巨型地幔柱活动的时间吻合。根据新分类方案,一部分前寒武纪绿岩应属于蛇绿岩,表明在太古宙时期地球已进入板块构造体制。新的定义和分类为蛇绿岩研究指出了新的方向。

关键词:蛇绿岩;分类;板块构造;太古宙;全球构造

中图分类号:P581; P588.1

文献标志码:A

文章编号:1671-2552(2012)01-0001-12

Zhang J, Deng J F, Xiao Q H, Lu S N, Pan G T, Zhang Z Y, Feng Y F. New advances in the study of ophiolites. *Geological Bulletin of China*, 2012, 31(1):1-12

Abstract: The dispute on the origin, definition and classification of ophiolites has lasted for two hundred years. In the early period, ophiolite was interpreted as a rock assemblage which was developed from a consanguineous igneous process and intruded into the axial part of the geosynclines. In the plate tectonics, it is regarded as the relic of the subducted oceanic plates produced in the middle ocean ridges. However, based on tens of years' studies, people have found that factors affecting the origin of the ophiolites are varied, and a new definition and new classification of the ophiolites have been put forward recently. This new definition emphasizes the tectonic setting in which the ophiolites were developed, and argues that ophiolites with different characteristics could have been developed at every stage of the Wilson cycle. The new classification is based on the tectonic environment in which the ophiolites were developed. Two groups have been classified, i.e., subduction-related ophiolites and subduction-unrelated ones. The two groups could be divided

收稿日期:2011-09-08;修订日期:2011-10-31

资助项目:中国地质调查局全国重要矿产预测评价项目二级课题《全国重要矿产成矿地质背景研究》(编号:1212010733802)

作者简介:张进(1973-),男,研究员,从事构造地质、盆地分析研究。E-mail: zhangjinem@sina.com

into several subgroups respectively. All these ophiolites have their own characteristic geochemical and petrological indexes and internal structures. Recent studies also reveal the main periods in which the ophiolites originated were consistent with the development and breakup of the super-continents and superplumes. Some recent studies also show that some pre-Cambrian greenstones should belong to the ophiolites based on the new classification. This means that the plate tectonic movement occurred during the Archean. The new definition and new classification point to the new direction for the study of ophiolites.

Key words: ophiolite; classification; plate tectonics; Archean; global tectonics

在地质学的发展过程中,专业术语方面的争论一直经久不息,诸如“复理石”、“磨拉石”、“混杂岩”、“陆内造山”、“蛇绿岩”、“前陆盆地”等等。争论的原因一方面是不同的研究者观察和理解问题的角度不同,另一方面是随着研究的深入,对研究客体的实质有了更深层次和更广的理解,导致出现与最初的定义不同的观点。虽然争论会导致对一些客体理解暂时的错误、模糊或后退,但最终会促使人们(科学家)对研究客体本质的进一步理解,从而促进学科的进步,蛇绿岩就是其中最为著名的例子。经过近 200 年的探索,蛇绿岩的定义和分类几经变化,蛇绿岩内涵的变化体现了地质学和地质思维不断向深度和广度拓展的过程。近年来,国外以 Yildirim Dilek 为代表的科学家在总结前人大量研究的基础上,对蛇绿岩的定义和分类进行了较大的改动。本文一方面主要介绍 Dilek 等^[1]最近的蛇绿岩的新定义和新分类,并与之前的定义和分类简单做一比较;另一方面,中国是一个蛇绿岩非常发育的国家, Dilek 等^[1]新的蛇绿岩划分方案中对中国的蛇绿岩的论述不多,该划分方案在中国是否具有很强的适用性,是否能够认识中国地质历史和蛇绿岩研究提供新的思路,希望此文对地学工作者,尤其是野外一线的工作者有所帮助。至于蛇绿岩研究中很多更加细节的问题,诸如现代大洋岩石圈地幔橄榄岩与古大洋岩石圈地幔橄榄岩的 LREE 富集程度不同的原因、蛇绿岩的上部熔岩的来源等问题不在本文讨论的范围内。

1 蛇绿岩的研究历史

“蛇绿岩”一词最早由法国矿物学家 Alexandre Brongniart 于 1813 年在关于混杂岩里蛇纹石的研究中所使用;随后他对早前蛇绿岩的定义进行了修改,重新定义为出现在亚平宁地区的一套火成岩类岩石(超镁铁岩、辉长岩、辉绿岩和火山岩)。这个定义虽然指出了蛇绿岩的主要组成,但没有涉及它的形成和来源。1927 年德国地质学家 Steinmann^[2]在地中海

山脉内蛇绿岩的文章中,把橄榄岩(蛇纹岩)、辉长岩、辉绿岩、细碧岩和有关的岩石都归属为最初形成于地槽轴部原位侵入的一种有生成关系的岩石组合。该定义首次将蛇绿岩的不同组成部分看作具有紧密时空联系的组合,而且 Steinmann^[2]还指出了蛇绿岩是构造移置体,并导致了大规模逆掩推覆在阿尔卑斯地区的发现。Steinmann^[2]有关蛇绿岩的定义被后人总结为 Steinmann 三位一体(Steinmann trinity)^[3]。Steinmann 的定义在欧洲得到了很多学者的支持和运用,但在美国则没有引起太多的注意。Hess^[4]不赞同 Steinmann 关于蛇绿岩的定义,认为他的蛇绿岩概念令人困惑,因为“它模糊了蛇绿岩的不同成员与构造旋回之间的决定性(关键性)的关系”。Hess^[5]根据其在阿巴拉契亚造山带的观察,发现蛇绿岩的围岩没有明显的热变质晕,并指出蛇绿岩是一种低温富水的橄榄岩浆所形成的。20 世纪 60 年代,随着板块构造理论的逐步建立,在获得了大量海底地球物理资料和对陆上几个典型蛇绿岩(塞浦路斯 Troodos 蛇绿岩和阿曼 Semail 蛇绿岩)研究的基础上,人们逐渐认识到蛇绿岩在再造大陆中的重要性,并于 1972 年在美国召开彭罗斯会议,就蛇绿岩方方面面的问题进行了热烈的讨论。会后形成了一个蛇绿岩的定义,重新确认了 Steinmann 蛇绿岩定义中的主体,并认为蛇绿岩是古大洋地壳和上地幔的残片,形成于大洋中脊,大洋地壳具有成层性,它们与蛇绿岩的不同组成部分之间是一一对应的。该定义的提出具有里程碑的意义,随后的几十年里受到来自世界各地很多地质学家的支持,尤其是使大西洋两岸地质学家关于蛇绿岩的认识渐趋一致。但是这个彭罗斯会议形成的蛇绿岩的定义并没有指出蛇绿岩形成的构造环境,这为日后的蛇绿岩争论埋下了伏笔。

2 蛇绿岩构造环境解释

在板块构造理论确立之前,蛇绿岩多被解释成侵入到优地槽沉积物中的火成岩^[6],甚至认为蛇绿

岩是喷发于海床之上巨量玄武质岩浆分异结晶的产物^[7-8]。20 世纪 60 年代在板块构造理论的框架下,结合来自现今大洋盆地的地震数据,以及对典型蛇绿岩的观察,建立了理想化的蛇绿岩“层序”。这个模型中蛇绿岩被认为主要形成于古洋中脊^[9]。但是 Coleman^[3]认为目前的大洋地壳形成过程不一定与过去相同,目前发现的蛇绿岩不到所有形成于大洋中脊的大洋地壳总体积的 0.001%,建议在研究中要谨慎运用这个类比,并认为可能还存在不为人们所知的其它机制。Hess^[4]认为目前发现的蛇绿岩主要形成于岛弧环境,不能代表大洋地壳,这个论述比 Miyashiro^[10]正式提出蛇绿岩的岛弧成因早了近 20 年。Miyashiro^[10]在地球化学研究中发现,原先认为形成于古大洋中脊的塞浦路斯 Troodos 蛇绿岩中大约 1/3 的下部枕状熔岩和席状岩墙岩石遵循钙碱性趋势,意味着这些岩石组合形成于具有薄大洋地壳的岛弧环境中。这篇文章在蛇绿岩研究中的作用类似于板块构造理论在地球科学研究中所起的革命性作用^[1]。文章的发表引起了巨大的争论,开拓了思路,人们发现蛇绿岩不一定只形成于大洋中脊,将蛇绿岩的形成与俯冲过程联系起来。随后的研究表明,西太平洋俯冲带上盘扩张环境中也可以形成蛇绿岩^[11]。这些研究最终导致了 20 世纪 80 年代俯冲带上盘(SSZ)蛇绿岩类型的确立^[12]。Izu-Bonin-Mariana 弧沟系统的弧前环境是现今研究程度最高的现代 SSZ 型蛇绿岩带之一^[1]。1975 年 Miyashiro^[13]根据地球化学特征将位于大陆边缘的碎屑楔状体中的玄武岩也划归蛇绿岩,但遭到了 Coleman^[3]的强烈反对。随着近年来各种地球物理资料的积累,发现过去认为的成层的大洋地壳并非如此简单,地壳内部的横向不连续性和纵向不均一性是大洋地壳(尤其是快速扩张洋脊形成的地壳)的重要特征,“彭罗斯型”大洋地壳的模型(成层性)已经不能适用。同时俯冲带上盘的弧前、初始弧和弧后环境已经成为被广泛接受的蛇绿岩形成的构造环境^[1,14-16]。可以看出 1972 年确立的蛇绿岩定义已经不能满足研究的需要,某种程度上已成为目前研究的桎梏,一些学者开始酝酿蛇绿岩新的定义和分类方案,试图涵盖所有确立的蛇绿岩类型,并尝试与不同的构造环境挂钩^[1,15-16]。

3 蛇绿岩定义的演变

1972 年以来的研究表明,多数蛇绿岩代表着一

个动力学的演化过程,在火成岩演化过程中多次的岩浆幕和不同的地幔源区致使它们表现出不同的地球化学特征,以及横向不连续和纵向不均一的地壳结构。蛇绿岩的岩浆、结构与熔融事件,岩浆分异,扩张速度和几何学,洋内断裂作用,与构造伸展相关的变形、距离地幔柱或海沟的远近、地幔温度与富集程度,以及原生火成演化过程中可获得的流体都有关,因此蛇绿岩是复杂地质过程的产物。1972 年彭罗斯型蛇绿岩的定义不能反映实际蛇绿岩组成和产出的多样性,因此不再实用^[1]。

为此 Dilek 等^[1,15-16]经过近 10 年的摸索,提出了如下新的蛇绿岩定义:非原地的上地幔和大洋地壳岩石碎片,板块汇聚作用使形成物的原生火成岩发生了构造置换。这样的岩片从底至顶应包括具备岩石成因和时代联系的橄榄岩、超镁铁质至长英质地壳侵入岩和火山岩的一个岩套(席状岩墙可有可无);其中一些单元可以在不完整的蛇绿岩中缺失。蛇绿岩的侵位是一个过程,从其原生地球动力学环境中大洋岩石圈的运移开始,并以在造山作用中卷入造山带而结束。

彭罗斯会议把蛇绿岩定义为^[9]:蛇绿岩是一种特殊的镁铁岩至超镁铁岩组合。不能把它用作一个岩石的名称或在填图中作为一个岩性单位。在一个发育完整的蛇绿岩中,岩石类型从底部向上由下列岩石组成,①超镁铁杂岩:由不同比例的斜辉橄榄岩、二辉橄榄岩和纯橄岩组成,并或多或少地蛇纹石化;②辉长杂岩:一般具有堆晶结构,通常包含堆晶的橄榄岩和辉石岩,它们经常比超镁铁杂岩变形程度差;③镁铁质席状岩墙杂岩;④镁铁质火山杂岩,通常为枕状。伴生的岩石类型包括:①条带状燧石、薄层页岩夹层及少量灰岩;②普遍与纯橄岩伴生的豆荚状铬铁矿体;③钠长英质侵入岩和喷出岩。一个蛇绿岩可以不完整,或经历了构造肢解或变质作用的改造。

可以看出 Dilek 的蛇绿岩新定义强调蛇绿岩的形成是个过程(从大洋岩石圈运移开始,并以卷入造山带而结束),在不同的地球动力学环境中,多样的岩石学、地球化学和构造过程,导致蛇绿岩在结构、构造和地球化学特征上出现多样性。新定义对原蛇绿岩组成部分的描述没有太大的改变,而更侧重于不同的构造环境所导致的多样性,这是在彭罗斯定义基础上的重要发展,并指出从板块分离至最终板

块聚合的各个阶段(即威尔逊旋回的每个阶段)都会形成不同的蛇绿岩。

4 分类方案

定义不同直接导致分类的不同。在此之前^[1],根据不同的标准也出现很多蛇绿岩的分类方案,曾多达十几种^[17]。但早期多数分类方案没有突出蛇绿岩生成的构造环境。而新的分类方案在各种数据的基础上侧重于蛇绿岩形成的构造环境。

4.1 早期的分类方案

4.1.1 国外学者主要的分类方案

由于判别依据不同,世界上蛇绿岩的分类方案也有很多,其中较有影响的如下。

Miyashiro^[13]根据拉斑玄武岩、钙碱性玄武岩、碱性火山岩是否出现和它们之间的组合将蛇绿岩初步分为Ⅰ、Ⅱ、Ⅲ型,并认为还有其它类型的可能。该方案可能是较早的以蛇绿岩的生成环境作为划分依据的。但由于仅考虑了地球化学信息,受到了一些学者的质疑^[3]。Pearce 等^[12]根据蛇绿岩上部火山岩形成的构造背景将蛇绿岩分为俯冲带型(SSZ)和洋中脊型(MOR)2种。Miyashiro^[13]和 Pearce 等^[12]的划分方案(方法)对现今的蛇绿岩研究影响很大。

Beccaluva 等^[18]根据玄武岩中 Ti 的含量,将蛇绿岩分为高 Ti、低 Ti 和非常低 Ti 类型的蛇绿岩。

Church 等^[19]根据堆晶岩中矿物的结晶顺序将蛇绿岩分为斜方辉石型、单斜辉石型和斜长石型。Boudier 等^[20]根据地幔橄榄岩的特征将蛇绿岩分为方辉橄榄岩型和二辉橄榄岩型。Ishiwatari^[21]根据岩石的亏损程度将其分为古里亚型、夜久野型和巴布亚型。这些分类多从岩石学的角度进行考虑,对蛇绿岩中各个组成部分之间的关系做了讨论,应该说这些分类是直接建立在 1972 年彭罗斯会议关于蛇绿岩的定义之上的。

Moore^[22]和 Coleman^[23]根据蛇绿岩的侵位特征将蛇绿岩分为特提斯型和科迪勒拉型。这个分类是以蛇绿岩产出的构造环境(注意不是生成环境)为判别依据的,但目前的研究发现即使在同一个造山带中也发育来源不同的蛇绿岩^[15-16]。

4.1.2 中国学者主要的分类

中国发育有不同时期、不同规模的造山带,是蛇绿岩分布非常广泛的国家。中国科学家在蛇绿岩的分类上也进行了很多尝试,其中大部分是以彭罗斯

蛇绿岩定义为基础,根据蛇绿岩中的地球化学信息进行分类的。

朱宝清等^[24]根据变质橄榄岩中 Al_2O_3 和 CaO 的含量将蛇绿岩分为低铝型和高铝型。王希斌等^[25]根据变质橄榄岩中 REE 的型式分为 V 型、LREE 富集型、烟斗型、LREE 亏损型和平坦型。赵建新等^[26]根据 Nb 同位素的特征分为 3 类。Wang 等^[27]根据地幔橄榄岩的部分熔融程度将其分为 3 种类型:高熔型、中熔型和低熔型。肖序常^[28]则根据扩张速率分为快速扩张型、中速扩张型、中慢速扩张型和极慢速扩张型。国外有关蛇绿岩的研究也表明,斜方辉橄榄岩和二辉橄榄岩可以都出现在蛇绿岩中,它们可以用来划分蛇绿岩的类型和推测其形成时大洋的扩张速度^[20,29]。

张旗^[30]则根据玻安岩是否出现、地幔岩的亏损程度和玄武岩的类型将蛇绿岩划分为科迪勒拉型(北祁连型/西准噶尔型)、东地中海型(双沟型)和西地中海型(日喀则型)3 类。该分类可能是中国比较早的认识到蛇绿岩多样性的研究。

4.1.3 Yildirim Dilek^[16]的分类方案

在 2011 年新的蛇绿岩分类方案提出之前, Dilek^[16]曾提出一个工作划分方案(working classification scheme):Ligurian-Type Ophiolites (Northern Apennines, Western Alps) (新方案中的陆缘型——CM);Mediterranean-Type Ophiolites (Albania, Greece, Cyprus, Turkey to Oman and Tibet) (新方案中的俯冲带上盘型——SSZ);Sierran-Type Ophiolites (Pacific Rim) (新方案中的火山弧型——VA);Chilean-Type Ophiolites (Rocas Verdes) (新方案中的俯冲带上盘型——SSZ);Macquarie-Type Ophiolites (Macquarie Island ~1500 km south-southeast of Tasmania) (新方案中的洋中脊型——MOR);Caribbean-Type Ophiolites (Caribbean region) (新方案中的地幔柱型——P)和 Franciscan-Type Ophiolites (Pacific Rim) (俯冲-增生杂岩型,该类型没有包括在新的分类方案中)。该方案是以蛇绿岩的生成环境为依据进行分类的初步尝试,是 2011 年最新分类方案的基础。

4.2 新分类方案

在早期工作划分方案的基础上,经过几年的摸索,并收集了大量世界各地典型蛇绿岩的地球化学资料, Dilek 等^[1]于 2011 年正式提出基于新的蛇绿

岩定义,以蛇绿岩生成环境为依据的新分类方案。新分类方案中首先分出 2 个大类型,即与俯冲作用无关的蛇绿岩和与俯冲作用相关的蛇绿岩。其中与俯冲作用无关的蛇绿岩可以划分为陆缘型(CM, Continental margin 的缩写)、洋中脊型(MOR, Mid-ocean-ridge 的缩写)和地幔柱型(P, Plume-type 的缩写)3 个亚类;与俯冲作用相关的蛇绿岩可以划分出:俯冲带上盘型(SSZ, Suprasubduction-zone 的缩写)和火山弧型(VA, Volcanic-arc 的缩写)2 个亚类。需要提及的是,早期工作划分方案中的俯冲-增生杂岩型蛇绿岩(Franciscan-Type Ophiolites)没有出现在新的分类方案中,关于其原因将在后文说明。下面将简单介绍新分类方案的组成^[1]。

4.2.1 与俯冲作用无关的蛇绿岩类型

陆缘型(CM):形成于初始大陆裂解之后大洋盆地演化的早期阶段。这些蛇绿岩由贫岩浆的洋陆过渡带碎片组成,如现今的原位洋陆过渡带红海-西阿拉伯裂解边缘。经典的陆缘蛇绿岩例子包括北亚平宁(Ligurian)和西阿尔卑斯侏罗纪蛇绿岩^[31-32]。这些蛇绿岩包括剥露的由玄武质熔岩直接覆盖的陆下岩石圈地幔二辉橄榄岩,并被小辉长岩类侵入,基性岩墙非常少。地壳岩石表现出正常(N) MORB 型地球化学特征。陆缘型蛇绿岩与 Ishiwatari^[21]和 Boudier 等^[20]所划分的二辉橄榄岩型(LOT)蛇绿岩一致,它们是弱亏损陆下岩石圈地幔和上涌软流圈低度熔融的产物^[33]。Rampone 等^[31]认为该类型蛇绿岩是大陆岩石圈被动拉张环境下形成的。

洋中脊型(MOR):形成于靠近地幔柱(冰岛)或远离地幔柱的洋中脊、靠近海沟的洋中脊或远离海沟的弧后扩张脊上。通常具有彭罗斯型的结构,表现出 N-MORB(希腊的 Argolis-Pindos)、富集(E)MORB(Macquarie 岛)和/或混染(C)MORB(智利 Taitao)的地球化学性质。洋中脊蛇绿岩对应于 Miyashiro^[13]根据拉斑玄武岩和碱性火山岩的出现所划分的 II 型和 III 型蛇绿岩。洋中脊型(MOR)进一步细分为靠近地幔柱型(PP, plume-proximal 的缩写)、远离地幔柱型(PD, plume-distal 的缩写)和靠近海沟型(TP, trench-proximal 的缩写)3 个次级类型。

地幔柱型(P):形成于靠近地幔柱的扩张脊上,为洋底高原的一部分(加勒比高原)。该类型蛇绿岩具有厚度大的侵入岩和火山岩序列,并显示出

亏损(D-MORB)至富集(E-MORB)微量元素的分布特征。

4.2.2 与俯冲作用相关的蛇绿岩类型

俯冲带上盘型(SSZ):形成于俯冲带上的伸展板块,如现今的 Izu-Bonin-Mariana 弧-沟后退系统^[34-35]。它们可以分别形成于伸展的初始弧后环境至弧前环境(BA-FA)、弧前环境(FA)、大洋和大陆弧后盆地(OBA 和 CBA)。SSZ 型蛇绿岩通常具备彭罗斯型蛇绿岩的结构并可表现出 MORB-IAT(岛弧拉斑玄武岩)-玻安岩地球化学特征的岩浆活动。SSZ 弧前蛇绿岩标志大洋盆地关闭期间的初始俯冲事件^[36-37]。SSZ 型蛇绿岩不同的亚单元之间的年龄范围通常不超过 10Ma。它们与 Miyashiro^[13]的 I 型蛇绿岩和 Ishiwatari^[21]、Boudier 等^[20]的方辉橄榄岩型(HOT)蛇绿岩一致,都是亏损的方辉橄榄岩地幔高度熔融的产物。俯冲带上盘型(SSZ)进一步细分为弧后至弧前(BA-FA, backarc to forearc 的缩写)、弧前(FA, forearc 的缩写)、大洋弧后(OBA, oceanic backarc 的缩写)和大陆弧后(CBA, continental backarc 的缩写)4 个次级类型。SSZ 型蛇绿岩是目前分布最为广泛的蛇绿岩类型^[15-16]。

火山弧型(VA):形成于硅镁质弧背景上(如菲律宾和加利福尼亚 Sierra Nevada)。它们具有多成因的地壳结构,一般具有已变形的较老的大洋基底、由辉长岩类侵入体和浅成侵入体组成的基性下地壳、中等至发育成熟的闪长质-英云闪长质地壳、由安山质-流纹质喷出岩和岩墙(局部呈席状)构成的上地壳及火山碎屑盖层。这些地壳单元展现了拉斑质至钙碱性的地球化学特征。火山-弧型蛇绿岩较上盘俯冲带型蛇绿岩(SSZ)有更厚、更完全熔融的具钙碱性组成的弧地壳。火山-弧型蛇绿岩不同组成单元的形成时间范围可超过 20~30Ma^[38]。该类型蛇绿岩与 Miyashiro^[13]的 I 型蛇绿岩类似。

上述几种亚类在 Dilek^[16]的工作划分方案中都有涵盖,但早期分类中的俯冲-增生杂岩中的蛇绿岩(Franciscan-Type Ophiolites)^[16]没有包括在新方案内。早前该类型的定义包括了任何上述的不同类型的蛇绿岩碎片,局部还可以与卷入到增生楔的远洋-半深海沉积、海沟沉积伴生。因为这些蛇绿岩包括了从下行俯冲板块上铲刮下来的大洋岩石的构造岩片,它们具有多样的岩石组合、多样的变质程度和

变形样式,以及各组成单元之间无成因联系的化学亲缘性。由于这些蛇绿岩没有特别的岩石组成,缺乏独特的地球化学特征,因此在最新的划分中被排除在外。

5 新分类的地球化学判别依据

蛇绿岩的早期研究实际上主要是岩石学方面的工作,涉及到蛇绿岩各个组成部分如何形成和它们之间的相互关系^[2,4,7-8,39-41]。自从板块构造理论框架建立起来以后,地球化学在蛇绿岩的研究和分类中就占据主导地位,一系列不同的判别依据和蛇绿岩类型的识别均建立在大量的地球化学数据的积累、分析和对比上^[10,12-13,42-46]。但由于不同研究者所选择的元素可能不同,对同一岩石(或组合)会得出不同的结论^[13,42]。

Dilek 等^[1]的方案实际上也主要是根据地球化学信息,并结合一定的岩石学和地质学资料(如变形特征等)划分的。然而蛇绿岩中的熔岩和岩墙一般经历了不同程度水热活动的蚀变^[4,47],以及洋内环境下的绿片岩至角闪岩相变质作用^[13]。为了确定蛇绿岩的原始地球化学组成,Dilek 等^[1]呼吁最好用这些作用过程中相对稳定的元素。

研究表明,在玄武岩与海水之间的低温反应过程中,Fe 和 Si 轻微淋滤而 Na 和 Mg 富集^[13],Al、Ti 和 P 最不活跃,Ca 相对亏损^[48-49]。微量元素(Y、Zr、Nb、V、Cr、Co、Ni)、稀土元素(REEs)、Th 及 Ta 相对稳定^[50]。变基性岩中过渡金属元素(Ti、V、Ni、Cr、Co、Cu、Zn、Fe、Mn)及 Mg 在中等至高级变质作用中活跃程度相对很小^[51]。在基性枕状熔岩的水热蚀变中,Ba 显示可变的蚀变趋势^[52]。Pb 中等至强烈亏损^[53]。枕状熔岩玻璃外壳的蚀变橙玄玻璃化将导致 K、Rb 和 Cs 的富集^[54]。因此,Al、Ti、P、Y、Zr、Nb、V、Cr、Co、Ni、稀土元素、Th 及 Ta 是可供选择的元素。而 Ti、V、Th、Yb、Nb 在变质作用和蚀变中最不活跃,它们是最为可靠的区分俯冲相关岩浆和其它类型岩浆的指标,尤其在与其它地球化学信息和基于野外的区域构造约束联合运用中更加可靠^[1]。

在判别图解的选择问题上,Dilek 等^[1]建议综合使用 SiO₂-MgO 图解、SiO₂-TiO₂ 图解、MORB 标准化稀土元素配分图解、Nb/Yb-Th/Yb 图解和 Ti/V 图解进行蛇绿岩不同类型的划分和判别。

Dilek 等^[1]的研究和他们所收集的全世界蛇绿岩

的资料表明,与俯冲带相关的蛇绿岩在给定 MgO 组分含量的情况下,SiO₂ 和 TiO₂ 变化较与俯冲带无关的蛇绿岩大。这 2 种成分变化最大的以俯冲带上盘弧后至弧前型蛇绿岩为代表,但俯冲带上盘弧前型蛇绿岩表现出基本不变的低 TiO₂ 成分。地幔柱型(P)蛇绿岩 MgO 具有最大的分布范围。同样 MOR 型的 3 个次级类型在 SiO₂-MgO 和 SiO₂-TiO₂ 判别图解上也有比较清楚的显示^[1]。

在 MORB 标准化稀土元素配分图解中^[1],陆缘型、洋中脊型和地幔柱型蛇绿岩在 V 至 Zr 之间相对平坦,并向最不相容性元素升高(Ba、Rb、Cs)。俯冲带上盘型(SSZ)和火山-弧型(VA)蛇绿岩表现出较大的变化,通常它们富集最不相容和非保守元素(Cs、Rb、Th),而且通常显示负的 Ta、Nb 异常和正的 Pb、Sr 异常。

在 Ti/V 图解中^[1],陆缘型(CM)、洋中脊型(MOR)和地幔柱型(P)蛇绿岩的 Ti/V 比率横跨 20~50 的范围,这是典型洋中脊玄武岩的范围,而俯冲带上盘型(SSZ)和火山-弧型蛇绿岩的 Ti/V 比率小于 10 或大于 50。

与俯冲相关的和与俯冲无关的蛇绿岩次级类型在 Ti/V 分布上表现出明显的不同^[1]。地幔柱次级类型的熔岩、岩墙基本上与陆缘型、靠近海沟的洋中脊次级类型不重叠。上盘俯冲带弧后至弧前次级类型在 Ti/V 图解中分布范围最大,这是俯冲带控制(影响)下的岩浆系统可以产生从玻安岩到岛弧拉斑玄武岩至 MORB 型岩浆的缘故。上盘俯冲带弧前次级类型的基性熔岩和岩墙基本上全分布在玻安岩范围内,与上盘俯冲带大洋弧后盆地次级类型不重叠^[1]。

在 Nb/Yb-Th/Yb 图解中^[1],陆缘型(CM)、洋中脊型(MOR)、地幔柱型(P)蛇绿岩的熔岩和岩墙样品点都投到地幔序列内;上盘俯冲带(SSZ)和火山-弧型(VA)蛇绿岩表现出明显偏离这个地幔排列而趋向与俯冲有关的马里亚纳岛弧区域。

6 不同构造环境蛇绿岩类型的岩石成因

不同蛇绿岩类型除了具有特征性的地球化学指标外,在岩石学上也各有特征。在新分类方案中,各种类型的蛇绿岩岩石成因如下。

洋中脊型(MOR)蛇绿岩与大洋扩张中心形成的大洋地壳,上涌软流圈减压熔融、熔体集中上升形

成的熔体透镜体,以及相关的晶粥带有关^[1]。熔体透镜体上方岩浆沿洋脊轴部挤入和洋底喷发造成了地壳的增生。熔岩和岩墙比原始地幔产生的岩浆更亏损不相容元素。局部产生于不相容元素富集的地幔源区的熔体可以分离并上升,形成非扩张轴部的侵入体,并为靠近洋脊的富集地幔型熔岩提供物质。研究表明,岩浆供给速率的变化、洋底扩张速率和扩张脊下方的热结构控制了岩浆增生的方式和所形成洋壳的结构、构造^[55]。

地幔柱型(P)蛇绿岩形成于靠近地幔柱的大洋脊上或地幔柱头部的分批玄武质和苦橄质岩浆重复进入先前大洋地壳所形成的洋底高原。熔岩的组成范围从 N-MORB 到 T-MORB 至 E-MORB。地幔柱头部由高温导致最高程度的熔融。可凭借较高的 Mg 含量、内部结构和独特的火山层序区分地幔柱型和具有 MORB 特征的蛇绿岩。地幔柱蛇绿岩以块状玄武质熔岩流、稍少的枕状熔岩流、苦橄质玄武岩的出现及少量的沉积物为特征,它们被辉长岩类岩床和局部超镁铁质岩床所侵入。局部地区在层序较高的位置枕状熔岩角砾、玻璃质碎屑岩和少量沉积岩(硅质岩、页岩和灰岩)与玄武质熔岩互层。

俯冲带上盘型(SSZ)起因于初始俯冲和随后板片快速后退所导致的在上盘板块的伸展。在俯冲的初始阶段,岩浆首先起因于深部二辉橄榄岩地幔的减压熔融,并产生了具类 MORB 成分的最早的地壳单元。熔融的后续阶段受到板片脱水、交代作用、交代橄榄岩重复多幕部分熔融等因素的强烈影响。重复多次水化地幔的熔融导致高度亏损富橄榄石和斜方辉石源区的形成。软流圈底劈、地幔横向流动、板片派生流体的进一步参与使地幔楔温度上升,导致浅部方辉橄榄岩部分熔融,形成了富 Mg、Si 和含水的玻安质熔体。玻安质岩墙和熔岩代表最年轻的岩石组合。该型蛇绿岩通常表现出从 MORB 到岛弧拉斑玄武岩再到玻安质火成活动的系列演化特征^[35]。

火山-弧型(VA)形成的初始阶段起因于基性岩浆。随着不断的俯冲和弧岩浆的渗透,水化的基性地壳部分熔融,形成英云闪长质岩浆,这种英云闪长质地壳随着火山弧的逐渐成熟而变厚。残余基性地壳可以转化成橄榄岩残余体。该类蛇绿岩包括了被成熟岛弧组合覆盖的较老的大洋岩石圈基底、基性

下地壳中的辉长质侵入岩和块状辉绿岩、闪长质至英云闪长质中地壳,以及上地壳的安山质至流纹质熔岩、岩墙侵入体和火山碎屑岩。一个火山弧的形成经历了 20~40Ma^[56]。

Dilek 等^[1]发现陆缘型、洋中脊型和地幔柱型蛇绿岩可显示出明显的微量元素丰度变化,尤其是最不相容元素。这可能与熔融的程度、地幔富集有关,但是这不能确定任何特别的地球化学演化趋势。

这里需要对席状岩墙做一说明。蛇绿岩中席状岩墙的出现通常被解释成现今出露于大陆上的,由海底扩张形成的古大洋地壳的重要证据^[57-58],通常作为蛇绿岩的一个必要组分^[3,9]。然而越来越多的研究表明,席状岩墙在很多蛇绿岩中是缺失的,约 90%的蛇绿岩缺少席状岩墙^[55],而且洋中脊环境和岛弧环境都有席状岩墙发现^[1,10,13],因此席状岩墙不能作为判别蛇绿岩的条件。在推测的对古老大洋地壳结构的解释中需要考虑这一点,在太古宙绿岩带的解释上更是如此。席状岩墙的形成比较特殊,需要扩张速率与岩浆供给之间保持精确的平衡,要求足够熔体的形成与裂谷带的伸展保持同步^[55]。在洋壳形成的上盘俯冲带环境中保持岩浆供给与扩张之间的平衡非常困难。当该平衡不存在时,席状岩墙杂岩就不会完整地形成或根本不会形成,相反当岩浆供给超过扩张速率时,会出现底侵于喷出岩之下的岩浆膨胀和侵入岩侵位的现象,当扩张速率超过岩浆供给速率时则形成非岩浆的、构造减薄的大洋地壳。

7 新分类方案下世界蛇绿岩的时空分布特征

随着全球蛇绿岩资料的积累,尤其是新元古代以来的资料,使得进行蛇绿岩全球尺度的横向对比及其与全球重大构造事件的联系逐渐成为可能,一批国外学者已展开了类似的研究^[1,15-16,59]。

在蛇绿岩新定义和分类的基础上,Dilek^[1]对全球分布的重要蛇绿岩进行了分析和统计,发现蛇绿岩形成的主要脉动时期与致使大洋关闭、大陆碰撞、大岩浆事件(大火成岩省和巨型岩墙群的侵位)和超大陆裂解的板块运动是一致的。

首先,世界上主要的蛇绿岩的形成时期和与超大陆形成有关的主要造山事件在时间上重叠。如早古生代的 Famatinian 和加里东造山,分别形成了冈

瓦纳和劳亚超大陆;晚古生代的阿巴拉契亚-海西和阿尔泰-乌拉尔造山,形成了潘基亚超大陆。新近纪随着新特提斯海的消失和蛇绿岩的侵位,印度-阿拉伯与欧亚大陆的碰撞形成了现今的新超大陆。这些碰撞造山带中的蛇绿岩一般表现为与洋脊玄武岩(MORB)至岛弧拉斑玄武岩(IAT)和玻安岩的地球化学亲缘性^[60]。而增生型造山带(西太平洋和科迪勒拉)中的蛇绿岩以深海橄榄岩、火山洋岛、海山及从下行板块铲刮下来的洋中脊地壳岩片形式出现,它们经常与相关的增生杂岩和高压变质岩石一起出现^[61~62]。

其次,Dilek等^[1]还发现过去250Ma以来,某些重要蛇绿岩的主要形成时期跟与地幔柱相关的大火成岩省(LIPs)、大岩墙群的侵位时期一致^[63~64],并共同标志着地球历史中的超岩浆事件。如特提斯、加勒比蛇绿岩的演化与白垩纪“超级地幔柱”事件(120~80Ma)重叠,该地幔柱事件导致太平洋、印度洋中洋底高原的形成、全球海平面的升高和海底扩张速度的加快^[65]。中生代最显著的蛇绿岩的主要形成时期与晚三叠世-侏罗纪潘基亚大陆裂解事件最终分离的时间相一致^[66]。

上述这些现象说明,蛇绿岩的形成与地幔柱和超大陆的形成、裂解都是地幔热活动的结果,这种吻合不是巧合,而是存在一定的因果关系和反馈机制。在超大陆的裂解-漂移及随后的碰撞阶段都会形成蛇绿岩。超大陆的形成一方面会导致超大陆之下的热聚集,促使地幔热活动增强^[67],这往往会导致超大陆的裂解^[66];另一方面,俯冲的大洋板片会快速聚集到下地幔,诱发出地幔柱,导致大规模火成岩省(LIP)的形成^[68],并可导致超大陆的最终裂解,如Rodinia超大陆^[69]。

8 蛇绿岩与太古宙可能的板块构造

板块构造是否可以运用到前寒武纪地球演化中,尤其是太古宙是否存在板块构造体制一直是争论的焦点之一^[70~72]。这主要是对太古宙地幔的热体制、状态和历史不清楚的缘故。而如果存在板块构造,应该存在蛇绿岩等的对应物。一些学者曾经提出一部分绿岩带可能就是蛇绿岩的残留^[73~75]。目前没有确证它们是蛇绿岩的原因很多,一方面人们并不了解太古宙地幔的热体制,另一方面可能是早期彭罗斯蛇绿岩成层性的定义限制了对早期蛇

绿岩的识别^[15],因为已有的研究表明太古宙大洋地壳的厚度、内部结构与显生宙时期的洋壳存在重要的差别^[76]。因此,不能通过研究显生宙洋壳确定的蛇绿岩模型(彭罗斯定义)研究太古宙时期可能的蛇绿岩。

根据蛇绿岩新的定义和分类方案,Dilek等^[1]选择了3个年龄跨度从古元古代(Jormua,1.95Ga,芬兰)至新太古代(Wawa,2.7Ga,加拿大)到古太古代(Isua,3.8Ga,格陵兰)的绿岩带进行了分析。他们将这些绿岩带中的火山岩、次火山岩的地球化学数据与新蛇绿岩划分类型进行了对比,发现在MgO-TiO₂图解中,Isua上地壳带中的Garbenschiefer角闪岩的样品点均投在与俯冲相关的蛇绿岩范围内,而Wawa、Jormua变玄武岩分别投在与俯冲无关的地幔柱、陆缘型蛇绿岩的范围内。在MORB标准化稀土元素配分图解中,Isua未分异角闪岩的样品点投在与俯冲相关的蛇绿岩范围内,显示正Pb异常和负Nb、Ta异常。另一方面,Garbenschiefer角闪岩表现出强烈的中(M)稀土亏损,这是玻安岩的典型特征。Wawa、Jormua变玄武岩则投在与俯冲无关的蛇绿岩范围内,并显示与元素不相容性升高一样的平至适度富集的状态。在Ti/V判别图解中,Isua中的Garbenschiefer角闪岩均投在玻安岩范围内(Ti/V<10),然而未分异角闪岩的Ti/V比值介于20~30之间,分布在MORB和岛弧的重叠区域;另一方面,Wawa、Jormua序列的火山和岩墙岩石分别投入到与俯冲无关的地幔柱型和陆缘型蛇绿岩范围内。在Nb/Yb-Th/Yb判别图解中,所有Isua数据都投入到与俯冲相关的范围内,Wawa、Jormua数据投在与俯冲无关的范围内。Wawa数据分布在介于N-MORB与洋岛玄武岩之间的一个较大的范围内,Jormua数据密集分布在E-MORB的周围。这些分析表明,古太古代Isua岩石最可能代表了上俯冲带型(SSZ)弧前盆地蛇绿岩的次级类型,新太古代Wawa绿岩带的构造与地球化学特征更类似于地幔柱型蛇绿岩,而早元古宙的Jormua杂岩无论是构造还是地球化学特征都类似于陆缘型蛇绿岩。这些结论与前人的认识一致^[77~79]。

Dilek等^[1]的研究提供了研究前寒武纪蛇绿岩或一部分绿岩带新的思路 and 观点,并摆脱了彭罗斯蛇绿岩模型的限制。当然应该承认,并不是所有的绿岩都属于可能的古洋壳碎片,还需要继续工作。

9 中国目前的研究状态

中国对蛇绿岩的系统研究基本上是彭罗斯会议以后才正式开始的,早期主要集中在祁连山地区^[80],随后全国性的蛇绿岩调查和研究相继展开。20 世纪 70—90 年代主要工作是查明全国的蛇绿岩分布情况^[81],并在这些工作的基础上对蛇绿岩的分类做了初步尝试^[24-25,27,30,82],这些分类基本上都是以彭罗斯型洋壳为参照物的。20 世纪 90 年代至今,中国的蛇绿岩研究受国际影响,开始将重点放在构造环境识别、岩石学、矿物学、地球化学等方面,并开始了全国蛇绿岩的分类和总结^[17,83-85]。在这个阶段,中国科学家同样发现了蛇绿岩的多样性,并识别出很多的 SSZ 型和 MORB 型蛇绿岩^[17,83-84,86]。虽然经过近 40 年的研究,中国的蛇绿岩研究取得了很大成就,但问题也还存在。与国际研究相比,中国对典型的蛇绿岩缺乏系统深入的研究,对变质岩区蛇绿岩的研究也缺少行之有效的方法^[86-87]。在 Dilek 等^[1]所引用的全世界蛇绿岩中,中国的蛇绿岩很少,这可能说明中国的研究影响不大,数据的质量和数量都还有待提高。相比而言,无论是蛇绿岩方面的研究还是很多其它方面的研究,都还存在着一定的差距,这是今后努力的方向。

10 结 语

蛇绿岩一词在地质学历史中具有特殊而重要的地位,其内涵随着研究的深入而不断变化。近几十年来的研究表明,蛇绿岩的内部结构、地球化学组成和侵位机制是多样的,早期的彭罗斯蛇绿岩定义已经不能再适应目前的研究,最新的定义和分类方案摆脱了早期定义的限制,强调蛇绿岩形成的构造环境,指出在整个威尔逊旋回的各个阶段都会形成性质不同的蛇绿岩,并根据生成环境而不是最后的就位环境对蛇绿岩进行了分类。这些类型的蛇绿岩最终可出现在碰撞带中,它们具有特定的地球化学、岩石学指标和复杂的内部结构。世界上蛇绿岩产生的主要时间段与全球超大陆的形成、裂解和巨型地幔柱活动的时间吻合,表明蛇绿岩的形成与一些重大地质事件都受控于地幔热活动。根据新的分类方案和指标,一部分前寒武纪绿岩(太古宙)属于蛇绿岩,这可能为认识地球的历史和蛇绿岩的研究打开了新的思路。

各省(自治区、直辖市)一线地质工作者对 Dilek 等^[1]的蛇绿岩新划分方案表现出浓厚的兴趣,也是促使笔者想尽快将此文和相关的研究介绍给读者的原因。在介绍 Dilek 等^[1]文章时由于语言、专业、经历等方面的原因,对原文的理解和世界上的研究状态一定还有不足和错误,可能有一些使读者模糊或不解的情况,敬请大家参考原文。

致谢: 成文过程中得到李锦轶、冯益民和王方国研究员的鼓励和支持,并认真修改了原稿,提出了很多宝贵的修改意见,在此表示衷心的感谢。

参考文献

- [1]Dilek Y, Furnes H. Ophiolite genesis and global tectonics: Geochemical and tectonic fingerprinting of ancient oceanic lithosphere[J]. Geological Society of America Bulletin, 2011, 123: 387-411, doi: 10.1130/B30446.1.
- [2]Steinmann G. Der ophiolitischen Zonen in der Mediterranean Kettengebirgen[M]. 14th International Geological Congress in Madrid, 1927, 2:638-667.
- [3]Coleman R G. Ophiolites[M]. New York: Springer-Verlag, 1977:1-229.
- [4]Hess H H. Mid-ocean ridges and tectonics of the sea floor[C]//Whittard W F, Bradshaw R. Submarine geology and geophysics. Proceedings of the 17th Symposium of the Colston Research Society, London, Butterworths, 1965:317-334.
- [5]Hess H H. A primary peridotite magma[J]. American Journal of Science, 1938, 35: 321-344.
- [6]Jennings C W, Strand R G. Geologic Map of California, Santa Cruz quadrangle[M]. California Division of Mines and Geology, scale 1:250000, 1959, 1 sheet.
- [7]Aubouin J, Ndojaj I. Regard sur la geologie de l'Albanie et saplace dans la geologie des Dinarides[J]. Bulletin de la Société Géologique de France, ser. 7, 1964, VI: 593-625.
- [8]Dubertret L. Géologie des roches vertes du NO de la Syrie et du Hatay (Turquie)[J]. Notes et mémoires du Moyen-Orient, 1955, 6: 13-179.
- [9]Anonymous. Penrose Field Conference on Ophiolites[J]. Geotimes, 1972, 17:24-25.
- [10]Miyashiro A. The Troodos complex was probably formed in an island arc[J]. Earth Planetary Science Letters, 1973, 19: 218-224.
- [11]Hawkins J W. Petrological and geochemical characteristics of marginal basin basalts[C]//Talwani M, Pitman W C III. Island arcs, deep sea trenches and back arc basins. American Geophysical Union, 1977, 1:355-365.
- [12]Pearce J A, Lippard S J, Roberts S. Characteristics and tectonic significance of supra-subduction zone ophiolites[C]//Kokelaar B P, Howells M F. Marginal Basin Geology: Volcanic and Associated Sedimentary and Tectonic Processes in Modern and Ancient

- Marginal Basins. Geological Society of London Special Publication, 1984, 16: 77–94.
- [13] Miyashiro A. Classification, characteristics, and origin of ophiolites [J]. *Journal of Geology*, 1975, 83: 249–281.
- [14] Dewey J. Ophiolites and lost oceans: Rifts, ridges, arcs, and/or scrapings? [C]//Dilek Y, Newcomb S. Ophiolite concept and the evolution of geological thought. Geological Society of America Special Paper, 2003, 373: 153–158.
- [15] Dilek Y. Ophiolites in Earth History [C]//Dilek Y, Robinson P T. Ophiolites in Earth History. Geological Society of London Special Publications, 2003, 218: 9–19.
- [16] Dilek Y. Ophiolite concept and its evolution [C]//Dilek Y, Newcomb S. Ophiolite concept and the evolution of geological thought. Geological Society of America Special Paper, 2003, 373: 1–16.
- [17] 周国庆. 蛇绿岩研究新进展及其定义和分类的再讨论 [J]. *南京大学学报 (自然科学版)*, 2008, 44: 1–24.
- [18] Beccaluva L, Ohnenstetter D, Ohnenstetter M, et al. Two magmatic series with island arcs affinities within the Vourinos ophiolites [C]//Atti del Congresso della Societa Italiana di Mineralogia e Petrologia Translated Title. Proceedings of the Congress of the Italian Society of Mineralogy and Petrology, Rendiconti della Societa Italiana di Mineralogia e Petrologia, 1982, 38: 900–901.
- [19] Church W R, Riccio L. Fractionation trend of the bay of islands ophiolite of Newfoundland: polycyclic cumulate sequences in ophiolites and their classification [J]. *Canadian Earth Sciences*, 1977, 14: 1156–1165.
- [20] Boudier F, Nicolas A. Harzburgite and lherzolite subtypes in ophiolitic and oceanic environments [J]. *Earth Planetary Science Letters*, 1985, 76: 84–92, doi: 10.1016/0012-821X(85)90150-5.
- [21] Ishiwatari A. Alpine ophiolites: Product of low-degree mantle melting in a Mesozoic transcurrent rift zone [J]. *Earth Planetary Science Letters*, 1985, 76: 93–108.
- [22] Moores E M. Origin and emplacement of ophiolites [J]. *Reviews of Geophysics and Space Physics*, 1982, 20: 735–760.
- [23] Coleman R G. The diversity of ophiolites [J]. *Geologic en Mijnbouw*, 1984, 63: 144–150.
- [24] 朱宝清, 王来生, 王连晓. 准噶尔西南地区古生代蛇绿岩 [J]. *中国地质科学院西安地质矿产研究所刊*, 1987, 17: 3–64.
- [25] 王希斌, 鲍佩声, 戎合. 中国蛇绿岩中变质橄榄岩的稀土元素地球化学 [J]. *岩石学报*, 1995, 11 (增刊): 24–41.
- [26] 赵建新, 李献华, McCulloch M T, 等. 皖南和赣东北蛇绿岩成因及其构造意义: 元素和 Sm–Nd 同位素制约 [J]. *地球化学*, 1995, 24 (4): 311–326.
- [27] Wang X B, Bao P S. Types of melting residue and structural deformation of the mantle peridotite bodies in orogenic belts of China [M]. *Progress in geosciences of China (1985~1988)*, Paper to 28th IGC, 1989: 63–66.
- [28] 肖序常. 从扩张速率试论蛇绿岩的类型划分 [J]. *岩石学报*, 1995, 11 (增刊): 10–23.
- [29] Nicolas A, Boudier F. Where ophiolites come from and what they tell us [C]//Dilek Y, Newcomb S. Ophiolite Concept and the Evolution of Geological Thought. Geological Society of America Special Paper, 2003, 373: 137–152.
- [30] 张旗. 蛇绿岩的分类 [J]. *地质科学*, 1990, 25 (1): 54–61.
- [31] Rampone E, Piccardo G B. The ophiolite–oceanic lithosphere analogue: New insights from the Northern Apennines (Italy) [C]//Dilek Y, Moores E M, Elthon D, et al. Ophiolites and Oceanic Crust: New Insights from Field Studies and the Ocean Drilling Program. Geological Society of America Special Paper, 2000, 349: 21–34.
- [32] Manatschal G, Müntener O. A type sequence across an ancient magma–poor ocean–continent transition: The example of the western Alpine Tethys ophiolites [J]. *Tectonophysics*, 2009, 473: 4–19, doi: 10.1016/j.tecto.2008.07.021.
- [33] Rampone E, Romairone A, Abouchami W, et al. Chronology, petrology, and isotope geochemistry of the Erro–Tobbio peridotites (Ligurian Alps, Italy): Records of late Palaeozoic lithospheric extension [J]. *Journal of Petrology*, 2005, 46: 799–827, doi: 10.1093/petrology/egi001.
- [34] Hawkins J W. Geology of supra–subduction zones: Implications for the origin of ophiolites [C]//Dilek Y, Newcomb S. Ophiolite Concept and the Evolution of Geological Thought. Geological Society of America Special Paper, 2003, 373: 227–268.
- [35] Reagan M K, Ishizuka O, Stern R J, et al. Fore–arc basalts and subduction initiation in the Izu–Bonin–Mariana system [J]. *Geochemistry, Geophysics, Geosystems*, 2010, 11 (3): 1–17, doi: 10.1029/2009GC002871.
- [36] Dilek Y, Furnes H. Spontaneous subduction initiation and forearc magmatism as revealed by Phanerozoic suprasubduction zone ophiolites [J]. *Geological Society of America Abstracts with Programs*, 2010, 42: 575.
- [37] Pearce J A, Robinson P T. The Troodos ophiolitic complex probably formed in a subduction initiation, slab edge setting [J]. *Gondwana Research*, 2010, 18: 60–81, doi: 10.1016/j.gr.2009.12.003.
- [38] Dilek Y, Thy P, Moores E M. Episodic dike intrusions in the northwestern Sierra Nevada, California: Implications for multistage evolution of a Jurassic arc terrane [J]. *Geology*, 1991, 19: 180–184, doi: 10.1130/0091-7613 (1991)019<0180:EDIITN>2.3.CO;2.
- [39] Bowen N L, Tuttle O F. The system $MgO-SiO_2-H_2O$ [J]. *Geological Society of America Bulletin*, 1949, 60: 439–460.
- [40] Thayer T P. Chemical and structural relations in ultramafic and feldspathic rocks in Alpine intrusive complexes [C]//Wyllie P J. Ultramafic and Related Rocks. New York: John Wiley and Sons, 1967: 222–238.
- [41] de Roever W P. Sind die alptypen Peridotmassen vielleicht tektonisch verfrachtete Buruchstücke der Peritotschale? [J]. *Geologische Rundschau*, 1957, 46: 137–146.
- [42] Pearce J A. Basalt geochemistry used to investigate past tectonic environments on Cyprus [J]. *Tectonophysics*, 1975, 25: 41–67, doi: 10.1016/0040-1951(75)90010-4.
- [43] Pearce J A. Supra–subduction zone ophiolites: The search for mod-

- ern analogues[C]//Dilek Y, Newcomb S. Ophiolite Concept and the Evolution of Geological Thought. Geological Society of America Special Paper, 2003, 373:269–293.
- [44]Pearce J A. Geochemical fingerprinting of oceanic basalts with applications to ophiolite classification and the search for Archean oceanic crust[J]. *Lithos*, 2008, 100:14–48, doi: 10.1016/j.lithos.2007.06.016.
- [45]Pearce J A, Cann J R. Ophiolite origin investigated by discriminant analysis using Ti, Zr, and Y[J]. *Earth Planetary Science Letters*, 1971, 12: 339–349.
- [46]Pearce J A, Cann J R. Tectonic setting of basic volcanic rocks determined using trace element analyses[J]. *Earth Planetary Science Letters*, 1973, 19: 290–300.
- [47]Alt J C, Teagle D A H. Hydrothermal alteration and fluid fluxes in ophiolites and oceanic crust[C]//Dilek Y, Moores E M, Elthon D, et al. Ophiolites and Oceanic Crust: New Insights from Field Studies and the Ocean Drilling Program. Geological Society of America Special Paper, 349, 2000, 273–282.
- [48]Scott R B, Hajash A Jr. Initial submarine alteration of basaltic pillow lavas: A microprobe study[J]. *American Journal of Science*, 1976, 276: 480–501, doi: 10.2475/ajs.276.4.480.
- [49]Seyfried W E, Mottl M, Bischoff J L. Seawater/basalt effects on the chemistry and mineralogy of spilites from the ocean floor[J]. *Nature*, 1978, 275: 211–213, doi: 10.1038/275211a0.
- [50]Gillis K M, Thompson G. Metabasalts from the Mid-Atlantic Ridge: New insight into hydrothermal systems in slow-spreading crust[J]. *Contributions to Mineralogy and Petrology*, 1993, 113: 502–523, doi:10.1007/BF00698319.
- [51]Nicollet C, Andriambololona D R. Distribution of transition elements in crustal metabasic igneous rocks[J]. *Chemical Geology*, 1980, 28: 79–90, doi: 10.1016/0009-2541(80)90037-6.
- [52]Humphris S E, Thompson G. Trace element mobility during hydrothermal alteration of oceanic basalts[J]. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 1978, 42: 127–136, doi: 10.1016/0016-7037(78)90222-3.
- [53]Teagle D A H, Alt J C. Hydrothermal alteration of basalts beneath the Bent Hill massive sulfide deposit, Middle Valley, Juan de Fuca Ridge[J]. *Economic Geology and the Bulletin of the Society of Economic Geologists*, 2004, 99: 561–584, doi: 10.2113/99.3.561.
- [54]Staudigel H, Hart R. Alteration of basaltic glass: Mechanism and significance for the oceanic crust-seawater budget[J]. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 1983, 47: 337–350, doi: 10.1016/0016-7037(83)90257-0.
- [55]Robinson P T, Malpas J, Dilek Y, et al. The significance of sheeted dike complexes in ophiolites[J]. *GSA Today*, 2008, 18: 4–10, doi: 10.1130/GSATG22A.1.
- [56]Dilek Y, Flower M F J. Arc-trench roll-back and forearc accretion: 2. A model template for ophiolites in Albania, Cyprus, and Oman [C]//Dilek Y, Robinson P T. Ophiolites in Earth History. Geological Society of London Special Publication, 2003, 218: 43–68.
- [57]Gass I G. Ophiolites and oceanic lithosphere[C]//Malpas J, Moores E M, Panayiotou A, et al. Ophiolites, Oceanic Crustal Analogues. Proceedings of the Symposium “Troodos 1987”: Nicosia, Cyprus. The Geological Survey Department, 1990:1–10.
- [58]Moores E M, Vine F J. The Troodos massif, Cyprus, and other ophiolites as oceanic crust: evaluation and implications[J]. *Philosophical Transactions of the Royal Society London*, 1971, 268A: 443–466.
- [59]Moores E M, Kellogg L H, Dilek Y. Tethyan ophiolites, mantle convection, and tectonic “historical contingency”: A resolution of the “ophiolite conundrum”[C]//Dilek Y, Moores E M, Elthon D, et al. Ophiolites and oceanic crust: New insights from field studies and the Ocean Drilling Program. Geological Society of America Special Paper, 2000, 349: 3–12.
- [60]Pagé P, Bédard J H, Tremblay A. Geochemical variations in a depleted fore-arc mantle: The Ordovician Thetford Mines ophiolite [J]. *Lithos*, 2009, 113: 21–47, doi: 10.1016/j.lithos.2009.03.030.
- [61]Ernst W G. Alpine and Pacific styles of Phanerozoic mountain building: Subduction-zone petrogenesis of continental crust[J]. *Terra Nova*, 2005, 17: 165–188, doi:10.1111/j.1365-3121.2005.00604.x.
- [62]Cawood P A, Kröner A, Collins W J, et al. Accretionary orogens through Earth history[C]//Cawood P A, Kröner A. Earth Accretionary Systems in Space and Time. Geological Society of London Special Publication, 2009, 318: 1–36.
- [63]Ernst R E, Head J W, Parfitt E, et al. Giant radiating dyke swarms on Earth and Venus[J]. *Earth Science Reviews*, 1995, 39:1–58, doi: 10.1016/0012-8252(95)00017-5.
- [64]Coffin M F, Eldholm O. Large igneous provinces: Progenitors of some ophiolites? [C]//Ernst R E, Buchan K L. Mantle Plumes: Their Identification through Time. Geological Society of America Special Paper, 2001, 352: 59–70.
- [65]Larson R L. Latest pulse of Earth: Evidence for a mid-Cretaceous superplume[J]. *Geology*, 1991, 19: 547–550, doi: 10.1130/0091-7613(1991)019<0547:LPOEEF>2.3.CO;2.
- [66]Dalziel I W D, Lawver L A, Murphy J B. Plumes, orogenesis, and supercontinental fragmentation[J]. *Earth Planetary Science Letters*, 2000, 178: 1–11, doi: 10.1016/S0012-821X(00)00061-3.
- [67]Yale L B, Carpenter S J. Large igneous provinces and giant dike swarms: Proxies for supercontinent cyclicity and mantle convection [J]. *Earth Planetary Science Letters*, 1998, 163: 109–122, doi: 10.1016/S0012-821X(98)00179-4.
- [68]Maruyama S. Plume tectonics[J]. *Journal of Geological Society, Japan*, 1994, 100: 24–49.
- [69]Li Z X, Bogdanova S V, Collins A S, et al. Assembly, configuration, and break-up history of Rodinia: A synthesis[J]. *Precambrian Research*, 2008, 160: 179–210.
- [70]Condie K C, Kröner A. When did plate tectonics begin? Evidence from the geologic record[C]//Condie K C, Pease V. When Did Plate Tectonics Begin on Planet Earth? Geological Society of America Special Paper, 2008, 440: 281–294, doi: 10.1130/2008.2440(14).
- [71]Hamilton W B. Archean magmatism and deformation were not the products of plate tectonics[J]. *Precambrian Research*, 1998, 91:143–

- 179, doi:10.1016/S0301-9268(98)00042-4.
- [72] Stern R J. Evidence from ophiolites, blueschists, and ultrahigh - pressure metamorphic terranes that the modern episode of subduction tectonics began in Neoproterozoic time[J]. *Geology*, 2005, 33: 557-560, doi: 10.1130/G21365.1.
- [73] Pease V, Percival J, Smithies H, et al. When did plate tectonics begin? Evidence from the orogenic record[C]//Condie K C, Pease V. When Did Plate Tectonics Begin on Planet Earth? Geological Society of America Special Paper, 2008, 440:199-228, doi: 10.1130/2008.2440(10).
- [74] Condie K C. Greenstones through time[C]//Condie K C. Archean Crustal Evolution. Amsterdam: Elsevier, 1994:85-120.
- [75] Condie K C, Benn K. Archean geodynamics: Similar to or different from modern geodynamics? [J]. *American Geophysical Union Monograph*, 2006, 164: 47-59.
- [76] Moores E M. Pre-1 Ga (pre-Rodinian) ophiolites: their tectonic and environmental implications [J]. *Geological Society of America Bulletin*, 2002, 114: 80-95.
- [77] Furnes H, Rosing M, Dilek Y, et al. Isua supracrustal belt (Greenland)-A vestige of a 3.8 Ga suprasubduction zone ophiolite, and the implications for Archean geology [J]. *Lithos*, 2009, 113:115-132, doi:10.1016/j.lithos.2009.03.043.
- [78] Polat A, Kerrish R, Wyman D A. Geochemical diversity in oceanic komatiites and basalts from the Late Archean Wawa greenstone belts, Superior Province, Canada: Trace element and Nd isotope evidence for a heterogeneous mantle [J]. *Precambrian Research*, 1999, 94: 139-173, doi: 10.1016/S0301-9268(98)00110-7.
- [79] Peltonen P, Mänttari I, Huhma H, et al. Archean zircons from the mantle: The Jormua ophiolite revisited [J]. *Geology*, 2003, 31: 645-648, doi: 10.1130/0091-7613(2003)031<0645:AZFTMT>2.0.CO;2.
- [80] 王荃, 刘雪亚. 中国西部的古海洋地壳及其大地构造意义 [J]. *地质科学*, 1976, (1): 14-24.
- [81] 王希斌, 郝梓国. 中国造山带蛇绿岩的时空分布及构造类型 [J]. *中国区域地质*, 1994, 13(3): 193-204.
- [82] 郝梓国, 王希斌, 鲍佩声, 等. 新疆西准噶尔地区两类蛇绿岩的地质特征及其成因研究 [J]. *岩石矿物学杂志*, 1989, 8(4): 299-310.
- [83] 张旗, 周国庆. 中国蛇绿岩 [M]. 北京: 科学出版社, 2001: 1-182.
- [84] 张旗, 肖序常. 中国蛇绿岩研究概述 [J]. *岩石学报*, 1995, 11(增刊): 1-9.
- [85] Zhang Q, Wang Y, Zhou G Q, et al. Ophiolites in China: their distribution, ages and tectonic settings [C]//Dilek Y, Robinson P T. *Ophiolites in Earth History*. Geological Society of London Special Publication, 2003, 218: 541-566.
- [86] 史仁灯. 蛇绿岩研究进展、存在问题及思考 [J]. *地质论评*, 2005, 51(6): 681-693.
- [87] 姚玉鹏, 田兴有, 易善锋, 等. 中国蛇绿岩研究的现状及今后的研究方向 [J]. *地球科学进展*, 1997, 12(2): 134-137.