

· 基础地质 ·

造山橄榄岩及其意义

张旗^{1,2}, 张维³, 姜丽莉⁴, 石玉若³, 焦守涛^{5,6}, 王存智⁷, 王振⁸ZHANG Qi^{1,2}, ZHANG Wei³, JIANG Lili⁴, SHI Yuruo³, JIAO Shoutao^{5,6}, WANG Cunzhi⁷, WANG Zhen⁸

1. 中国科学院地质与地球物理研究所, 北京 100029;

2. 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, 北京 100029;

3. 中国地质科学院地质研究所离子探针中心, 北京 100037;

4. 中国地质调查局成都地质调查中心, 四川 成都 610081;

5. 中国地质调查局发展研究中心, 北京 100037;

6. 自然资源部地质信息工程技术创新中心, 北京 100037;

7. 中国地质调查局南京地质调查中心, 江苏 南京 210016;

8. 中国地质大学(北京)地球科学与资源学院, 北京 100083

1. Institute of Geology and Geophysics, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100029, China;

2. State Key Laboratory of Lithospheric Evolution, Institute of Geology and Geophysics, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100029, China;

3. SHRIMP Center, Institute of Geology, Chinese Academy of Geological Sciences, Beijing 100037, China;

4. Chengdu Center of China Geological Survey, Chengdu 610081, Sichuan, China;

5. Development Research Center, China Geological Survey, Beijing 100037, China;

6. Technology Innovation Center of Geological Information, MNR, Beijing 100037, China;

7. Nanjing Geological Survey Center, China Geological Survey, Nanjing 210016, Jiangsu, China;

8. School of Earth Sciences and Resources, China University of Geosciences, Beijing 100083, China

摘要:造山橄榄岩和蛇绿岩的橄榄岩主要由地幔岩组成,造山橄榄岩代表陆壳下的地幔,蛇绿岩的橄榄岩代表洋壳下的地幔。洋壳下的地幔与陆壳下的地幔在物质组成上大体接近,但产出的构造背景明显不同。介绍了造山橄榄岩的组成、与造山橄榄岩有关的高压-超高压变质作用、地幔流体作用、成矿作用、造山橄榄岩侵位的机制等,以及中国几个可能的造山橄榄岩的基本情况,讨论了造山橄榄岩的演变过程及其与蛇绿岩的橄榄岩的区别。造山橄榄岩的形成大体经历了初期的陆壳减薄和裂谷阶段、晚期的挤压造山2个构造演化阶段。有些地区只发育裂谷阶段,构造演化在裂谷后即夭折了,也称为造山橄榄岩。蛇绿岩与造山橄榄岩之间的区别不在物质组成和地球化学方面,而是在构造背景上。如有没有深海沉积、混杂堆积,有,是蛇绿岩;没有,则是造山橄榄岩。有没有超高压变质作用、地幔交代作用或地幔交代作用是否强烈,有且很强,可能是造山橄榄岩;没有,则可能是蛇绿岩。岩体是冷侵位还是热侵位,冷侵位是蛇绿岩,热侵位是造山橄榄岩。蛇绿岩出现在造山带,代表已经消失的洋盆;造山橄榄岩一般也出现在造山带,但代表的是减薄和撕裂的陆壳下的地幔。

关键词:造山橄榄岩;蛇绿岩;阿尔卑斯;裂谷;超高压变质作用;流体;洋壳;陆壳

中图分类号:P588.12⁺5 **文献标志码:**A **文章编号:**1671-2552(2020)10-1489-18

Zhang Q, Zhang W, Jiang L L, Shi Y R, Jiao S T, Wang C Z, Wang Z. Orogenic peridotite and its significance. *Geological Bulletin of China*, 2020, 39(10): 1489-1506

Abstract: Orogenic peridotite and peridotite of ophiolite are mainly composed of mantle rock. Orogenic peridotite represents the mantle

收稿日期:2020-03-01;修订日期:2020-05-29

资助项目:国家重点研发计划项目《基于地质云的地质灾害基础信息提取与大数据分析挖掘》(编号:2018YFC1505501)、《基于“地质云”平台的深部找矿知识挖掘》(编号:2016YFC0600510)、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《镁铁-超镁铁岩大数据研究》(编号:81300001)和中国地质调查局项目《国家地质大数据汇聚与管理》(编号:DD20190381)

作者简介:张旗(1937-),男,研究员,岩石学和地球化学专业。E-mail:zq1937@126.com

beneath the continental crust, and peridotite of ophiolite represents the mantle beneath the oceanic crust. The mantle beneath the oceanic crust is generally close to the mantle beneath the continental crust in terms of material composition, but the tectonic setting is different. This paper briefly introduces the composition of orogenic peridotites, high-pressure and ultrahigh-pressure metamorphism related to orogenic peridotites, mantle fluids, mineralization, and mechanisms of orogenic peridotite emplacement, and also briefly introduces several possible orogenic peridotites in China such as the Songshugou peridotite in the Qinling Mountain, the Raobazhai rock mass in Anhui, several rock masses in the Yidun-type area in western Sichuan, Santai rock mass in western Yunnan, and Dadaoerji rock mass in Gansu. The evolution process of orogenic peridotite and its difference from ophiolite peridotite are discussed. It is pointed out that the difference between ophiolite and orogenic peridotite is not mainly in material composition and geochemistry, but in tectonic setting. Is there no abyssal sediment? Is it mixed up? Yes, it is peridotite of ophiolite; no, it is orogenic peridotite. Is there any UHP metamorphic effect? Is there mantle metasomatism or strong mantle metasomatism? Some are very strong and may be orogenic peridotites; no, they may be peridotites of ophiolite. Cold emplacement is peridotite of ophiolite, and thermal emplacement is orogenic peridotite. It is pointed out in this paper that the formation of orogenic peridotite has generally experienced two stages of tectonic evolution: the initial thinning of the continental crust, the rifting stage, and the late extruding orogenic belt. In some areas, only the rift stage is developed, and the tectonic evolution finished after the rift, also known as orogenic peridotites, such as Zabargad in the Red Sea, Ronda in Spain, Beni Bousera in Morocco, and Yidun peridotite in China. The peridotite of ophiolite appears in the orogenic belt, representing the ocean basin that has disappeared; the orogenic peridotite generally appears in the orogenic belt, but it represents the thinned and torn continental crust. It is necessary to study and demonstrate whether the peridotite that appears in the orogenic belt is ophiolite because their tectonic meanings are different.

Key words: orogenic peridotite; ophiolite; Alps; rift; ultrahigh pressure metamorphism; fluid; oceanic crust; continental crust

蛇绿岩是大家熟悉的,但造山橄榄岩很少有人提及。笔者早年在川西和滇西考察时,发现一类地幔橄榄岩(主要是弱亏损的强烈蛇纹石化的二辉橄榄岩)直接侵入位于上三叠统浅海相图姆沟组、曲嘎寺组(川西地区)、上三叠统石钟山组、崔依比组、潘天阁组及中三叠统上兰组(滇西地区)火山-沉积岩地层中,附近未见深海相沉积(如含放射虫硅质岩、深海相浊积岩)及混杂堆积现象(洋壳和陆壳物质的高度混杂),构造以剪切和挤压为主。与橄榄岩伴生的侵入岩和堆晶岩很少,有一些辉绿岩呈岩墙和岩脉产出,大体具OIB(洋岛玄武岩)的地球化学特征^[1-5]。上述特征表明,这种类型的橄榄岩是在地壳伸展或裂谷构造背景下侵位的,不具蛇绿岩的特征。由于该类型橄榄岩在义敦地区非常发育,笔者称其为“义敦型”岩体,指出它代表的是陆壳下的地幔,而蛇绿岩是洋壳下的地幔(+洋壳)组成的^[1-6]。

该类型岩体在国外发现很多,其研究历史比蛇绿岩早,尤其在欧洲科学家重点研究的阿尔卑斯山地区,早已发现这种类型的橄榄岩,此外还有西班牙、摩洛哥、红海等地^[7-11]。国外对这种类型岩体的研究程度很详细、很深入。由于该类型岩体出露规模大,保存好,有的还有若干矿产(铬、镍、铂族金属、金、石墨等)产出,因此,备受众多学者的关注^[7, 12-23]。

20世纪70—90年代,国外学术界对上述类型岩体的认识分歧较多,称谓也不统一,如陆壳亚类^[7]、造山橄榄岩^[8-9, 24]、山根带杂岩^[11]、地幔核杂岩^[10]等。上述术语各有不同的含义,不同作者也有不同的理解,但是,一个基本的认识是,它们都不是蛇绿岩。笔者早先提出的“义敦型”术语,表明的也是非蛇绿岩的含义^[1]。

随着对这种类型岩体研究的日益深入,早先的许多术语如“陆壳亚类”、“山根带杂岩”、“地幔核杂岩”等,使用的人越来越少,而“造山橄榄岩(orogenic peridotite)”的术语逐渐被大多数学者接受,其含义也逐渐明确:它不是蛇绿岩,虽然在某些地方保存了海洋地壳曾经出现过的迹象,表明该类橄榄岩与蛇绿岩之间可能存在某种过渡的特征^[7-11, 17, 20-21, 25-26]。故本文也采用“造山橄榄岩”这个术语,而舍弃“义敦型”的称谓。尽管“义敦型”这个提法没有错,它有着明显不同于蛇绿岩的特点,也有自身的含义(详见后述)。实际上,“orogenic”这个词的含义也不是特别合适,“orogenic peridotite”大多是在陆壳伸展撕裂的条件下形成的,其成因大多与裂谷有关,如果称其为“裂谷橄榄岩”也不失为可行的选择(与任纪舜先生的交流)。因为,其侵位时虽然经历了强烈的挤压作用,但是位置并不限于造山带,其本质也不属于造山带。鉴于

大多数学者都采用这个术语^[8-9, 21, 24, 26-28],出于交流的方便,本文也认同此术语,其实质反映的是陆壳撕裂的过程。

下面简略介绍造山橄榄岩的组成、分布、与橄榄岩伴生的变质作用、流体作用、成矿作用、岩体的侵位特征等,讨论几个学术界关心的问题。

1 造山橄榄岩概述

造山橄榄岩的英文是 Orogenic peridotite^[8],也可称为“造山带橄榄岩”,相应的英文应为 Orogenic belt peridotite。与全球蛇绿岩相比,造山橄榄岩的分布相对局限(图 1),主要出露在欧洲的阿尔卑斯山、比利牛斯山、西班牙南部、摩洛哥北部、红海等地,在委内瑞拉和日本也有零星的分布^[9, 15, 17, 20-21, 26]。国内类似的地质现象不是特别明显,大多数学者对此了解不多,有一些甚至被误认为是蛇绿岩。最近,国内在这方面的研究有了较明显的改观,并取得了不菲的成果^[27-47]。据最近的文献,中国的造山橄榄岩主要分布在大别—苏鲁、秦岭—阿尔金、南祁连、川西—滇西等地^[1-7, 28-31, 39-40, 41, 46-47]。

在阿尔卑斯地区,如瑞士南部的 Arami、意大利西北部的 Finero、Balmuccia、Baldissero、Beni Bousera、Lanzo 岩体等,均以二辉橄榄岩为主。对上述岩体的构造属性存在争论,有人认为它们是蛇绿岩,也有人认为不是蛇绿岩。根据欧洲学者多年的研究,阿尔卑斯地区的大多数地幔橄榄岩不具有蛇绿岩的特征,而属于大陆岩石圈地幔的属性^[7-12, 17, 20-21, 25-26]。根据目前的资料,阿尔卑斯地区除其西端的利古里亚、科西嘉外^[12, 48-51],其余地幔橄榄岩大多不是蛇绿岩,而属于造山橄榄岩。

1.1 造山橄榄岩的组成

Bodinier 等^[21]总结前人的研究指出,“构造侵位”的地幔岩包括来自大陆下、海洋下及岛弧下的地幔岩,它们是从上地幔—地壳界面附近构造抬升上来的,存在下列一些形式:①以小而分散的超镁铁质岩体出现在缝合带和造山带,即所谓的“阿尔卑斯”或“造山”橄榄岩地块;②规模较大的(数十千米)蛇绿岩或岛弧杂岩之下的超镁铁质岩,就位于大陆边缘,如阿曼蛇绿岩和 Kohistan 和 Talkeetna 弧杂岩;③产于海洋盆地,如红海中的抬升到海平面上方 Zabargad 岛、大西洋中的 St. Paul's 岛和西南太平洋中 Macquarie 岛的橄榄岩等^[21]。

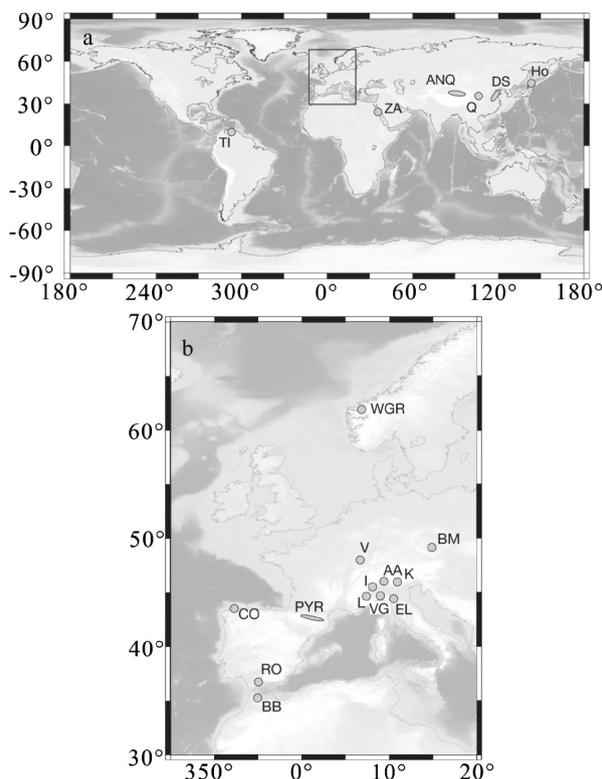


图 1 造山橄榄岩的全球分布^[21]

Fig. 1 Location of the main orogenic peridotite occurrences in the world

图 a: TI—Tinaquillo, 委内瑞拉北部; Ho—Horoman, 日本, 北海道; DS—Dabie—大别, 苏鲁超高压变质, 中国; Q—秦岭超高压变质带, 中国; ANQ—柴达木北缘—阿尔金超高压变质带, 中国; ZA—Zabargad 岛, 红海, 埃及;

图 b: WGR—西区片麻岩带, 挪威西南部; B—Bohemian 地块, 捷克中部、德国东部、奥地利北部及波兰南部; V—Vosges, 法国东部; AA—Alpe Arami, 中阿尔卑斯、瑞士南部; M—Val Malenco, 阿尔卑斯中东部, 意大利北部; I—Ivrea 带 (Finero, Balmuccia, and Baldissero), 西阿尔卑斯, 意大利西北部; L—Lanzo, 西阿尔卑斯, 意大利西北部; VG—Voltri 群 (Erro-Tobbio 橄榄岩), 利古里亚西部, 意大利西北部; EL—外利古里亚橄榄岩, 利古里亚东部, 意大利西北部; PYR—Pyrenees, 法国南部; RO—Ronda, Betic Cordillera, 西班牙南部; BB—Beni Bousera, 裂谷, 摩洛哥北部; CO—Cabo Ortegal, 西班牙北部

除少数例外,造山橄榄岩的组成以二辉橄榄岩为主(图 2),与石榴子石、尖晶石或斜长石橄榄岩相处于平衡^[52]。少量的有角闪石和金云母方辉橄榄岩、高压和超高压(UHP)石榴子石橄榄岩等。其成分范围包括纯橄榄岩、方辉橄榄岩、二辉橄榄岩和辉石岩。造山橄榄岩大小各异,从镶嵌在变质沉积物中的小块(1~10 m)到形成逆掩构造单元主体的大型超镁铁质露头(面积可达 300 km²)。绝大多数

二辉橄榄岩地块的大小在几百米到几千米之间,呈串珠状出现,沿缝合线或断裂带分布^[21]。

造山二辉橄榄岩大多是弱亏损的(通常有约10%的单斜辉石,图2)。其次为难熔的橄榄岩(方辉橄榄岩和纯橄岩)及部分堆晶岩。堆晶岩厚几厘米至几米,主要由变质达麻粒岩相的镁铁质岩石、含石榴子石、尖晶石和斜长石的斜方辉石岩和二辉石岩组成。难熔橄榄岩可能具有相当的数量(高达30%~40%),而镁铁质层通常不超过5%。由于流体的广泛存在,有些橄榄岩几乎完全由地幔熔体/流体、俯冲板块或地壳成因交代的组分组成,如比利牛斯山富含单斜辉石和角闪石的橄榄岩,阿尔卑斯山的角闪石(金云母)橄榄岩及角闪石和石榴子石橄榄岩等^[21]。

所有的二辉橄榄岩几乎都在高温(1000℃)下发生了变形,表现为镁铁质层的等斜褶皱和系统的橄榄石晶格定向。橄榄岩通常出现程度不等的蛇纹石化,许多蛇纹石化都是沿断层分布,显示受构造应变的影响。

西班牙南部的 Ronda 岩体是造山橄榄岩的一个典型实例。Ronda 岩体出露面积约 300 km²,提供了地幔过程的许多信息,这些信息是玄武岩的地幔包体所无法比拟的。Ronda 橄榄岩的组成从方辉橄榄岩到二辉橄榄岩及辉石岩,与 Ronda 岩体伴生的有 MORB(洋中脊玄武岩)及苦橄岩(含 12%~22%的 MgO)。Ronda 尖晶石斜长石二辉橄榄被解

释为是中元古代大陆下的岩石圈地幔(SCLM),由软流圈地幔衍生的富含挥发分的低程度部分熔融形成,在约 22 Ma 前侵入到地壳之上并经历了强烈的变形作用的产物^[9, 53-55]。

Su 等^[56]研究了世界上 40 多个地区的造山纯橄榄岩的特征,将其划分为 3 种类型:残留的纯橄榄岩、交代的纯橄榄岩和堆晶的纯橄榄岩。它们具有不同的形成过程、不同的组成和不同的地球动力学过程。其中,残余纯橄榄岩是原始地幔部分熔融程度高(25%~60%)的产物,交代纯橄榄岩是富辉石的橄榄岩与硅不饱和的熔体发生反应形成的,而堆晶纯橄榄岩是地幔岩浆结晶的晶体堆积形成的。研究造山纯橄榄岩可以更好地了解其成因,与俯冲、变质作用前的演化过程,以及俯冲和折返过程中的壳幔相互作用。值得注意的是,在造山纯橄榄岩中还记录了硅不饱和熔融-岩石反应的广泛存在,这些反应显著地改变了造山橄榄岩的组成。

造山橄榄岩是陆壳下的地幔,蛇绿岩是洋壳下的地幔。洋壳下的地幔与陆壳下的地幔都是地幔岩,它们的地球化学特征有什么差别,许多人进行了研究,结果大体是:有差别,差别似乎不大^[5]。例如 Su 等^[57]发现橄榄石中的 Ca 可以作为造山橄榄岩的地质温度计,且榴辉岩相地幔橄榄岩中橄榄石的 Na 含量可以作为压力的指标,而橄榄石中 Ti 的高含量可能与俯冲地壳交代作用有关,此外,还显示 Mn 含量偏高的情况,表明橄榄石中 Mn 对壳幔相互作用较敏感^[57]。Weyer 等^[58]研究了意大利 Balmuccia 橄榄岩,发现它们的 Zr/Hf、Nb/Ta 值明显亏损,比球粒陨石低很多,说明在地幔部分熔融过程中 Hf 比 Zr 更相容, Ta 在地幔中具有较高的相容性,他们解释这种现象说明其源区可能经历了俯冲事件的影响。Mazzucchelli 等^[59]研究了阿尔卑斯南部的 Baldissero 岩体中的闪长岩脉,发现闪长岩由较高的 Mg[#]值及较高的 Nd 和较低的 Sr 同位素组成,暗示其是幔源成因的。归根结底,橄榄岩地球化学的区别主要取决于它们的岩石组成、产出的构造背景、形成的温度压力条件及流体加入的情况。需要强调的是,上述条件的变化不同地区情况不同,局部地区总结的规律不一定适用于全球。

1.2 与造山橄榄岩相伴的变质作用

造山橄榄岩大多经历了高温高压变质作用的改造,许多橄榄岩与榴辉岩一起出现,许多橄榄岩

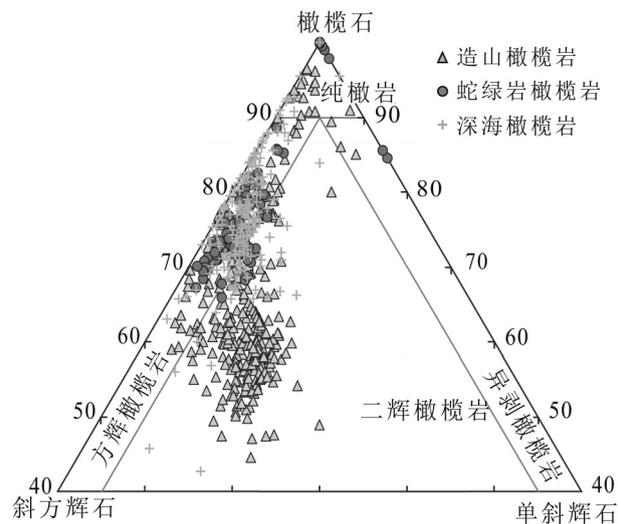


图2 造山橄榄岩、蛇绿岩和深海橄榄岩组成^[21]

Fig. 2 Modal compositions of orogenic, ophiolitic, and abyssal peridotites

显示高温变质作用的特征^[53, 60-65]。Bodinier 等^[21]根据几个主要的造山橄榄岩的岩石学特征和折返的 $p-T$ 轨迹,将其分为高压/超高压、中压和低压 3 个亚类。其中超高压的石榴子石橄榄岩备受关注(关于超高压方面的文献国内学者了解很多,笔者就不赘述了)。不同造山带的石榴子石橄榄岩,在构造、结构、矿物、化学成分和年龄上有许多不同,造成这些差异的原因很复杂,主要有 3 个:①地幔源区不同;②受到俯冲大洋/大陆地壳的流体/熔体的干扰不同;③大陆壳成分不同^[66]。

阿尔卑斯高压变质作用的研究非常详细,许多学者的研究表明,阿尔卑斯超高压变质作用达到的峰值温压范围大体是 $550 \sim 620^\circ\text{C}$ 和 $1.5 \sim 1.8 \text{ GPa}$ ^[63, 65, 67]。除阿尔卑斯外,西班牙南部的橄榄岩也一样,如 Ronda 岩体,并不处于造山带。据 Hidas 等^[68]的研究,Ronda 岩体从中新世早期—晚期经历了前期的弧后伸展和后期的挤压 2 个阶段的演化(图 3),Ronda 岩体底侵位时对围岩的挤压造成的强烈超糜棱岩化作用形成的石榴子石辉石岩(榴辉岩相)可达 1000°C 和 1.4 GPa ^[69],岩体的围岩榴辉岩中还有蓝宝石、刚玉、蓝晶石等高压矿物出现,典型的变质矿物组合是石榴子石-单斜辉石-蓝晶石-刚玉,记录的 $p > 1.5 \text{ GPa}$ 和 $T > 900^\circ\text{C}$ ^[70]。上述研究表明,Ronda 岩体在其演化过程中没有经历过俯冲作用,仅仅由于岩体在侵位阶段对围岩的强烈挤压作用也可达到榴辉岩相的高温高压条件。

1.3 与造山橄榄岩相伴的流体作用

与造山橄榄岩有关的流体作用是一个新的问题,在蛇绿岩的地幔橄榄岩中很少出现,虽然有关的现象在蛇绿岩、洋中脊及转换断层中也有报道^[71-74]。据笔者研究,在中国蛇绿岩的地幔岩中还很少能够见到这种现象^[6],而在大陆岩石圈地幔和地幔包体中,地幔流体、流体交代的现象非常常见^[62, 64, 70, 75-84]。橄榄岩中的含水矿物主要有角闪石(韭闪石、透闪石)、金云母、绿泥石等。如安徽饶拔寨岩体,主要由角闪橄榄岩组成,几乎每个薄片均有角闪石出现,角闪石含量高的可达 40% 左右,主要是镁质角闪石和契尔马克角闪石^[85]。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^[85-86]。此外,松树沟橄榄岩中流体交代作用

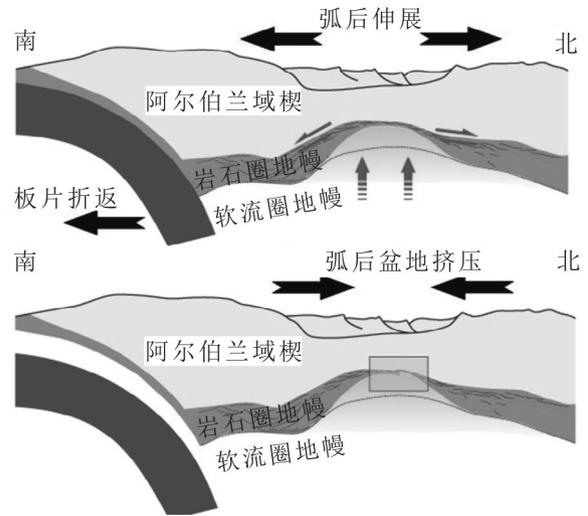


图 3 西地中海新生代构造演化示意图^[68]

Fig. 3 Sketch map of Cenozoic tectonic evolution of the western Mediterranean

也很普遍^[27-31]。据 Cao 等的研究,在松树沟岩体发生的水-岩交换作用的流体具有玻安质岩浆的性质^[30-31]。

地幔岩富流体的现象在国外报道很多,如意大利的 Lanzo、西班牙的 Ronda、日本的 Horoman、马来西亚的 Kinabalu、埃及的 Zabargad 等^[9, 23, 62-63, 76]。Agrinier 等^[76]根据对 Zabargad 橄榄岩和角闪石的结构、岩石学、化学和同位素(Sr、H 和 O)研究,将流体的活动分为 3 期:第一和第二期角闪石(主要是韭闪石)是幔源的,在橄榄岩底辟上升期间橄榄岩变形之前形成。含水流体源于大陆下的地幔,在橄榄岩底辟隆起过程中被释放出来。第三期角闪石位于剪切带和矿脉中,来自富钠/钾的流体,与橄榄岩的形成无关。Zabargad 橄榄岩位于泛非大陆深部地壳的麻粒岩相的片麻岩中,但没有证据表明流体来自陆壳^[76]。蛇纹石化作用经常是橄榄岩伴随的蚀变作用,其有不同的成因,形成于不同的阶段。蛇纹石化的水具有复杂的来源,包括从地壳到海水到陆壳上的地下水,因此,许多学者对岩体的蛇纹石化作用进行了研究^[87],给出了岩体构造演化的许多重要的信息。

1.4 与造山橄榄岩有关的成矿作用

与该类岩体有关的成矿作用包括铂族金属^[9, 16]、铬铁矿^[23]、镍铜矿^[23]、石墨^[22]、金^[16]等。对意大利 Lanzo 斜长二辉橄榄岩及西班牙 Ronda 橄榄

岩的研究表明,造山橄榄岩显示钨、铼和钡的局部富集,主要富集轻铂族元素^[9]。Ronda 岩体的铬镍矿化有一定的规模,据研究,该矿化与 MORB 类型的流体有关,且受到大陆下地壳成分的混染^[23]。

在摩洛哥北部的 Beni Bousera 岩体中发现了 17 个铬铁矿体,其结构、构造和地球化学特征均类似于蛇绿岩的豆荚状铬铁矿。但是它们属于反常的高温二辉橄榄岩体,兼具大陆地幔和海洋地幔的双重特征,可能相当于大陆-大洋裂谷期中形成的具过渡特征的地幔岩^[64]。Gervilla 等^[60]将上述矿化分为 3 类:①铬铁矿(Cr 矿石),②铬镍砷化物矿石(Cr-Ni 矿石)和③铁镍铜硫化物和石墨矿石(S-G 矿石)。铬矿石由富铬和富镁铬铁矿组成,形成豆荚状矿体,并与纯橄榄岩主岩中的斜方辉石、单斜辉石和橄榄石相关的网状细脉有关。铬镍矿石由富含铝和铁的铬铁矿、晶间镍矿、斜方辉石和/或堇青石脉矿物组成,富集金和铂族元素。S-G 矿石主要由硫化物(磁黄铁矿、镍黄铁矿、黄铜矿和方黄铜矿)和少量石墨和铬矿、少量砷化物(镁硅石和镍黄铁矿),以及与金云母、单斜辉石和斜长石脉石伴生的硫砷矿(钴铁格氏锰矿)组成。这些矿石都是在大陆下岩石圈地幔部分演化的后期,通过少量熔体的分馏形成的。其中,铂族元素在铬镍矿和硫砷矿之间的分布主要受高温富砷小体积熔体中不混溶砷化物液体的分离控制^[60]。

中国秦岭造山带的松树沟橄榄岩也有铬铁矿产出,已发现的矿化和矿点有 163 处,其中 38 个具有工业意义^[88-89]。中国真正具有经济价值的铬铁矿可能是在甘肃省肃北县的大道尔基,大道尔基岩体由强烈亏损的方辉橄榄岩和堆晶岩 2 个单元组成,堆晶岩包括 3 个旋回,铬铁矿产于第 3 旋回底部的纯橄岩-含辉纯橄岩中,为浸染状铬铁矿^[90-92]。大道尔基是否为造山橄榄岩存在争议,早先认为是蛇绿岩(详见后述)。

Lorand 等^[19]研究了法国比利牛斯山脉 51 个尖晶石橄榄岩样品中的金,认为金的富集与角闪石的出现有关,Au 的最高品位可达 $5 \times 10^{-9} \sim 18 \times 10^{-9}$ 。Lorand 等^[19]认为,金在地幔交代作用中表现相对惰性,与角闪石有关的 H_2O-CO_2 流体可能有利于金的迁移。

1.5 造山橄榄岩的侵位机制

造山橄榄岩深埋于陆壳之下,是怎么抬升、折

返到陆壳上部的?这是学术界长盛不衰的研究课题。蛇绿岩研究对此有专门的讨论,造山橄榄岩也有许多相关的研究。二者折返的机制有的类似,有的不同。一个明显的不同是关于“热侵位”和“冷侵位”的讨论。蛇绿岩通常是冷侵位,造山橄榄岩通常是热侵位。学术界大多赞同造山橄榄岩是高温的岩体,经历了高温高压变质作用的改造,有的还伴有明显的深熔作用^[24, 54-55, 65, 67, 70, 93]。

造山橄榄岩围岩的变质作用主要出现在橄榄岩岩体的底部^[54-55, 69, 94]。如 Ronda 橄榄岩经历了复杂的高压变质作用和深熔作用,榴辉岩相的 $p > 1.5$ GPa, $T > 900^\circ C$ ^[57, 70, 94]。Tubía 等^[69]发现,Ronda 岩体保存了与大陆地壳岩石上地幔热逆冲作用有关的韧性剪切带的独特现象,即橄榄岩下盘岩石的变形越靠近岩体变形程度越大。基底剪切带的石榴子石辉石产生约 $1100^\circ C$ 和 1.4 GPa 条件下的糜棱岩化。这种条件导致下伏地壳岩石的部分熔融和长英质热液的形成,随后的变形主要集中在热动力变质晕中,变质晕带显示的明显的应变梯度,记录了不同的运动学机制^[69]。如图 4 所示,展示了一个逆向变化的 Ronda 岩体下盘变质带的变化序列^[54-55]。

Obata 等^[95]研究了意大利 Balmuccia 橄榄岩的假玄武玻璃(pseudotachylite),该假玄武玻璃以不协调的岩脉形式出现,横切橄榄岩的原生构造,在剪切带中部形成薄(约 1 cm)层。假玄武玻璃的橄榄石具有类似于寄主橄榄石的成分,在薄片由细粒的自形橄榄石和单斜辉石晶体组成,紧密堆积在玻璃基质中,含少量的碎屑橄榄石颗粒和岩屑糜棱岩碎屑。对寄主岩石和假玄武玻璃橄榄石的岩石学分析及剪切加热能量计算表明,假玄武玻璃橄榄石起源于寄主橄榄岩的几乎完全熔融,然后在 100 s 或更短的时间尺度内快速结晶,其形成条件与地震机制相符。看来,橄榄岩中假玄武玻璃的存在可能意味着一个非常显著的剪切加热,可能是由于断层面上的高剪切应变造成的。

Kornprobst 等^[96]根据西班牙的实例提出了造山橄榄岩的侵位模式,认为造山橄榄岩经历了 2 个阶段的演化,最终定位于造山带(图 5)。笔者根据在川西和滇西地区的研究,认为造山橄榄岩可能存在 2 种侵位型式:一种是大陆减薄的裂谷模式,适合川滇地区的情况(图 6);另一种是大陆基底抬升的模式,适合欧洲阿尔卑斯的情况(图 7)。

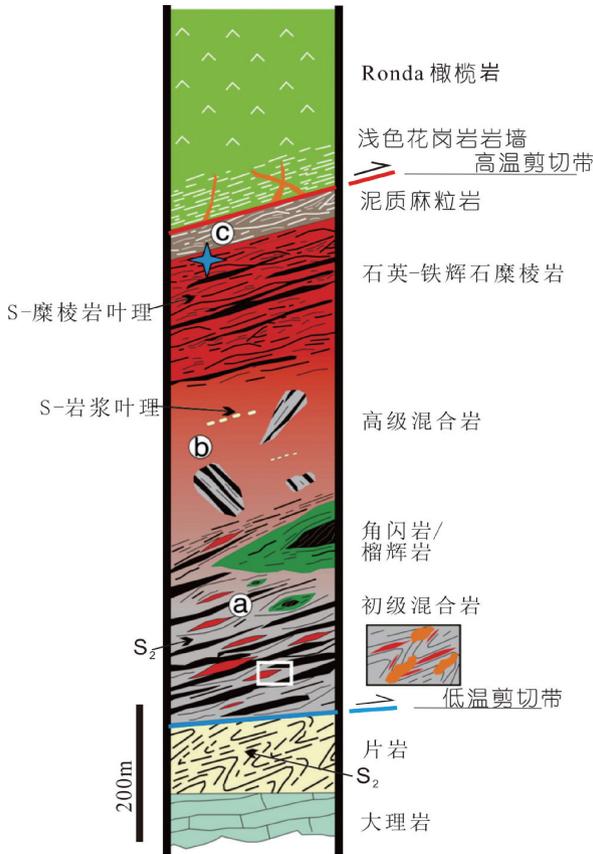


图 4 西班牙 Ronda 岩体底部剖面图

(展示了从岩体底部向下变质程度逐渐降低的变化^[54]; a、b、c 分别表示原作者详细研究部位,本文在此省略; 蓝色星号表示原作者取样位置)

Fig. 4 Schematic cross section of the crustal footwall of the Ronda peridotites at Sierra Alpujata showing the location of the studied mylonitic samples

(1)裂谷模式。在裂谷阶段,陆壳伸展减薄,软流圈上涌,大陆岩石圈向两侧退缩(图 6-a)。持续的拉张把陆壳撕裂,出现洋壳。软流圈在洋壳下部熔融形成 MORB,留下的残余地幔则具有大洋岩石圈地幔的特征(在图 6-b 中以粉红色表示,以区别于呈棕色的大陆岩石圈地幔),遂进入洋盆扩张阶段。在板块碰撞阶段,洋壳及大洋岩石圈地幔被仰冲卷入陆壳即为蛇绿岩;残留裂谷下部的大陆岩石圈地幔也可能被挤出到地壳浅部,即川西滇西地区出现的造山橄榄岩(即义敦型岩体)(图 6-c)。在碰撞阶段,蛇绿岩出露的部位代表 2 个陆块之间的缝合线,而义敦型出露的位置代表陆壳减薄撕裂的部位。

(2)下地壳抬升模式。图 8 是据 Nicolas^[13] 等的

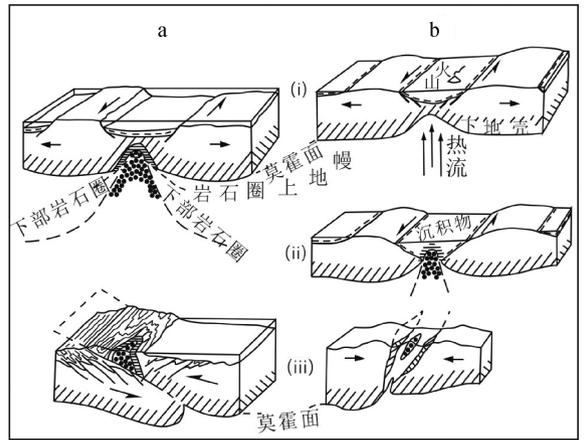


图 5 超镁铁岩-麻粒岩组合侵位模式^[96]

Fig. 5 Emplacement model of ultramafic-granulitic associations a—西班牙 Betic 裂谷带;b—比利牛斯山北部;i—伸展阶段,地壳减薄,地幔上涌,出现热异常;ii—地壳破裂阶段,地壳撕裂,橄榄岩侵入; iii—压缩阶段

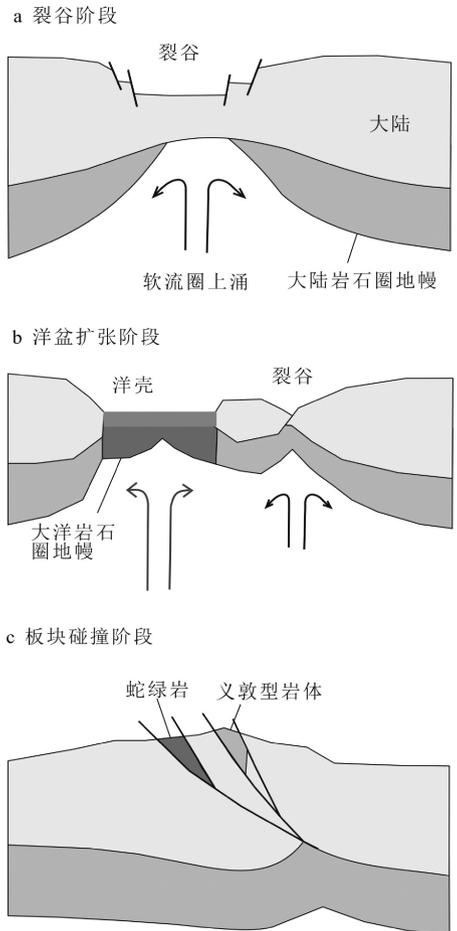


图 6 造山橄榄岩(义敦型岩体)形成模式之一:裂谷模式^[5]

Fig. 6 Model 1: the gift model of the orogenic peridotite (Yidun type body)

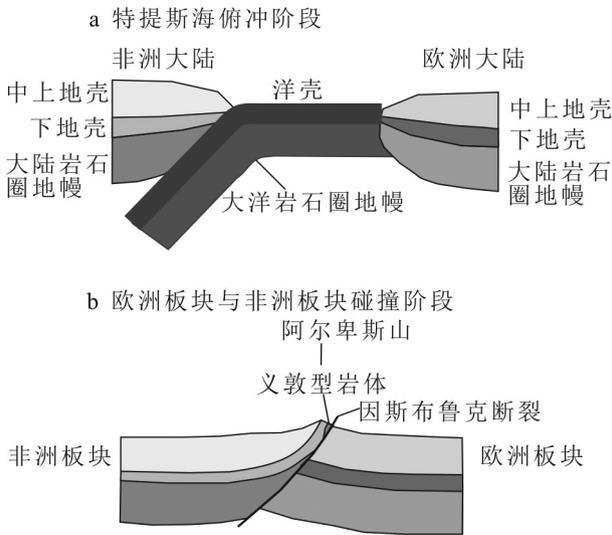


图7 造山橄榄岩形成模式之二:陆壳基底剥蚀抬升模式^[5]
Fig. 7 Model 2: the erosion of continental crustal basement uplift model of the orogenic peridotite

认识构思的。在阿尔卑斯,因斯布鲁克断裂代表欧洲板块与非洲板块碰撞的部位,沿因斯布鲁克线分布的许多造山橄榄岩(如 Arami、Finero、Balmuccia、Baldissero、Lanzo 岩体等)可能是非洲板块陆壳基底之下的大陆岩石圈地幔,可能是在板块碰撞时被仰冲上来的。因斯布鲁克线已发现含柯石英的榴辉

岩,暗示地幔岩挤出时经历了超强的应变压力。

2 中国的造山橄榄岩

中国的造山橄榄岩经过几十年的研究已经取得了很好的成果,中国造山橄榄岩的实例很多,大体分布在大别—苏鲁、秦岭、柴达木北缘—阿尔金(图1)、北祁连、滇川西部等地。下面介绍几个实例。

2.1 松树沟纯橄岩

产于秦岭群中的松树沟橄榄岩是秦岭造山带中规模最大的超镁铁岩体,出露面积达 20 km²,以强烈亏损的纯橄岩为主(图8)。对于松树沟橄榄岩形成的构造背景存在蛇绿岩与造山橄榄岩 2 种不同的认识,大多数学者认为松树沟是蛇绿岩^[28, 31, 34-38],包括笔者早先的研究在内^[6, 97]。秦岭造山带分开了华北与华南 2 个地块,其间应当存在一个洋盆,因此,秦岭应当有蛇绿岩,然而,松树沟地幔橄榄岩是否为蛇绿岩?这是需要研究和论证的。

由于松树沟橄榄岩与超高压变质作用的密切关系,以及松树沟岩体及其围岩中蛇绿岩的证据并不充分(详见后述),笔者修正早先的认识,认为将松树沟纯橄岩确定为造山橄榄岩比较合适。苏犁等^[27]根据对橄榄岩岩石组合、结构构造、矿物成分、

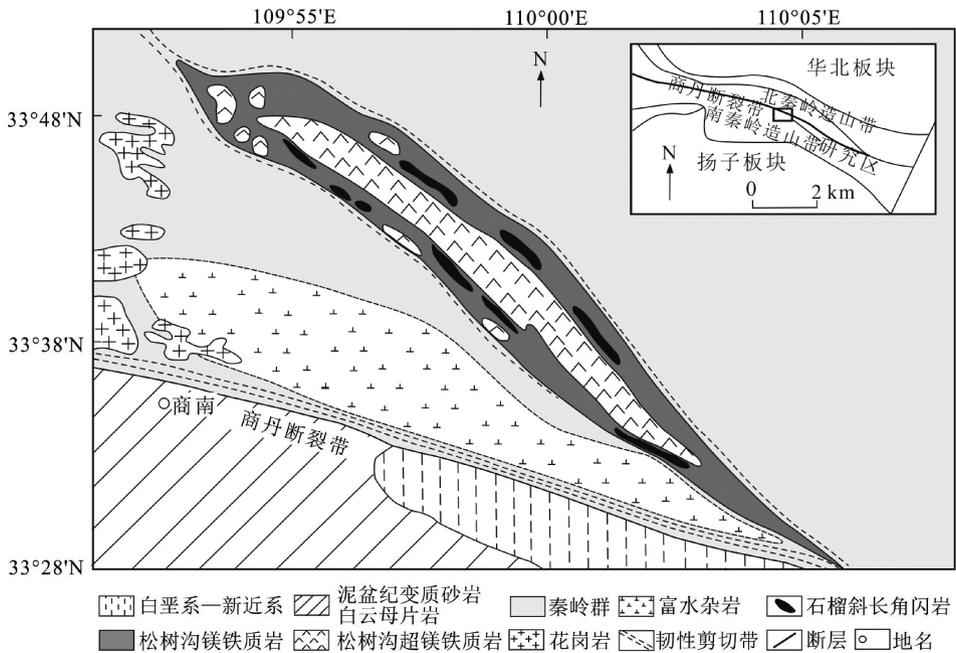


图8 中国北秦岭松树沟超镁铁质岩体地质略图^[27]

Fig. 8 Simplified geological map of the Songshugou area in the Qinling Range, China

全岩主量和微量元素组成、原生岩浆包裹体等的研究指出,该岩体是熔体多孔隙流动渗滤成因的交代地幔,与蛇绿岩的纯橄岩(如阿曼)明显不同^[27]。

许多作者研究了松树沟橄榄岩的地球化学特征和 Re-Os 同位素,指出岩体中流体交代作用很普遍,可能与板块的俯冲作用有关^[27-31]。松树沟与超高压变质作用密切相关,经历了从形成到俯冲、折返的复杂过程^[32-36]。松树沟榴闪岩很早就有学者研究,现已知其属于超高压变质作用的产物^[37-38]。Yu 等^[35]对松树沟的变形作用和糜棱岩化进行了详细的研究,指出松树沟橄榄岩强烈的变形和糜棱岩化的原岩为岩石圈成因的粗粒橄榄岩,橄榄岩中大量角闪石的存在表明有含水流体的加入。Cao 等^[30]和 Sun 等^[31]等发现,难熔的橄榄岩可能与高温玻安岩流体发生过水-岩交换作用,故松树沟橄榄岩可能是在弧前背景下复杂的部分熔融和熔体/流体-岩石相互作用的产物。结合 Re-Os 同位素定年研究,松树沟糜棱岩橄榄岩可能是新元古代大洋岩石圈地幔的碎片,在早古生代俯冲侵位形成的^[28, 30-31, 35-36, 98-99]。

松树沟橄榄岩产出铬铁矿,这主要是在 20 世纪 60—70 年代由地质勘探队发现和勘探的。铬铁矿主要赋存在粗粒纯橄岩和方辉橄榄岩中,共发现矿化和矿点 163 处,其中 38 个具有工业意义。矿体最长 140 m,最厚 5.37 m,最大延深 220 m。多呈豆荚状、层状、似脉状产出,矿石类型包括浸染状、条带状、块状等,以浸染状和条带状贫矿石为主^[88-89]。李犇等^[100]指出,松树沟铬铁矿产于堆晶纯橄岩中,形成于格林威尔期松树沟洋盆的扩张过程,是中粗粒纯橄岩在热边界层在冷凝固过程中岩浆分异形成的。仇东东等^[98]基于 343 个钻孔资料,通过 3Dmine 软件建立了松树沟铬铁矿的三维地质模型,根据贫矿的富集部位、流动构造、岩浆分异程度、化探异常,预测了 2 个具有深部找矿潜力的地段,并提出了找矿标志与找矿方法,为下一步找矿提供了新的思路。

2.2 饶拔寨橄榄岩

大别-苏鲁超造山带出露的许多造山橄榄岩是近年研究的热点^[39-47]。本文仅就饶拔寨岩体谈一点看法。安徽饶拔寨岩体是大别-苏鲁造山带中最大的橄榄岩(图 9),它是大陆岩石圈地幔还是大洋岩石圈地幔存在争论^[6, 85-86, 101-110]。饶拔寨岩体主要由纯橄岩、方辉橄榄岩、二辉橄榄岩和角闪橄榄岩

组成^[85-86, 107, 111-113]。饶拔寨岩体有 2 个特点:一个是强烈的糜棱岩化作用;另一个是广泛的地幔交代作用^[5]。饶拔寨岩体总体面貌不同于通常所说的地幔橄榄岩,有角闪石、金云母等含水矿物出现^[85-86],尤以角闪石居多,几乎在每个薄片上均能见到,角闪石含量高的可达 40%左右。在角闪方辉橄榄岩中,橄榄石和斜方辉石明显拉长,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。部分角闪石呈变斑晶产出,有明显的变形弯曲,波状消光,有的角闪石具亚颗粒化。部分橄榄石和角闪石细粒晶体沿具扭折带的斜方辉石变晶裂隙生长,指示是在岩石圈地幔中重结晶的^[85]。角闪石的产出及其结构特征表明,饶拔寨橄榄岩经历了明显的地幔交代作用,而非橄榄岩形成之后流体上升的交代形成的^[85-86]。角闪石的大量出现及微量元素、稀土元素、Sr-Nd 和 Re-Os 同位素资料表明,饶拔寨岩体更接近大陆岩石圈地幔而不是大洋岩石圈地幔的残片^[85]。饶拔寨橄榄岩可能形成于中元古代,属于造山橄榄岩,形成于陆壳

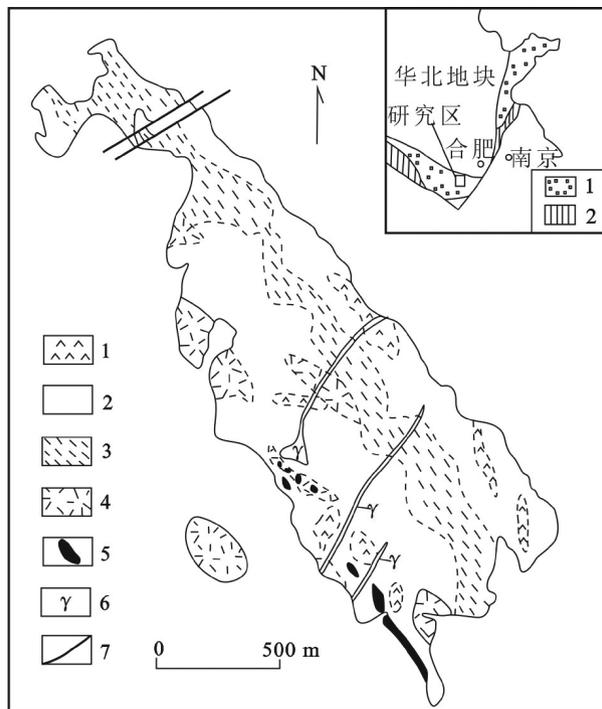


图 9 饶拔寨岩体地质图^[113]

Fig. 9 Geological map of the Raobazhai peridotite
 1—纯橄岩;2—方辉橄榄岩和二辉橄榄岩;3—糜棱岩化橄榄岩;
 4—角闪橄榄岩;5—石榴子辉石岩;6—花岗岩;7—断层。
 角图中:1—元古宙-太古宙岩石;2—新元古代岩石

之下,在中生代因构造挤压就位^[85-86, 109, 111]。

2.3 川西-滇西造山橄榄岩

该区橄榄岩出露很多,主要分布在川西德格、白玉、巴塘和滇西的德钦、维西和潞西地区。出露的地幔橄榄岩体有数百个之多。除四川德荣至云南德钦的白马雪山、共卡一带为蛇绿岩外,大多属于造山橄榄岩(即早先笔者命名的“义敦型”岩体^[1-6])。义敦地区的造山橄榄岩主要由弱亏损的二辉橄榄岩及很少的堆晶岩、辉长岩、闪长岩及辉绿岩(岩脉或岩墙)组成,围岩为晚三叠世灰岩、砂泥岩(川西)和双峰山火山岩(滇西北),为一套浅海相含碳酸盐岩沉积-火山岩系沉积。地幔橄榄岩或单独或与堆晶岩相伴沿断层侵入到上述地层中,岩体边部片理化较强,由宽2~4 m的滑石片岩和绿泥石片岩组成(图10)。堆晶岩有橄榄岩、单辉橄榄岩、辉石岩、辉长岩等(川西),但未见与其相伴的玄武岩。辉绿岩墙群具洋岛型玄武岩的地球化学特征,高度富Ti,强烈富集轻稀土元素,指示其形成于板内构造环境^[1-6]。此辉绿岩墙群不同于蛇绿岩的辉绿岩墙群,蛇绿岩的辉绿岩墙群的围岩是辉绿岩,代表扩张的洋脊增生的产物;而义敦型辉绿岩墙群的围岩是陆相或浅海相地层(图10),是在拉张构造背景下侵入在陆壳内部的。

云南德钦-维西岩群由几十个小规模的蛇纹岩、辉石岩、辉长岩和闪长岩组成。云南潞西三台山的地幔橄榄岩主要是强烈亏损的方辉橄榄岩,位于保山地块与腾冲地块之间的高黎贡山断裂带内。这里的方辉橄榄岩是否为蛇绿岩也存在争议^[3, 6, 114-117]。三台山出露有十几个地幔橄榄岩块体(图11),大多强烈蛇纹石化,构造侵位于侏罗纪-三叠纪浅变质的砂岩、千枚岩中(夹厚约几厘米的泥砂质硅质岩)。笔者多次赴该区考察,除地幔橄榄岩外,找不到任何与蛇绿岩有关的证据^[3]。刘慧明^[117]报道的三台山橄榄岩的锆石U-Pb年龄为190 Ma,时代为早侏罗世。

2.4 甘肃省大道尔基岩体

大道尔基岩体是否为蛇绿岩存在不同认识^[118-120]。大道尔基(早先称为大道尔吉)岩体沿党河断裂分布,以南为南祁连地块,以北为中祁连地块^[121-122]。岩体之北与北大河岩群C岩段大理岩呈断层接触,南与奥陶纪石英闪长岩体也呈断层接触(图12)。岩体由地幔橄榄岩和堆晶岩2个

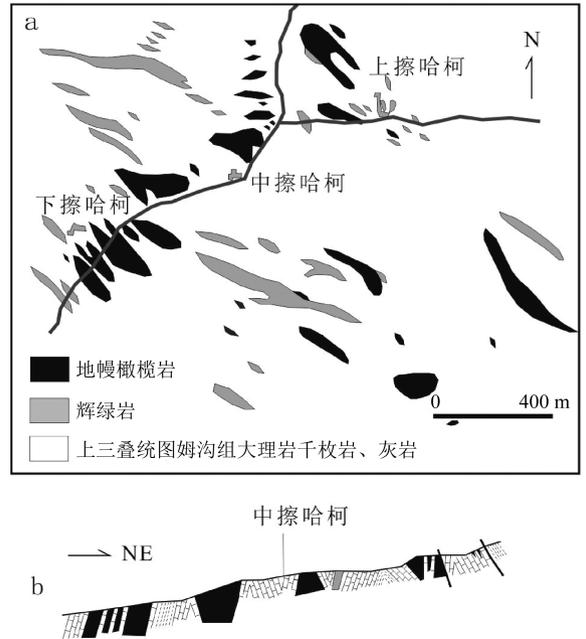


图10 四川白玉县擦哈柯地质草图^[3]

Fig. 10 Sketch geological map and profile map of the Cahake Yidun-type body in Baiyu County, Sichuan

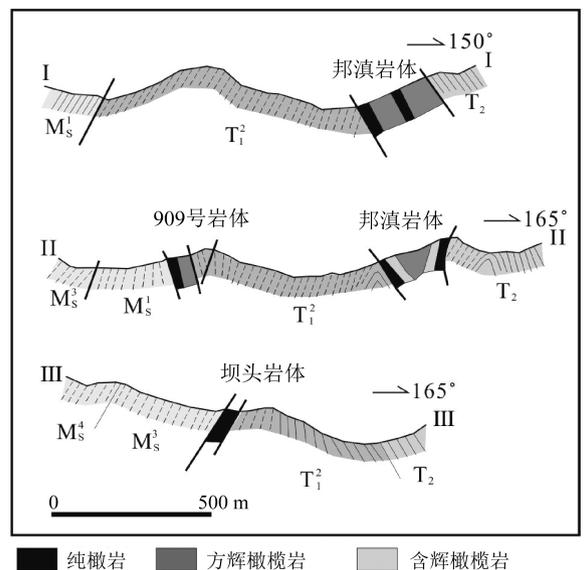


图11 三台山地幔橄榄岩侵位的剖面图^[3]

(剖面线I-I、II-III和IV-IV的位置见图6)

Fig. 11 Profiles of mantle peridotites in the Santaishan area of Luxi City, Yunnan Province

M_s^1 —中生代(?)浅变质的石英砂岩家页岩及薄层泥质灰岩;

M_s^3 —中生代(?)变晶砂岩、石英片岩及云母片岩;

M_s^4 —中生代(?)片岩和片麻岩; T—三叠纪(?)陆相碎屑岩

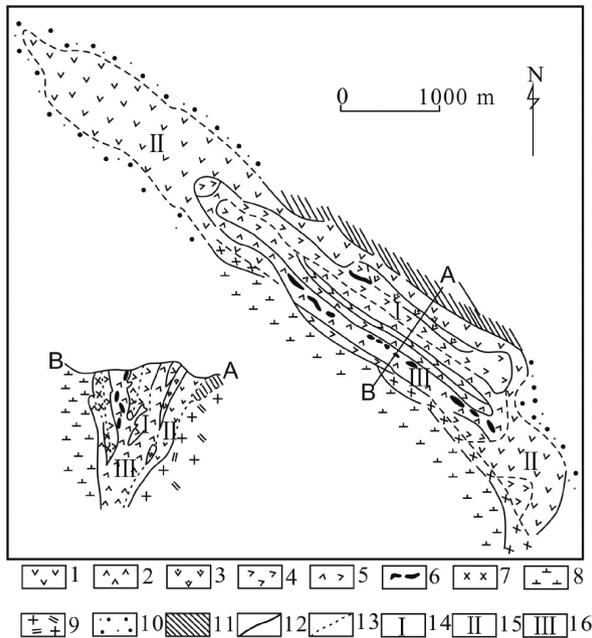
图 12 大道尔吉岩体地质示意图^[122]

Fig. 12 Geological map of the Dadaoerji body

- 1—蛇纹石化纯橄岩;2—含矿纯镁橄榄岩;3—顽辉镁橄榄岩;4—辉石岩;
5—一条带状透辉橄榄岩;6—铬铁矿体;7—辉长岩;8—石英闪长岩;
9—花岗岩闪长岩;10—第四系;11—一条带状硅质灰岩、千枚岩及砂砾岩;
12—断层;13—地质界线;14—透辉石岩相;
15—富镁纯橄岩相;16—含矿纯橄岩相

单元组成,堆晶岩包括 3 个旋回,铬铁矿产于第 3 旋回底部的纯橄岩—含矿纯橄岩中,为浸染状铬铁矿^[90-92]。最近的 1:5 万区调研究得出的 Sm-Nd 等时线年龄为 445 ± 58 Ma。地幔岩强烈蚀变,地球化学显示强烈富 Mg 贫 Al、Ca 的特征, Yb 含量很低 ($0.03 \times 10^{-6} \sim 0.05 \times 10^{-6}$), 属于强烈亏损的方辉橄榄岩。

3 讨论

3.1 两阶段演化的造山橄榄岩

Bodinier 等^[21] 在总结构造侵位的橄榄岩时,将橄榄岩分为 3 类:造山的、蛇绿岩的和深海的。造山橄榄岩的术语表达的是橄榄岩目前出现的位置及形成的机制:橄榄岩出现在造山带,是构造侵位挤上来的。实际上,造山橄榄岩大多是经历了很长时期逐渐演化过来的,有的从元古宙即已出现,到新生代才最终定位(如 Ronda)。但是,橄榄岩最初是怎么形成的? 根据研究,橄榄岩最初大多经历过裂谷的演化阶段,也就是说,造山橄榄岩的萌芽期是

裂谷构造背景^[1-6, 10, 1, 24, 61, 123-125]。例如,产于川西—滇西的义敦型岩体,二辉橄榄岩直接侵入到三叠纪浅海相火山—沉积岩中,并未经历造山挤压过程,算不上造山橄榄岩,代表了在裂谷阶段之后夭折的造山橄榄岩。

裂谷夭折的典型实例还有位于红海的 Zabargad 橄榄岩。其在红海主海槽的西缘,面积只有 4 km^2 , 但由于它是在裂谷环境中出现的地幔岩露头,已成为众多地质、地球物理、岩石学和地球化学研究的重要对象^[123]。Bonatti 等^[15] 称其为大洋裂谷前期的橄榄岩(peridotite body from preoceanic rifts)。Zabargad 岛超镁铁质岩由纯橄岩、二辉橄榄岩和辉石岩组成,岩石中尖晶石的 Ti/V 值介于 $8.37 \sim 16$ 之间,表明这些岩石是与尖晶石二辉橄榄岩相平衡的地幔物质(>30 km 深度和 9 kbar)。这些特征加上岩石通常很新鲜、橄榄石的高 Fo 含量(93%)及中新世不整合蒸发岩的存在,被认为是红海裂谷在中新世侵位的上地幔碎片。橄榄岩中产宝石级橄榄石,是在岩浆结晶早期形成的,具原始岩浆的特征^[124]。野外填图表明,Zabargad 橄榄岩主要与泛非片麻岩和白垩纪地层接触,Zabargad 组具复杂的褶皱,部分与断裂有关。因此,Zabargad 断裂带可能是位于该岛北部红海海底的一条海底高角度断裂带,它穿过 Zabargad 岛,橄榄岩沿该断裂挤上来^[125]。

西班牙的 Ronda 岩体也是一个与裂谷有关的典型代表,Doblas 等^[10] 称其为“地幔核杂岩”(Mantle core complexes)。Tubía^[24] 认为,Ronda 岩体是经历了伸展和挤压过程才形成的。Ronda 橄榄岩位于 Los Reales 推覆体的底部,被变质岩系覆盖,变质岩系从麻粒岩相到绿片岩相不等。Los Reales 推覆体的构造变质包括了 2 个主要的变质阶段:第一次是具有岩石圈规模的伸展事件,发生在 Ronda 橄榄岩上覆脆弱的陆壳中,主要与岩石圈减薄之下软流圈的底辟上涌有关,并导致低压高温变质作用和具有 $N110^\circ E$ 方向的拉伸线理的韧性剪切带。第二次是随后的挤压事件,表现为 Ronda 橄榄岩从 SWW 向 NEE 方向的热逆冲作用。最后,由于前一次挤压事件造成的岩石圈增厚,导致 N—S 方向上晚期的伸展变形。侏罗纪—新近纪,变质变形的运动学可以整合到与非洲板块和伊比利亚板块整体走滑运动相一致的左旋斜构造模型中,而后期的变形反映了从古近纪开始非洲和伊比利亚板块的

汇聚。

在西班牙西部还有一个 Galicia 被动大陆边缘,那里的蛇纹石化橄榄岩非常发育,南北延伸约 125 km。据 Beslier 等^[61]研究,橄榄岩是在北大西洋于白垩纪大陆裂谷期间上升的,在上升过程中经历了部分熔融和高温低应力韧性变形作用,随后又在低温和应力增加下产生强烈的糜棱岩化作用。糜棱岩构造的几何学特征既与橄榄岩穹隆的上升有关,也与裂谷期间大陆岩石圈广泛的应变场有关^[61]。

造山橄榄岩,顾名思义离不开造山作用。它处于造山带,是在造山过程中被挤上来的。那么,川滇西部的“义敦型”还没有造山,也不处于造山带,它还属于造山橄榄岩吗?纵观全球的造山橄榄岩,大多出现在造山带,伴随着高压-超高压变质作用。只有少数实例是与地壳伸展作用导致的裂谷事件有关,如红海的 Zabargad、西班牙的 Ronda、摩洛哥的 Beni Bousera 等。笔者猜测,许多造山橄榄岩的形成过程可能正是由大陆伸展拉开序幕的,大陆伸展、地壳减薄,有可能使陆壳下的岩石圈地幔在地壳撕裂的地方挤上来,这就是在义敦地区所见的地幔岩直接侵入地表的结果。如果后来的地壳应力转变为挤压,那么,在什么地方陆壳容易破裂,造成陆内俯冲事件呢?显然是地壳最薄弱的部位。与正常地壳厚度和加厚地壳相比,减薄的陆壳、已经撕裂的陆壳、已经有地幔物质挤出部位应当是最容易发生陆内俯冲的地方。在这里发生的俯冲,最有可能把地幔物质挤上来。因此,造山橄榄岩大体经历了 2 个阶段:早期的裂谷阶段(或地壳伸展减薄阶段)和晚期的陆壳挤压阶段。阿尔卑斯、大别、秦岭造山带、云南滇西三台山的造山橄榄岩可能属于这种类型,而 Ronda、Zabargad、川滇西部属于造山橄榄岩形成的早期阶段的产物。阿尔卑斯等地缺乏与造山橄榄岩伴生的火山岩,阿尔卑斯与义敦地区的橄榄岩性质相近,说明这种模式是可能的。如果这种可能性存在,那么,Zabargad、义敦型橄榄岩即是造山橄榄岩的一个亚类,另一个亚类是阿尔卑斯型。阿尔卑斯的造山橄榄岩经历了裂谷期和造山期 2 个阶段,最终形成、定位、终结于阿尔卑斯期造山阶段。因此,义敦型属于造山橄榄岩萌芽期阶段的产物,刚结束裂谷阶段,还没有达到造山阶段即夭折了。而阿尔卑斯型橄榄岩才是真正的造山橄榄岩。

地幔岩深埋于地壳之下,在 3 种情况下能够出露在地壳之上:①以蛇绿岩的方式,将洋壳底部的地幔岩带上来,位于蛇绿岩的底部;②造山橄榄岩,代表陆壳底部的地幔岩,以裂谷的方式或陆内挤压的方式出现在造山带和伸展盆地或裂谷地区(如川西义敦地区,红海等);③玄武岩中的地幔岩包体。不考虑包体的情况,地幔岩仅以蛇绿岩和造山橄榄岩 2 种形式产出。前者代表洋壳下的地幔,后者代表陆壳下的地幔。

秦岭造山带分开了华北与华南 2 个地块,其间肯定存在一个海盆,秦岭应当出现蛇绿岩,但是,蛇绿岩在哪里?松树沟是否有蛇绿岩?需要研究和论证。同样,云南三台山橄榄岩位于腾冲地块与保山地块之间,其间也应当存在一个洋盆,但是,三台山橄榄岩是否为蛇绿岩也同样是一个需要仔细研究的问题。

3.2 造山橄榄岩与蛇绿岩的区别

蛇绿岩和造山橄榄岩都以地幔岩作为主体,二者如何区别是一个很难解决的问题。笔者之前已经提出了一些标志^[2-3,5],现根据新的资料补充如下。

(1)深海沉积。有深海沉积的是蛇绿岩,没有的是造山橄榄岩。大洋中脊处于深海背景,最浅的东太平洋中隆的深度也超过了 2500 m。而深海硅质岩属于远洋沉积,基本上没有陆壳物质混入的可能性。造山橄榄岩产于陆内,没有大洋背景或仅有初期的大洋背景(如 Zabargad),初期大洋背景也不可能有深海沉积出现。因此,这一条标志应当是可靠的。

(2)混杂堆积。有混杂堆积的是蛇绿岩,没有的是造山橄榄岩。混杂堆积最大的特点,即不同于其他堆积的最大区别是:混杂堆积是大洋岩石样品与大陆岩石样品的混杂,是无序的,大洋岩石与大陆岩石乱七八糟挤在一起的现象。造山橄榄岩由于没有大洋背景,所以虽然构造挤压可以非常强烈,挤压和剪切可以把许多不同的岩石卷进来,但是不可能发生混杂堆积现象。

(3)超高压变质作用。没有超高压变质作用的可能是蛇绿岩,有可能是造山橄榄岩。为什么加上“可能”,因为橄榄岩侵位的情况千变万化。中国的蛇绿岩很多,那些基本上可以确定是蛇绿岩的地块,与蛇绿岩伴生的变质岩绝大多数仅达蓝片岩

相,很少能够达到角闪岩相^[6]。阿尔卑斯山的橄榄岩绝大多数与超高压的榴辉岩相变质作用相伴^[21],它们是否为蛇绿岩仍存在争论^[126-128]。如位于西阿尔卑斯地区的 Lanzo 岩体,有人认为它是榴辉岩的大洋岩石圈碎片,是蛇绿岩。根据 Piccardo 等^[127]的研究,Lanzo 岩体的组成十分复杂,早先为大陆下的岩石圈地幔,是在利古里亚-特提斯大陆的前大洋裂谷作用和岩石圈减薄过程中,被来自上升的软流圈地幔降压部分熔融形成的具有 MORB 特征的熔体强烈改造而形成的,因此显示出更加亏损和难熔的性质^[127]。Rubatto 等^[128]通过对 Lanzo 橄榄岩中不同产出的锆石的定年研究认为,Lanzo 地块是一个经历了超高压变质作用的大陆单元,没有与亚得里亚海边缘或邻近的中生代特提斯大陆一起俯冲,Lanzo 岩体的榴辉岩与板块俯冲无关。据 Li 等^[50-51]研究,在阿尔卑斯山脉西部保存最完好的蛇绿岩之一是 Chenaillet 蛇绿岩,该蛇绿岩位于 Montgenèvre 以南的法意边界,未见高压超高压变质作用的影响。看来,不与高压变质作用伴生的蛇绿岩容易鉴别,而与高压变质作用相伴的是否为蛇绿岩很难确定。当然,不排除有些蛇绿岩可能经历过超高压变质作用,问题是蛇绿岩如果经历了超高压变质作用的改造,许多迹象可能被抹平了,鉴别起来特别困难。鉴于中国的蛇绿岩基本上不与高压变质作用相联系,在目前情况下,暂不把与高压-超高压变质作用有联系的地幔橄榄岩当作蛇绿岩。

(4)交代地幔。无交代地幔的可能是蛇绿岩,有地幔交代作用且非常发育的可能是造山橄榄岩。这一条标志不是非常肯定。中国蛇绿岩很少有交代地幔的报道(松树沟存在争论不作为实例)。例如,苏犁在云南双沟蛇绿岩橄榄岩的橄榄石中发现了流体包裹体(苏犁面告),虽然数量很少还不足以形成交代地幔。在统计全球数据库资料时发现,大洋中脊是严重缺水的^[129-130]。蛇绿岩有相当一部分是岛弧的,从俯冲带带入的水交代了俯冲带上盘的地幔楔,才引发地幔部分熔融的,因此,从理论上不排除存在地幔交代作用的可能性。造山橄榄岩为什么富水?水来自哪里?研究表明,造山橄榄岩的水有 2 个来源:一是来自地幔深部,是软流圈上升带来的。地球上的水,归根结底来自地幔。笔者统计发现,OIB 环境的含水量是大洋中脊的 10 倍^[130],而造山橄榄岩恰恰处于大陆伸展的裂谷背景,因此,

水的含量比蛇绿岩来源丰富。其次,地幔橄榄岩上升与陆壳接触使陆壳升温把陆壳中的水析出来也是一个可能的来源。造山橄榄岩许多含水矿物(角闪石、金云母、绿泥石)具有陆壳的同位素特征即是证据。

(5)冷侵位和热侵位。冷侵位的是蛇绿岩,热侵位的是造山橄榄岩。蛇绿岩为什么是冷侵位?主要原因是蛇绿岩形成在大洋中脊或弧后盆地、弧前盆地中脊,一经形成,即开始冷却固结,蛇绿岩的橄榄岩是熔出了玄武岩之后留下来的地幔残留物,组成大洋岩石圈。大洋岩石圈相对于软流圈来说是冷的、刚性的、重的。如果大洋板块开始俯冲,大洋中脊需要经过远程运移才能到达俯冲带。板块汇聚、陆陆碰撞或陆弧碰撞时,橄榄岩早已冷却固结,而不是橄榄岩在大洋中脊形成时的 1000℃甚至更高的温度。因此,它只能是冷侵位,与蛇绿岩伴生的蓝片岩也证明它是冷侵位的。而造山橄榄岩不同,它是从陆壳下挤上来的,代表的是减薄的陆壳下的岩石圈地幔(部分熔融物少至无)或软流圈地幔(部分熔融物较多),它是原位的,没有经过远程运输。因此,与造山橄榄岩相伴的变质作用大多为高温的,说明属于热侵位。当然,上述解释较简单,实际的过程可能更加复杂。

(6)岩石和地球化学标志。笔者强调,许多学者青睐的岩石组成和地球化学特征可能并非很好的区别标志^[5]。主要是二者相似之处颇多,虽然它们也有一定的区别,例如,①蛇绿岩的橄榄岩亏损程度更强,以方辉橄榄岩为主,而造山橄榄岩主要是二辉橄榄岩。但是,造山橄榄岩也有强烈亏损的方辉橄榄岩,甚至以方辉橄榄岩为主。②造山橄榄岩的交代作用较普遍,常见含角闪石和金云母的橄榄岩,而蛇绿岩很少有这种含水橄榄岩出现。③与蛇绿岩伴生的堆晶岩和玄武岩广泛发育,而与造山橄榄岩伴生的堆晶岩和玄武岩很少。④闪长岩非常特殊,很少出现在蛇绿岩中,如果有,大多是高镁类型的(如玻安岩);而造山橄榄岩中闪长岩出现的频率甚至高过辉长岩,说明造山橄榄岩含水部分熔融的情况比较普遍。与 MORB 中残留橄榄岩和橄榄石斑晶的橄榄石相比(两者的 $H_2O < 5 \times 10^{-6}$),Lanzo 纯橄岩橄榄石的 H_2O 含量较高($18 \times 10^{-6} \sim 40 \times 10^{-6}$)^[131]。地球化学模拟表明,Lanzo 纯橄岩的橄榄石是由石榴子石辉石岩和橄榄岩地幔源混合的

低程度熔融形成的。⑤造山橄榄岩从岩石学和地球化学上与蛇绿岩的地幔橄榄岩及堆晶岩很难区分,它们都有大致类似的矿物组成和微量元素及Sr-Nd同位素特征^[132-133]。相对来说,蛇绿岩的组成岩石和矿物中,几乎很少有来自陆壳源区的地球化学和同位素痕迹,而造山橄榄岩及其衍生物(橄榄岩部分熔融形成的辉石岩、辉长岩、闪长岩)等陆壳的痕迹是常见的。⑥蛇绿岩的衍生物要么是MORB类型的,要么是岛弧类型的,几乎没有OIB特征的;而与造山橄榄岩伴生的衍生物大多是MORB和OIB类型^[6, 20, 134]。

4 结 论

(1)造山橄榄岩是一类不同于蛇绿岩的地幔岩,代表陆壳下的地幔,在物质组成上与蛇绿岩的橄榄岩接近,但产出的背景不同。这就决定了它们之间的区别主要在构造背景上,如有没有深海沉积、混杂堆积、超高压变质作用、地幔交代作用,或地幔交代作用是否强烈、冷侵位还是热侵位等,而不是在物质组成和地球化学特征上。

(2)造山橄榄岩的形成大体经历了初期的陆壳减薄、裂谷阶段及后期的挤压造山阶段。有些地区只发育了裂谷作用的伸展阶段,构造演化在裂谷后即夭折了,也称为造山橄榄岩(夭折的造山橄榄岩),因为它们代表的是陆壳下的地幔。如红海的Zabargad、西班牙的Ronda、摩洛哥的Beni Bousera、中国义敦地区的许多橄榄岩等。

(3)研究造山橄榄岩的意义主要在于恢复早先的构造背景,蛇绿岩代表2个陆块之间的缝合带,代表消失的海洋。造山橄榄岩没有上述含义,只表示大陆经历过伸展减薄和撕裂的过程。大陆伸展、撕裂甚至可以达到有海洋地壳出现的情况,代表洋壳的雏形,如今天的红海,导致蛇绿岩与造山橄榄岩有时具有某些过渡的特征。蛇绿岩出现在造山带,代表洋盆的残迹;造山橄榄岩也可以出现在造山带,代表曾经减薄、撕裂的陆壳。

后记:地质上有太多的争论,例如本文讨论的许多问题。要紧的是,不必在意有没有争论、哪些见解可靠,哪种见解拥护的人多,哪些是主流见解,而是要依靠实践去检验。例如松树沟橄榄岩、饶拔寨橄榄岩、三台山橄榄岩,它们是不是蛇绿岩?不是看有哪些专家权威认可,而是看提供的证据是否

充分。只有实践,才是检验真理的唯一标准。因此,踏踏实实地收集证据才是最重要的。

与造山橄榄岩相伴的高压超高压变质作用是常见的,有些学者一见到这种情况,就习惯性地认为它来自80 km或150 km深度甚至更深,就立即与大陆深俯冲作用等联系起来。大陆能不能深俯冲?这本身就是一个没有搞明白的、需要研究和论证的问题。因为,大陆比地幔密度低很多,大陆深俯冲的说法与最基本的物理常识是相悖的。陆内俯冲是没有问题的,陆内俯冲主要发生在地壳范围内,很少能够深入地幔的。陆内俯冲时地幔也有变化,但是与陆壳内的变化不同,二者的力学机制也不同。以为陆内变形能够直接传导到地幔只是一种猜想。例如欧洲阿尔卑斯、西班牙、红海的实例,说明超高压变质作用不一定需要达到地幔的深度。80 km、150 km表达的是静水压力,而野外的榴辉岩基本上经历了强烈的挤压和剪切变形作用,不考虑应变应力不合适。

致谢:感谢中国地质科学院地质研究所任纪舜院士、牛宝贵研究员和西北大学陈立辉教授对本文的评论和建议,感谢审稿专家对本文的评审及建议。

参考文献

- [1]张旗,张魁武,李达周.横断山区基性-超基性岩的类型[J].岩石学报,1987,(3): 46-53.
- [2]张旗,李达周,张魁武,等.义敦型镁铁-超镁铁岩的主要特征及其与蛇绿岩的对比[J].岩石学报,1990,6(3): 33-42.
- [3]张旗,张魁武,李达周.横断山区镁铁-超镁铁岩[M].北京:科学出版社,1992.
- [4]张旗,周德进,赵大升,等.滇西古特提斯造山带的威尔逊旋回:岩浆活动记录和深部过程讨论[J].岩石学报,1996,12(1): 17-28
- [5]张旗.镁铁-超镁铁岩的分类及其构造意义[J].地质科学,2014,49(3): 982-1017
- [6]张旗,周国庆.中国蛇绿岩[M].北京:科学出版社,2001: 1-182.
- [7]Nicolas A, Jackson E D. Repartition en deux provinces des peridotites des chaînes alpines longeant la Méditerranée: implications géotectoniques[J]. Schweiz. Petrogr. Mitt., 1972, 52: 479-495.
- [8]Menzies M A. Chemical and isotopic heterogeneities in orogenic and ophiolitic peridotites [C]//Ophiolites and Oceanic Lithosphere. Blackwell Sci., Pnbl., Oxford, London, 1984: 231-240.
- [9]Lorand J P, Schmidt G, Palme H, et al. Highly siderophile element geochemistry of the Earth's mantle: new data for the Lanzo (Italy) and Ronda (Spain) orogenic peridotite bodies[J]. Lithos, 2000, 53: 149-164.
- [10]Doblas M, Oyarzun M. "Mantle core complexes" and Neogene extensional detachment tectonics in the western Betic Cordilleras, Spain: an alternative model for the emplacement of the Ronda peridotite[J].

- EPSL,1989,93: 76–84.
- [11] Den Tex E. 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 P J Wyllie[J]. *Tectonophy*, 1969, 7: 457–488.
- [12] Ernst W G. Petrochemical Study of Lherzolitic Rocks from the Western Alps[J]. *Journal of Petrology*, 1978, 19: 341–392.
- [13] Nicolas A. Lherzolites of the western Alps: a structural review [C]// *Kimberlites, II: The Mantle and Crust–mantle relationship*, Elsevier, Amsterdam, 1984: 333–346.
- [14] Trommsdorff V, Hermann J, Muntener O, et al. Geodynamic cycles of subcontinental lithosphere in the Central Alps and the Arami enigma[J]. *Journal of Geodynamics*, 2000, 30: 77–92.
- [15] Bonatti E, Michael P J. Mantle peridotites from continental rifts to ocean basins to subduction zones [J]. *Earth and Planetary Science Letters*, 1989, 91: 297–311.
- [16] Gueddari K, Piboule M, Amosse J. Differentiation of platinum–group elements (PGE) and of gold during partial melting of peridotites in the lherzolitic massifs of the Bético–Rifeño range (Ronda and Beni Bousera) [J]. *Chemical Geology*, 1996, 134: 181–197.
- [17] Snow J E, Schmidt G. Proterozoic melting in the northern peridotite massif, Zabargad island: Os isotopic evidence [J]. *Terra Nova*, 1999, 11: 45–50.
- [18] Boudier F, Nicolas A, Ji S, et al. The gneiss of Zabargad Island—deep crust of a rift [J]. *Tectonophysics*, 1988, 150: 209–227.
- [19] Lorand J P, Bodinier J L, Dupuy C, et al. Abundances and distribution of gold in the orogenic–type spinel peridotites from Arie`ge (Northeastern Pyrenees, France) [J]. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 1989, 53: 3085–3090.
- [20] Muntener O, Piccardo G B, Polino R, et al. Revisiting the Lanzo peridotite (NW–Italy): ‘Asthenospherization’ of ancient mantle lithosphere [J]. *Ophioliti*, 2005, 30: 111–124.
- [21] Bodinier J L, Godard M. Orogenic, ophiolitic, and abyssal peridotites [C]// *Holland H D, Turekian K K. Treatise on Geochemistry*. 2nd ed. Amsterdam: Elsevier, 2014, 103–167.
- [22] Crespo E, Luque F J, Rodas M, et al. Graphite–sulfide deposits in Ronda and Beni Bousera peridotites (Spain and Morocco) and the origin of carbon in mantle–derived rocks [J]. *Gondwana Research*, 2006, 9: 279–290.
- [23] Gonzalez–Jimenez J M, Marchesi C, Griffin W L, et al. Zircon recycling and crystallization during formation of chromite– and Ni–arsenide ores in the subcontinental lithospheric mantle (Serranía de Ronda, Spain) [J]. *Ore Geology Reviews*, 2017, 90: 193–209.
- [24] Tubía J. The Ronda peridotites (Los Reales nappe): An example of the relationship between lithospheric thickening by oblique tectonics and late extensional deformation within the Betic Cordillera (Spain) [J]. *Tectonophysics*, 1994, 238: 381–398.
- [25] Ishiwatari A. Alpine ophiolites: product of low–degree mantle melting in a Mesozoic transcurrent rift zone [J]. *EPSL*, 1985, 76: 93–108.
- [26] Bodinier J L, Menzies M A, Thirlwall M. Continental to oceanic mantle transition—REE and Sr–Nd isotopic geochemistry of the Lanzo lherzolite massif. Orogenic lherzolites and mantle processes [J]. *Journal of Petrology*, 1991, 20: 191–210.
- [27] 苏犁, 宋述光, 周鼎武. 秦岭造山带松树沟纯橄岩体成因: 地球化学和岩浆包裹体的制约 [J]. *中国科学: 地球科学*, 2005, 35(1): 38–47.
- [28] Dong Y P, Zhou M F, Zhang G W, et al. The Grenvillian Songshugou ophiolite in the Qinling Mountains, Central China: Implications for the tectonic evolution of the Qinling orogenic belt [J]. *Journal of Asian Earth Sciences*, 2008, 32: 325–335.
- [29] Nie H, Yang J Z, Zhou G Y, et al. Geochemical and Re–Os isotope constraints on the origin and age of the Songshugou peridotite massif in the Qinling orogen, central China [J]. *Lithos*, 2019, 344/345: 207–216.
- [30] Cao Y, Song S G, Su L, et al. Highly refractory peridotites in Songshugou, Qinling orogen: Insights into partial melting and melt/fluid–rock reactions in forearc mantle [J]. *Lithos*, 2016, 252/253: 234–254.
- [31] Sun S S, Dong Y P, Sun Y L, et al. Re–Os geochronology, O isotopes and mineral geochemistry of the Neoproterozoic Songshugou ultramafic massif in the Qinling Orogenic Belt, China [J]. *Gondwana Research*, 2019, 70: 71–87.
- [32] Tang L, Santosha A, Dong Y P, et al. Early Paleozoic tectonic evolution of the North Qinling orogenic belt: Evidence from geochemistry, phase equilibrium modeling and geochronology of metamorphosed mafic rocks from the Songshugou ophiolite [J]. *Gondwana Research*, 2016, 30: 48–64.
- [33] 李晔, 周汉文, 钟增球, 等. 北秦岭早古生代两期变质作用: 来自松树沟基性岩岩石学及锆石 U–Pb 年代学的记录 [J]. *地球科学*, 2012, 37(增刊): 111–124.
- [34] 刘良, 廖小莹, 张成立, 等. 北秦岭高压–超高压岩石的多期变质时代及其地质意义 [J]. *岩石学报*, 2013, 29(5): 1634–1656.
- [35] Yu H, Zhang H F, Santosh M. Mylonitized peridotites of Songshugou in the Qinling orogen, central China: A fragment of fossil oceanic lithosphere mantle [J]. *Gondwana Research*, 2017, 52: 1–17.
- [36] 张宏福, 于红. 造山带橄榄岩岩石学与构造过程: 以松树沟橄榄岩为例 [J]. *地球科学*, 2019, 44(4): 1057–1066.
- [37] 钱加慧, 杨秀清, 刘良, 等. 北秦岭松树沟榴闪岩锆石 U–Pb 定年、矿物包裹体和 Lu–Hf 同位素特征及其地质意义 [J]. *岩石学报*, 2013, 29(9): 3087–3098.
- [38] 陈丹玲, 任云飞, 宫相宽, 等. 北秦岭松树沟榴辉岩的确定及其地质意义 [J]. *岩石学报*, 2015, 31(7): 1841–1854.
- [39] 郑永飞, 赵子福, 陈伊翔. 大陆俯冲隧道过程: 大陆碰撞过程中的板块界面相互作用 [J]. *科学通报*, 2013, 58: 2233–2239.
- [40] 郑永飞, 陈伊翔, 戴立群, 等. 发展板块构造理论: 从洋壳俯冲带到碰撞造山带 [J]. *中国科学: 地球科学*, 2015, 45: 711–735.
- [41] 郑建平, 熊庆, 赵伊, 等. 俯冲带橄榄岩及其记录的壳幔相互作用 [J]. *中国科学: 地球科学*, 2019, 49: 1037–1058.
- [42] 陈意, 苏斌, 郭顺. 大别–苏鲁造山带橄榄岩: 进展和问题 [J]. *中国科学: 地球科学*, 2015, 45(9): 1245–1269.
- [43] 陈意, 苏斌, 郭顺. 造山带橄榄岩起源和大陆俯冲带壳幔相互作用 [J]. *地球科学*, 2019, 44(12): 4086–4094.
- [44] 陈仁旭, 尹壮壮, 夏春鹏. 大别–苏鲁造山带橄榄岩记录的碰撞造

- 山过程中地幔楔的地壳交代作用[J]. 矿物岩石地球化学通报, 2019, 38(3): 459-484.
- [45] 陈仁旭, 郑永飞. 造山带橄辉岩记录的大陆俯冲带多期壳幔相互作用[J]. 地球科学, 2019, 44(12): 4095-4101.
- [46] Zheng Y F. Metamorphic chemical geodynamics in continental subduction zones[J]. *Chemical Geology*, 2012, 328: 5-48.
- [47] Zheng Y F. Subduction zone geochemistry[J]. *Geoscience Frontiers*, 2019, 10: 1223-1254.
- [48] Beccaluva L, Piccardo G B, Serri G. Petrology of northern Apennine ophiolites and comparison with other Tethyan ophiolites [C]// *Ophiolites. Proc. Inter. Ophi. Symp. Cyprus*, 1980: 314-331.
- [49] Lemoine M, Tricart P, Boillot G. Ultramafic and gabbroic ocean floor of the Ligurian Tethys (Alps, Corsica, Apennines): in search of a genetic model[J]. *Geology*, 1987, 15: 622-625.
- [50] Li X H, Faure M, Lin W, et al. New isotopic constraints on age and magma genesis of an embryonic oceanic crust: the Chenaillet Ophiolite in the Western Alps[J]. *Lithos*, 2013, 160/161: 283-291.
- [51] Li X H, Faure M, Rossi P, et al. Age of Alpine Corsica ophiolites revisited: Insights from in situ zircon U-Pb age and O-Hf isotopes[J]. *Lithos*, 2015, 220/223: 179-190.
- [52] O' Hara M J. Mineral parageneses in ultramafic rocks [C]// *Wyllie P J. Ultramafic and Related Rocks*, New York: Wiley, 1967: 393-403.
- [53] Frey F A, Suen C J, Stockman H W. The Ronda high temperature peridotite: Geochemistry and petrogenesis [J]. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 1985, 49: 2469-2491.
- [54] Bartoli O, Acosta-Vigil A, Tajmanová L, et al. Using nanogranitoids and phase equilibria modeling to unravel anatexis in the crustal footwall of the Ronda peridotites (Betic Cordillera, S Spain) [J]. *Lithos*, 2016, 256/257: 282-299.
- [55] Acosta-Vigil A, Rubatto D, Bartoli O, et al. Age of anatexis in the crustal footwall of the Ronda peridotites, S Spain [J]. *Lithos*, 2014, 210/211: 147-167.
- [56] Su B, Chen Y, Guo S, et al. Origins of orogenic dunites: petrology, geochemistry and implications[J]. *Gondwana Research*, 2016, 29: 41-59.
- [57] Su B, Chen Y, Mao Q, et al. Minor elements in olivine inspect the petrogenesis of orogenic peridotites[J]. *Lithos*, 2019, 344/345: 207-216.
- [58] Weyer S, Munker C, Mezger K. Nb/Ta, Zr/Hf and REE in the depleted mantle: implications for the differentiation history of the crust-mantle system[J]. *EPSL*, 2003, 205: 309-324.
- [59] Mazzucchelli M, Zanetti A, Rivalenti G, et al. Age and geochemistry of mantle peridotites and diorite dykes from the Baldissero body: Insights into the Paleozoic-Mesozoic evolution of the Southern Alps[J]. *Lithos*, 2010, 119: 485-500.
- [60] Gervilla F, Leblanc M. Magmatic ores in high-temperature alpine-type lherzolite massifs (Ronda, Spain, and Beni Bousera, Morocco) [J]. *Econ. Geol.*, 1990, 85: 112-132.
- [61] Beslier M O, Girardeau J, Boillot G. Kinematics of peridotite emplacement during North Atlantic continental rifting, Galicia, northwestern Spain[J]. *Tectonophysics*, 1990, 184: 321-343.
- [62] Imai A, Ozawa K. Tectonic implications of the hydrated garnet peridotites near Mt Kinabalu, Sabah, East Malaysia [J]. *Journal of Southeast Asian Earth Sciences*, 1991, 6: 431-445.
- [63] Morishita T, Arai S, Ishida Y. Occurrence and chemical composition of amphiboles and related minerals in corundum-bearing mafic rock from the Horoman Peridotite Complex, Japan [J]. *Lithos*, 2007, 95: 425-440.
- [64] Leblanc M, Temagoult A. Chromite pods in a lherzolite massif (Collo, Algeria): Evidence of oceanic-type mantle rocks along the West Mediterranean Alpine Belt [J]. *Lithos*, 1989, 23: 153-162.
- [65] Tubia J M, Cuevas J, Ibarra J I G. Sequential development of the metamorphic aureole beneath the Ronda peridotites and its bearing on the tectonic evolution of the Betic Cordillera [J]. *Tectonophysics*, 1997, 279: 227-252.
- [66] Zhang R Y, Liou J G, Yang J S, et al. Petrochemical constraints for dual origin of garnet peridotites from the Dabie-Sulu UHP terrane, eastern-central China [J]. *Journal of Metamorphic Geology*, 2000, 18: 149-166.
- [67] Marchesi C, Garrido C, Bosch D, et al. Mantle refertilization by melts of crustal-derived garnet pyroxenite: Evidence from the Ronda peridotite massif, southern Spain [J]. *EPSL*, 2013, 362: 66-75.
- [68] Hidas K, Booth-Rea G, Garrido C J, et al. Backarc basin inversion and subcontinental mantle emplacement in the crust: kilometre-scale folding and shearing at the base of the proto-Alborán lithospheric mantle (Betic Cordillera, southern Spain) [J]. *J. Geol. Soc.*, 2013, 170: 47-55.
- [69] Tubia J M, Cuevas J, Esteban J J. Localization of deformation and kinematic shift during the hot emplacement of the Ronda peridotites (Betic Cordillera, southern Spain) [J]. *Journal of Structural Geology*, 2013, 50: 148-160.
- [70] Morishita T, Arai S, Gervilla F. High-pressure aluminous mafic rocks from the Ronda peridotite massif, southern Spain: significance of sapphirine- and corundum-bearing mineral assemblages [J]. *Lithos*, 2001, 57: 143-161.
- [71] Bailey E, Holloway J R. Experimental determination of elastic properties of talc to 800°C, 0.5 GPa; calculations of the effect on hydrated peridotite, and implications for cold subduction zones [J]. *EPSL*, 2000, 183: 487-498.
- [72] Liu C Z, Wu F Y, Wilde S A, et al. Anorthitic plagioclase and pargasitic amphibole in mantle peridotites from the Yungbwa ophiolite (southwestern Tibetan Plateau) formed by hydrous melt metasomatism [J]. *Lithos*, 2010, 114: 413-422.
- [73] Wang J X, Zhou H Y, Salters V, et al. Mantle melting variation and refertilization beneath the Dragon Bone amagmatic segment (53° E SWIR): Major and trace element compositions of peridotites at ridge flanks [J]. *Lithos*, 2019, 324/325: 325-339.
- [74] Nozaka T. Metasomatic hydration of the Oeyama forearc peridotites: Tectonic implications [J]. *Lithos*, 2014, 184/187: 346-360.
- [75] Woodland A B, Komprobst J, McPherson E, et al. Metasomatic interactions in the lithospheric mantle: petrologic evidence from the Lherz massif, French Pyrenees [J]. *Chemical Geology*, 1996, 134: 83-112.
- [76] Agrinier P, Mével C, Bosch D, et al. Metasomatic hydrous fluids in

- amphibole peridotites from Zabargad Island (Red Sea) [J]. *EPSL*, 1993, 120: 187–205.
- [77] McPherson E, Thirlwall I M F, Parkinson I J. Geochemistry of metasomatism adjacent to amphibole-bearing veins in the Lherz peridotite massif [J]. *Chemical Geology*, 1996, 134: 135–157.
- [78] Grieco G, Ferrario A, Mathez E A. The effect of metasomatism on the Cr-PGE mineralization in the Finero Complex, Ivrea Zone, Southern Alps [J]. *Ore Geology Reviews*, 2004, 24: 299–314.
- [79] Beccaluva L, Bianchini G, Bonadiman C, et al. Coexisting anorogenic and subduction-related metasomatism in mantle xenoliths from the Betic Cordillera (southern Spain) [J]. *Lithos*, 2004, 75: 67–87.
- [80] Lucassen F, Franz T G, Viramonte J, et al. The late Cretaceous lithospheric mantle beneath the Central Andes: Evidence from phase equilibria and composition of mantle xenoliths [J]. *Lithos*, 2005, 82: 379–406.
- [81] Marocchi M, Hermann J, Morten L. Evidence for multi-stage metasomatism of chlorite-amphibole peridotites (Ulten Zone, Italy): Constraints from trace element compositions of hydrous phases [J]. *Lithos*, 2007, 99: 85–104.
- [82] Frezzotti M L, Ferrando S, Peccerillo A. Chlorine-rich metasomatic H₂O-CO₂ fluids in amphibole-bearing peridotites from Injibara (Lake Tana region, Ethiopian plateau): Nature and evolution of volatiles in the mantle of a region of continental flood basalts [J]. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 2010, 74: 3023–3039.
- [83] Tommasia A, Langone A, Padrón-Navarra J A, et al. Hydrous melts weaken the mantle, crystallization of pargasite and phlogopite does not: Insights from a petrostructural study of the Finero peridotites, southern Alps [J]. *EPSL*, 2017, 477: 59–72.
- [84] Kang H, Jung H. Lattice-preferred orientation of amphibole, chlorite, and olivine found in hydrated mantle peridotites from Bjorkedal, southwestern Norway, and implications for seismic anisotropy [J]. *Tectonophysics*, 2019, 750: 137–152.
- [85] 张旗, 马宝林, 刘若新, 等. 一个消减带之上的大陆岩石圈地幔残片: 安徽饶拔寨超镁铁岩的地球化学特征 [J]. *中国科学(B)*, 1995, 35(8): 867–873.
- [86] 支霞臣, 靳永斌, 孟庆, 等. 大别山北部饶拔寨超镁铁岩体微量元素地球化学 [J]. *岩石学报*, 2004, 20: 463–472.
- [87] Pedrera A, Galindo-Zaldívar J, Acosta-Vigil A, et al. Serpentinization-driven extension in the Ronda mantle slab (Betic Cordillera, S. Spain) [J]. *Gondwana Research*, 2016, 37: 205–215.
- [88] 仇东东. 陕西省松树沟铬铁矿成因与成矿预测研究 [D]. 长安大学硕士学位论文, 2015.
- [89] 芮会超. 北秦岭松树沟超镁铁质岩石及条带状铬铁矿成因研究 [D]. 长安大学硕士学位论文, 2018.
- [90] 鲍佩声, 王希斌. 对大道尔吉铬铁矿成因的新认识 [J]. *矿床地质*, 1998, 8(1): 3–18.
- [91] 王希斌, 郝治国, 鲍佩声, 等. 中国造山带蛇绿岩中铬铁矿床的成因类型及其成矿的若干特征 [J]. *矿床地质*, 1992, 11(1): 21–34.
- [92] 苟国朝, 田培昭, 张新虎, 等. 大道尔吉蛇绿岩型超镁铁岩铬铁矿中铂族元素分布特征 [J]. *西北地质*, 1994, 15(1): 11–18.
- [93] Estebana J J, Sanchez-Rodriguez L, Seward D, et al. The late thermal history of the Ronda area, southern Spain [J]. *Tectonophysics*, 2004, 389: 81–92.
- [94] Reuber I, Michard A, Chalouan A, et al. Structure and emplacement of the Alpine-type peridotites from Beni Bousera, Rif, Morocco: A polyphase tectonic interpretation [J]. *Tectonophysics*, 1982, 82: 231–251.
- [95] Obata M, Karato S I. Ultramafic pseudotachylite from the Balmuccia peridotite, Ivrea-Verbano zone, northern Italy [J]. *Tectonophysics*, 1995, 242: 313–328.
- [96] Kornprobst J, Vielzeuf D. Transcurrent crustal thinning: a mechanism for the uplift of deep continental crust/upper mantle associations [C] // *Limberlites. II*, Elsevier, Amsterdam, 1984: 347–359.
- [97] 张宗清, 张旗. 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 [J]. *岩石学报*, 1995, 11(增刊): 165–177.
- [98] 仇东东, 焦建刚, 姜建超, 等. 北秦岭松树沟铬铁矿床三维地质建模及其找矿意义 [J]. *地球科学与环境学报*, 2014, 36(1): 210–217.
- [99] 李海勇. 大陆俯冲带交代作用: 苏鲁造山带橄榄岩地球化学制约 [D]. 中国科学技术大学博士学位论文, 2017.
- [100] 李森, 朱赖民, 弓虎军, 等. 北秦岭松树沟橄榄岩与铬铁矿床的成因关系 [J]. *岩石学报*, 2010, 26(5): 1487–1502.
- [101] 徐树桐, 江来利, 刘贻灿, 等. 大别山(安徽部分)的构造格局和演化过程 [J]. *地质学报*, 1992, 59(4): 279–285.
- [102] 李曙光, 聂永红, Jagoutz E, 等. 大别山俯冲陆壳的再循环——地球化学证据 [J]. *中国科学(D辑)*, 1997, 27(5): 412–418.
- [103] 吴元保, 陈道公, 程昊, 等. 北大别饶拔寨退变质榴辉岩的地球化学特征 [J]. *地震地质*, 2000, 22(增刊): 99–103.
- [104] 靳永斌, 支霞臣, 孟庆, 等. 大别山北部饶拔寨超镁铁岩体的形成时代: Re-Os 同位素定年 [J]. *科学通报*, 2003, 48: 2560–2565.
- [105] Zhi X C. Re-Os isotopic system and formation age of subcontinental lithosphere mantle [J]. *Chinese Science Bulletin*, 2000, 45: 193–200.
- [106] Zhi X C, Jin Y B, Meng Q, et al. The Re-Os isotope geochemistry of the Raobazhai ultramafic complex of Dabieshan, central China [J]. *Geochim Cosmochim Acta*, 2003, 67(18S): A83.
- [107] 王希斌, 杨经绥, 陈松永, 等. 也谈饶拔寨超镁铁岩体的成因和构造类型的归属问题 [J]. *岩石学报*, 2005, 21: 1593–1608.
- [108] 王希斌. 对“也谈饶拔寨超镁铁岩体的成因和构造类型的归属问题”一文评论的答疑 [J]. *岩石学报*, 2006, 22(12): 3084–3089.
- [109] 张旗. 饶拔寨岩体是蛇绿岩吗?——评王希斌等: “也谈饶拔寨超镁铁岩体的成因和构造类型的归属问题” [J]. *岩石学报*, 2006, 22(12): 3079–3084.
- [110] Zheng L, Zhi X C, Reisberg L. Re-Os systematics of the Raobazhai peridotite massifs from the Dabie orogenic zone, eastern China [J]. *Chemical Geology*, 2009, 268: 1–14.
- [111] 匡少平, 凌文黎, 张本仁. 大别造山带中镁铁质-超镁铁质岩石和榴辉岩有关问题的讨论 [J]. *地质论评*, 1999, 45(6): 584–595.
- [112] 游振东, 桑隆康, 钟增球, 等. 大别山北麓尖晶石橄榄岩中石榴辉石岩包体的成因矿物学信息 [J]. *现代地质*, 2001, 15(2): 161–167.
- [113] 杨锡庸. 安徽大别地区一个超镁铁质冷侵入体: 对霍山县饶拔寨岩体的再认识 [J]. *中国地质科学院南京地质矿产研究所所刊*, 1983, (4): 81–99.

- [114] 钟大赉,等.滇川西部古特提斯造山带[M].北京:科学出版社,2002:1-231.
- [115] 王奕萱,王根厚,袁国礼,等.滇西三台山地幔橄榄岩的成因及其构造意义:来自地质学、矿物学和岩石地球化学的证据[J].地学前缘,2018,25(1):138-156.
- [116] 储著银,王伟,陈福坤,等.云南潞西三台山超镁铁岩体 Os-Nd-Pb-Sr 同位素特征及地质意义[J].岩石学报,2009,25(12):3221-3228.
- [117] 刘慧明.云南三台山超基性岩与盈江超基性岩形成构造环境对比与含矿性研究[D].中国地质大学(北京)硕士学位论文,2018.
- [118] 许志琴,徐惠芬,张建新,等.北祁连走廊南山加里东俯冲杂岩增生地体及其动力学[J].地质学报,1994,68:1-15.
- [119] 张旗,郭原生,王岳明,等.祁连山地区镁铁-超镁铁岩的多样性[J].地球科学进展,1997,12(5):324-330.
- [120] 王二七,张旗,Burchfiel C B.青海拉鸡山:一个多阶段抬升的构造窗[J].地质科学,2000,35:493-500.
- [121] 冯益民,何世平.祁连山大地构造与造山作用[M].北京:地质出版社,1996.
- [122] 师占义.西北几个主要含矿超基性岩体的岩石矿物特征及意义[J].地质论评,1980,26(4):307-318.
- [123] Boullier A M, Firdaous K, Boudier F. Fluid circulation related to deformation in the Zabargad gneisses (Red Sea rift) [J]. Tectonophysics, 1997, 279: 281-302.
- [124] Takla M A, Eldougdoug A A, Hussein A A A, et al. Petrogenesis of Zabargad ultramafic rocks and origin of peridot, Zabargad Island, Red Sea, Egypt[J]. Annals of the Geological Survey of Egypt, 1997, 20: 451-478.
- [125] Marshak S, Bonatti E, Brueckner H, et al. Fracture-zone tectonics at Island, Red Sea (Egypt) [J]. Tectonophysics, 1992, 216: 379-385.
- [126] Pelletier L, Müntener O. High-pressure metamorphism of the Lanzo peridotite and its oceanic cover, and some consequences for the Sesia-Lanzo zone (northwestern Italian Alps) [J]. Lithos, 2006, 90: 111-130.
- [127] Piccardo G B, Zanetti A, Müntener O. Melt/peridotite interaction in the southern Lanzo peridotite: Field, textural and geochemical evidence [J]. Lithos, 2007, 94: 181-209.
- [128] Rubatto D, Gebauer D, Compagnoni R. Dating of eclogite facies zircons: the age of Alpine metamorphism in the Sesia-Lanzo Zone (Western Alps) [J]. EPSL, 1999, 167: 141-158.
- [129] 刘欣雨,张旗,张成立.基于大数据方法建立大洋安山岩构造环境判别图[J].地质通报,2019,38(12):1963-1970.
- [130] 张旗,李明超,陈万峰,等.岩石大地构造学说的兴起、没落与新生[J].大地构造与成矿学,2020,44(2):289-296.
- [131] Sanfilippo A, Tribuzio R, Ottolini L, et al. 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 [J]. Geochimica et Cosmochimica Acta, 2017, 214: 51-72.
- [132] Pognante U, Rösli U, Toscani L. Petrology of ultramafic and mafic rocks from the Lanzo peridotite body (Western Alps) [J]. Lithos, 1985, 18: 201-214.
- [133] Hartmann G, Wedepohl K H. The composition of peridotite tectonites from the Ivrea Complex, northern Italy: Residues from melt extraction [J]. Geochimica et Cosmochimica Acta, 1993, 57: 1761-1782.
- [134] Bodinier J L, Menzies M A, Thirlwall M. Continental to oceanic mantle transition—REE and Sr-Nd isotopic geochemistry of the Lanzo lherzolite massif. Orogenic lherzolites and mantle processes [J]. Journal of Petrology, 1991, 20: 191-210.