

青藏高原北部东昆仑南缘德尔尼蛇绿岩： 一个被肢解了的古特提斯洋壳

杨经绥 王希斌 史仁灯 许志琴 吴才来

(国土资源部大陆动力学重点实验室; 中国地质科学院地质研究所, 北京 100037)

提 要: 青藏高原北部东昆仑德尔尼蛇绿岩由变质橄榄岩、基性超基性堆晶岩、辉绿岩墙群和基性喷出岩组成。变质橄榄岩主要为纯橄岩、方辉橄榄岩、二辉橄榄岩、含长二辉橄榄岩和含石榴石二辉橄榄岩, 岩石中残余尖晶石的 Cr' 值 ($=100 \times Cr / (Cr + Al)$) 为 30~57, Mg' 值 ($=100 \times Mg / (Mg + Fe^{2+})$) 为 50~75, 指示一个富 Al 和 Mg 成分系列。变质橄榄岩有一个相对窄的成分, 其 Mg' 值为 89.1~91.3, Al_2O_3 含量 1%~4%, REE 轻度亏损, 表明其为经历了中、低程度部分熔融的残余地幔物质。含石榴石二辉橄榄岩中的石榴石为钙铁榴石, 富 Ca 和 Fe, 贫 Mg 和 Al (And 95%~97%, Pyr 0.27%~5.06%, Gro 0~2.62%), 为变质成因。堆晶岩包括纯橄岩、异剥橄榄岩、(石榴石)辉石岩和辉长岩。堆晶纯橄岩与层状杂岩伴生, 偶含少量斜长石。异剥橄榄岩由橄榄石、透辉石和少量斜长石组成。层状辉长岩-辉石岩杂岩由透辉石和斜长石组成, 两种矿物交替形成层状堆积层理。石榴石辉石岩或异剥钙榴岩呈团块状产于变质橄榄岩中, 其中的石榴石为钙铝榴石 (Gro 69.19%~89.93%; And 9.12%~18.84%; Br 0.73%~11.63%), 也属变质成因。辉绿岩墙显示 LREE 亏损, $(La/Sm)_N = 0.5 \sim 0.8$, HREE 呈近平坦型分布, Eu 正异常 (δEu 1.2~1.6)。玄武岩的 REE 模式与 MORB 类似, $(La/Sm)_N = 0.5 \sim 0.9$, 显示不同程度的 Eu 负异常。熔岩的成分尤其一致的 REE 模式说明结晶过程中未发生明显的分异作用以及外来成分的混染。熔岩中的锆石 SHRIMP U-Pb 测年获得 $^{206}Pb/^{238}U$ 年龄为 (276~319) Ma, 平均 (308.2 $\pm$ 4.9) Ma, 认为代表蛇绿岩洋壳形成时代。强烈的蛇纹石化和碳酸岩化反映了海底热液蚀变作用并伴随德尔尼块状硫化物矿床的形成。德尔尼蛇绿岩是一个被构造肢解的古洋壳, 可能形成于一个快速扩张的洋脊, 在古特提斯洋盆关闭时侵位, 标志来自冈瓦纳大陆的陆块与原欧亚大陆的缝合带。

关 键 词: 蛇绿岩; 德尔尼; 阿尼玛卿; 东昆仑; 西藏

中图分类号: P588.12^{±5} **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-3657(2004)03-0225-15

东昆仑南缘发育一条近东西走向、断续分布、长约千余千米蛇绿岩带, 即东昆仑南缘蛇绿岩带。带内蛇绿岩以构造岩块产出, 东段蛇绿岩主要出露在阿尼玛卿山一带^[1], 西段在木孜塔格山北坡有零星出露^[2]。根据岩块出露的密集程度, 由东至西, 阿尼玛卿一带的蛇绿岩可分为玛沁、玛积雪山、下大武和布青山 4 段。近年来, 对该蛇绿岩的研究已取得了一些进展, 如, 杨经绥等^[3]通过对阿尼玛卿蛇绿岩的研究, 认为阿尼玛卿蛇绿岩是石炭纪—二叠纪古特提斯洋盆关闭后的残留, 代表冈瓦纳大陆的北界; 边千韬等^[4-6]在阿尼玛卿西段布青山蛇绿混杂岩中发现奥陶纪疑源类化石以及测得该地区花岗—英云闪长岩 (402 $\pm$ 24) Ma 的锆石 U-Pb 年龄, 认为阿尼玛卿带中存在早古生代蛇绿岩; 陈亮等^[7]获得阿尼玛卿东段德尔

尼蛇绿岩玄武岩全岩 Ar-Ar 坪年龄 (345.3 $\pm$ 7.9) Ma。

德尔尼蛇绿岩产于玛沁一带, 以德尔尼山命名, 该蛇绿岩以产出特殊的大型 Cu-Co-Zn 硫化物矿床而著名^[8]。杨经绥等^[9]较早对该蛇绿岩和其中的硫化物矿床开展过对比研究, 认为该矿床为海底热液蚀变成因; 并于 1994 年参加中法合作项目期间对德尔尼蛇绿岩及其硫化物矿床开展了调查, 在玛沁地区发现和建立了德尔尼蛇绿岩剖面^[10]。笔者 1997 年以来对玛沁一带的蛇绿岩和德尔尼矿区地表地质、平洞以及钻孔岩心做了系统调查和研究, 在室内开展了大量的蛇绿岩和矿石样品的测试, 本文报道其中的蛇绿岩岩石学和年代学研究进展, 其余成果将陆续报道。

收稿日期: 2004-05-08; 改回日期: 2004-06-19

基金项目: 国家自然科学基金项目 (49732070); 中国地质调查局地质大调查项目 (200313000058) 和国土资源部科技司项目 (2001010101) 联合资助。

作者简介: 杨经绥, 男, 1950 年生, 博士, 研究员, 博士生导师, 从事构造岩石学研究; E-mail: y7angjsui@ccsd.org.cn。

1 德尔尼蛇绿岩的地质背景

德尔尼蛇绿岩主要出露在青海省果洛藏族自治州玛沁县德尔尼山一带。区内山脉呈 NW—SE 走向,海拔 3 700 m 以上,最高山峰为德尔尼峰,高度 4 600 余米。根据区域地质特征,区内分为 3 个构造单元,北为(东)昆仑地块、南为巴颜喀拉—松潘甘孜地块,中间为北西—南东走向的阿尼玛卿俯冲杂岩带。该杂岩带西起花石峡以西的布青山,东至玛沁县城以东,南北均以断裂分界(图 1)。

德尔尼地区出露的区域地层包括上元古界、古生界、中生界和新生界(图 1)。新元古界主要出露于德尔尼蛇绿岩的北侧,包括两个岩性段,分别以夹大理岩之片岩及大理岩为主。前者为斜长角闪片岩类夹薄层—中厚层条带状透闪石化大理岩;后者主要为灰白色块状中细粒大理岩,主要分布在区域之西北部,总厚度 670 m 左右。这套地层为浅海沉积。根据该地层中的斜长角闪片岩的 Sm—Nd 等时线年龄($1\,098 \pm 14$) Ma,认为属新元古代^[1]。

本研究对该组斜长角闪岩中的锆石(样品取自德尔尼河附近),运用单颗粒锆石法测得的同位素年龄为(417.1 ± 3.3) Ma,认为代表角闪岩相的变质年龄。在德尔尼铜矿以西 30 km 的小平梁采得构造混杂在纯橄岩中的云母片岩样品,其白云母 $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$ 等时线年龄为(422.7 ± 11.2) Ma,与其坪年龄(419.1 ± 0.60) Ma 非常接近,说明云母片岩的变质年龄为加里东末期,与边千韬等^[2]报道的西段布青山花岗—英云闪长岩(402 ± 24) Ma 的锆石 U—Pb 年龄可以对比。

晚古生代,该区主要是一套浅海相—半深海相沉积的生物碎屑灰岩和砂板岩沉积^[3],包括上石炭统的灰岩和下二叠统的灰岩和砂板岩。德尔尼蛇绿岩呈构造岩块侵位于其中。上石炭统的灰岩与周围地层均为断层接触,呈窄条状,走向近东西,长 13 000 m,厚约 1 100 m,岩性为以灰色厚层生物灰岩为主的一套浅海相沉积。下二叠统的灰岩和砂板岩与周围地层呈局部角度不整合接触,厚约 400 m,为一套半深海相沉积。王永标等^[4]报道从早二叠世的沉积中分出深水相深海软泥和放射虫硅质岩沉积,并且认为不受陆源物质的影响,说明洋盆在该时期规模仍然很大。

三叠纪地层是厚度很大的复理石建造,记录了海进和海退的相互交替,尤其表现在下三叠统的一套砂板岩中^[5]。到侏罗纪德尔尼地区已转向接受陆相湖泊盆地沉积,呈 NE—SW 向展布,部分角度不整合于德—恰花岗杂岩之上(该杂岩特点见下文),厚约 700 m。到白垩纪德尔尼地区已完全演化为陆地,接受的是一套干旱条件下的山间盆地沉积物,主要出露在大武滩西南一带,岩石组合为砂砾岩—细砂岩—含砾粗砂岩—含长石岩屑砂岩—泥岩等,厚约 2 000 m。

德—恰花岗杂岩体分布在蛇绿岩的北侧,呈窄条状,延长约 16 000 m,宽 100~2 200 m,其北侧东段被中下侏罗统砂砾岩层、西段被新近系上新统沉积岩层不整合覆盖,南侧侵

入到新元古界的斜长角闪片岩和大理岩中,杂岩体的部分岩脉侵入到赋存矿体的碳酸盐蛇纹石化超镁铁岩体中^[3]。杂岩体的岩石类型以花岗岩、花岗闪长岩、石英闪长岩及正长岩类为主,野外观察和室内鉴定花岗杂岩体未发生变质变形。本研究测得单颗粒锆石 U—Pb 法同位素年龄为(250 ± 20) Ma。石英闪长岩、二长花岗岩脉和钾长花岗岩脉均投于代表火山岛弧环境的 VAG 区域,说明德尔尼铜矿区的花岗质岩石形成于大陆边缘的岛弧环境。

2 德尔尼蛇绿岩的产出特征

德尔尼蛇绿岩属阿尼玛卿蛇绿岩带的东段,呈 NW—SE 向展布,与其西北方向的玛积雪山、下大武、布青山蛇绿岩断续相连,构成长约 300 km 的阿尼玛卿蛇绿岩带(图 1)^[6],代表阿尼玛卿缝合带的重要标志^[1,14]。德尔尼蛇绿岩东西长约 80 km,宽 10~20 km,蛇绿岩出露于地层时代尚有争论的下二叠统(或下三叠统)砂板岩与新元古代片岩和大理岩之间。在蛇绿岩北侧与元古宇之间发育一条宽几十米至百余米的以动力变质为特征的糜棱—混杂岩带,呈 NW—SE 向狭长带状平行分布,与区域构造线方向一致。

德尔尼蛇绿岩由变质橄榄岩、堆晶岩、岩墙群和玄武岩等组成。其中以变质橄榄岩为主,而作为洋壳组成部分的堆晶岩、辉绿岩岩墙群和玄武岩等则出露零星,规模不大,而且它们的原始层序已被构造破坏,均以构造岩块(或岩片)的形式产出,类似其他造山带中常见的蛇绿混杂岩(图 2—A,2—B)。

变质橄榄岩由 3 个较大的岩体群组成,其中以德尔尼岩体最大,长约 17 km,宽 200~800 m、面积 8~9 km²。岩体北界新元古代地层和糜棱岩带向南逆冲推覆(图 2—A);德尔尼主岩体构造侵位于新元古代片岩、大理岩与下二叠统砂板岩之间,呈 NW—SE 向展布,与区域构造线方向一致,倾向 NE、倾角较陡。该岩体主要由蛇纹石化和碳酸盐化方辉橄榄岩、纯橄岩和二辉橄榄岩组成,德尔尼大型块状硫化物矿床即赋存于该岩体内(图 2—C)。在 I 号矿体的上覆超镁铁岩盖层的底部,有一层厚约几米的超镁铁质构造角砾岩,类似的超镁铁角砾岩在岩体边缘多处见到,其岩相学特征和化学成分与主岩体一致,认为系超镁铁岩在海底侵位时所产生^[10],同时认为王玉往等^[9]提出的德尔尼蛇绿岩橄榄岩为海底喷出的“超基性角砾集块岩”的看法值得商榷。

堆晶杂岩在本区分布十分零星,呈岩块混杂于橄榄岩体内,规模普遍较小(数米至数十米),最大一块出露宽度约 100 余米。该套堆晶杂岩主要由辉长岩和辉石岩组成,发育典型的堆积构造(图 2—E),并被较晚的由岩浆分异形成的纯橄岩穿插。该套堆晶杂岩按矿物岩石组合属王希斌等(1996)划分的 DPG 类型,即纯橄岩(Dunite)—辉石岩(Pyroxenite)—辉长岩(Gabbro)组合的缩写。这是一种造山带蛇绿岩中十分常见的堆晶岩类型之一。此外,在矿区南侧观察到少量橄长

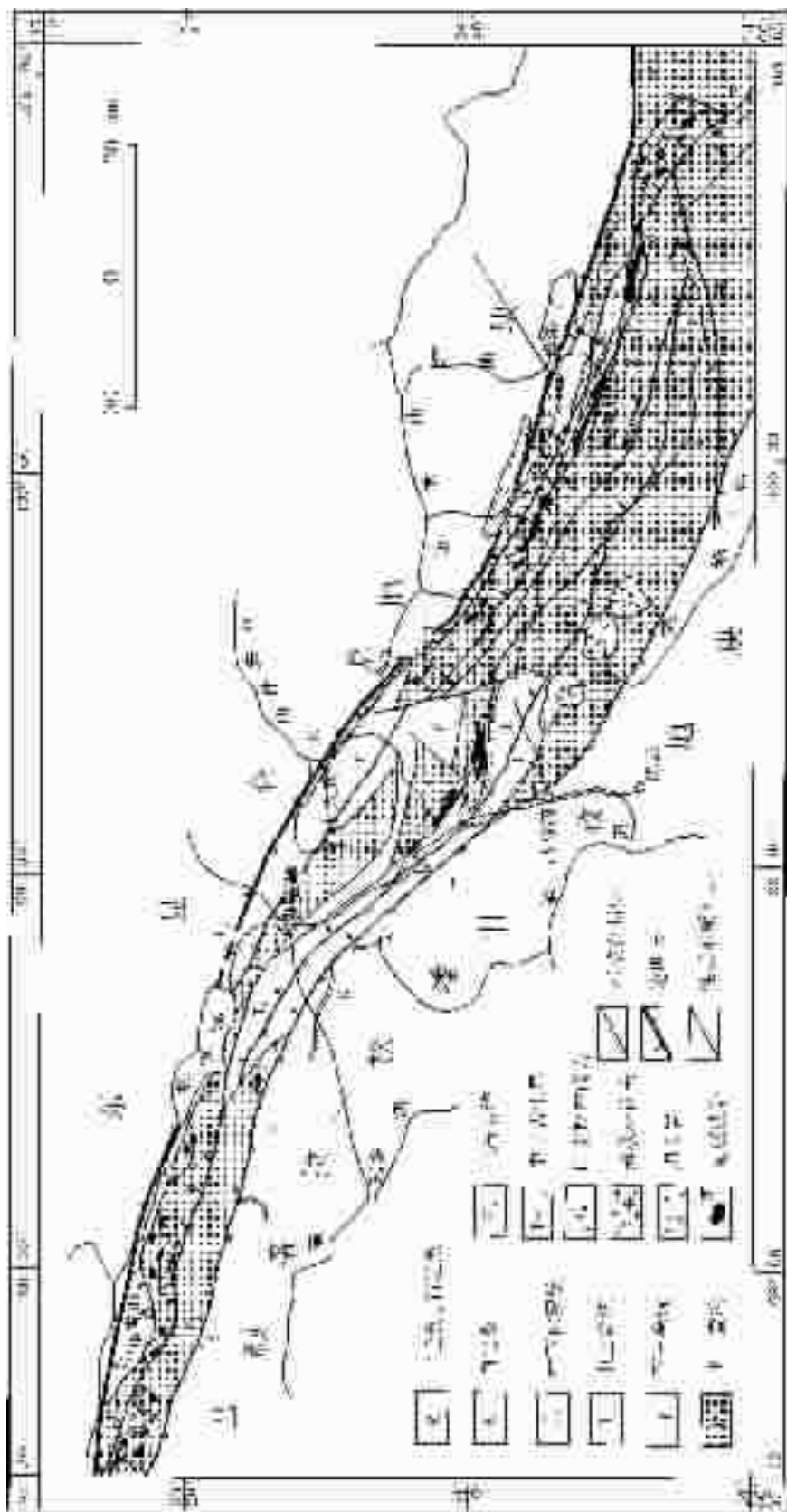


图 1 德尔尼蛇绿岩的分布和区域地质简图 (据青海省地质局, 1991 修改)^[1]
Fig 1 Geological sketch map of the Dur'ngoi ophiolite (modified after Geological Bureau of Qinghai Province, 1991)^[1]



图 2 德尔尼蛇绿岩不同岩石单元野外产出特征

A—元古宙地层由北向南推覆在德尔尼蛇绿岩上;B—蛇绿岩的南部可见早二叠世的板岩呈构造岩块产出;
C—德尔尼变质橄榄岩中的 1 号硫化物矿体;D—变质橄榄岩中辉长岩块体;E—由辉石岩条带和辉长岩
条带组成的堆晶岩;F—席状岩墙群,单个岩墙厚度数十厘米,可见其冷凝边。Pt—元古宙片麻岩;
Serp—蛇纹岩;P₁—早二叠世片岩;Ore—硫化物矿体;Gab—辉长岩块;Py—辉石岩;Dk—席状岩墙群

Fig. 2 Occurrences of the Dur'ngoi ophiolite

A—Proterozoic strata are overthrust from N to S over the ophiolite;B—Early Permian slate occurs as tectonic blocks in the southern part of the ophiolite;C—Dur'ngoi sulfide ore body in meta-peridotite;D—Gabbro blocks in meta-peridotite;E—Cumulate layers consisting of pyroxenite bands and gabbro bands;F—Sheeted dikes, each of which is a few dozens cm thick, chilled-margin can be seen;Pt—Proterozoic gneisses;Serp—serpentinite;P₁—Early Permian Schist;Ore—massive sulfide ore body;Gab—gabbro block;Py—pyroxenite;Dk—sheeted dikes

岩转石,也属堆晶岩类。

岩墙群为本研究首次发现,呈岩块产出在玛沁以南公路出露的早二叠世砂板岩地层中,地表出露宽度约 40 m,部分被覆盖,推测总出露宽度可达 100 余米。该岩块由多条平行的岩墙组成,单个岩墙宽 20~50 cm,具冷凝边构造,产状近直立(图 2—F)。其他产出的辉绿岩岩墙通常与辉长岩伴生,附近还常见有熔岩。

玄武岩熔岩呈岩块产于橄榄岩岩体或早二叠世砂板岩地层中,规模不大,通常小于 100 m,但在钻孔 ZK1303 岩心中,见到熔岩厚度达 200 m 以上,均呈块状熔岩流(Massive/Sheet Flow)产出,未见枕状熔岩(Pillow Lava)。岩石已受到绿片岩相变质作用。在蛇绿岩北侧的元古宙地层中发现另一套玄武岩熔岩和辉绿岩类夹于大理岩中,并受到角闪岩相变质作用,认为不同于本蛇绿岩套组合,属早期的构造事件的产

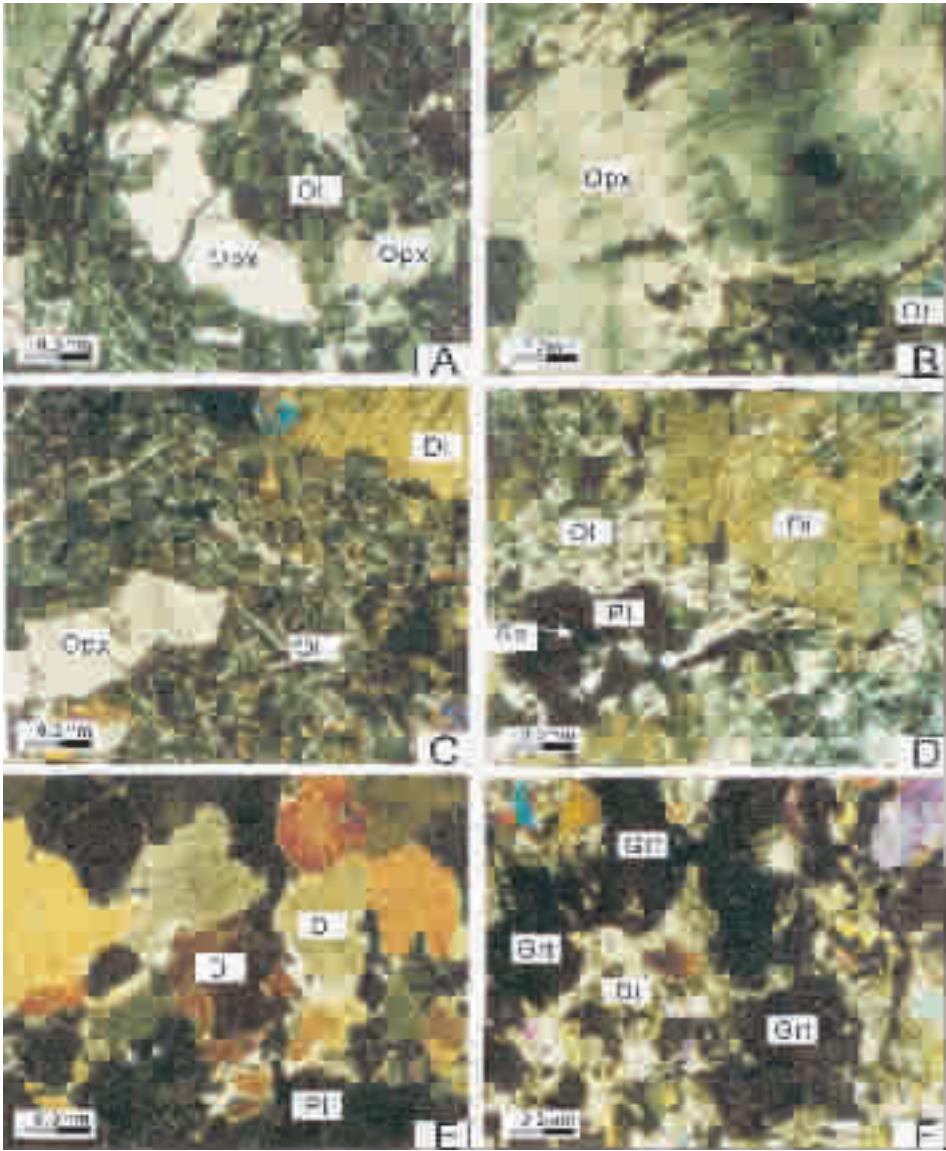


图 3 德尔尼蛇绿岩的不同岩石单元的显微镜下结构和矿物特征

A—方辉橄榄岩中斜方辉石(Opx,已蚀变成绢石)的熔融残余结构,Ol(橄榄石,已蚀变成蛇纹石);B—Opx(绢石)中的单斜辉石出溶条纹(已蚀变),并可见晶体弯曲变形;C—二辉橄榄岩由 Ol(已蛇纹石化)、OPX(绢石)和 Di(透辉石)以及少量 Sp(尖晶石)组成;D—异剥橄榄岩主要由 Ol 和 Di 组成,偶含少量斜长石(Pl);E—辉长岩—辉石岩堆积层由不同比例 Di 和 Pl 组成;F—异剥钙榴岩(Rodingite)中,Di(多已蚀变成绿泥石)和石榴石(Grt)为主要矿物

Fig. 3 Photomicrographs of rocks in the Dur'ngoi ophiolite

A—Relict melt structure of Opx in harzburgite (Opx altered to bastite);B—Cpx exsolution lamellae exsolved from Opx (bastite), and crystal was bended;C—Lherzolite consists of Ol, Opx, Cpx and few Sp; D—Wehrlite consists of Ol and Di, with occasional plagioclase; E—Cumulate layers formed by Di and Pl in different percentages; F—Rodingite consists of Di and Grt

物,本文不予进一步讨论。

3 德尔尼蛇绿岩岩相学特征

3.1 变质橄榄岩

本区变质橄榄岩主要由方辉橄榄岩组成, 纯橄岩和二辉橄榄岩较少,岩相特征分述如下:

纯橄岩:研究区纯橄岩有两种类型:属变质橄榄岩范畴的纯橄岩和与层状辉长岩伴生的属堆晶岩范畴的纯橄岩(即岩浆成因的纯橄岩)。前者与方辉橄榄岩密切伴生,但其数量规模不等,例如在一些剖面及 ZK1303 孔中的岩心厚达百米以上。主要由单一的橄榄石组成,但通常含有少量(3%~6%)斜方辉石(已蚀变为绢石),与方辉橄榄岩呈过渡关系。纯橄岩均

已蛇纹石化,但其原岩粒状结构仍可辩认,并含少量蚀变程度不等的铬尖晶石,蚀变轻者为褐色半透明,强者为含 Mn 和 Zn 的磁铁矿或铬铁矿。

方辉橄榄岩:由橄榄石(Ol)+斜方辉石(Opx)和少量副矿物铬尖晶石(Sp)组成。与纯橄岩类似,岩石已强烈蛇纹石化,但原岩的结构尚被保留。根据橄榄石和斜方辉石的假象和结构,认为其原岩由 75%~90% Ol 和 10%~25% Opx 以及少量(<1%)Sp 组成。橄榄石未见残晶保存,多显网环结构,颗粒较均匀。斜方辉石被蛇纹石取代但保留其假象(绢石),颗粒大小不一。镜下发现具成因意义的斜方辉石熔融残余结构(图 3— a),并且常见斜方辉石(绢石)晶体中出现单斜辉石出溶条纹,以及晶体弯曲变形(图 3— b)。尖晶石含量低,通常<1%,颗粒较细、呈他形和后成合晶分布于造岩矿物颗粒之间,但往往边缘蚀变为磁铁矿而不透明,仅中心部分尚能保留新鲜部分,显示褐色、茶色或半透明。此外,岩石中有大量金属硫化物,是赋存硫化物矿体的主要岩石类型。

二辉橄榄岩:根据矿物成分,可进一步分为 3 种类型。

(1)尖晶石二辉橄榄岩:即普通的二辉橄榄岩,由 Ol(蛇纹石化)、Opx(绢石)和 Cpx 以及少量 Sp 组成(图 3— c)。该类二辉橄榄岩不含石榴石(Grt)及斜长石(Pl),斜方辉石形成绢石假象后,往往又被碳酸盐交代。单斜辉石(Cpx)较新鲜,含量可达 5%~10%,分布均匀,颗粒较细,为透辉石。尖晶石(Sp)呈他形或后成合晶(与斜方辉石组成连晶)多蚀变成不透明,少数新鲜颗粒呈茶色,显示其富 Al 的成分特点。

(2)含长二辉橄榄岩:含少量 Pl,其他矿物有 Ol、Opx、Cpx 和 Sp,橄榄石和斜方辉石均已蛇纹石化。具不等粒粒状结构,由斜方辉石蚀变的绢石颗粒大小悬殊,形态各异,显示典型熔融残余结构。单斜辉石含量可达 10%,与斜方辉石相比,颗粒较细,蚀变较弱。斜长石已全部绿泥石化,显微镜下见到被斜绿泥石集合体交代。个别新鲜或蚀变较弱的颗粒经电子探针分析为拉长石(An50)。

(3)含石榴石二辉橄榄岩:石榴石(Grt)颗粒粗大,粒径可达 1~1.5 mm、含量可达 5%~6%,其他矿物有 Ol、Opx、Cpx 和少量 Sp。显微镜下仅见 Cpx 和 Grt 及 Sp 保留新鲜颗粒,而 Ol 和 Opx 均已蛇纹石化,未见残晶保留;其原来的结构仍可辩认,呈不等粒的残斑结构。具 Opx 假象的绢石含量可达 20%,并且其原来典型的熔融残余结构仍被保留,颗粒大小不一。单斜辉石的残晶保留较多,含量可达 8%~10%,呈不规则形态,一些已蚀变为角闪石和绿泥石等。石榴石成分属钙铁石榴石,推测为斜长石变质而成。尖晶石呈他形、半透明—不透明,局部呈定向排列,往往与绿泥石伴生在一起。

3.2 堆晶杂岩

本区堆晶杂岩包括纯橄岩、异剥橄榄岩、辉石岩和辉长岩,它们都以含 Cpx 或 Pl 为特征,显示清晰的层状堆积构造。一些纯橄岩呈脉状体穿插堆晶杂岩,该类纯橄岩归属堆晶纯橄岩类。另有少量的含长橄榄岩。

堆晶纯橄岩与残余地幔纯橄岩的区别是前者与一套层状杂岩伴生并偶含少量 Pl。纯橄岩已强烈蛇纹石化,显示网环结构,为原岩粒状结构的继承。斜长石已绿泥石化,多已不显光性,并常与 Sp 共生。

异剥橄榄岩(单辉橄榄岩):由 Ol 和透辉石(Di)组成,偶含少量 Pl(图 3— d),通常显示不太明显的层状堆积构造。橄榄石已蛇纹石化,未见残晶保留,单斜辉石(Cpx)部分蚀变成白色土状物和绿泥石(Chl)集合体,该类岩石可随着辉石的增加而过渡到辉石岩。

层状辉长岩—辉石岩杂岩是一套由 Di 和 Pl 组成的杂岩,这两种浅色和暗色矿物以不同比例形成交替的层状堆积构造(图 3— e),当暗色矿物为主时为透辉岩,以浅色矿物为主或各半则形成辉长岩或中间的过渡类型。单斜辉石相对斜长石蚀变较轻,具半自形—他形、中粗粒结构,有些蚀变成角闪石;斜长石多被绿泥石、黝帘石和透闪石等交代,未见残晶保留。层状辉长岩以含副矿物磷灰石为特征,含少量 Sp,很少含硫化物矿物。块状辉长岩以缺乏层状构造而区别于层状辉

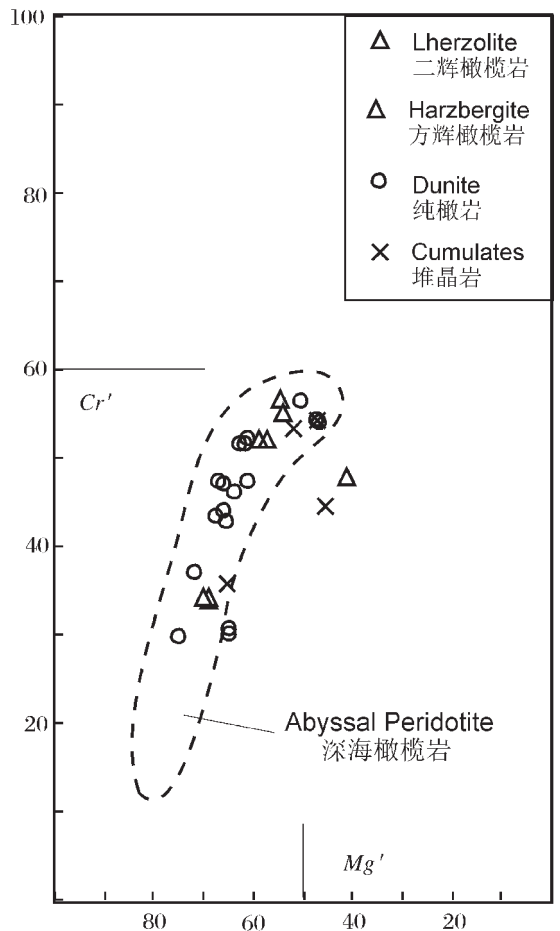


图 4 德尔尼蛇绿岩变质橄榄岩和堆晶岩中尖晶石 Cr'—Mg' 图解

Fig. 4 Cr'—Mg' diagram of spinels from meta-peridotite and cumulates in the Dur' ngoi ophiolite

表 1 德尔尼蛇绿岩的岩石化学成分

Table1 Chemical compositions of the rocks in the Durn’goi ophiolite

样品编号	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24	25	26	27	28	29
SiO ₂ /10 ²	37.81	38.48	38.15	39.06	40.41	40.41	38.48	36.83	38.36	39.24	42.7	40.33	41.72	35.93	40.86	51.97	49.91	47.61	48.68	51.03	50.76	47.67	46.7	49.13	46.7	49.13	53	49.25	48.19
TiO ₂	0.022	0.02	0.11	0.009	0.099	0.071	0.11	0.19	0.37	0.46	0.35	0.23	0.46	0.52	0.13	1.41	1.28	1.22	1.87	1.39	1.41	1.36	1.57	0.89	1.32	1.31	1.01	1.02	1.02
Al ₂ O ₃	1.09	1.41	3.93	3.37	2.12	2.82	2	9.8	8.61	13.85	13.87	17.6	15.66	17.47	16.91	13.53	15.28	13.34	14.64	14.10	15.69	15.45	14.38	14.88	15.2	15.28	13.22	14.57	15.66
FeO	0.41	0.37	0.38	0.38	0.37	0.29	0.28	0.5	0.42			0.16			0.29	0.03	0.03	0.03	0.03	0.02									
Fe ₂ O ₃	7.05	8.2	8.32	7.86	7.05	6.49	7.23	6.22	7.99	10.48	10.3	10.97	8.33	9.72	8.77	8.71	2.09	1.97	1.78	2.27	10.56	9.62	10.44	12.14	8.45	10.46	9.68	8.91	9.56
MnO	2.72	2.2	2.38	2.12	2.7	1.66	2.87	3.36	2.02	8.18	6.72	8.3	6.68	7.57	6.41	4.2	6.82	6.92	6.68	9.48	6.46	6.5	7.94	7.66	5.22	6.96	7.44	6.15	6.2
MgO	0.12	0.11	0.11	0.09	0.13	0.19	0.13	0.13	0.13	0.13	0.13	0.13	0.15	0.15	0.16	0.17	0.16	0.21	0.17	0.17	0.17	0.18	0.17	0.18	0.17	0.18	0.17	0.18	0.18
CaO	1.85	0.76	2.06	3.25	4.92	3.5	11.51	12.24	11.66	10.53	20.95	13.29	13.69	12.53	17.47	11.37	9.06	8.89	9.33	8.34	8.33	7.63	7.84	10.22	9.8	10.84	7.78	10.94	11.21
Na ₂ O	0.028	0.027	0.026	0.064	0.051	0.035	0.05	0.077	0.031	0.12	0.13	0.16	0.2	0.091	0.19	0.06	0.08	0.05	0.03	0.05	0.33	4.07	2.93	2.98	2.64	4.25	3.18	2.29	2.29
K ₂ O	0.008	0.006	0.011	0.019	0.008	0.006	0.009	0.005	0.004	0.011	0.012	0.016	0.026	0.012	0.023	0.004	3.85	3.82	4.12	3.40	0.068	0.096	0.14	0.084	0.06	0.077	0.12	0.16	0.11
P ₂ O ₅	<0.1	<0.1	<0.1	<0.1	<0.1	<0.1	<0.1	<0.1	<0.1	<0.1	<0.1	<0.1	<0.1	<0.1	<0.1	<0.1	0.13	0.14	0.11	0.18	0.18	0.17	0.14	0.19	<0.1	0.12	0.13	<0.1	<0.1
NiO	0.15	0.17	0.22	0.17	0.18	0.15	0.17																						
Li ₂ O	13	12.56	11.31	11.1	10.52	11.17	15.2	7.18	8.84	7	4.08	5.21	4.34	4.45	3.34	7.97	2.36	2.08	2.90	2.92	3.9	3.06	3.27	2.88	8.68	2.65	2.03	3.25	2.88
Total	99.4	99.65	99.42	99.36	99.49	100.32	99.31	99.46	100.56	100.2	99.26	100.12	100.08	99.7	99.87	98.38	97.89	98.01	97.53	99.18	100.09	99.6	99.79	100.21	100.33	99.31	100.16	99.85	99.85
Mg	91.27	89.95	89.13	89.38	90.17	91.34	88.43	87.76	85.28	79.25	67.56	70.19	71.42	70.94	70.19	82.92	86.39	86.93	87.78	84.82	55.79	59.87	58.94	52.94	62.81	58.67	60.49	65.52	64.00
La10 ⁶	0.72	0.82	1	0.78	0.36	0.62	2.61	0.51	1.47	2.13	1.11	0.83	11.6	1.4	0.75	2.31	5.37	3.68	2.95	4.32	3.44	3.11	3.52	4.14	2.54	2.9	2.8	3.78	2.06
Cr	4.55	1.69	2.66	1.68	1.05	1.41	4.88	1.22	3.96	6.47	2.52	2.47	19.6	3.2	2.45	4.62	14.13	11.72	7.77	13.76	8.98	7.98	7.82	8.95	5.71	7.73	7.19	8.1	5.42
Pt	0.42	0.14	0.23	0.15	0.11	0.13	0.5	0.11	0.4	0.68	0.26	0.3	2.3	0.36	0.27	0.52	2.79	2.14	1.51	2.57	1.67	1.52	1.53	1.8	1.1	1.38	1.38	1.24	1.05
Nd	1.86	0.74	1.48	0.88	0.71	0.79	2.42	0.86	2.55	4.69	2.04	1.92	6.55	2.68	3.06	2.52	13.57	10.89	6.88	14.26	10.09	9.24	9.07	8.75	7.5	8.43	8.08	7	5.73
Sm	0.36	0.15	0.35	0.25	0.18	0.23	0.54	0.29	0.59	1.16	0.77	0.8	0.9	0.95	1.41	0.58	4.48	4.73	2.23	4.07	3.62	3.38	3.31	3.62	2.94	3.26	3.04	2.5	2.17
Eu	0.067	0.035	0.12	0.074	0.051	0.069	0.11	0.18	0.19	0.54	0.36	0.32	0.39	0.43	0.48	0.18	2.04	1.68	1.32	2.41	1.13	1.1	0.96	0.78	1.19	1.01	0.8	0.75	0.69
Gd	0.42	0.17	0.38	0.32	0.14	0.24	0.45	0.3	0.48	0.86	0.88	0.95	0.99	1.2	0.5	5.37	3.68	2.86	4.94	4.24	3.72	3.75	4.71	3.98	3.92	3.54	2.99	2.47	2.47
Tb	0.086	0.041	0.11	0.068	0.083	0.11	0.13	0.098	0.12	0.22	0.23	0.24	0.18	0.25	0.32	0.11	1.28	0.81	1.11	1.71	0.91	0.89	0.82	1.14	0.81	0.83	0.74	0.62	0.54
Dy	0.31	0.14	0.47	0.52	0.33	0.45	0.58	0.43	0.55	1.08	1.26	1.38	0.85	1.44	1.91	0.57	6.51	5.09	9.55	5.29	4.99	4.76	4.37	4.36	4.57	4.55	4.42	3.42	3.26
Hf	0.068	0.036	0.12	0.12	0.078	0.11	0.13	0.098	0.12	0.19	0.24	0.27	0.16	0.28	0.38	1.12	1.82	1.36	1.48	1.91	1.19	1.16	1.12	1.52	1.01	1.08	1.04	0.77	0.7
Er	0.2	0.11	0.34	0.38	0.22	0.32	0.34	0.26	0.3	0.52	0.66	0.74	0.48	0.78	1.16	0.34	3.35	2.77	2.35	3.02	3.4	3.17	2.86	4.47	2.73	2.82	2.94	2.15	2.07
Tm	0.026	0.018	0.055	0.06	0.041	0.1	0.12	0.093	0.048	0.18	0.2	0.23	0.15	0.25	0.38	0.098	0.61	0.68	0.43	0.64	0.62	0.67	0.61	1.47	0.56	0.48	0.46	0.44	0.48
Yb	0.17	0.12	0.43	0.47	0.23	0.3	0.36	0.26	0.32	0.48	0.55	0.74	0.46	0.79	1.21	0.31	2.93	1.62	3.48	4.04	2.85	2.74	2.61	3.25	2.23	2.48	2.5	1.82	1.73
Lu	0.03	0.027	0.051	0.073	0.045	0.05	0.048	0.044	0.048	0.07	0.09	0.26	0.07	0.12	0.2	0.054	0.29	0.49	0.36	0.63	0.49	0.43	0.45	2.08	0.28	0.42	0.42	0.28	0.29
Nb	0.15	0.05	0.14	0.2	0.12	0.08	0.08	0.07	0.33	0.74	0.38	0.19	1.37	0.07	0.41	0.53	1.69	1.73	1.14	2.03	0.92	0.94	1.05	1.34	0.67	0.67	0.99	0.63	0.58
Rb	0.69	0.66	0.71	1.11	0.3	0.65	1.18	0.26	1.17	1.11	0.83	1.11	1.02	0.7	1.33	0.6	2.29	1.17	0.92	2.2	1.27	1.32	3.77	1.73	1	1	0.65	0.76	2
Sr	5.31	4.44	4.85	8.94	12.8	5.19	29	11.5	5.52	13.3	19.6	81	177	152	122	13.6	123.9	102.8	173.7	126.4	160	96.8	98.8	146	109	132	83.8	84.4	108
Ba	46	50	64	81	85	88	95	128	127	209	158	192	172	191	251	152	18	187	123.3	114	202	172	165	199	269	221	158	168	167
Zr	1.81	1.4	3.44	6.21	3.5	3.91	3.47	2.04	15	14	26	26	18	18	29	19	36.3	54.5	22.1	49.8	73	73	84	91	44.2	73	75.6	53.1	52.7
Ge																													
V	77	96	125	111	101	110	93	126	134	203	212	216	190	265	247	101	247.8	228.9	242.4	301.5	358	339	261	404	202	227	247	228	235
N																													
Y	1.02	0.56	1.76	2.33	1.12	1.57	1.57	1.48	1.48	2.96	3.23	4.24	2.64	4.31	5.65	1.68	30.01	28.63	27.47	45.39	30.18	28.41	26.35	33.67	26.24	25.4	25.87	18.95	17.94
Co	88.7	95.2	106	122	85	104	77	65	80.8	81.3	56.6	78	67.3	61	47	87.4	41.5	41.1	37.9	53.2	36.2	34.8	35.5	34.7	37.9	42.8	36.8	39.2	39.2
Th	0.14	0.15	0.2	0.064	0.068	0.05	0.17	0.1	0.14	0.34	0.11	0.14	0.21	0.17	0.11	0.087	0.56	2.16	0.76	0.2	0.072	0.17	0.31	0.11	0.11	0.11	0.32	0.033	0.19
Sc	4.28	8.45	11.7	9.44	6.58	7.7	5.09	15.9	8.56	12.59	8.59	15.58	16.05	15.4	19.12	7.44	31.05	29.8	30.7	32.9	27.81	31.82	28.47	33.74	21.14	21.44	22.57	20.26	20.93
Hf	0.069	<0.024	<0.1	0.02	0.05	0.063	<0.03	0.14	0.078	0.11	0.09	0.075	0.24	0.2	0.16	0.087	0.41	0.57	1.53	1.78	0.5	0.43	0.46	0.65	0.24	0.3	0.42	0.2	0.24
Ta	0.051	0.031	0.065	0.05	0.042	0.065	0.04	0.05	0.025	0.36	<0.01	0.026	0.036	0.021	0.06	0.03	0.31	0.2	0.4	0.25	0.12	0.21	0.06	0.06	0.15	0.04	0.11	0.022	0.069
U	0.082	<0.01	0.55	0.035	0.07	0.3	0.74	0.025	0.082	0.12	0.15	0.15	0.1	0.11	0.028	0.061	0.084	0.22	0.19	0.11	0.48	0.16	0.23	0.18	0.11	0.11	0.15	0.14	0.11
(La+Ce)/N	0.41	1.26	0.98	1.21	0.69	1.14	1.39	1.09	0.97	0.86	1.15	0.87	1.54	1.14	0.80	1.30	0.99	0.82	0.99	0.82	1.01	1.17	1.20	1.16	1.08	1.01	1.21	0.99	0.98

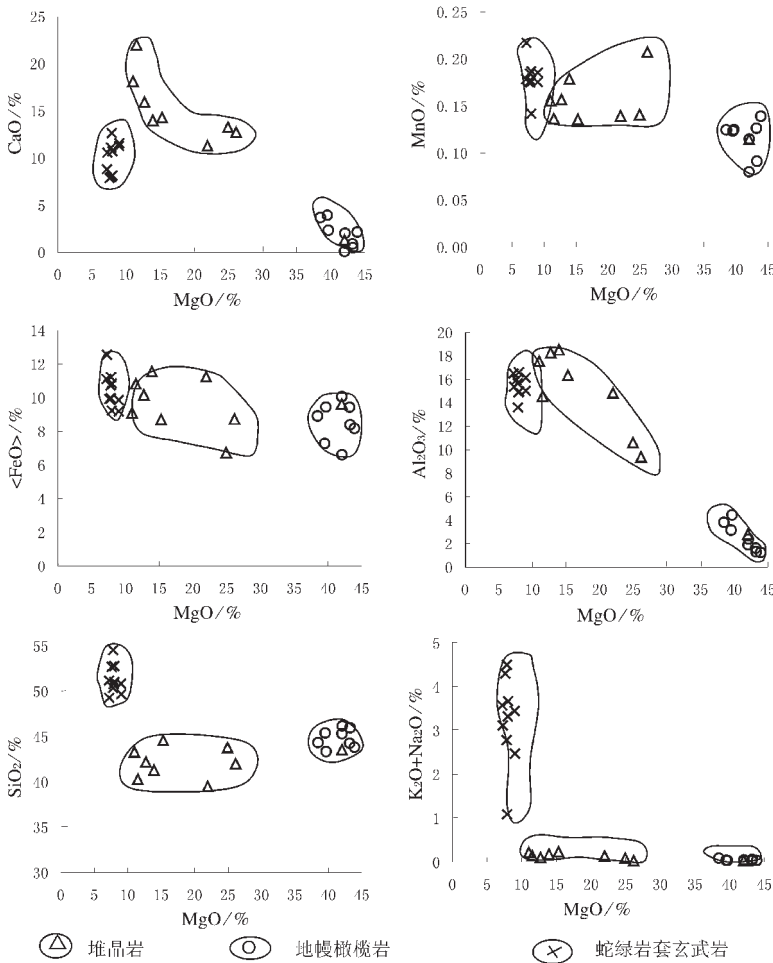


图5 德尔尼蛇绿岩 MgO 与其他主要氧化物变异图解

Fig. 5 MgO vs. other main oxides of the rocks in the Dur'ngoi ophiolite

长岩。辉长岩蚀变较强,斜长石已钠黝帘石化、绿泥石化,单斜辉石大多闪石化,磷灰石很少。

石榴石辉石岩,或异剥钙榴岩(Rodingite),呈团块状产于变质橄榄岩中,由 Cpx、Chl、Grt 及石英等组成(图 3—f)。石榴石和单斜辉石分别组成条带状构造,石榴石为钙铝榴石,呈浑圆状产出,并与 Chl 密切伴生,Cpx 部分已闪石化,分析表明 Cpx 为透辉石—次透辉石,该类岩石推测为层状辉长岩的变质产物。

3.3 辉绿岩和玄武岩

辉绿岩为灰绿色、致密块状,岩石已闪石化、绿泥石化和绿帘石化,未见原生辉石和斜长石的残晶。但其成分与玄武岩一致,属拉斑玄武岩系列^[9]。玄武岩为灰绿色,呈岩块产出,具杏仁状构造,ZK1303 孔中厚达 200 余米。岩石蚀变较强,原生矿物已被次生矿物取代,主要为绿泥石、绿帘石和次闪石等;局部具辉绿结构及似斑状结构,其原岩可能为粒玄岩类。该类玄武岩虽蚀变较强,但其化学成分却十分稳定,为

典型海底拉斑玄武岩(详后)。

4 德尔尼蛇绿岩矿物学特征

由于变质橄榄岩和堆晶岩蚀变强烈,能够测得成分的矿物有单斜辉石、石榴石和副矿物铬尖晶石,以下分别予以探讨。

二辉橄榄岩的 Cpx 属透辉石种属。与堆晶岩中的 Cpx 相比,其成分具如下特征:(1)MgO 含量普遍偏高,变化于 15.53%~17.59%,平均为 16.24%;(2)Cr₂O₃ 含量也较高,主要变化于 1.05%~1.38%,为堆晶岩中 Cpx 的 2~7 倍;(3)Al₂O₃ 含量与堆晶岩中的 Cpx 近似,为 2.97%~4.43%,它们均为含铝透辉石;(4)二辉橄榄岩中的 Cpx 以含较低的全铁 <FeO>(0~3.39%)和 MnO(0~0.17%)而区别于堆晶岩中的 Cpx。堆晶岩中 Cpx 属次透辉石和透辉石种属,MgO 含量为 11.98%~16.10%,平均为 13.80%;Cr₂O₃ 0.12%~0.65%;Al₂O₃ 含量为 1.42%~4.83%;<FeO>含量在 3.9~7.9 之间,MnO 0.07%~0.27%。

一些二辉橄榄岩产有石榴石,以富钙和铁、贫镁和铝为特征,其 CaO 含量为 34.63%~34.90%,FeO 为 25.68%~26.78%,SiO₂ 为 36.28%~36.44%,MgO 和 Al₂O₃ 含量低,普遍 <1%,为钙铁榴石(Andradite)(And 93~94,Pyr 0.24~4.41,Gro 1.09~3.52),认为属变质成因。这类石榴石与源自地幔的石榴石橄榄岩中的石榴石不同,后者均为镁铝榴石^[10]。为了区别后者,故将本区这套含石榴石的岩石称为含石榴石橄榄岩。堆晶岩石榴石辉石岩(或异剥钙榴岩)中的石榴石以富钙和铝、而贫铁和镁为特征,CaO 含量为 32.63%~37.94%,Al₂O₃ 含量变化于 13.47%~19.74%,FeO 2.8%~5.83%,SiO₂ 含量同上述钙铁榴石相近,变化于 37.00%~38.57%,该类石榴石应属钙铝榴石(Grossular)(Gro 81.3~87.5,And 0.9~5.9,Br 0.76~11.6),也属变质成因。根据 Coleman^[17]分类上述两类石榴石均属 C 型。

变质橄榄岩个别样本中偶含少量斜长石,但多已蚀变为绿泥石或叶绿泥石,测得少量残晶矿物成分为拉长石(An₅₄)。

变质橄榄岩中铬尖晶石含量通常小于 1%,颗粒较细,常以他形—半自形为特征。在尖晶石成分的两个主要参数 Cr' (=

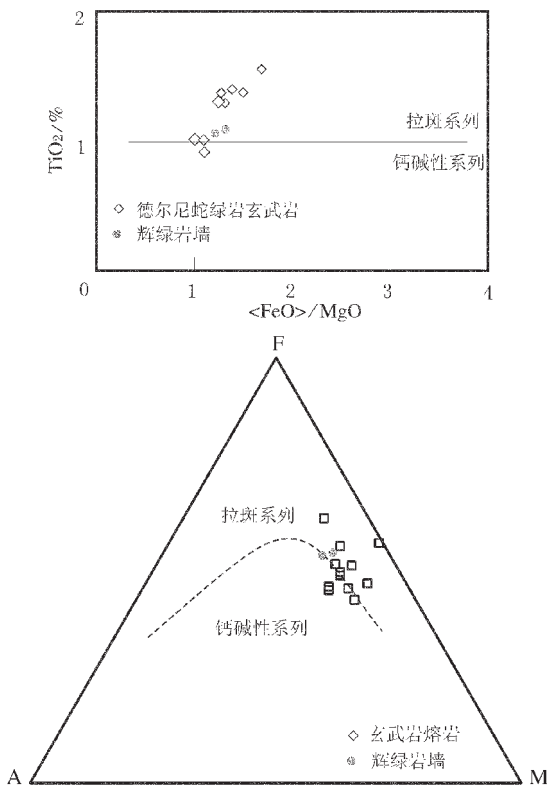


图 6 德尔尼蛇绿岩熔岩和岩墙的(FeO)/MgO - TiO₂ 和 AFM 成分系列判别图

Fig. 6 (A) (FeO)/MgO vs. TiO₂ diagram and AFM diagram of the lavas and dikes in the Dur'ngoi ophiolite; A-(K₂O + Na₂O), F-FeO, M-MgO

100×Cr/(Cr+Al))及 Mg' (=100×Mg/(Mg+Fe²⁺))的变异图上(图 4),本区变质橄榄岩中各亚类岩石(方辉橄榄岩、纯橄岩和二辉橄榄岩)的 Sp 成分均相近,变化区间较窄,以 Cr' < 60 为限,变化于 30~56 之间,Mg' 大多数 > 50,变化于 50~75,属于富 Al 和 Mg 成分系列。这一成分区与大洋变质橄榄岩的 Sp 成分区一致^[18]。变质橄榄岩各亚类岩石的副矿物铬尖晶石成分无明显差别,表明这套变质橄榄岩杂岩可能是在无水条件下单阶段低度熔融的产物^[19-20]。堆晶岩中尖晶石多已强烈蚀变,新鲜颗粒较少。在 Cr' 及 Mg' 的变异图上(图 4),堆晶岩中未蚀变(或蚀变较轻的)尖晶石其成分与变质橄榄岩的尖晶石成分相近,尤其 Cr' 值也均 < 60,变化于 36~54,Mg' 45~65,但其二价氧化物含铁相对略高。

5 德尔尼蛇绿岩地球化学特征

5.1 常量元素

本区变质橄榄岩全岩化学分析结果(表 1 序号 1~6)表明:其成分变化范围较窄,在 MgO 与 SiO₂、(FeO)、CaO、Al₂O₃、MnO、K₂O+Na₂O 等氧化物变异图解中(图 5)都显示

较小的成分变化区间;以富镁为主要特征,Mg' 值较高,变化于 89.13~91.34 之间,Al₂O₃ 含量为 1%~4%,CaO、Al₂O₃ 和碱金属含量普遍较低,富含 Cr、Ni、Co,这种有限成分区的特征表明本区以方辉橄榄岩为主的这套杂岩应属地幔熔融残余^[21]。

堆晶岩(表 1 序号 7~16)的主要氧化物含量显示成分范围远离变质橄榄岩成分区(图 6),其 MgO 含量大大低于变质橄榄岩,为 11%~28%。Al₂O₃ 及 CaO 含量均显示较大的变化范围,前者主要为 9%~18%,后者 11%~21%。此外,它们均贫碱金属元素(Na₂O + K₂O),为 0.03%~0.23%。成分特征表明该套堆晶杂岩组合是由铁镁质岩浆经分离结晶作用形成,并显示较大的分异程度。

辉绿岩岩石化学成分(表 1 序号 17~20)与本区玄武岩成分十分一致。SiO₂ 含量为 48%~52 % 之间,MgO 含量稳定为 7.1%~7.3%,Al₂O₃ 含量为 13.3%~15.3 % 之间,CaO 含量为 8.9%~9.3 %,Na₂O+K₂O 含量为 3.5%~4.1%。各项化学成分显示相当大的稳定性(图 5),在系列判别图上(图 6)与熔岩成分区间十分一致,均属拉斑玄武岩系列。

蛇绿岩的玄武岩(表 1 序号 21~29)的化学成分以其均一稳定为明显特征(尽管其蚀变较强),SiO₂ 含量主要为 47%~53 %,MgO 含量较堆晶岩低,变化于 6.8%~8.7%,但 Na₂O+K₂O 含量则比堆晶岩明显富集,为 2.4%~4.4 %,其他各项成分亦均与堆晶岩不同,而自成一区。这类玄武岩成分应属大洋拉斑玄武岩系列。成分特征表明玄武岩的岩浆极少受到外来成分的混染(其 REE 特征也很稳定),在成岩过程中并未遭受较明显的分异作用。成分说明其母岩浆可能来自一个大洋地幔,但与堆晶岩母岩浆可能不是来自同一源区。根据各种有关图解判别,其形成环境与 MORB 的成分区一致。

5.2 稀土元素

变质橄榄岩的稀土元素分析的样品来自方辉橄榄岩及二辉橄榄岩等岩石,其丰度对原始地幔的标准化曲线见图 7—A。与原始地幔相比,本区变质橄榄岩的稀土元素(REE)丰度略为亏损,不同于蛇绿岩中常见的强亏损型地幔岩^[21],说明本区二辉橄榄岩遭受了较低程度的部分熔融。变质橄榄岩 REE 分布型式为近平坦型,LREE 轻微富集,与原始地幔岩的 REE 丰度接近,说明轻重稀土分馏程度较低。但 REE 分布型式表明其变化与岩石类型无关,而可能是不同程度的地幔交代作用的结果。

堆晶岩类野外产出为辉长岩—辉石岩和异剥橄榄岩组成的层状构造杂岩,彼此过渡并无穿插和侵入的标志,但稀土元素却表现出多样性的分布型式,可明显地分为 3 种类型(图 7—B):即轻稀土元素(LREE)富集型、平坦型、亏损型。富集型分别是均质辉长岩、石榴石层状辉长岩/石榴石辉石岩、异剥橄榄岩和暗色橄长岩。该分布型式显示了轻稀土和重稀土(HREE)之间的强烈分馏,(La/Sm)_N > 1,为 1.5~7.9。部分显示不同程度的正 Eu 异常。其 δEu 由 1.3~1.5。平坦型的 (La/Sm)_N 比值接近 1,为 0.9~1.1,显示了稀土元素极弱的分

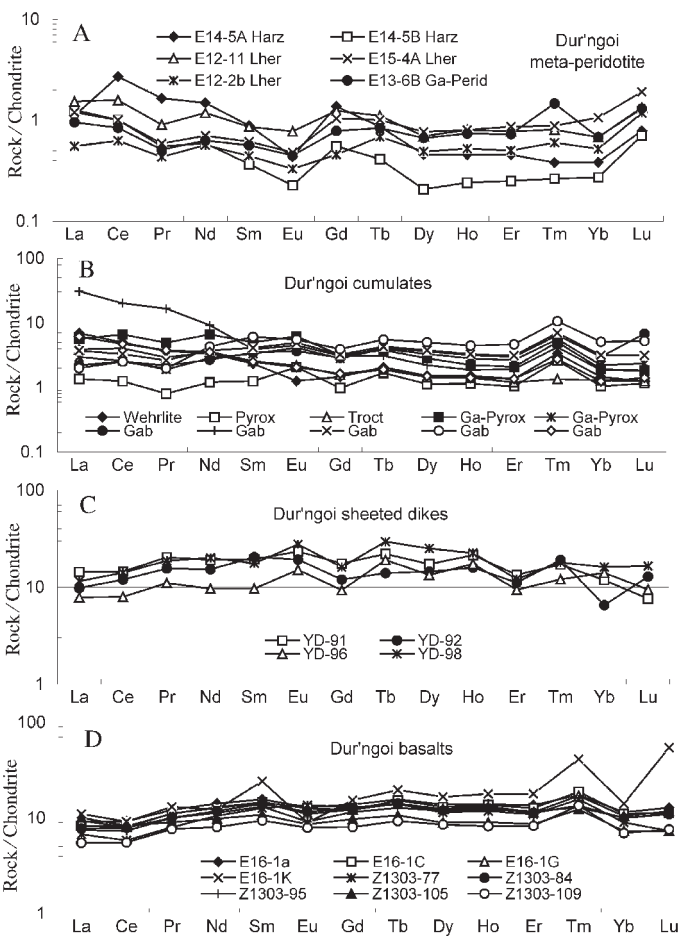


图7 德尔尼蛇绿岩的不同岩石单元稀土元素分配图

A—变质橄榄岩;B—堆晶岩;C—辉绿岩;D—玄武岩

Fig. 7 REE patterns of the meta-peridotites in the Dur'ngoi ophiolite

A—meta-peridotite;B— cumulates;C— sheeted dikes;D— basalts

榴作用,但也显示强烈的正Eu异常,δEu1.35~1.85,说明有斜长石的堆积作用。LREE亏损型分别为层状辉长岩和层状辉石岩—辉长岩杂岩,其(La/Sm)_N为0.33~0.64,并显示弱的正Eu异常。

辉绿岩墙的REE丰度对球粒陨石标准化的分布曲线如图7—C所示。曲线均显示LREE亏损,其(La/Sm)_N变化于0.5~0.8,而HREE呈近平坦型分布。并显示Eu的正异常(δEu1.2~1.6)。

玄武岩的稀土元素特征与其岩石化学成分一样十分稳定。其分布模式见图7—D。玄武岩以(La/Sm)_N<1为特征,变化于0.5~0.9之间,且显示不同程度的负Eu异常,δEu由0.5~1.1,平均0.8。该类玄武岩的稀土元素配分模式与大洋中脊玄武岩(MORB)可以对比。

6 德尔尼蛇绿岩形成的构造环境和时代

6.1 德尔尼蛇绿岩的形成环境的判别

蛇绿岩的形成环境可以根据变质橄榄岩和玄武岩各自的系列地球化学特征加以判别,以下分别予以讨论。

变质橄榄岩:研究和实验表明铬尖晶石成分存在着Cr³⁺—Al³⁺之间广泛的互补区间,变质橄榄岩中铬尖晶石的Cr'值随着地幔部分熔融程度的增高而显示有规律的变化,据此可利用Cr'值作为推断地幔源区熔融程度和结晶压力环境的灵敏指示^[4]。德尔尼变质橄榄岩尖晶石成分的Cr'—Mg'图解显示本区变质橄榄岩的尖晶石成分变化范围与现代深海橄榄岩尖晶石成分基本一致,即其Cr'值多以<60为特征。利用变质橄榄岩中尖晶石的Cr'值与单斜辉石中的TiO₂图解^[4]可以用于判断1.5 Gpa压力范围内变质橄榄岩的熔融程度,得出本区变质橄榄岩的熔融程度主要在10%~15%之间,这表明本区变质橄榄岩为中、低熔融程度的地幔残余物,其形成环境类似于洋中脊下的大洋地幔环境^[23]。

本区变质橄榄岩中的主要元素SiO₂在熔融过程中表现出不相容性,即SiO₂在变质橄榄岩中的含量低于原始地幔

表2 德尔尼蛇绿岩玄武岩熔岩样品(Z1303)中锆石的SHRIMP U—Pb同位素定年

Table 2 SHRIMP U—Pb age of basaltic lava from the Dur'ngoi erni ophiolite

Labels	U/10 ⁻⁶	Th/10 ⁻⁶	Th/U	±	Pb*/10 ⁻⁶	²⁰⁶ Pb/10 ⁻⁹	²⁰⁶ Pb/ ²³⁸ U	±	²⁰⁷ Pb/ ²³⁸ U	±	²⁰⁷ Pb/ ²⁰⁶ Pb	±	²³⁸ U/ ²⁰⁶ Pb	±	²⁰⁶ Pb/ ²³⁸ U年龄/Me	±
Z1303-1.1	29	17	0.57579	0.0126	1	1	0.04846	0.0022	0.34764	0.14306	0.05203	0.021	20.634	0.9297	305	13
Z1303-2.1	14	5	0.35441	0.0132	1	2	0.04897	0.0044	0.16954	0.37607	0.02511	0.055	20.421	1.819	308	27
Z1303-3.1	27	10	0.35378	0.0118	1	0	0.04786	0.0032	0.40429	0.06537	0.06127	0.009	20.895	1.4039	301	20
Z1303-4.1	25	8	0.33134	0.0094	1	5	0.04623	0.004	-0.0597	-0.2422	-0.00937	0.038	21.631	1.8643	291	25
Z1303-5.1	47	25	0.53279	0.0149	3	1	0.05074	0.0024	0.44663	0.09732	0.06384	0.013	19.708	0.921	319	15
Z1303-6.1	14	5	0.36158	0.02	1	1	0.04665	0.0062	0.38659	0.26177	0.0601	0.039	21.436	2.8397	294	38
Z1303-7.1	71	38	0.53027	0.007	4	1	0.05	0.0018	0.36854	0.07422	0.05346	0.01	19.999	0.732	315	11
Z1303-8.1	11	7	0.63526	0.0272	0	3	0.04373	0.0071	-0.3031	-0.505	-0.05026	0.084	22.866	3.7041	276	44
Z1303-9.1	56	20	0.35424	0.007	2	10	0.04839	0.0028	-0.0206	-0.1668	-0.00308	0.025	20.667	1.1915	305	17
Z1303-10.1	52	23	0.4431	0.0119	3	2	0.04953	0.0019	0.38947	0.13422	0.05703	0.019	20.188	0.7711	312	12
Z1303-11.1	79	38	0.47974	0.0103	4	2	0.0482	0.0022	0.27804	0.08752	0.04184	0.013	20.748	0.9443	303	14
Z1303-12.1	1	0	0.03706	0.0133	0	2	0.03117	0.0244	-1.3423	-2.0321	-0.31236	0.437	32.086	25.082	198	154

注:误差1σ;²⁰⁴Pb和Pb*分别代表普通铅和放射成因铅;测年在美国斯坦福大学SHRIMP—RG实验室完成。

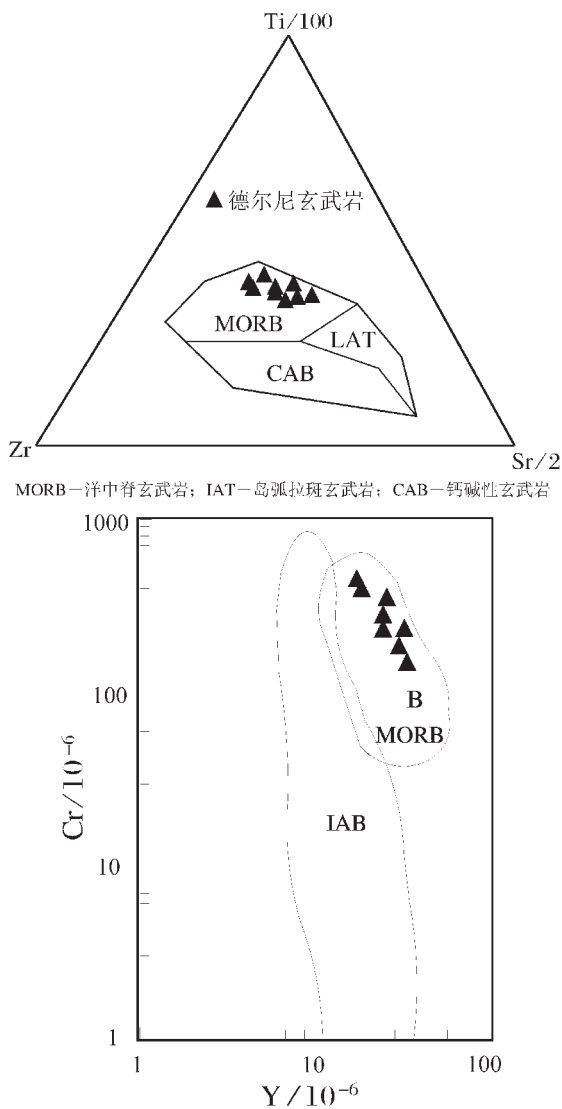


图 8 德尔尼蛇绿岩玄武岩和辉绿岩岩墙的 $\text{TiO}_2\text{--K}_2\text{O--P}_2\text{O}_5$ 和 Cr--Y 形成环境判别图^[24]
Fig. 8 $\text{TiO}_2\text{--K}_2\text{O--P}_2\text{O}_5$ and Cr--Y diagrams of basaltic rocks in the Dur'ngoi ophiolite (1982)^[24]

岩。研究表明 SiO_2 在高压条件下表现为相容元素的特征,在低压条件下表现为不相容元素的特征,即高压条件下形成的变质橄榄岩,其 SiO_2 富集,而在低压条件下形成的变质橄榄岩则亏损 SiO_2 ,由此认为本区变质橄榄岩是在低压条件下形成的,这与变质橄榄岩中尖晶石的判断结果是相一致的。

玄武岩和辉绿岩: 玄武岩作为蛇绿岩的上部层位是部分熔融作用形成的产物,产自地幔源区。通常野外地质特征是判断其形成环境的重要方面,但由于本区玄武岩原始层序解体而呈构造岩块产出,这里只能从其岩石成分和地球化学特征等方面加以讨论。

在常量元素的判别图上,如 $\text{TiO}_2\text{--}10\text{MnO--}10\text{P}_2\text{O}_5$ 、

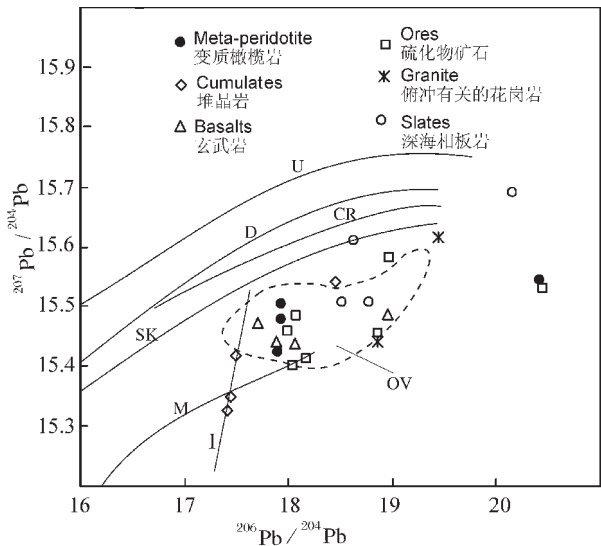


图 9 德尔尼蛇绿岩不同岩石类型的 Pb 同位素演化图解
U—上地壳铅演化曲线;D—单阶段铅演化曲线^[25];CR—开放体系线性增加曲线^[26];SK—两阶段铅演化曲线^[27];M—地幔铅演化曲线^[28];OV—大洋火山岩区间^[28]
Fig. 9 Diagram of Pb isotopes from the Dur'ngoi ophiolite
U—Curve of upper crust Pb evolution; D—Single stage curve of Pb evolution^[25]; CR—Linear growth curve in an open system^[26]; SK—Two stage curve of Pb evolution^[27]; M—Curve of mantle Pb evolution^[28]; OV—Oceanic volcanics^[28]

$\text{TiO}_2\text{--K}_2\text{O--P}_2\text{O}_5$ 三角图以及相关图解上,本区蛇绿岩之玄武岩成分全部或大部落于大洋中脊玄武岩(MORB)区;在稀土元素配分模式图解上也一致显示为大洋中脊玄武岩(MORB)的亏损型配分模式(图 7);同样,在一些微量元素环境判别图解上,如 $\text{Ti}/100\text{--Zr--Sr}/2$ 和 Cr--Y 等,也同样显示与大洋中脊玄武岩(MORB)成分区一致(图 8)。此外,该区玄武岩的 Pb 同位素组成也与洋中脊玄武岩(MORB)一致,如 $^{206}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}\text{--}^{207}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$ 图解(图 9)。由此可以得出结论,本区蛇绿岩玄武岩来自与大洋中脊玄武岩(MORB)类似的构造环境。这与用变质橄榄岩副矿物尖晶石成分判别得出的环境是一致的。

6.2 德尔尼蛇绿岩的形成时代

前人有关德尔尼蛇绿岩的形成时代有两种认识: 根据变质橄榄岩的全岩 Sm-Nd 等时线年龄为 10 亿年左右,认为蛇绿岩形成于中元古代^[1];根据蛇绿岩的围岩时代和下大武基性熔岩全岩 Rb-Sr 等时线年龄为 260 Ma 左右,推断下大武蛇绿岩形成于二叠纪—三叠纪^[1]。最近报道的德尔尼蛇绿岩玄武岩全岩 Ar-Ar 坪年龄为 (345.3 ± 7.9) Ma^[7];此外,在阿尼玛卿蛇绿岩的西段布青山蛇绿混杂岩中发现奥陶纪疑源类化石以及测得该地区花岗—英云闪长岩 (402 ± 24) Ma 的锆石 U-Pb 年龄,认为阿尼玛卿带中存在早古生代蛇绿岩^[4-6]。

显然,用残余变质橄榄岩的年龄作为蛇绿岩的形成时代是不可靠的,因为变质橄榄岩形成时代完全可以大大早于

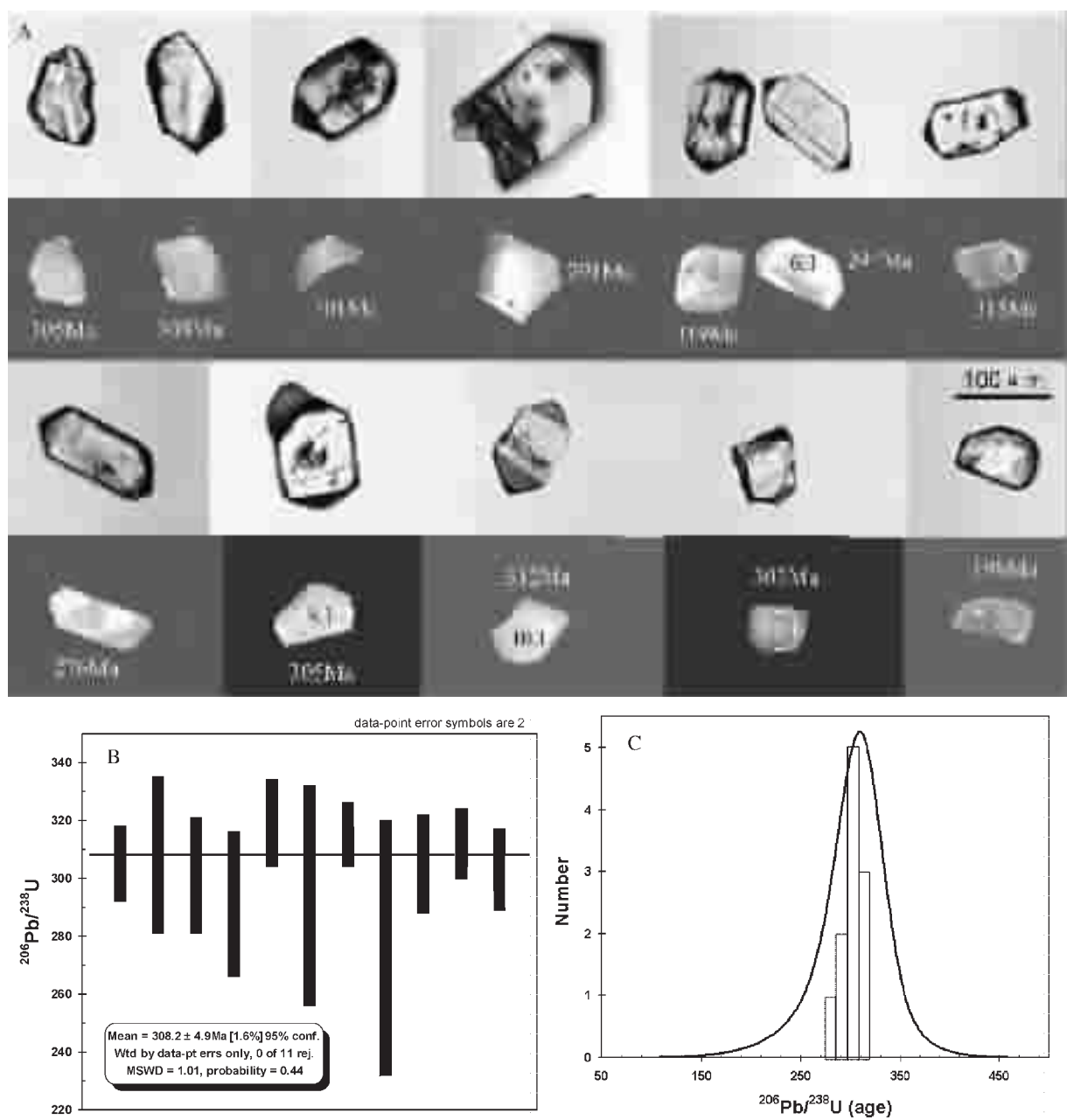


图 10 德尔尼蛇绿岩玄武岩熔岩的锆石 SHRIMP U-Pb 平均年龄

A—锆石的显微照片、阴极发光影像和 SHRIMP U-Pb 同位素年龄；

B—C—SHRIMP 年龄值的平均年龄为 (308.2 ± 4.9) Ma, 属石炭纪

Fig 10 SHRIMP U-Pb ages of the zircons from the basalts in the Dur'ngoi ophiolite

A- Photomicrographs of zircons and cathodoluminescence images; B-C- the average age is 308.2 ± 4.9 Ma

蛇绿岩洋壳形成时代。第二种根据蛇绿岩就位的海相地层的时代和蛇绿岩玄武岩的全岩 Rb-Sr 等时线年龄,以及发育在俯冲带上的花岗岩的年龄来推断蛇绿岩的形成时代,其科学性和可信性较高。成分特征表明下大武的基性熔岩为岛弧火山岩属性,其 260 Ma 的 Rb-Sr 等时线年龄应该代表洋壳俯冲和洋盆关闭期间的年龄,该年龄与放射虫硅质岩给出的早—中三叠世的时代是相匹配的^[4],同样与沿俯冲带发育的

同构造花岗岩的年龄 236.8 Ma 相吻合^[29]。笔者采用德尔尼蛇绿岩熔岩中的锆石作为测试年龄样,样品取自 ZK1303 钻孔岩心,该钻孔由青海地矿局组织实施并提供样品。该钻孔选在德尔尼超镁铁岩上,穿透超镁铁岩后,获得了近 200 m 厚玄武岩岩心。玄武岩岩石比较新鲜,虽然受一定程度绿片岩相变质,但仍然保留少量新鲜辉石和斜长石等矿物。从熔岩中选出锆石用于 U-Pb 测年。锆石颗

粒一般为 60~100 μm 大小,晶面发育,阴极发光显示典型岩浆锆石的生长环带。测年在美国斯坦福大学的 SHRIMP-RG 实验室完成。共测定 12 粒锆石(表 2),其中 11 粒获得 $^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$ 年龄区间为 276~319 Ma,平均(308.2 $\pm$ 4.9) Ma(图 10),另 1 粒锆石的 $^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$ 年龄(198 $\pm$ 154) Ma,误差大,没有包括在平均值内。锆石的 Th / U 比值均比较接近,在 0.35~0.63 之间,属岩浆锆石的特点。认为该年龄值代表岩浆结晶的时代,即蛇绿岩洋壳形成的时代为晚石炭世。

7 对德尔尼蛇绿岩的几点认识

阿尼玛卿蛇绿岩是东昆仑巨型褶皱带中迄今已知出露和保存最佳的一段蛇绿岩。蛇绿岩虽已解体,但蛇绿岩各组成单元均有出露,并且未被花岗岩和其他岩浆活动所破坏。笔者通过对蛇绿岩岩石学和年代学方面的研究,取得的以下几点认识:

(1)德尔尼蛇绿岩代表一个已被构造肢解但岩石单元十分发育的古洋壳。德尔尼蛇绿岩是一个蛇绿混杂岩带,其中出露的蛇绿岩岩石构造单元有变质橄榄岩、基性超基性堆晶岩、辉绿岩墙群和基性喷出岩。对蛇绿岩的地幔岩和玄武岩的成分研究表明该蛇绿岩属洋中脊型。

(2)蛇绿岩洋壳可能形成于一个快速扩张洋脊。在体表及已知的 200 余米厚的熔岩中均未发现枕状熔岩,说明喷出岩中熔岩流的比例较高,而熔岩流的高比例可以认为是洋脊快速扩张的证据^[9]。本研究表明洋盆形成的时代至少始于晚石炭世(308.2 $\pm$ 4.9) Ma,如果玄武岩全岩(345.3 $\pm$ 7.9) Ma Ar-Ar 坪年龄^[7]获得证实,则洋壳形成时间要早到早石炭世。而洋盆关闭的时间可能延续到晚三叠世,其中间隔可达约 1 亿年。如果用较快的扩张速率来估算,洋盆规模应该很大,这一点与该洋盆曾是规模巨大的古特提斯海盆的一部分,代表冈瓦纳大陆与欧亚大陆之间的连接的认识是相吻合的^[9]。

(3)橄榄岩的强蛇纹石化和碳酸岩化与形成德尔尼铜矿有关。在对比阿尼玛卿带中德尔尼与布青山的变质橄榄岩时发现,前者近矿橄榄岩不仅完全蛇纹石化,而且叠加强烈碳酸岩化;后者蛇纹石化程度相对较弱,橄榄岩中保留了部分橄榄石和斜方辉石残晶(本研究未刊资料)。认为岩石的蚀变程度与海底热液活动的强弱有关。由此得出的启示是:德尔尼硫化物矿床的成因受海底热液活动控制,这一结论与矿石中发现海底热液活动产生的矿物是相吻合的^[10],由此,可以指导进一步寻找德尔尼型铜矿床。

致谢: 野外调查期间得到青海省地矿局和第一地质队所提供的帮助和支持,尤其惠允使用岩心和考察平洞;野外也得到中法合作研究队同仁的协助;SHRIMP 同位素定年在美国斯坦福大学完成,岩石成分测试由中国地质科学院测试

研究所李蓉华完成,在此表示衷心感谢。

参考文献(References):

- [1] 姜春发,杨经绥,冯秉贵,等. 昆仑开合构造[M],北京:地质出版社,1992.
Jiang Chunfa, Yang Jingsui, Feng Binggui, et al. Opening - Closing Tectonic of Kunlun Mountains[M]. Beijing:Geological Publishing House, 1992 (in Chinese).
- [2] Molnar P, et al. Geologic evolution of northern Tibet: results of an expedition to Ulugh Muztagh[J]. Science, 1987, 235:299~305.
- [3] Yang Jingsui, Robinson P T, Jiang Chunfa, et al. Ophiolites of the Kunlun Mountains, China and their tectonic implications [J]. Tectonophysics, 1996, 258:215~231.
- [4] 边千韬,罗小全,陈海泓,等. 阿尼玛卿蛇绿岩带花岗-英云闪长岩锆石 U-Pb 同位素定年及大地构造意义[J]. 1999, 34(4):420~426.
Bian Qiantao, Luo Xiaoquan, Chen Haihong, et al. Zircon U-Pb age of granodiorite - tonalite in the A'nyemaqen ophiolitic belt and its tectonic significance[J]. Scientia Geologica Sinica, 1999, 34 (4):422~426 (in Chinese with English abstract).
- [5] 边千韬,尹磊明,孙淑芬,等. 东昆仑布青山蛇绿混杂岩中发现奥陶纪疑源类[J]. 2001, 46(2):167~171.
Bian Qiantao, Yi Leiming, Sun Shufen, et al. Discovery of Ordovician acritarch in Buqingshan area in the East Kunlun mountains[J]. Chinese Science Bulletin, 2001, 46(2):167~171 (in Chinese).
- [6] 边千韬,罗小泉,李涤微,等. 青海省阿尼玛卿带布青山蛇绿岩混杂岩的地球化学性质及形成环境[J]. 地质学报, 2001, 75(1):45~55.
Bian Qiantao, Luo Xiaoquan, Li Dihui, et al. Geochemistry and formation environment of the Buqingshan ophiolite complex, Qinghai province, China[J]. Acta Geologica Sinica, 2001, 75(1): 45~55. (in Chinese with English abstract).
- [7] 陈亮,孙勇,裴先治,等. 德尔尼蛇绿岩 ^{40}Ar - ^{39}Ar 年龄: 青藏最北端古特提斯洋盆存在和延展的证据[J]. 科学通报,2001,46(5):424~426.
Chen Liang, Sun Yong, Pei Xianzhi, et al. The ^{40}Ar - ^{39}Ar ages of the Dur'ngoi ophiolites: Evidence of ancient Tethys ocean basin in north Tibet[J]. Chinese Science Bulletin, 2001,46(5):424~426 (in Chinese).
- [8] 章午生. 德尔尼铜矿地质[M]. 北京:地质出版社,1981.
Zhang Wusheng. Geology of the Dur'ngoi Copper Mine [M]. Beijing:Geological Publishing House, 1981 (in Chinese).
- [9] 杨经绥,白文吉. 甘肃白银厂和青海黄铁矿型铜矿与塞浦路斯铜矿的成因对比[J]. 地质与勘探,1987,23(5):7~10.
Yang Jingsui, Bai Wenji. A genetic comparison of the Baiyinchang and Dur'ngoi pyrotic copper deposits with the Cyprus type copper deposits [J]. Geology and Prospecting, 1987, 23 (5):7~10 (in Chinese).
- [10] Yang Jingsui, Zheng Xinghua, Bai Wenji, et al. A preliminary study on genesis of the Dur'ngoi massive Cu-Co-Zn sulfide deposit hosted by the peridotite of A'nyemaqen ophiolite, Kunlun Mt., China. In:Proc. 30th IGC. 1997, 9:381~392.

[11] 青海省地质局. 青海省地质志[M]. 北京:地质出版社,1991.
Geological and Mineral Resource Bureau of Qinghai Province [M]. Regional Geology of Qinghai Province,1991 (in Chinese without English abstract).

[12] 王永标,杨浩. 东昆仑-阿尼玛卿-巴颜喀拉地区早二叠世的生物古地理特征[J]. 中国科学,2003,33(8):775~780
Wang Yongbiao, Yang Hao. Permian biology and geography of the eastern Kunlun-A'nymaqen -Bayankala area[J]. Science in China, 2003, 33(8):775~780(in Chinese).

[13] 段国莲. 论德尔尼黄铁矿型铜-钴矿床的地质特征及其与塞浦路斯铜矿的区别[J]. 矿床地质, 1998, 20(4):287~294.
Duan Guolian. Geological characteristics of Dur'ngoi pyrite type copper-cobalt deposits difference from Cyprus Copper deposit [J]. Geology of Chemical Minerals, 1998, 20(4):287~294 (in Chinese with English abstract).

[14] 许志琴,杨经绥,陈方远. 阿尼玛卿缝合带及“俯冲-碰撞”动力学[A]. 见:张旗主编.蛇绿岩与地球动力学研究[C],北京:地质出版社,1996,185~189.
Xu Zhiqin, Yang Jingsui, Chen Fangyuan. The A'nymaqen suture belt and the dynamics in the subduction and collision[A]. In:(Zhang Qi ed.). Study on Ophiolites and Geodynamics[C]. Beijing: Geological Publishing House, 1996, 185~189 (in Chinese with English abstract).

[15] 王玉往,秦克章. VAMSD 矿床系列最基性端员—青海省德尔尼大型铜钴矿床的地质特征和成因类型[J].矿床地质,1997,16(1):1~10.
Wang Yuwang, Qin Kezhang. The extremely basic member of VAMSD deposit series—the Dur'ngoi large copper-cobalt deposit of Qinghai Province:its geological characteristics and genetic type[J]. Mineral Deposits, 1997, 16 (1):1~10 (in Chinese with English abstract).

[16] Zhang Ruyuan, Liou J G, Cong Bolin. Petrogenesis of garnet-bearing ultramafic rocks and associated eclogites in the Su-Lu ultrahigh-P metamorphic terrane, eastern China[J]. J. Meta. Geol., 1994,12:169~186.

[17] Colman R G, Lee D E, Brannock W W. Eclogites and eclogite facies rocks: their differences and similarities[M]. Geological Society of America Bulletin, 1965, 76(5):483~508.

[18] Dick H J B, Fisher R L. Mineralogic studies of the residues of mantle melting: Abyssal and alpine-type peridotites [A]. In:Kornprobst J (ed).Kimberlites[C]. Amsterdam:Elsevier, 1984, 295~308.

[19] 王希斌,鲍佩声. 试论中国蛇绿岩类型及其成矿专属性[A]. 见:张旗主编. 蛇绿岩与地球动力学研究 [C]. 北京:地质出版社, 1996a.69~74.
Wang Xibin, Bao Peisheng. Genetic types of Chinese ophiolite and their metallogenetic specialization[A]. In :Zhang Qi(ed.). Study on Ophiolites and Geodynamics [C]. Beijing: Geological Publishing House, 1996a.69~74 (in Chinese with English abstract).

[20] 王希斌,鲍佩声. 豆荚状铬铁矿的成矿规律,兼论西藏铬铁矿的勘查与找矿[J]. 西藏地质, 1996b, 2:1~12.
Wang Xibin, Bao Peisheng, Mineralization of the podform chromite, and exploration of chromite deposit in Tibet [J], Tibet Geology, 1996b, 2:1~12 (in Chinese with English abstract).

[21]Colman R G.Ophiolites, Ancient Oceanic Lithosphere? [M]. Berlin: Springer-Verlag, 1977.

[22] Jadues A L, Green D H. Anhydrous melting of peridotite at 0-15kbar pressure and genesis of tholeiite basalts[J]. Miner. Petrol., 1980, 73: 287~310.

[23] Dick H J B, Bullen T. Chromium spinel as a petrogenetic indicator in abyssal and alpine-type peridotites and spatially associated lavas[J]. Contr. Miner. Petrol., 1984, 86(1):54~76.

[24] Pearce J A.Trace element characteristics of lavas from destructive plate boundaries[A]. In :Thorpe R.S (ed.).Andesites [C]. 1982. 525~547.

[25] Doe B R, Stacey J S. The Application of lead isotope to the problems of ore genesis and ore prospect evolution: A review[J]. Economic Geology, 1974, 69:757~776.

[26] Cumming G L, Richards J R. Ore lead isotope ratio in a continuously changing earth[J]. Earth and Planetary Science Letters, 1975, 28(2):155~175.

[27] Stacey J S, Kramers J D. Approximation of terrestrial lead isotope evolution by a two-stage model [J]. Earth and Planetary Science Letters, 1975, 26(2):207~221.

[28] 陈好寿,周肃,魏琳,等. 成矿作用年代学及同位素地球化学[M]. 北京:地质出版社, 1994.
Chen Haoshou, Zhou Su, Wei Lin, et al. Chronology of Minerogenesis and Isotope Geochemistry [M]. Beijing: Geological Publishing House, 1994 (in Chinese).

[29] 柴耀楚,冯秉贵,杨经绥. 东昆仑中段东西大滩花岗岩带的基本特征及其成因的探讨[A]. 见:青藏高原地质文集(15)[C].1984, 78~90.
Chai Yaochu, Feng Binggui, Yang Jingsui. The characteristics and genesis of the Xidatan granite in the middle segment of East Kunlun [A]. In:Proceedings of Geology of the Tibeatan Plateau (15) [C]. 1984, 78~90 (in Chinese with English abstract).

[30] Yang J-S,Hall J M. An intermediate-fast spreading rate of the Troodos type oceanic crust: a comparison to modern oceanic crusts[J]. Continental Dynamics. 1996, 1:70~80.

The Dur'ngoi ophiolite in East Kunlun, northern Qinghai-Tibet Plateau: a fragment of paleo-Tethyan oceanic crust

YANG Jing-sui, WANG Xi-bin, SHI Ren-deng, XU Zhi-qin, WU Cai-lai

(Key Laboratory for Continental Dynamics, Ministry of Land and Resources, China ;

Institute of Geology, Chinese Academy of Geological Science Beijing 100037)

Abstract: The Dur'ngoi ophiolite in the north Qinghai-Tibetan Plateau consists of meta-peridotite, mafic-ultramafic cumulate, sheeted dikes and basaltic lavas. The meta-peridotite consists of dunite, harzburgite, lherzolite, feldspar-bearing lherzolite and garnet-bearing lherzolite and contains residual spinel with Cr#s $[100 \times \text{Cr}/(\text{Cr} + \text{Al})]$ of 30–57 and Mg#s $[100 \times \text{Mg}/(\text{Mg} + \text{Fe}^{2+})]$ of 50–75, indicating an Al- and Mg-rich series. The meta-peridotites have a relatively narrow range of composition with Mg#s of 89.2–92.6, Al_2O_3 contents of 1%–4 % and slightly depleted REE patterns, indicating that they represent relict mantle material that has undergone intermediate to low degrees of partial melting. Garnets in the lherzolite are andradite enriched in Ca and Fe and depleted in Mg and Al (And 95–97, Pyr 0.27–5.06, Gro 0–2.62), indicating that they formed by metamorphism. Cumulates consist mainly of dunite, wehrlite, pyroxenite and gabbro. The dunite contains minor feldspar, mostly replaced by chlorite and clay minerals. The wehrlite consists of olivine, diopside and minor plagioclase. A well-layered gabbro-pyroxenite complex is defined by variations in modal plagioclase and pyroxene. Blocks of garnet-pyroxenite or rodingite are locally present in the meta-peridotite. Garnets in the cumulates are grossular (Gro 69.19–89.93; And 9.12–18.84; Br 0.73–11.63), formed by metamorphism. Diabase dikes are depleted in LREE with $(\text{La}/\text{Sm})_N$ ratios of 0.49–0.75 and have flat HREE patterns with positive Eu anomalies ($\delta\text{Eu} = 1.14–1.27$). Basalts have REE patterns similar to those of MORB with $(\text{La}/\text{Sm})_N$ ratios of 0.46–0.95 and small negative Eu anomalies. The basalt compositions, particularly their consistent REE patterns, suggest no contamination in their magma source and little differentiation during crystallization. SHRIMP U-Pb dating of zircons from the basalts yielded $^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$ ages of 276–319 Ma (average 308.2 ± 4.9 Ma). The Dur'ngoi ophiolite is interpreted as a dismembered fragment of paleo-oceanic crust formed at a fast-spreading mid-ocean ridge. Intense serpentinization and carbonization reflect hydrothermal alteration on the seafloor associated with formation of the Dur'ngoi Cu-Co-Zn massive sulfide deposit. The ophiolite was probably emplaced during closure of the paleo-Tethyan ocean basin and is believed to mark the suture between Gondwana and Eurasia.

Key words: Ophiolite; Dur'ngoi; A'nyemaqen; East Kunlun; Tibetan