1000-0569/2008/024(07)-1567-84 *Acta Petrologica Sinica* 岩石学报

北阿尔金地区米兰红柳沟蛇绿岩的岩石学特征和SHRIMP定年*

杨经绥[1,2] 史仁灯[1,2] 吴才来[1,2] 苏德辰[1,2] 陈松永[1,2] 王希斌[1,2] WOODEN Joseph[3]

YANG JingSui[1,2], SHI Rendeng[1,2], WU Cailai[1,2], SU Dechen[1,2], CHEN SongYong[1,2], WANG Xibin[1,2] and Joseph WOODEN[3]

1. 中国地质科学院地质研究所, 国土资源部大陆动力学重点实验室, 北京 100037
2. 中国地质科学院青藏高原大陆动力学研究中心, 北京 100037
3. Stanford University, Stanford, CA, USA

1. *Key Laboratory for Continental Dynamics of Ministry of Land and Resources, Institute of Geology, Chinese Academy of Geological Sciences, Beijing* 100037, *China*
2. *Tibet Center for Continental Dynamics, Chinese Academy of Geological Sciences, Beijing* 100037, *China*
3. *Stanford University, Stanford, CA, USA*

2008-04-08 收稿, 2008-06-24 改回.

Yang JS, Shi RD, Wu CL, Su DC, Chen SY, Wang XB and Wooden J. 2008. Petrology and SHRIMP age of the Hongliugou ophiolite at Milan, north Altun, at the northern margin of the Tibetan plateau. *Acta Petrologica Sinica*, 24(7): 1567 - 1584

Abstract The Hongliugou ophiolite in Milan is the best-developed and best-preserved body in the North Altun ophiolite belt at the northern edge of the Tibetan plateau. The ophiolite consists mainly of mantle peridotites, mafic-ultramafic cumulates, sheeted dikes and basaltic lavas, which crop out as tectonic blocks in a mélange zone about 100km long. Individual blocks are variable in size, with the largest over 10km long and 1km wide. The mantle peridotites consist chiefly of harzburgite accompanied by minor dunite. The harzburgite consists mainly of olivine ($Fo_{91.2\sim92.7}$), orthopyroxene ($En_{93\sim98}$), and sparse clinopyroxene (En_{46}). Spinels in these rocks have $Cr^{\#}$(100Cr/(Cr + Al)) of 43 to 69 (average 55) and $Mg^{\#}$(100Mg/(Mg + Fe)) of 43 to 64 (average 58), typical of both abyssal and suprasubduction zone (SSZ) peridotites. The cumulates are composed of wehrlite, Ol-websterite, (Ol)-clinopyroxenite, gabbro and anorthosite, an assemblage similar those formed in SSZ settings. Both the sheeted dikes and basaltic lavas have relatively uniform, MORB-like compositions with 1% ~ 1.5wt% TiO_2 and very low contents of K_2O (< 0.3 wt%) and P_2O_5. Their MORB character is confirmed by their incompatible element compositions and their flat, LREE-depleted, chondrite-normalized REE patterns. A few ocean island basalts (OIB) have also been identified in the ophiolite. The two types of basalt suggest that some of the ophiolitic units in the mélange may have originated in different tectonic settings. The presence of blueschists and eclogites in the mélange, coupled with the occurrence of various subduction-related granitic rocks in the region, suggest that the mélange zone represents a complex plate suture. Zircon from an ophiolitic gabbro yielded a SHRIMP U-Pb age of 479.4 ± 8.5Ma, which represents the formation age of the ophiolite. Thus, the North Altun suture zone is comparable in age and character to the North Qilian suture on the east side of the Altyn Tagh fault, and confirms that the two belts were offset about 400km by sinistral movement on the Altyn Tagh fault.

Key words Ophiolite; Orogen; Hongliugou; Altun; Qinghai-Tibetan plateau

摘 要 米兰红柳沟蛇绿岩是北阿尔金蛇绿岩带中发育和保留最好的蛇绿岩,主要由地幔橄榄岩、镁铁-超镁铁质堆晶杂岩、岩墙群和基性熔岩等组成。它们以规模不等的构造岩块产出,大者长十余km,宽近1km,组成一条近100km长的蛇绿混杂岩带。地幔橄榄岩以方辉橄榄岩为主,有少量纯橄岩,主要由橄榄石(Fo=91.2~92.7),斜方辉石(En=93~98)和少量单斜

* 本研究得到中国地质调查(1212010610107, 1212010610105)和国家自然科学基金重大国际合作项目(40610098)资助。

第一作者简介: 杨经绥, 男, 1950年生, 研究员, 岩石学专业, 从事青藏高原和造山带的岩石大地构造研究, E-mail: yangjingsui@yahoo.com.cn

辉石(En=46)组成;副矿物尖晶石 $Cr^{\#}$ 为 43~69(平均 55),$Mg^{\#}$ 为 43~64(平均 58),表现出深海橄榄岩(Abyssal peridotite)和俯冲带环境(SSZ)橄榄岩成分特点。深成堆晶岩主要由异剥橄榄岩—橄榄二辉石岩—(橄榄)辉石岩—辉长岩—斜长岩,该组合的堆晶岩通常被认为是 SSZ 构造背景的产物。席状岩墙群的岩石成分与熔岩一致,其 TiO_2(1%~1.5%)和低含量的 K_2O <0.3%和 P_2O_5 表明具有 MORB 型的岩石特征,并得到了不相容元素和 LREE 平坦型和亏损型的球粒陨石标准化模型等证据的支持。该地区另存在一套高 Ti 的洋岛型拉斑玄武岩。两类熔岩的存在,以及地幔橄榄岩和堆晶岩的不同特征,表明米兰红柳沟蛇绿岩组合可能来自不同构造背景。带中与洋壳俯冲有关的蓝片岩和榴辉岩组成的高压变质带的存在,以及与俯冲碰撞有关的不同类型花岗岩类的产出,表明米兰红柳沟蛇绿混杂岩带代表了一个复杂的板块缝合带。蛇绿岩中辉长岩的锆石 SHRIMP 年代为 479±8Ma,这是获得的第一个北阿尔金蛇绿岩的锆石 SHRIMP U-Pb 同位素年龄,认为代表蛇绿岩的形成时代。因此,北阿尔金缝合带无论在年龄和特征等方面,均可以与阿尔金断裂带东部的北祁连缝合带对比,证实两个带曾经是一个带,被阿尔金断裂左旋错断了约 400km。

关键词 蛇绿岩;造山带;红柳沟;阿尔金;青藏高原

中图法分类号 P588.125;P597.3

1 引言

阿尔金地区以巨型阿尔金走滑断裂而著称,断裂以西为阿尔金山地区,以东为祁连山地区。近年来人们陆续报道在阿尔金断裂两侧发现榴辉岩带,即南阿尔金榴辉岩带(车自成等 1995;刘良等,1996)和柴北缘榴辉岩带(杨经绥等,1998,2000),提出阿尔金断裂两侧的岩石单元可以对比,由此推断阿尔金断裂左行走滑位移了约 400km(许志琴等,1999;葛肖虹和刘俊来,1999)。随着超高压变质作用的证据分别在柴北缘(杨经绥等,2001;宋述光和杨经绥,2001)和南阿尔金(张建新等,2003;刘良等,2003)的发现,这种宏观上的对比已被多数人所接受。

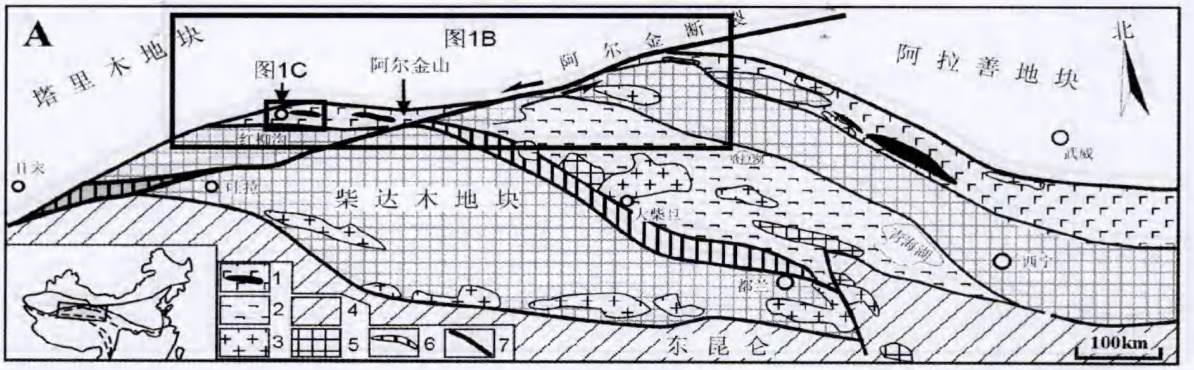
研究表明,阿尔金断裂两侧还分别发育两条蛇绿岩带,即阿尔金地区的北阿尔金蛇绿岩带和南阿尔金蛇绿岩带(新疆地矿局,1993;何国琦等,1994;崔军文等,2000),及与两带对应的祁连山地区的北祁连蛇绿岩带和柴北缘(南祁连)蛇绿岩带。相对说来,北祁连蛇绿岩带的研究开展较早,也取得了较多的进展,获得该蛇绿岩带代表早古生代洋盆的认识,并且发现与其配套的十分发育的沟弧盆体系和洋壳俯冲碰撞有关的高压低温榴辉岩和蓝片岩变质带(吴汉泉,1980;张建新等,2006,2007)。

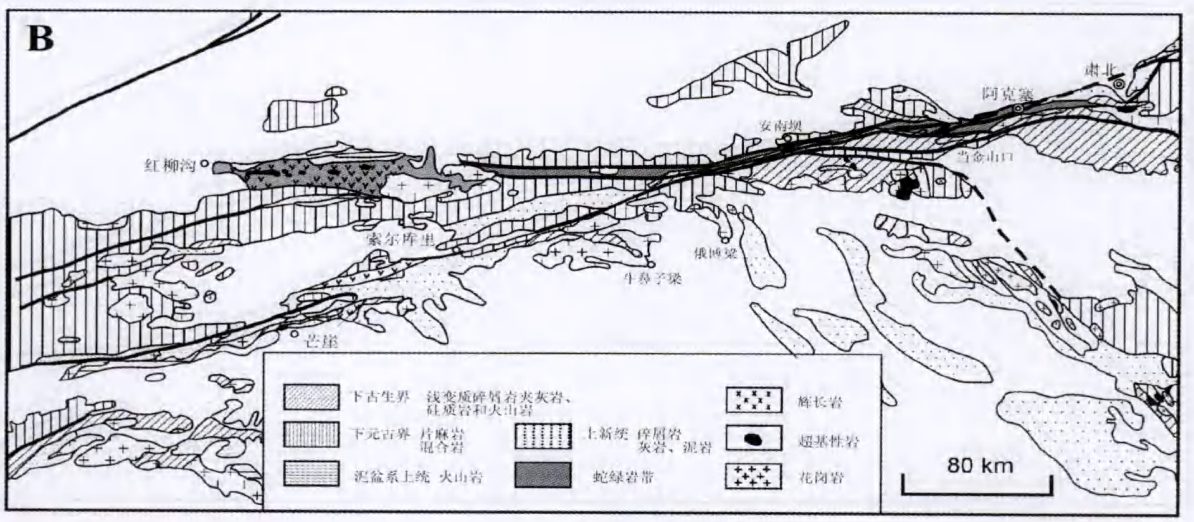
北阿尔金蛇绿岩带沿阿尔金山脉北段出露,从西至东,由米兰红柳沟经阿克赛至肃北半鄂博,走向近东西,全长大于 600km(图 1)。已有的研究表明,该带的东段米兰红柳沟蛇绿岩中发现两套火山岩,即 MORB 型变基性火山岩和洋岛玄武岩(OIB)(刘良等,1999;吴峻等,2002),并发现了代表大洋扩张的具 MORB 性质的席状岩墙群(杨经绥等,2002)。刘良等(1999)取得米兰红柳沟蛇绿岩火山岩的 Sm-Nd 等时线年龄 508±41Ma,认为是蛇绿岩的形成年龄(博士论文,未刊)。车自成等(2002)曾根据贝克滩洋岛玄武岩的 524Ma 的 Sm-Nd 全岩等时线年龄和地层中的化石,认为阿尔金北缘蛇绿岩形成于晚寒武—早奥陶世。修群业等(2007)最近用 TIMS 单颗粒锆石 U-Pb 法,测得米兰红柳沟恰什坎萨依洋岛型枕状玄武岩的年龄为 448±3Ma,认为代表蛇绿岩的年龄。最近在米兰红柳沟的红柳泉一带发现变质时代为 490~512Ma 的典型石榴蓝闪片岩和低温榴辉岩带,认为可以与北祁连清水沟百经寺一带的高压低温榴辉岩和蓝片岩变质带对比(张建新等,2007)。

米兰红柳沟向西有 SN 走向阿克赛红柳沟和阿克赛沟,两者相距约 20km,均在阿克塞县城的西边。沟内震旦系片麻岩中夹有数层基性为主火山碎屑岩。其中可见辉绿岩和较大的辉长岩块。在阿尔金山的中脊线附近出露一个规模较大的方辉橄榄岩和纯橄岩为主的超镁铁岩块,几乎完全蛇纹石化,目前正在大规模开采其中的石棉矿。这些基性超基性岩带的空间展布与米兰红柳沟相连。但目前未见有研究成果发表。

在阿克塞老县城附近的当金山口一带也有一套基性火山岩,并在当金山口南坡出露一小超基性岩构造岩块。该超基性岩含大量单斜辉石,已强烈蚀变,属岩浆成因的橄榄辉石岩类,不同于蛇绿岩的地幔橄榄岩。基性火山岩分布在当金山口两侧,以熔岩为主夹一些火山碎屑岩。熔岩的枕状结构保留较好,大者直径达 0.5m 以上,未变形。前人将其定为志留系,但未见有确定的同位素年代数据。半鄂博位于该带的东端由当金山口往东 50km 处的肃北县,该位置上出露的超基性岩块体较小,但辉长岩块较大;基性熔岩块也不大,均为十余 m 至数十 m 规模。郭召杰等(1998)报道东部半鄂博地区辉长岩的 Sm-Nd 等时线年龄为 829±60Ma,认为该年龄代表蛇绿岩的形成年龄。

以上研究表明,北阿尔金蛇绿岩带的研究程度总体较低,以简单报道性的成果为主。北阿尔金蛇绿岩带究竟是什么样?该蛇绿岩究竟包括哪些岩石单元组合?它们各自的产出特征及岩石学特征是什么?显然,要回答上面的这些问题,已有的研究是不够的。尤其,对于它们的形成时代、构造背景及地质意义的探讨,资料显得缺乏或存在矛盾。本研究群体考察了米兰红柳沟、阿克赛红柳沟、阿克赛沟、当金山口和半鄂博一带的蛇绿岩及有关岩石,本文将重点报道米兰红柳沟蛇绿岩的岩石单元和基本特征以及年代学的研究进展。





阿尔金蛇绿岩分布地质简图

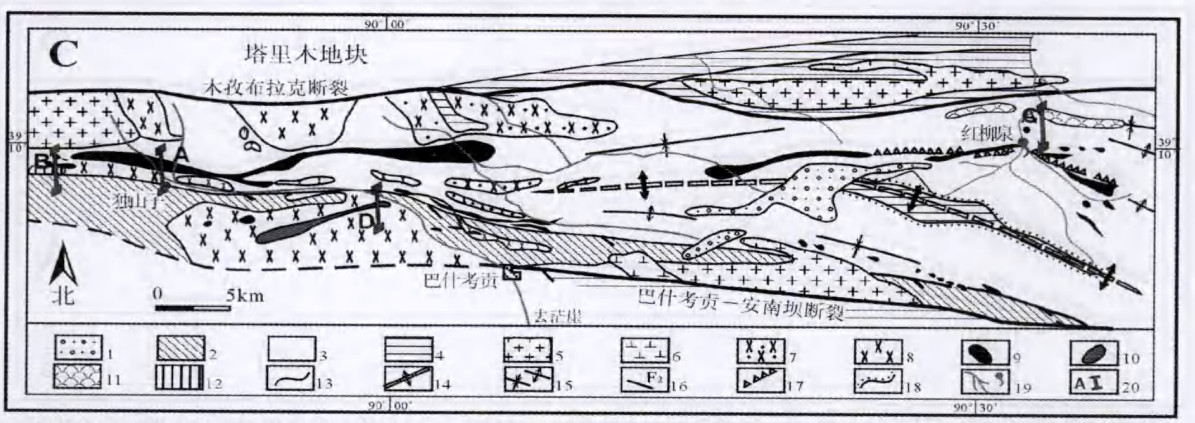


图 1　阿尔金山—祁连山地区构造单元划分(A)；北阿尔金蛇绿岩分布地质简图(B)；米兰红柳沟蛇绿岩分布地质简图(C)

A：1-蛇绿混杂岩带；2-中祁连地块；3-花岗岩；4-东昆仑造山带；5-前寒武纪变质基底；6-俯冲杂岩带；7-断层。C：1-第四纪；2-石炭纪：云母石英片岩、变质砂岩、中基性火山岩及底砾岩；3-泥盆纪：底部为砂岩、粉砂岩和砾岩，中部：火山岩、火山碎屑岩，顶部为白色厚层灰岩，最上部为砂岩、粉砂岩和泥岩；4-元古代：片岩和片麻岩；5-花岗岩；6-闪长岩；7-辉绿岩；8-辉长岩；9-超镁铁质岩；10-镁铁-超镁铁质堆晶岩；11-枕状熔岩；12-岩墙群；13-地质体界线；14-复式背斜轴；15-背斜和向斜轴；16-压扭性断裂；17-挤压性断裂带；18-不整合；19-水系和泉眼；20-图 2 中堆晶岩等剖面位置

Fig. 1　Tectonic sketch map of the Altun-Qian region (A); Regional map of the North Altun ophiolite belt (B); Geological map of the Hongliugou ophiolite in the North Altun region(C)

A: 1-Ophiolite melange; 2-Central Qilian Block; 3-Granite; 4-East Kunlun Orogen; 5-Precambrian metamorphic basement; 6-Subduction complex; 7-Fault. C: 1-Quaternary sediments; 2-Carboniferous sericite-quartz schist + metamorphic sandstone + intermediate-basic volcanic rocks and minor basal conglomerate; 3-Devonian strata unconformately coverred the Proterozoic group, and is composed of three parts from bottom to top as following: bottom part is major sandstone, siltstone and conglomerate; middle part mainly consists of volcanic lavas, pyroclastic rocks besides sandstones; top part is white heavy-bedded limestone with 150m ~ 400m thickness, the topmost part is thick-bedded layer sandstone, siltstone, and pelite; 4-Proterozoic group is composed of schist and gneiss; 5-Granite; 6-Diorite; 7-Diabase; 8-Gabbro; 9-ultramafic rocks; 10-ultramafic cumulates; 11-pillow lavas; 12-dyke swarm; 13-line of geological limitation; 14-complex anticlinal axis; 15-anticlinal and synclinal axis; 16-compressional torsion fracture; 17-compressional fracture zone; 18-discordant contact; 19-spring and drainage; 20-location of cumulate profiles in Figure 2

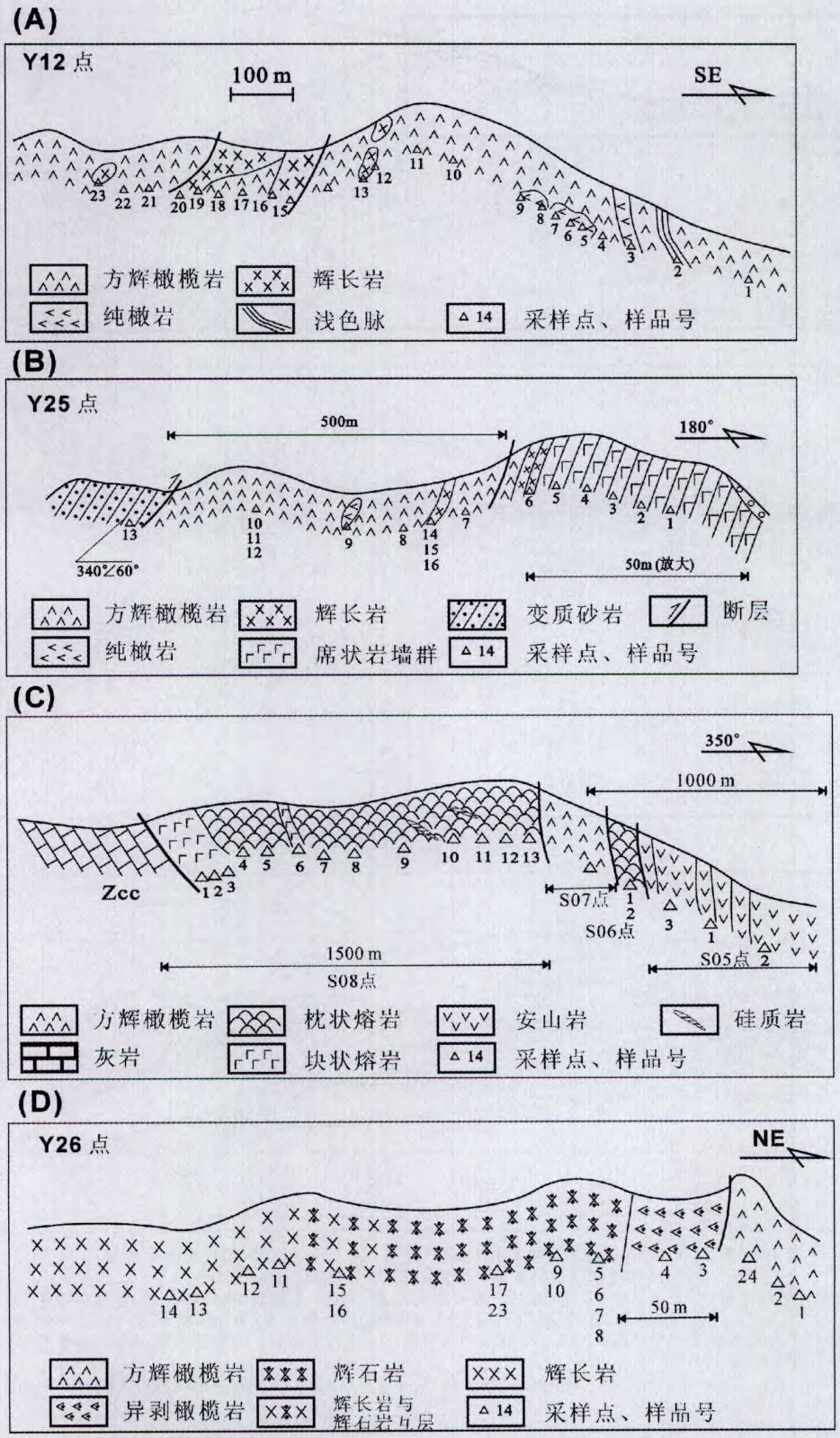


图2 北阿尔金米兰红柳沟蛇绿岩的不同岩石组合产出剖面,剖面位置见图1C

(A)地幔橄榄岩为主的剖面,其中产出辉长岩块;(B)席状岩墙群与地幔橄榄岩剖面;(C)枕状熔岩为主的岩性剖面;(D)堆晶岩的岩性剖面

Fig. 2 Profiles of different lithologic units of the Hongliugou ophiolite in North Altun

(A) main mantle sequence with some gabbro; (B) sheeted dikes and mantle rocks; (C) dominant pillowed lavas; (D) cumulate sequence

2　北阿尔金米兰红柳沟蛇绿岩的产出

北阿尔金山蛇绿岩带主要产在新元古代阿尔金群中(图 1)。阿尔金群出露在巴什考贡—安南坝断裂以南及木孜布拉克断裂以北，主要由片麻岩、片岩和大理岩组成，岩层近东西走向，新报道的花岗质岩石的 Rb-Sr 全岩等时线年龄为 1035 ± 77Ma，为新元古代与前人的认识相同(覃小锋等，2008)。在阿尔金群上直接不整合覆盖着泥盆系地层，主要由砂岩、粉砂岩和砾岩组成，其中夹杂有火山熔岩、火山碎屑岩和黑色硅质岩，向上过渡为白色厚层状灰岩。米兰红柳沟一带的蛇绿岩主要由地幔橄榄岩、辉长岩、辉绿岩和基性火山熔岩组成，它们多以构造岩块产出，属蛇绿混杂岩带。

大多数地幔橄榄岩仅宽数十米或几米，研究区内最大的地幔橄榄岩体长约 28km，最宽处达 1.8km，一般介于 0.3km ~0.8km，面积约 20km^2。地幔橄榄岩主要由方辉橄榄岩和少量的纯橄岩组成，纯橄岩在方辉橄榄岩中呈透镜状异离体，纯橄岩与方辉橄榄岩为截然接触关系(图 2A)。地幔橄榄岩大部分已强烈蛇纹石化(图 3H)，地幔橄榄岩与阿尔金群接触处均发生构造变形，片理化强烈，接触边界均未见热变质现象。地幔橄榄岩中常常构造混杂其它岩性的岩块，如剖面中显示出数层辉长岩块(图 2A)。

本研究新厘定出一套堆晶岩，出露在研究区的西南部位，位于最大地幔橄榄岩体南约 5km 左右的一个南北向深沟内(图 1C & 2D)。岩体由北向南依次为异剥橄榄岩、橄榄单辉辉石岩逐渐过渡为单辉辉石岩、二辉辉石岩、含长辉石岩和层状辉长岩，岩体北侧与方辉橄榄岩呈断层接触，向南断续出露有堆晶辉长岩、含单斜辉石斜长岩和熔岩流等，断续处被地层不整合覆盖，出露厚度约 500m。发育较好的层状辉长岩具有典型的堆晶结构(图 3E,F)，即深色层(主要是辉石)与浅色层(主要是斜长石)呈现韵律性的变化，深色层厚度达 50cm，最薄 1cm，浅色层厚 1cm ~30cm 不等，总厚度约 20m，堆晶层倾向 335°，倾角 55°。深成岩部分(异剥橄榄岩 + 橄榄辉石岩 + 辉石岩)厚约 100m(图 3G)。

在蛇绿岩带的最西端出露有较好的席状岩墙群，岩墙产状近直立(倾角 65° ~75°)，倾向北，单个岩墙最厚约 1.5m，最薄约 20cm，有冷凝边，但已不十分明显，发育与岩墙“层面”垂直的节理，整个岩墙群出露宽度为 50m 左右(图 2C，图 3D)。该岩墙群的岩石较新鲜，保留一部分单斜辉石和辉绿结构，成分表明该岩石为典型的 MORB 型的基性岩(杨经绥等，2002)。从剖面中可以看出(图 2B)，岩墙群是以构造岩块产出，其南界第四纪坡积物覆盖，其北部出现少量辉长岩，之后与变质橄榄岩断层接触。变质橄榄岩由方辉橄榄岩和纯橄岩组成，岩石基本上已经强烈蛇纹石化，与北部的变质砂岩地层为断层接触。

米兰红柳沟的熔岩在红柳泉附近最为发育，由厚约 1500m 的枕状熔岩和块状熔岩组成，熔岩的产出特征反映在岩性剖面中(图 2C，剖面位置见图 1C)。熔岩为灰绿色，岩枕大小不一，大者可达到 1.5m，小者 0.1m 左右，岩枕保持完好形态，岩石变形较弱，变质程度也仅仅为绿片岩相(图 3B)。枕状熔岩中也常见一些块状或层状熔岩流，两者之间为连续渐变，但块状熔岩的数量明显少于枕状熔岩(图 3C)。这套枕状熔岩为主的熔岩层以高 TiO_2 为特征，具有洋岛玄武岩(OIB)的特点(刘良等，1999；吴峻等，2002)。岩枕或熔岩流之间经常可以见到紫红色的硅质岩的夹层或透镜体，或被构造破碎了的硅质岩岩块(图 3A)。熔岩层的南界与阿尔金群的马特克布拉克组呈断层接触；其北界与强烈蛇纹石化的方辉橄榄岩断层接触，该橄榄岩岩块之北还是熔岩，它们均以构造岩块产出；剖面的最北部出现一套紫红色的安山质熔岩(图 2C)。

3　米兰红柳沟的变质橄榄岩

3.1　岩相学和矿物学特征

米兰红柳沟变质橄榄岩主要由方辉橄榄岩和少量纯橄岩组成，未见二辉橄榄岩。岩石有较强蛇纹石化，但部分岩石中保留橄榄石、斜方辉石及尖晶石类新鲜矿物。

方辉橄榄岩中橄榄石为中粗粒，多数已蛇纹石化；但局部有密集状保留，但也已被蛇纹石化成为孤岛状残晶(图 4A)。6 个方辉橄榄岩样品的 43 个橄榄石的电子探针成分分析(表略)，显示橄榄石的 Fo 主要变化于两个期间，第一个区间有 37 个数据，Fo 变化于 89 ~92，平均 90.5，第二个区间有 8 个分析，Fo 变化于 93.3 ~95.5，平均 Fo 94.6。显微镜下观察表明第一组为粗粒橄榄石蚀变为较大的孤岛状残晶，第二组是微细的橄榄石，尽管也被后期蚀变作用影响，但基本上可以看出呈脉状分布，说明可能是早期地幔交代作用的产物。

斜方辉石含量一般 10% ~20%，多者达 30%，粒度较粗，大者 1cm 之上。斜方辉石普遍蚀变为绢石，有些核部保留辉石的残晶；另有些辉石被蛇纹石细脉切割后也呈孤岛状残留。3 个样品的 22 个斜方辉石的成分分析(表略)，显示一个较小变化的稳定成分区间，SiO_2 含量 56.2% ~57.5%，平均 56.8%；Al_2O_3 0.9% ~2.5%，平均 1.6%；Cr_2O_3 平均 0.84%；CaO 平均 1.4%；MgO 32.3% ~33.9%，平均 33.2%，$Mg^{\#}$ 值平均 90.9，属于蛇绿岩地幔岩中常见的，但基性程度较高的类型。Al_2O_3 的含量与高压相的石榴石橄榄岩中的明显不同，后者小于 1%，通常 0.5% 左右。

铬尖晶石含量一般 1% ~2%，自形晶为主，在蛇纹岩中则成残晶，港湾状或骸晶状，或被包裹在斜方辉石中。共测得 6 个方辉橄榄岩样品的 55 个硅尖晶石的成分分析(表略)。Cr_2O_3 含量有一个较大的变化区间，主要变化于 41% ~54% 之间，该变化主要表现在样品之间的差别，而非铬尖晶石的蚀变结果。与之变化一致的是 MgO 的含量，变化区间为 10% ~14%，多数情况下，Cr_2O_3 含量高，则 MgO 含量低，

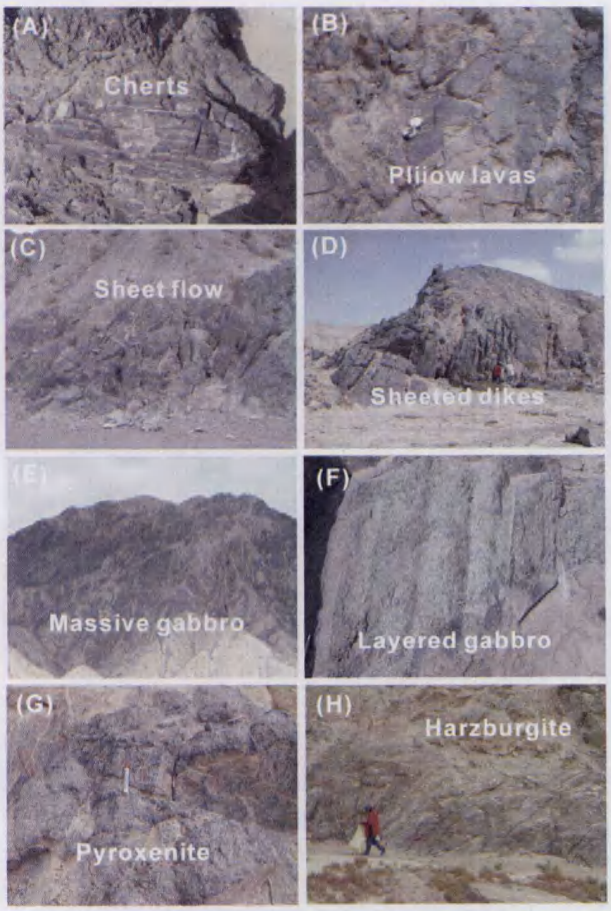


图3 米兰红柳沟蛇绿岩及有关岩石单元的野外照片

(A)枕状熔岩中的硅质岩;(B)枕状熔岩;(C)席状熔岩流;(D)席状岩墙群;(E)块状辉长岩;(F)堆晶成因的层状辉长岩;(G)堆晶成因的辉石岩;(H)块状的方辉橄榄岩

Fig. 3 Field occurrences of different lithologic units of the Hongliugou ophiolite in Milan, North Altun

(A) chert within pillow lavas; (B) pillow lavas; (C) sheet flow; (D) sheeted dikes; (E) massive gabbro; (F) cumulated layered gabbro; (G) cumulated pyroxenite; (H) massive harzburgite

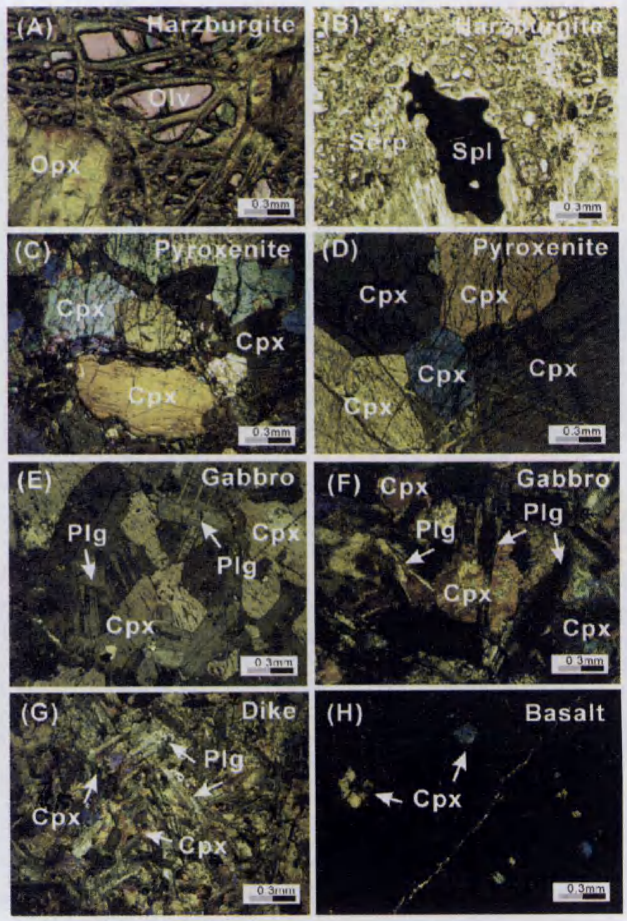


图4 米兰红柳沟蛇绿岩的不同岩性单元的显微镜下照片

(A)—(B)方辉橄榄岩;(C)—(D)单斜辉石岩;(E)—(F)辉长岩;(G)辉绿岩墙;(H)玄武岩;Olv-橄榄石;Spl-尖晶石;Serp-蛇纹石;Opx-斜方辉石;Cpx-单斜辉石;Plg-斜长石

Fig. 4 Microphotographs of ophiolitic rocks in the Hongliugou ophiolite in Milan, North Altun

(A)-(B) harzburgite; (C)-(D) clinopyroxenite; (E)-(F) gabbro; (G) sheeted dikes; (H) basalt; Olv-olivine; Spl-spinel; Cpx-clinopyroxene; Plg-plagioclase

但两者不存在线性关系。在 $Mg^{\#}$(=Mg/(Mg+Fe)*100)与 $Cr^{\#}$(=Cr/(Cr+Al)*100)的变异图中(图5),铬尖晶石属于高 Cr 型,$Cr^{\#}$值变化于 50~70 之间,$Mg^{\#}$值变化于 40~60 之间,反映出深海地幔橄榄岩(Abyssal Peridotite)并岛弧环境特征。

3.2 岩石成分特征

本研究共分析了 42 件岩石样品的全分析,包括主元素、微量元素和稀土元素。分析测试在国家地质测试中心完成,分析方法和使用的相关仪器及误差参考文献(杨经绥等,2002)。其中测得 9 件方辉橄榄岩样品的岩石化学成分(表1)。

岩石中挥发分含量达 10%~13%,反映岩石的蛇纹石化程度较高。经去掉挥发分重新换算,显示米兰红柳沟的超镁铁岩有高的 MgO 含量,变化于 44%~46%,和低的 Al_2O_3(0.5%~1%),CaO(0.1%~0.7%),TiO_2(<0.02%)和 K_2O(<0.01%)等氧化物含量,反映岩石的基性程度较高。在 MgO 与其它氧化物的变异图中(图6),超镁铁岩中 MgO 与主元素 SiO_2,以及超镁铁岩与蛇绿岩的其它岩性中的 MgO 与 Al_2O_3 和 TiO_2 显示了一个较好的负相关,说明这些元素的变化与岩石的基性程度有关;Cr_2O_3 含量 0.32%~0.55%,NiO 0.25%~0.31%,为普通方辉橄榄岩的成分特点。

对于微量元素说来,蛇纹石化作用通常会影响 Rb、Sr、Ba 和 U 含量的变化,而 Nb、Ta、Th、Hf 的低含量会影响分析的程度,因此,这里选择含量相对较高的微量元素 Zr、Y、Yb、Sc 和

表 1　北阿尔金米兰红柳沟蛇绿岩的岩石化学成分(主量元素：wt%；稀土和微量元素：$\times 10^{-6}$)

Table 1　Representatives of chemical compositions of the rocks from the Hongliugou ophiolite in Milan, North Altun (Major elements: wt%; trace elements: $\times 10^{-6}$)

编号	K28-41	K28-42	K28-52	K28-55	K28-56	K28-78	K28-77	K28-74	K29-10	03Y26-1	03Y26-2	03Y26-5	03Y26-6	03Y26-7
岩石	方辉橄榄岩	方辉橄榄岩	方辉橄榄岩	方辉橄榄岩	方辉橄榄岩	方辉橄榄岩	方辉橄榄岩	方辉橄榄岩	方辉橄榄岩	橄榄辉石岩	橄榄辉石岩	橄榄辉石岩	橄榄辉石岩	橄榄辉石岩
SiO_2	40.36	41.21	39.40	41.58	41.35	38.51	41.15	40.97	40.53	49.29	49.55	47.53	47.46	48.05
TiO_2	0.015	0.016	0.011	0.021	0.019	0.007	0.006	0.008	0.013	0.09	0.14	0.08	0.09	0.09
Al_2O_3	0.77	0.81	0.66	0.63	0.75	0.44	0.87	0.65	0.43	2.62	2.92	2.30	2.57	2.73
Cr_2O_3	0.41	0.39	0.38	0.28	0.42	0.48	0.34	0.29	0.39					
TFe_2O_3	6.68	7.19	7.29	5.98	6.07	7.58	5.62	5.35	6.70	5.24	5.08	5.88	5.83	5.39
FeO	2.09	3.07	2.37	1.90	1.98	2.12	1.60	1.31	1.99					
MnO	0.09	0.10	0.10	0.06	0.11	0.09	0.09	0.09	0.04	0.10	0.10	0.10	0.10	0.10
MgO	38.26	39.67	39.99	38.94	40.06	40.16	38.39	39.84	38.00	22.14	20.99	24.26	24.24	22.79
CaO	0.63	0.72	0.35	0.19	0.13	0.27	0.09	0.14	0.33	17.99	18.64	15.84	15.80	16.85
Na_2O	0.067	0.073	0.037	0.018	0.019	<0.004	0.019	<0.004	0.040	0.06	0.12	0.04	0.04	0.04
K_2O	0.009	0.008	0.006	0.004	0.002	0.003	0.005	0.002	0.005	0.06	0.06	0.05	0.05	0.06
P_2O_5	<0.1	<0.1	<0.1	<0.1	<0.1	<0.1	<0.1	<0.1	<0.1	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01
NiO	0.22	0.23	0.24	0.23	0.23	0.25	0.22	0.24	0.27					
LOI	11.96	9.89	12.31	11.61	10.71	12.78	12.68	12.64	13.20	1.74	1.60	3.55	3.27	2.94
Total	99.47	100.31	100.77	99.54	99.87	100.57	99.48	100.21	99.95	99.32	99.22	99.64	99.46	99.03
La	3.97	5.40	4.93	0.95	0.12	5.15	1.34	0.59	0.97	0.30	0.35	0.15	0.28	0.26
Ce	7.23	10.07	9.39	2.40	2.65	14.10	3.17	1.41	2.04	0.73	1.04	0.41	0.63	0.67
Pr	0.88	1.20	1.10	0.27	0.28	1.94	0.36	0.14	0.21	0.10	0.16	0.07	0.09	0.10
Nd	3.17	4.50	3.77	0.96	0.90	8.13	1.43	0.60	0.82	0.56	0.94	0.40	0.45	0.48
Sm	0.59	0.93	0.74	0.22	0.15	1.97	0.25	0.12	0.13	0.23	0.34	0.15	0.19	0.20
Eu	0.20	0.24	0.20	0.11	0.12	0.70	0.16	0.07	0.11	0.07	0.12	0.06	0.06	0.07
Gd	0.54	0.70	0.60	0.091	0.13	1.58	0.19	0.08	0.10	0.28	0.44	0.26	0.24	0.29
Tb	0.10	0.14	0.11	0.027	0.04	0.32	0.03	0.03	0.03	0.05	0.07	0.04	0.04	0.05
Dy	0.45	0.69	0.57	0.120	0.15	1.83	0.12	0.07	0.11	0.35	0.56	0.34	0.33	0.35
Ho	0.11	0.16	0.14	0.025	0.03	0.43	0.03	0.02	0.03	0.08	0.12	0.07	0.07	0.08
Er	0.19	0.28	0.25	0.059	0.07	0.79	0.06	0.03	0.06	0.25	0.36	0.22	0.21	0.22
Tm	0.035	0.047	0.042	0.009	0.013	0.140	0.006	0.005	0.013	0.03	0.05	0.03	0.03	0.03
Yb	0.230	0.360	0.280	0.075	0.085	0.890	0.053	0.047	0.089	0.20	0.29	0.17	0.17	0.19
Lu	0.032	0.056	0.037	0.009	0.016	0.120	0.013	0.007	0.011	0.03	0.05	0.02	0.03	0.03
$(La/Ce)_N$	1.43	1.39	1.37	1.03	0.12	0.95	1.10	1.09	1.24	1.05	0.88	0.96	1.14	1.02
$(La/Sm)_N$	4.14	3.58	4.10	2.66	0.49	1.61	3.30	3.03	4.60	0.78	0.64	0.60	0.89	0.81
$(Sm/Yb)_N$	11.42	9.92	11.64	8.38	0.93	3.83	16.72	8.30	7.21	0.99	0.78	0.60	1.06	0.92
Y	2.30	2.97	2.32	0.50	0.73	3.03	0.52	0.37	0.82	1.94	3.01	1.72	1.76	1.93
Sc	6.33	7.66	6.99	6.99	11.30	7.33	8.99	6.66	5.66	46.72	47.60	50.99	50.53	53.34
Rb	0.28	0.17	<0.01	<0.01	<0.01	<0.01	0.75	<0.01	<0.01	0.39	0.75	0.31	0.32	0.35

续表 1

Continoued Table 1

编号	K28-41	K28-42	K28-52	K28-55	K28-56	K28-78	K28-77	K28-74	K29-10	03Y26-1	03Y26-2	03Y26-5	03Y26-6	03Y26-7
岩石	方辉橄榄岩	方辉橄榄岩	方辉橄榄岩	方辉橄榄岩	方辉橄榄岩	方辉橄榄岩	方辉橄榄岩	方辉橄榄岩	方辉橄榄岩	橄榄辉石岩	橄榄辉石岩	橄榄辉石岩	橄榄辉石岩	橄榄辉石岩
Sr	19.60	13.80	15.00	11.50	7.06	18.50	6.57	6.47	10.34	11.98	11.79	7.44	6.88	8.29
Ba	39.00	39.50	41.30	33.80	32.20	36.20	32.20	29.60	31.70	1.34	4.16	1.39	2.47	2.62
Zr	0.28	1.32	0.37	0.18	0.20	0.27	0.40	0.28	<0.01	1.93	1.93	1.09	1.42	1.95
Nb	0.15	<0.01	<0.01	<0.01	<0.01	0.10	<0.01	<0.01	0.22	0.32	0.14	0.07	0.12	0.09
Ta	<0.01	<0.01	<0.01	<0.01	<0.01	<0.01	<0.01	<0.01	0.35	0.02	0.02	0.01	0.02	0.01
U	0.08	<0.01	<0.01	0.52	<0.01	<0.01	<0.01	<0.01	<0.01	0.08	0.12	0.14	0.11	0.10
Th	<0.01	0.20	<0.01	<0.01	0.37	<0.01	0.15	0.18	0.30	0.13	0.14	0.16	0.17	0.17
Hf	0.28	0.37	<0.01	<0.01	<0.01	<0.01	0.25	<0.01	0.32	0.05	0.08	0.04	0.05	0.06
V	36.60	40.50	33.50	26.20	35.70	34.80	29.30	27.50	13.20	100.51	110.84	103.04	104.63	109.79
Cr										3694.50	3828.93	1925.48	1931.24	2151.44
Co	88.40	105.50	95.80	84.50	102.70	111.80	97.20	92.50	91.30	52.67	46.21	64.88	64.36	59.25
Ni										469.50	381.98	341.28	354.31	334.93

编号	03Y26-8	03Y26-9	03Y26-10	03Y26-11	03Y26-12	03Y26-13	03Y26-14	03Y26-15	03Y26-16	03Y26-17	03Y26-18	03Y26-19	03Y26-20	03Y26-21
岩石	橄榄辉石岩	橄榄辉石岩	橄榄辉石岩	辉长岩	辉长岩	橄榄辉石岩	橄榄辉石岩	橄榄辉石岩	橄榄辉石岩	橄榄辉石岩	辉长岩	辉长岩	橄榄辉石岩	辉长岩
SiO_2	47.50	48.44	49.20	42.16	42.75	47.30	47.14	48.80	48.62	50.78	40.95	42.95	45.30	42.23
TiO_2	0.10	0.13	0.13	0.09	0.09	0.15	0.64	0.11	0.11	0.13	0.03	0.09	0.10	0.07
Al_2O_3	2.81	2.89	2.78	17.98	17.31	7.07	15.31	3.63	3.58	2.79	26.61	20.08	3.58	21.43
Cr_2O_3														
TFe_2O_3	5.93	7.14	6.77	5.45	5.87	7.06	9.36	6.31	6.46	4.80	4.06	5.06	9.59	5.13
MnO	0.11	0.15	0.15	0.10	0.09	0.12	0.16	0.11	0.11	0.11	0.08	0.09	0.10	0.09
MgO	24.08	20.69	20.38	11.91	12.30	16.66	10.30	19.76	20.02	18.34	7.20	10.80	23.54	10.71
CaO	15.66	17.11	17.85	17.37	16.61	19.08	13.60	18.68	18.26	20.40	15.53	16.18	11.96	15.93
Na_2O	0.05	0.04	0.05	0.22	0.42	0.04	1.52	0.05	0.03	0.12	0.76	0.56	0.03	0.46
K_2O	0.06	0.05	0.05	0.24	0.08	0.06	0.37	0.06	0.06	0.06	0.48	0.24	0.06	0.18
P_2O_5	0.01	0.01	0.01	0.00	0.01	0.00	0.16	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01
NiO														
LOI	3.07	2.60	1.96	4.88	4.11	2.56	1.67	1.93	2.00	1.57	4.78	4.08	5.34	4.38
Total	99.37	99.24	99.33	100.41	99.63	100.12	100.24	99.46	99.25	99.10	100.49	100.15	99.59	100.64
La	0.37	0.12	0.17	0.11	0.16	0.21	8.89	0.16	0.17	0.56	0.15	0.17	0.10	0.16
Ce	0.98	0.46	0.48	0.29	0.41	0.68	21.63	0.51	0.54	1.65	0.32	0.35	0.33	0.32
Pr	0.14	0.08	0.08	0.05	0.07	0.12	2.74	0.09	0.10	0.23	0.04	0.05	0.06	0.05
Nd	0.75	0.58	0.50	0.26	0.34	0.73	11.84	0.54	0.55	1.18	0.19	0.33	0.36	0.27
Sm	0.24	0.26	0.26	0.12	0.15	0.30	2.74	0.20	0.18	0.38	0.06	0.13	0.16	0.12
Eu	0.08	0.10	0.09	0.07	0.07	0.11	0.86	0.08	0.08	0.13	0.06	0.08	0.05	0.08

续表 1

Continoued Table 1

编号	03Y26-8	03Y26-9	03Y26-10	03Y26-11	03Y26-12	03Y26-13	03Y26-14	03Y26-15	03Y26-16	03Y26-17	03Y26-18	03Y26-19	03Y26-20	03Y26-21
岩石	橄榄辉石岩	橄榄辉石岩	橄榄辉石岩	辉长岩	辉长岩	橄榄辉石岩	橄榄辉石岩	橄榄辉石岩	橄榄辉石岩	橄榄辉石岩	辉长岩	辉长岩	橄榄辉石岩	辉长岩
Gd	0.35	0.41	0.40	0.17	0.19	0.42	3.05	0.28	0.32	0.52	0.08	0.18	0.20	0.15
Tb	0.05	0.08	0.08	0.03	0.03	0.07	0.41	0.04	0.05	0.08	0.01	0.03	0.04	0.03
Dy	0.41	0.61	0.58	0.22	0.25	0.46	2.99	0.36	0.36	0.62	0.08	0.21	0.28	0.19
Ho	0.09	0.14	0.14	0.05	0.06	0.10	0.67	0.08	0.08	0.14	0.02	0.05	0.06	0.04
Er	0.26	0.41	0.40	0.13	0.14	0.29	1.84	0.23	0.22	0.40	0.05	0.15	0.18	0.12
Tm	0.04	0.06	0.05	0.02	0.02	0.05	0.27	0.03	0.03	0.05	0.01	0.02	0.02	0.02
Yb	0.22	0.33	0.36	0.10	0.13	0.24	1.72	0.17	0.18	0.35	0.04	0.11	0.16	0.10
Lu	0.04	0.06	0.06	0.02	0.02	0.04	0.27	0.03	0.03	0.05	0.01	0.02	0.02	0.02
$(La/Ce)_N$	0.98	0.69	0.90	0.96	0.99	0.81	1.07	0.84	0.82	0.89	1.25	1.25	0.78	1.35
$(La/Sm)_N$	0.95	0.29	0.40	0.55	0.66	0.43	2.00	0.50	0.58	0.90	1.51	0.84	0.39	0.88
$(Sm/Yb)_N$	1.10	0.24	0.31	0.69	0.79	0.60	3.42	0.64	0.65	1.06	2.30	1.03	0.40	1.14
Y	2.20	3.24	3.16	1.11	1.31	2.64	16.55	1.81	1.80	3.44	0.41	1.11	1.42	0.96
Sc	49.20	64.34	66.39	42.42	42.97	82.09	43.96	73.91	75.14	64.90	12.72	39.39	57.39	32.26
Rb	0.39	0.38	0.29	6.54	0.87	0.20	4.76	0.44	0.40	0.37	18.83	7.76	0.32	5.08
Sr	9.92	7.13	6.40	131.07	119.85	27.82	208.54	10.75	10.89	11.66	247.03	179.38	11.22	182.96
Ba	2.40	0.51	0.18	29.12	5.19	1.35	95.38	2.44	2.17	1.60	79.51	43.41	0.97	18.39
Ba	2.64	1.15	1.15	0.49	0.64	1.44	24.94	1.03	1.03	2.68	0.32	0.60	0.69	0.45
Nb	0.07	0.02	0.05	0.04	0.04	0.03	4.83	0.04	0.04	0.09	0.20	0.03	0.03	0.02
Ta	0.02	0.01	0.06	0.02	0.03	0.01	0.15	0.01	0.02	0.02	0.06	0.02	0.02	0.01
U	0.07	0.06	0.06	0.08	0.06	0.10	0.22	0.08	0.07	0.08	0.07	0.07	0.06	0.07
Th	0.15	0.09	0.10	0.09	0.09	0.09	0.47	0.10	0.10	0.12	0.09	0.09	0.08	0.09
Hf	0.08	0.06	0.06	0.02	0.02	0.07	0.71	0.05	0.04	0.09	0.01	0.03	0.04	0.02
V	103.67	174.49	180.32	110.45	124.60	214.66	211.22	186.30	194.29	139.31	41.78	123.07	160.35	80.89
Cr	1923.23	2563.83	2469.78	252.18	296.01	813.97	414.19	1688.84	1682.00	3164.67	81.90	197.36	1310.09	117.94
Co	65.98	59.04	54.68	46.44	44.07	53.20	48.03	59.88	63.02	43.41	32.70	41.61	98.75	40.40
Ni	376.81	217.03	184.04	108.97	135.80	141.98	135.54	286.11	295.67	339.06	99.99	94.06	381.23	69.90
编号	03Y26-22	03Y26-23	03Y26-24	K29-9	K28-95	K28-96	K28-22	K28-23A	K28-24A	K28-2	K28-6	K28-64	K28-65	K29-11
岩石	橄榄辉石岩	橄榄辉石岩	异剥橄榄岩	辉长岩	辉长岩	辉长岩	辉绿岩	辉绿岩	辉绿岩	玄武岩	玄武岩	玄武岩	玄武岩	玄武岩
SiO_2	48.72	50.92	42.22	48.49	52.71	50.63	47.92	49.12	48.54	47.83	49.00	48.71	48.58	45.52
TiO_2	0.12	0.14	0.05	2.690	0.200	0.140	1.380	1.040	1.080	1.500	1.160	1.120	1.220	1.070
Al_2O_3	3.67	3.30	1.44	14.66	3.71	4.42	14.23	15.51	15.32	14.03	15.06	15.00	14.80	13.89
Cr_2O_3					0.15									
TFe_2O_3	6.09	4.73	8.94	14.04	5.86	5.44	11.96	10.13	10.42	12.74	10.90	10.85	11.41	10.05
TFe_2O_3				10.27	4.30	3.57	9.07	7.72	7.96	9.60	8.53	8.47	9.07	7.96
MnO	0.11	0.11	0.07	0.17	0.12	0.11	0.16	0.16	0.16	0.21	0.18	0.20	0.20	0.18
MgO	18.64	18.46	32.06	5.98	18.16	18.06	8.20	8.25	8.39	7.67	7.73	7.74	7.70	7.28
CaO	19.45	20.35	7.02	6.05	17.72	17.86	11.55	11.73	11.28	11.35	11.68	10.87	11.31	18.41

续表 1

Continoued Table 1

编号	03Y26-22	03Y26-23	03Y26-24	K29-9	K28-95	K28-96	K28-22	K28-23A	K28-24A	K28-2	K28-6	K28-64	K28-65	K29-11
岩石	橄榄辉石岩	橄榄辉石岩	异剥橄榄岩	辉长岩	辉长岩	辉长岩	辉绿岩	辉绿岩	辉绿岩	玄武岩	玄武岩	玄武岩	玄武岩	玄武岩
Na_2O	0.05	0.16	0.01	4.320	0.240	0.230	3.000	2.710	2.910	3.040	3.010	3.250	2.870	0.280
K_2O	0.06	0.07	0.06	0.640	0.056	0.090	0.190	0.150	0.160	0.260	0.160	0.330	0.260	0.081
K_2O	0.01	0.01	0.01	0.27	<0.1	<0.1	0.11	0.10	0.09	0.09	0.11	0.09	0.10	0.07
NiO														
LOI	2.22	1.27	8.32	3.26	1.86	2.63	1.29	1.18	1.68	1.06	1.57	1.58	1.23	2.99
Total	99.13	99.51	100.18	100.57	100.64	99.76	99.99	100.08	100.03	99.78	100.56	99.74	99.68	99.82
La	0.16	0.46	0.13	19.80	5.15	6.43	8.17	6.39	3.50	5.97	3.20	4.67	4.00	10.39
Ce	0.56	1.43	0.36	44.27	14.10	14.63	17.43	14.40	9.10	15.30	9.13	12.53	11.87	22.09
Pr	0.09	0.22	0.06	6.83	1.94	1.75	2.78	1.98	1.23	2.10	1.33	1.74	1.60	3.00
Nd	0.54	1.18	0.28	29.02	8.13	6.80	10.12	8.33	5.77	9.90	6.77	7.37	7.40	12.17
Sm	0.20	0.41	0.10	6.36	1.97	1.58	2.97	2.42	1.86	2.80	2.22	2.70	2.10	3.67
Eu	0.08	0.13	0.04	2.11	0.70	0.49	1.13	1.06	0.63	1.17	1.06	0.74	1.03	1.15
Gd	0.31	0.51	0.16	4.72	1.58	1.30	4.00	3.03	2.30	3.93	2.88	2.92	2.90	3.88
Tb	0.05	0.08	0.03	0.94	0.32	0.24	0.73	0.55	0.42	0.67	0.59	0.54	0.51	0.70
Dy	0.40	0.66	0.18	5.45	1.83	1.26	4.30	3.57	2.78	4.76	3.73	3.67	4.15	4.13
Ho	0.09	0.15	0.05	1.18	0.43	0.32	1.27	1.03	0.72	1.33	1.10	1.13	1.16	1.14
Er	0.23	0.42	0.13	2.12	0.79	0.52	2.300	1.94	1.50	2.45	2.07	2.02	2.13	2.15
Tm	0.03	0.06	0.02	0.370	0.140	0.082	0.430	0.350	0.250	0.460	0.390	0.310	0.370	0.380
Yb	0.21	0.38	0.11	2.100	0.890	0.550	2.830	2.290	2.070	3.280	2.670	2.860	2.450	2.490
Lu	0.03	0.06	0.02	0.320	0.120	0.071	0.45	0.370	0.290	0.470	0.400	0.380	0.410	0.370
$(La/Ce)_N$	0.75	0.84	0.93	1.16	0.95	1.14	1.22	1.15	1.00	1.01	0.91	0.97	0.88	1.22
$(La/Sm)_N$	0.49	0.69	0.76	1.92	1.61	2.51	1.69	1.63	1.16	1.31	0.89	1.07	1.17	1.74
$(Sm/Yb)_N$	0.52	0.80	0.79	6.24	3.83	7.73	1.91	1.85	1.12	1.20	0.79	1.08	1.08	2.76
Y	2.00	3.58	1.01	23.57	9.17	7.82	14.07	10.43	6.77	10.10	9.67	17.80	13.30	21.75
Sc	81.35	63.05	23.98	34.60	47.30	38.60	42.60	36.00	40.00	38.30	38.30	41.50	40.30	32.00
Rb	0.33	1.26	0.31	24.30	0.87	0.50	1.15	1.67	2.23	2.10	1.77	17.30	9.42	1.60
Sr	11.80	14.95	4.66	270.70	24.80	47.60	160.30	144.50	157.10	128.40	135.00	137.50	150.40	32.50
Ba	1.88	3.36	0.65	367.70	131.00	131.10	201.20	198.90	204.70	215.40	198.70	232.70	211.20	202.40
Ba	1.01	3.45	1.06	126.30	22.30	10.00	66.00	54.30	62.20	78.40	63.70	74.80	70.70	60.80
Nb	0.03	0.05	0.03	19.70	0.92	0.42	5.82	5.25	5.10	5.80	5.43	6.17	4.83	4.32
Ta	0.02	0.01	0.01	1.13	<0.01	0.23	0.50	0.30	0.40	0.30	1.68	1.12	0.30	
U	0.07	0.07	0.07	0.65	0.22	<0.01	0.07	0.06	0.20	0.22	0.25	<0.01	<0.01	0.75
Th	0.09	0.11	0.09	2.23	0.97	0.97	0.47	0.52	1.13	0.80	0.77	0.33	0.68	0.95
Hf	0.05	0.10	0.03	2.68	0.30	<0.01	1.78	1.35	1.48	2.20	1.83	1.02	1.77	1.97
V	212.60	145.41	48.91	452.80	123.30	112.30	310.00	258.40	259.20	299.00	318.40	331.70	301.70	348.30
Cr	1616.78	3222.17	1787.13	284.90	920.70		241.00	410.60	415.30	270.00	388.10	328.10	37.00	237.50
Co	56.87	38.87	103.01	52.80	45.20	50.50	40.00	39.30	40.50	37.00	44.20	50.00	52.70	44.80
Ni	246.11	214.87	801.20	105.80	224.80	228.70	56.80	110.70	113.60	57.03	80.50	90.00	86.40	76.40

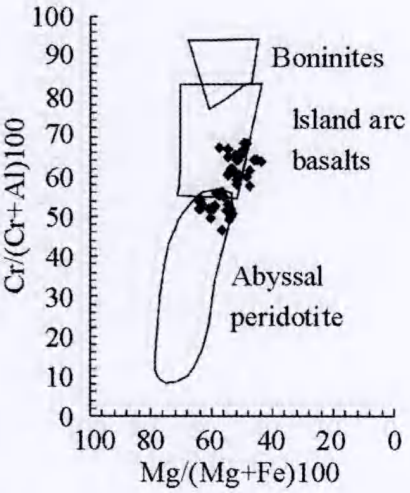


图 5　米兰红柳沟蛇绿岩地幔橄榄岩的尖晶石成分显示深海橄榄岩和岛弧环境的橄榄岩特征（据 Dick and Bullen，1984）

Fig. 5　Spinel compositions from mantle peridotite from the Hongliugou ophiolite plotted on the Mg/(Mg + Fe) vs Cr/(Cr + AL) diagram of Dick and Bullen (1984)

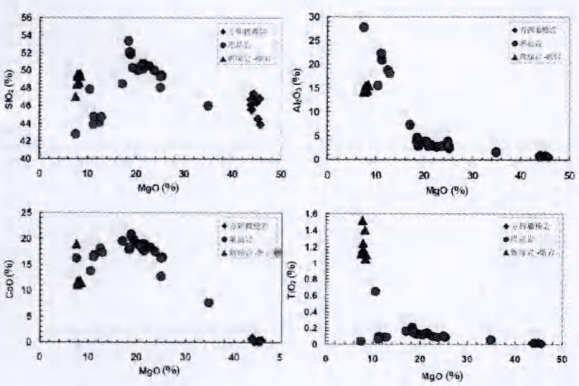


图 6　米兰红柳沟蛇绿岩不同岩石的主元素成分特征

Fig. 6　MgO vs SiO_2, Al_2O_3, CaO and TiO_2 diagrams of different rock types from the Hongliugou ophiolite

Cr、Ni、V 和 Co 用于讨论。反映在 MgO 与它们的丰度变异图上（图 7），Cr、Ni 和 Co 与 MgO 的正相关及 V 与 MgO 的负相关，说明与岩石中尖晶石及橄榄石含量的变化有关（Dick and Bullen，1984）。Zr、Y、Yb 及 Sc 不仅仅含量低，并且十分集中，反映了经部分熔融后残余地幔岩岩石的的不相容元素变化程度小，这个特点与主元素 Si、Al、Ti 变化小相一致，并说明岩石的亏损程度高。

米兰红柳沟橄榄岩的稀土元素球粒陨石标准化模式为 LREE 富集型（图 8）。根据稀土元素丰度，又可以分为两个组，一组的样品分别为 K29－41、42、52、78，二组为 K28－55、56、77、74 和 K29－10。前者的 REE 丰度变化于 17.7×10^{-6} ~ 24.7×10^{-6}，后者变化于 3.2×10^{-6} ~ 7.2×10^{-6}，差别是十分显著的。根据镜下观察，前者为含较多橄榄石的新鲜橄榄岩，并含一定量的单斜辉石（<5%），成分特征表现为 CaO 略高 0.27% ~ 0.72%，TFe_2O_3 也略高，为 7.58% ~ 6.68%；后者为全蛇纹石化橄榄岩，可识别出一些绢石，原岩少单斜辉石，岩石并有较高程度碳酸盐化，成分上表现低 CaO，为 0.09% ~ 0.19%，也低 TFe_2O_3，为 5.35% ~ 6.70%。由此看来，高 REE 含量与岩石中较多的单斜辉石含量有关，而 LREE 富集的橄榄岩则被解释是因为橄榄石含量高（Ferry and Spear，1978），反映原始地幔特征。

4　米兰红柳沟的堆晶岩类

4.1　岩相学和矿物特征

堆晶岩的类型有异剥橄榄岩、（橄榄）单辉辉石岩，橄榄二辉辉石岩、含长辉石岩和层状辉长岩等。

易剥橄榄岩：黑绿色，岩石较新鲜，块状构造，他形—半自形等粒状结构。由新鲜的异剥辉石（透辉石）和中等程度蛇纹石化的橄榄石组成，异剥辉石他形—半自形，含量为 15% ~ 40%，$Mg^{\#}$ = 85.5 ~ 92.1，其矿物端员组分为 En = 45.1 ~ 48.8、Fs = 3.9 ~ 7.4、Wo = 47.4 ~ 50.0，为透辉石，橄榄石他形—半自形，含量 60% ~ 85%，Fo = 87.4 ~ 91.3。

（橄榄）单辉辉石岩：黑绿色，较新鲜，块状构造，半自形—自形等粒粒状结构（图 4C，4D。由新鲜的橄榄石和单斜辉石组成，大部分单斜辉石为自形晶、粒径约 2mm ~ 5mm，含量 65% ~ 80%，$Mg^{\#}$ = 85.8 ~ 92.6，其矿物端员组分为 En = 43.5 ~ 47.8、Fs = 3.9 ~ 7.0、Wo = 47.3 ~ 50.0，为透辉石。橄榄石呈他形—半自形粒状集合体充填在单斜辉石颗粒之间，显示其结晶晚于单斜辉石，含量 20% ~ 35%，Fo = 87.7 ~ 89.1。

橄榄二辉辉石岩：黑绿色，较新鲜，块状构造，半自形—自形等粒粒状结构，主要由单斜辉石、斜方辉石和橄榄石组成，单斜辉石自形程度高于斜方辉石和橄榄石。橄榄石含量为 5% ~ 35%，Fo = 81.6 ~ 88.5，单斜辉石含量 35% ~ 55%，$Mg^{\#}$ = 87.1 ~ 92.9，其矿物端员组分为 En = 43.6 ~ 47.8、Fs = 3.9 ~ 6.8、Wo = 46.3 ~ 49.9，为透辉石，斜方辉石含量 10% ~ 30%，$Mg^{\#}$ = 80.5 ~ 87.7，其矿物端员组分为 En = 79.5 ~ 86.7、Fs = 12.2 ~ 19.6、Wo = 0.7 ~ 1.27，为顽火辉石。

堆晶辉长岩：主要由成带状分布的单斜辉石和斜长石组成，显示堆晶结构，单斜辉石颗粒的边缘有轻度绿泥石化，其 $Mg^{\#}$ = 82.5 ~ 83.9，端员组分 En = 41.3 ~ 42.8、Fs = 8.0 ~ 9.1、Wo = 46.6 ~ 48.9，为透辉石，大部分斜长石发生钠黝帘石化，其 An = 94.1 ~ 98.5，为钙长石。另见层状辉长岩和含单斜辉石的斜长岩的过渡。前者主要由单斜辉石和斜长石组成，由下而上随着单斜辉石的减少而过渡为斜长岩。它们的大部分单斜辉石发生绿泥石化，斜长石发生钠黝帘石化，单斜辉石的 $Mg^{\#}$ = 74.2 ~ 80.5，在堆晶岩中其 $Mg^{\#}$ 最低，端员组分 En = 38.5 ~ 42.5、Fs = 10.1 ~ 12.7、Wo = 46.8 ~ 48.9，为次透辉石。

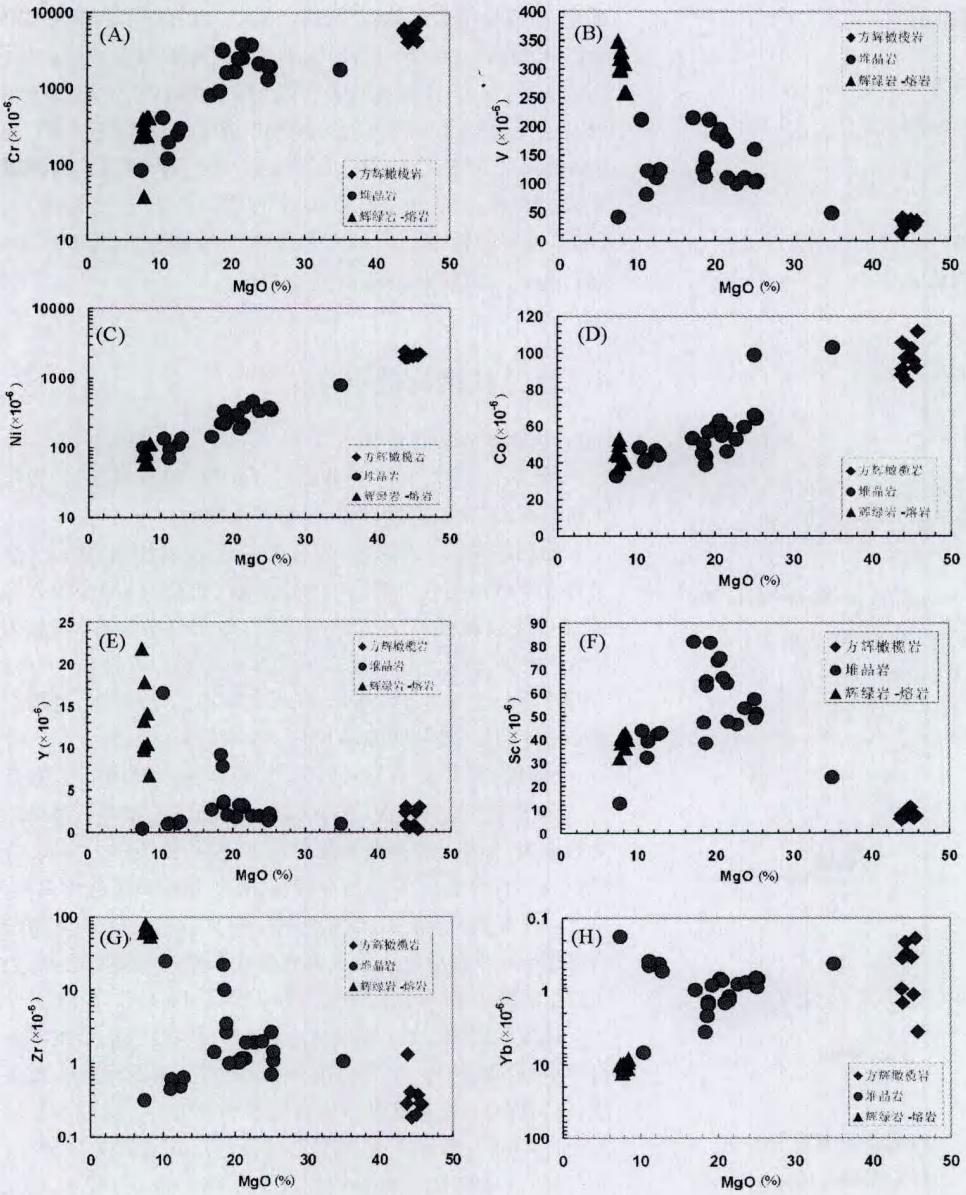


图7 米兰红柳沟蛇绿岩不同岩石类型的微量元素特征

Fig. 7 MgO vs Cr, V, Ni, Co, Y, Sc, Zr and Yb diagrams of different rock types from the Hongliugou ophiolite

总的来看,从堆晶岩底部的异剥橄榄岩,经橄榄单辉辉石岩+二辉辉石岩,到上部的辉长岩,橄榄石的 Fo、单斜辉石和斜方辉石的 $Mg^{\#}$ 均显示一个从高到低的演化趋势,斜长石的 An 也显示出规律性变化,反映了原始岩浆经历的分异结晶作用。这种异剥橄榄岩—单辉辉石岩—二辉石岩—辉长岩的堆晶岩组合通常被认为形成在俯冲带上(SSZ)环境(Elthon *et al.*, 1982,1992)。

4.2 岩石成分特征

堆晶岩的主元素特点是有一个很大的成分变化区间,其中 SiO_2 变化于 42% ~54%, Al_2O_3 为 1% ~28%, CaO 5% ~20%, MgO 8% ~35%,但我们注意到主元素成分没有显示连续的变化,多数元素均存在成分变化的间断,并且与地幔橄榄岩之间也存在一个很大的 MgO 含量变化的间断(图5)。岩石中 TiO_2、P_2O_5、Na_2O、K_2O 含量普遍较低,其中 TiO_2 主要为 0.03% ~0.2%, P_2O_5 为 0.01%,不含斜长石的堆晶岩(深成岩部分)中的 Na_2O = 0.01% ~0.16%, K_2O = 0.05% ~0.07%,层状辉长岩中的 Na_2O 和 K_2O 含量略高, Na_2O = 0.22% ~0.76%, K_2O = 0.08% ~0.48%。岩石另一个特点是 MgO 含量高;其中异剥橄榄岩中的 MgO 最高,可达

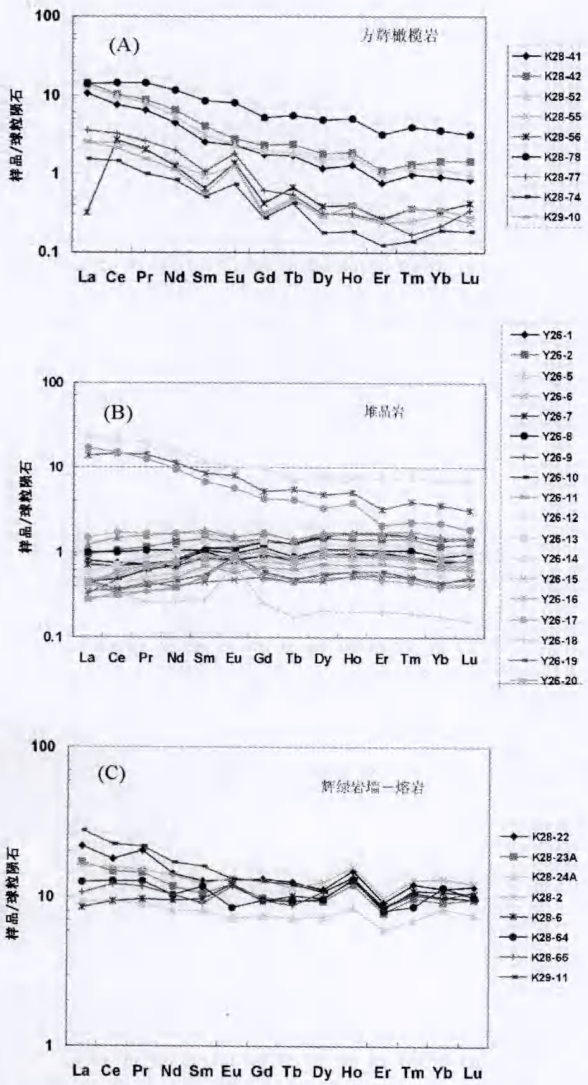


图 8　米兰红柳沟蛇绿岩中地幔橄榄岩(A)、堆晶岩(B)和及熔岩和辉绿岩岩墙(C)的 C1 球粒陨石 REE 标准化的模式

Fig. 8　C1 chondrited REE patterns of the mantle peridotite (A) mafic-ultramafic cumulates (B) and lavas/sheeted dikes (C) from the Hongliugou ophiolite in Milan, North Altun

32.06%；而层状辉长岩中的最低，MgO 介于 7.2% ~ 12.3%；其他岩类中的 MgO 介于 16.66% ~24.24%，显示岩浆结晶分异过程中向贫 MgO 富 FeO 方向演化，这与岩相观察结果是一致的。并且堆晶岩中高 MgO 与高 Cr，Co 和 Ni 一致，显示正相关关系；而不相容元素 Y，Zr 和 Nb 的丰度较低，但 Sc 含量高，甚至高于熔岩(图 7)。

球粒陨石标准化的稀土元素配分模式显示(图 8B)，堆晶岩的深成岩部分可以分为两种类型：LREE 亏损型和平坦型，堆晶岩的上部层状辉长岩具有显著的 Eu 正异常，LREE 亏损型的 HREE 总量高于 C1 球粒陨石，平坦型的 REE 总量为 C1 球粒陨石的 1 ~3 倍不等，辉长岩的 REE 总量均低于 C1 球粒陨石，显示较为亏损的特点。层状辉长岩的大离子亲石元素 Sr、K、Rb、Ba 含量高于堆晶岩的深成岩，高场强元素 Nb、Ta、Th、Zr、Hf、Y、Yb、Sc、Cr 等配分模式较为一致，并且含量也比较接近，显示同源特点，这与堆晶岩之间连续过渡是一致的。样品中的不相容元素含量较低，其原因可能与堆晶岩中大部分矿物是堆积成因，以及岩浆房中堆晶相矿物之间的流体较少有关(Parlak *et al.*，2000)。

5　米兰红柳沟的熔岩和辉绿岩类

本类岩石中主要有辉绿岩类，包括席状岩墙群的辉绿岩或呈岩脉状的侵入体；熔岩类，包括枕状熔岩和块状或席状熔岩流；以及有些不属于堆晶岩的辉长岩，主要为块状或岩脉状。

5.1　岩相学和矿物特征

米兰红柳沟的辉绿岩无论是以岩墙群或呈侵入体出现，均显示较好辉绿结构，斜长石搭格架，辉石充填其中。岩石中有大量新鲜矿物被保留。斜长石总量略高于辉石，An 60 ~70，属拉长石。粒度一般变化于 1mm ~0.5mm 之间，与辉长岩的区别是辉石粒度较细。

米兰红柳沟基性熔岩与辉绿岩相伴。熔岩为拉斑结构，矿物粒度细小，斜长石格架中充填物以细粒辉石为主，有些为玻璃质。熔岩蚀变程度略高些，主要为绿泥石化。但仍可见较新鲜的玄武岩被保留，说明该区岩石未经历过区域变质，绿片岩相的变质系海底热液作用形成。

米兰红柳沟的块状辉长岩较新鲜，保留一部分辉长岩结构，但矿物不同程度遭受海底热液蚀变。矿物粒度均匀，通常 1mm ~2mm，可见辉石和斜长石紧密镶嵌，约各占 50%，辉石粒度较粗，其中可嵌入斜长石，一些辉石退变成角闪石。

5.2　岩石成分特征

米兰红柳沟岩墙群辉绿岩与其相伴的熔岩主要为亚碱性系列，属拉斑玄武岩系列。其成分变化区间小，表现在 TiO_2 约 1% ~1.5%，Al_2O_3 14% ~15%，MgO 7% ~8%，CaO 主要在 11% 左右，K_2O <0.3%，Na_2O 3%，及 P_2O_5 0.1% 左右(表 1)。在 MgO 与其他主元素的变异图上，熔岩和辉绿岩的成分集中，但与堆晶岩的成分变化趋势存在差别，尤其是 TiO_2 的含量存在一个明显的间断(图 6)。相似的特征也出现在 MgO 与微量元素的变异图中，例如，不相容元素 Y、Zr 和 Yb(图 7)。因此，熔岩与堆晶岩之间是否存在的成因方面的联系，值得今后研究中注意。

米兰红柳沟熔岩和岩墙的 REE 总量为 37×10^{-6} ~67×10^{-6}，球粒陨石标准化 $(La/Sm)_N$ 0.86 ~1.74，显示 LREE 平坦型到轻微富集型，其变化反映同岩浆分异作用造成(表 1，图 8C)。在 Ti 与 V 的变异图中，米兰红柳沟的熔岩投在 MORB 区间(图 9)，在 Th-Hf/3-Ta 的三角图中，它们也在

表 2 阿尔金红柳沟辉长岩的锆石 SHRIMP U-Pb 年龄数据

Table 2 U-Th-Pb SHRIMP zircon dating of sample Y-26, northern Altun

测点	U ($\times10^{-6}$)	Th ($\times10^{-6}$)	Th/U	$^{206}Pb/^{238}U$	误差(%)	$^{238}U/^{206}Pb$	误差(%)	$^{208}Pb/^{232}Th$	误差(%)	$^{207}Pb/^{206}Pb$	误差(%)	$^{206}Pb/^{238}U$ (Ma)	误差 (Ma)
Y26-11-1	206.64	133.96	0.65	0.13	2.75	12.70	0.78	0.02	2.01	0.06	2.91	490	3.7
Y26-11-2	234.87	156.18	0.66	0.13	4.60	12.82	0.81	0.02	3.84	0.06	2.30	486	3.7
Y26-11-3	505.74	353.95	0.70	0.13	4.28	12.79	0.55	0.02	1.71	0.06	1.57	486	2.5
Y26-11-4	691.85	843.66	1.22	0.13	3.64	12.77	0.44	0.02	1.86	0.05	1.27	486	2.0
Y26-11-5	404.29	526.36	1.30	0.15	2.65	13.78	0.56	0.02	2.12	0.06	1.62	452	2.5
Y26-11-6	221.71	144.20	0.65	0.13	4.37	13.88	0.83	0.02	3.30	0.05	2.47	450	3.8
Y26-11-7	189.02	111.15	0.59	0.16	2.39	13.33	0.84	0.02	2.64	0.06	2.42	467	4.0
Y26-11-8	243.32	191.05	0.79	0.13	2.66	12.74	0.76	0.02	3.39	0.06	2.16	488	3.5
Y26-11-9	263.02	137.87	0.52	0.14	3.01	13.30	0.73	0.02	2.51	0.05	2.12	468	3.3
Y26-11-10	288.58	215.30	0.75	0.14	3.52	13.32	0.66	0.02	1.59	0.06	2.09	468	2.9
Y26-11-11	222.65	139.64	0.63	0.12	5.45	13.17	0.82	0.02	4.34	0.06	2.38	473	3.7
Y26-11-12	630.93	760.52	1.21	0.12	4.69	13.22	0.49	0.02	1.75	0.05	2.82	471	2.2
Y26-11-13	149.82	89.37	0.60	0.14	1.39	12.46	0.85	0.02	2.86	0.06	2.41	499	4.0

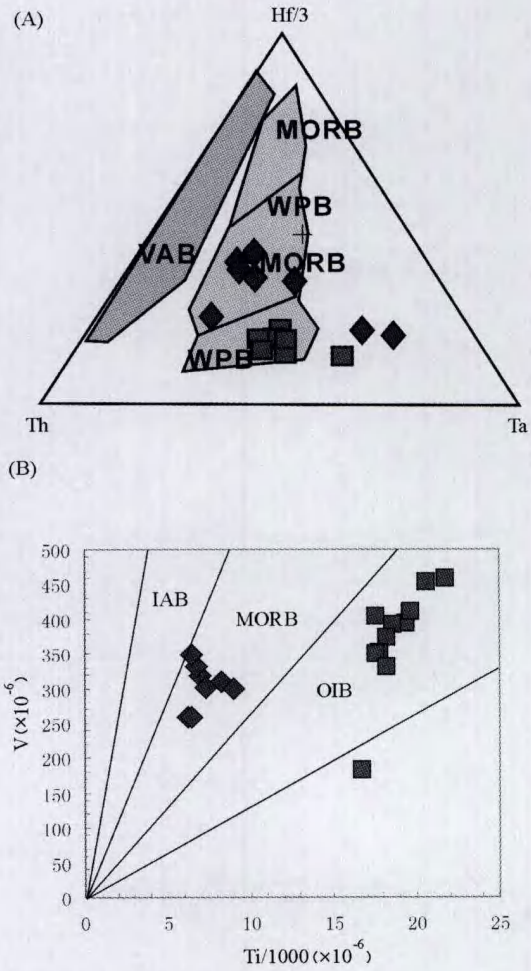


图 9 米兰红柳沟蛇绿岩中熔岩有两者类型,分别为大洋玄武岩(MORB)和洋岛玄武岩(OIB)(据 Pearce,1982; Shervais,1982)

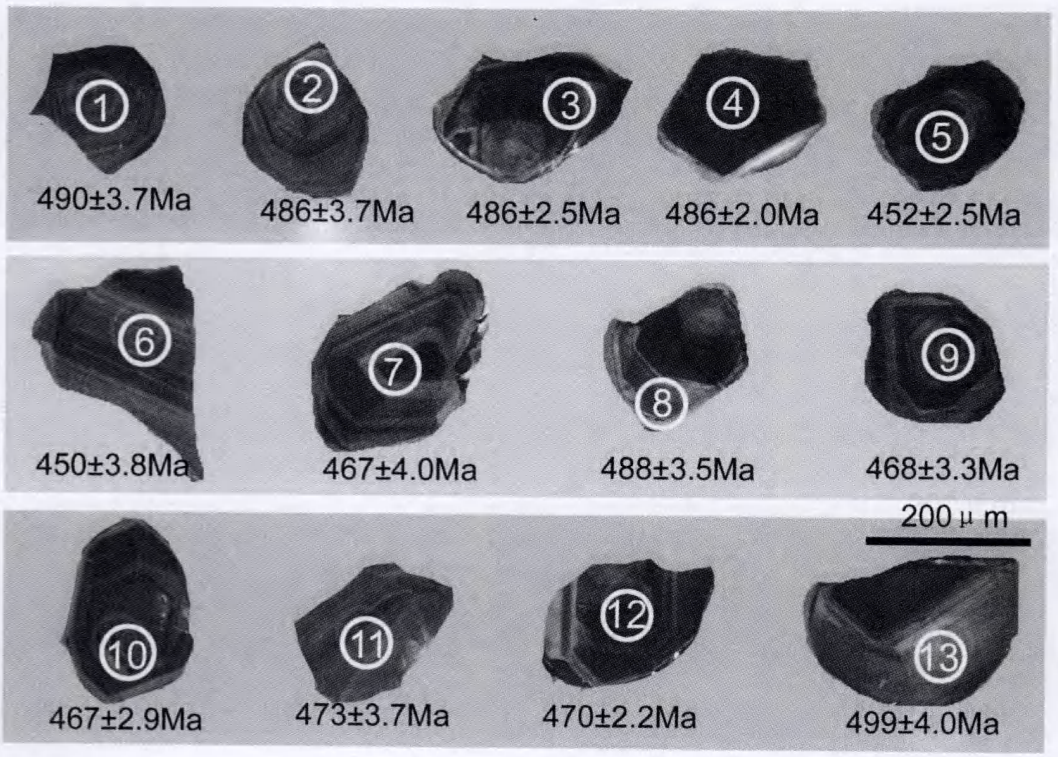
Fig. 9 Two types of lavas separated in the Th-Hf/3-Ta and T/1000 vs V diagrams, MORB and OIB types, respectively (after Pearce, 1982; Shervais, 1982)

MORB + WPB 区间,与它们的主元素和 REE 特征相一致;但厚层的枕状熔岩都两个图解中分别一致地落到 OIB 区间和 WPB 区间,与前人的研究结果十分一致(吴峻等,2002)。

块状辉长岩岩石成分以低 TiO_2(0.1% ~0.2%)、Al_2O_3(3.7% ~4.4%)、和($K_2O + Na_2O$) = 0.3%,及高 MgO(18.1% ~18.2%)和 CaO(17.7% ~17.9%)为特征。挥发分含量不高,为 1.9% ~2.6%。岩石成分特点与蛇绿岩的熔岩和岩墙可对比。

6 米兰红柳沟辉长岩的 SHRIMP 年代学

SHRIMP 定年的样品取自堆晶辉长岩(编号 03Y-26-11),产在研究区西段的 SN 向沟中(图 2 剖面 D)。由北往南,沟内开始为异剥橄榄岩岩块,后出现橄榄辉石岩和厚层



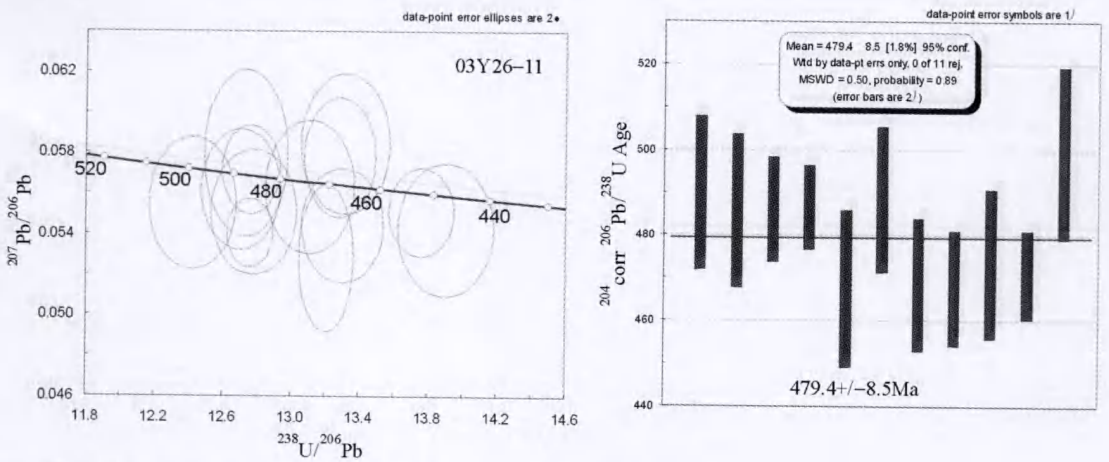


图 10 北阿尔金米兰红柳沟蛇绿岩中辉长岩的锆石的阴极发光照片和 SHRIMP U-Pb 年龄

Fig 10 CL images and SHRIMP U-Pb ages of the zircons from the gabbro of the Hongliugou ophiolite, Milan, North Altun.

辉长岩块，其中辉长岩中有辉石岩脉穿插。之后重复出现异剥橄榄岩和堆晶层理明显的辉长岩，均为构造岩块产出。

定年样品为中粗粒块状辉长岩，主要由单斜辉石和斜长石组成，岩石保留较为新鲜矿物及辉长结构。样品的重量约为 15kg，经过常规的分选手段，从中选出近 1000 粒锆石。锆石颜色为深黄色，透明度较差，发育较多裂纹，短柱状，自形晶，出现一些碎晶，可能为选矿过程所致，粒度主要再 0.2mm ~0.3mm 之间。锆石内部基本上不含矿物包裹体，阴极发光影像显示锆石内部具有典型的岩浆锆石所具有的生长环带（图 10）。

锆石的 SHRIMP U-Pb 同位素定年在美国斯坦福大学完成，有关仪器的条件和测试过程参看文献（Barth *et al.*，2001）。共测得 13 粒锆石的 13 个年龄数据（表 2），锆石的 $^{206}Pb/^{238}U$ 年龄变化在 450 ±3.8Ma 至 499 ±4.0Ma 区间，获得的加权平均年龄为 479 ±8Ma（图 10）。锆石的 U 含量在 140×10^{-6} ~ 690×10^{-6} 之间，Th 含量 89×10^{-6} ~ 760×10^{-6} 之间，Th/U 比值 0.5 ~ 1.3 之间，表现为岩浆锆石的特征（Gebaur *et al.*，1985）。认为锆石的 U-Pb 479 ±8 Ma 年龄为辉长岩岩浆房的结晶年龄，即蛇绿岩的形成年龄认为是早奥陶世。

刘良(1999)曾测得玄武岩的 Sm-Nd 全岩等时线 508 ± 41Ma 年龄(刘良,1999,博士论文),该年龄与辉长岩的年龄相差约 30Ma,属于晚寒武世。但该年龄误差变化范围较大。最近,有报道米兰红柳沟枕状熔岩的单颗粒锆石同位素稀释(TIMS)U-Pb 定年,年龄为 448.6 ± 3.3Ma,为晚奥陶世,该枕状熔岩被认为是洋岛玄武岩(修群业等,2007)。车自成等曾根据贝克滩洋岛玄武岩的 Sm-Nd 全岩等时线年龄 524Ma 和沉积建造、化石年代推断阿尔金北缘蛇绿混杂岩带的形成时代为晚寒武—早奥陶世,但一直没有精确的同位素年龄来印证(车自成等,2002)。本研究取得的年龄值,与车自成等(2002)根据地层和化石推测的早奥陶世的认识较吻合。

由此看来,已有的年龄资料表明米兰红柳沟蛇绿岩形成在早古生代,这一点是一致的。但已经获得的年龄值存在一个较大跨度,从 524Ma 到 448Ma,也是显然的。如何来判定这些已取得的年龄的地质意义,现在下结论还为时过早,尚需要对蛇绿岩和区域地质开展大量的详细研究,同时配合精确的详细定年,以取得对洋壳形成的时间以及从形成到关闭的各个阶段的年龄的限定。

7 北阿尔金蛇绿岩的地质和构造意义

本研究获得如下几点进展和认识:

(1)确立和厘定了米兰红柳沟蛇绿岩的岩石组合。通过对北阿尔金蛇绿岩带的野外地质调查,认为米兰红柳沟蛇绿岩是北阿尔金蛇绿岩带中发育和保留最好的蛇绿岩。虽然蛇绿岩以构造岩块和蛇绿混杂岩的形式产出,但基本保留了蛇绿岩的完整组合:即,由下至上,它们是地幔橄榄岩(方辉橄榄岩和纯橄岩)、堆晶岩、辉绿岩岩墙群、基性熔岩(块状熔岩+枕状熔岩)及夹于其中的硅质岩;并首次厘定出异剥橄榄岩+辉石岩+辉长岩的堆晶岩组合,为研究红柳沟蛇绿岩的形成环境和构造背景提供了重要证据。

(2)地幔橄榄岩和堆晶岩成分显示 SSZ 构造背景的特征。确定红柳沟蛇绿岩中地幔橄榄岩主要由方辉橄榄岩和少量纯橄岩所组成;矿物主要的特征是橄榄石镁高(Fo = 91.2 ~ 92.7),斜方辉石为顽辉石(En = 93 ~ 98),单斜辉石为透辉石(En = 46);副矿物尖晶石 $Cr^{\#}$ 为 43 ~ 69(平均 55),$Mg^{\#}$ 为 43 ~ 64(平均 58),成分落在深海橄榄岩(Abyssal peridotite)和岛弧玄武岩区间(图 6),表明其可能既保留了形成于 MORB 的背景信息,也记录了 SSZ 环境改造的结果,推测北阿尔金山存在 SSZ 型蛇绿岩。蛇绿岩中堆晶岩组合为异剥橄榄岩—橄榄二辉石岩—(橄榄)辉石岩—含长辉石岩—辉长岩—含 Cpx 斜长岩,这种岩石组合的堆晶岩通常被认为是 SSZ 构造背景的产物(Elthon *et al.*, 1992)。

(3)米兰红柳沟保留海底扩张重要证据——岩墙群和 MORB 型玄武质熔岩。两者具有典型海底拉斑玄武岩(MORB)的共同特征,主要表现在中等含量的主元素 TiO_2、Al_2O_3 和 MgO,低含量的 $K_2O < 0.3\%$ 和 P_2O_5,特征的不相容元素和 LREE 平坦型的球粒陨石标准化模型。本研究并证实了该地区存在高 Ti 的洋岛玄武岩类型。

(4)获得蛇绿岩的辉长岩 U-Pb 同位素年龄为早古生代。蛇绿岩辉长岩的锆石 SHRIMP 时代为 479.4 ± 8.5Ma。这是北阿尔金蛇绿岩的第一个单颗粒锆石的 SHRIMP U-Pb 同位素精确年龄,认为代表蛇绿岩的形成时代。

此外,米兰红柳沟还发现了一系列与洋盆关闭和洋壳的俯冲作用有关的岩石组合。首先,在米兰红柳沟蛇绿岩带的南北两侧分别确认出一套成因特征相似、年龄相近的同碰撞岛弧型石英闪长岩类,锆石 SHRIMP U-Pb 测年获得南带的石英闪长岩年龄为 481Ma,斜长花岗岩为 474Ma,北带花岗闪长岩 481Ma。此外,南带还获得一组属碰撞后 S 型花岗岩类的同位素年龄分别为 437Ma,433Ma,411Ma 和 434Ma;认为它们形成于洋盆关闭,板块俯冲碰撞的不同阶段。此外,北带另获得一个 405Ma 的花岗岩年龄,认为其受走滑断层控制形成于折返阶段(吴才来等,2005,2007;戚学祥等,2005a,b)。最近,又在北阿尔金的红柳泉一带新认别出一套蓝片岩和榴辉岩。它们与泥质片岩,钙质片岩和石英状片岩等一起构成高压/低温(HP/LT)变质带。*P-T* 估算显示榴辉岩形成的峰期温压为 $T = 430 \sim 540℃$,$P = 2.0 \sim 2.4GPa$,北阿尔金 HP/LT 变质带在岩石组成、野外产出及岩石学和矿物学特征等方面与北祁连 HP/LT 变质带十分相似(张建新等,2006,2007)。

因此,我们将北阿尔金米兰红柳沟地区出露的代表洋盆的蛇绿岩、与洋壳俯冲有关形成的高压变质岩,以及与俯冲碰撞有关的花岗岩看成北阿尔金俯冲增生杂岩带,认为该带不仅仅代表一个板块的缝合带,而且保留了板块边缘的沟弧盆体系。因此,北阿尔金缝合带无论在岩石组合特征和年龄等方面,均可以与阿尔金断裂带东部的北祁连缝合带对比,证实两个带曾经是一个带,被阿尔金断裂左旋错断了约 400km。

致谢 本文得到中国地质调查(1212010610107,1212010610105)和国家自然科学基金重大国际合作项目(40610098)资助。

References

Barth AP, Wooden JL and Coleman DS. 2001. SHRIMP U-Pb zircon geochronology of Mesoproterozoic metamorphism and plutonism in the southwesternmost United States. Journal of Geology, 109: 319 - 327

Bureau of Geology and Mineral Resources of Xinjiang Uygur Autonomous Region. 1993. Regional Geology of Xinjiang Uygur Autonomous Region. Beijing: Geological Publishing House, 1 - 841 (in Chinese)

Che ZC, Liu L, Liu HF and Luo JH. 1995. The Discovery of the HP metamorphic rocks and its environment. Chinese Science Bulletin, 40: 1298 - 1300 (in Chinese)

Che ZC, Liu L and Luo JH. 2002. Tectonics of China and Adjacent Region. Beijing: Science Press, 207 - 369 (in Chinese)

Cui JW, Tang ZM and Deng JF. 2000. The Altun Fault. Beijing: Geological Publishing House, 1 - 249 (in Chinese)

Dick HJB and Bullen T. 1984. Chromium spinel as a petrologic indicator in abyssal and alpine-type peridotites and spatially associated lavas. Contribution to Mineralogy and Petrology, 86: 54 - 76

Elthon D, Casey JF and Komor S. 1982. Mineral chemistry of ultramafic cumulates from the North Arm Mountain massif of the Bay of Islands Ophiolite: Evidence for high-pressure crystal fractionation of oceanic basalts. J. Geophy. Res., B 87: 8717 - 8734

Elthon D, Stewart M and Ross DK. 1992. Composition trends of minerals in oceanic cumulates. Journal of Geophysical Research, B 97: 15189 - 15199

Ferry JM and Spear FS. 1978. Experimental calibration of the partitioning of Fe and Mg between biotite and garnet. Contributions to Mineralogy and Petrology, 66: 113 - 117

Ge XH and Liu JL. 1999. Formation and tectonic background of the northern Qilian orogenic belt. Earth Science Frontiers, 04: 223 - 229 (in Chinese with English abstract)

Gebauer D, Lappin MA and Grunenfelder M. 1985. The age and origin of some Norwegian eclogites: A U-Pb zircon and REE study. Chemical Geology, 52: 227 - 248

Guo ZJ, Zhang ZC and Wang JJ. 1998. The Sm-Nd isochrone ages of the Altun ophiolites and its tectonic signification. Chinese Science Bulletin, 43: 1981 - 1984 (in Chinese)

He GQ, Li MS and Liu DQ. 1994. The Evolvement of the Paleozoic Lithosphere and the Formation of the Deposit in Xinjiang, China. Urumchi: Xinjing People Publishing house, 1 - 437 (in Chinese)

Liu L, Che ZC, Luo JH, Wang Y and Gao JZ. 1996. The conformity of eclogite in Western Altun and its geological significance. Chinese Science Bulletin, 41(16): 1485 - 1488 (in Chinese)

Liu L, Che ZC, Wang Y, Luo JH and Chen DL. 1999. The petrological characters and geotectonic setting of high-pressure metamorphic rock belts in Altun Mountains. Acta Petrologica Sinica, 15 (1): 57 - 64 (in Chinese with English abstract)

Liu L, Sun Y, Luo JH, Wang Y, Chen DL and Zhang AD. 2003. The UHP metamorphism of Englisayi granitic gneiss in Altun. Science in China (series D), 33(12): 1184 - 1192(in Chinese)

Parlak O, Hock V and Delaloye M. 2000. Suprasubduction zone origin of the Pozanti-Karsanti ophiolite (southern Turkey) deduced from whole-rock and mineral chemistry of the gabbroic cumulates. In: Bozkurt E, Winchester JA and Piper JDA (eds.). Tectonics and Magmatism in Turkey and the Surrounding Area. Geological Society, London, Special Publications, 173: 219 - 234

Pearce JA. 1982. Trace element characteristics of lavas from destructive plate boundaries. In: Thorpe RS (ed.). Andesites. Wiley, Chichester, 525 - 548

Qi XX, Li HB, Wu CL, Yang JS, Zhang JX, Meng FC, Shi RD and Chen SY. 2005a. The zircon SHRIMP U-Pb dating of the Qiashikayi granodiorite in Northern Altun. Chinese Science Bulletin, 50(6): 571 - 576(in Chinese)

Qi XX, Wu CL and Li HB. 2005b. SHRIMP U-Pb age of zircons from Kazisayi granite in the northern Alty Tagh mountains and its significations. Acta Petrologica Sinica, 21 (3): 859 - 866 (in Chinese with English abstract)

Qin XF, Xia B, Li CQ, Li J, Lu JP, Xu H, Zhou FS, Hu GA and Li Q. 2008. Geochemical characteristics and tectonic setting of Precambrian granitic gneiss in the western segment of Altyn Tagh tectonic belt. Geoscience, 22(1): 34 - 44(in Chinese with English abstract)

Shervais JW. 1982. Ti V plots and the petrogenesis of modern and ophiolitic lavas. Earth and Planetary of Science Letters 59, 101 - 118.

Song SG and Yang JS. 2001. Sanidine + Quartz inclusions in Dulan eclogites: Evidence for UHP metamorphism on the north margin of the Qaidam basin, N W China. Acta Geologica Sinica, 75(2): 180 - 185 (in Chinese with English abstract)

Wu CL, Yang JS, Yao SZ, Zeng LS, Chen SY, Li HB, Wooden JL and Mazdab FK. 2005. Characteristics of the granitoid complex and its zircon SHRIMP dating at the south margin of the Bashikaogong Basin, North Altun, NW. Acta Petrologica Sinica, 21(3): 849 - 858(in Chinese with English abstract)

Wu CL, Yao SZ, Zeng LS, Yang JS, Joseph LW, Chen SY and Frank KM. 2007. Characteristics of the granitoid complex and its zircon SHRIMP dating at the south margin of the Bashikaogong Basin - Simierbulake, North Altun, NW. Science in China(Series D), 37 (1): 10 - 26(in Chinese)

Wu HQ. 1980. The glaucophane-schists of East Qinling and Northern Qilian Mountain in China. Acta Geologica Sinica, 54 (03): 195 - 208(in Chinese with English abstract)

Wu J, Lan CL, Li JL and Yu LJ. 2002. Geochemical evidence of MORB and OIB combination in Hongliugou ophiolite melanges, Altun fault belt. Acta Petrologica et Mineralogica, 21(1): 24 - 30(in Chinese with English abstract)

Xiu QY, Yu HF, Liu YS, Lu SN, Mao DB, Li HM and Li S. 2007. Geology and zircon U-Pb age of pillow basalt at Qiashikansoy in northern Altun Tagh, NW China. Acta Geologica Sinica, 81(6): 787 - 794(in Chinese with English abstract)

Xu ZQ, Yang JS, Zhang JX, Jiang M, Li HB and Cui JW. 1999. A Comparison between the tectonic units on the two sides of the Altun sinistral strike-slip fault and the mechanism of lithospheric shearing. Acta Geologica Sinica, 73(3): 193 - 205(in Chinese with English abstract)

Yang JS, Xu ZQ, Li HB, Wu CL, Cui JW, Zhang JX and Chen W. 1998. The discovery of the eclogite in the north margin of the Chadamu Basin, in western China. Chinese Science Bulletin, 43 (14): 1544 - 1549 (in Chinese)

Yang JS, Xu ZQ, Song SG, Wu CL, Shi RD, Zhang JX, Wan YS, Li HB, Jin XC and Jalivet M. 2000. Discovery of eclogite in Dulan, Qinghai Province and its significance for the HP-UHP metamorphic belt along the central orogenic belt of China. Acta Geologica Sinica, 74: 156 - 168 (in Chinese with English abstract)

Yang JS, Song SG, Xu ZQ, Shi RD, Zhang JX, Li HB, Wan YS, Liu Y, Qiu HJ, Liu FL and Maruyama S. 2001. Discovery of coesite in the north Qaidam Early Paleozoic ultrahigh-high pressure (UHP-HP) metamorphic belt, NW China. Acta Geologica Sinica, 75(2): 175 - 179 (in Chinese with English abstract)

Yang JS, Wu CL and Shi RD. 2002. Sheeted dike swarm in Hongliugou, northwest of the Altun region: Evidence for seafloor spreading. Regional Geology of China, 21: 69 - 74 (in Chinese with English abstract)

Zhang JX, Yang JS, Xu ZQ, Meng FC, Song SG, Li HB and Shi RD. 2003. The UHP evidences of the Altun eclogites. Chinese Science Bulletin, 47(3): 231 - 234 (in Chinese)

Zhang JX and Meng FC. 2006. The eclogite bearing lawsonite : The evidence of cold oceanic crust subduction. Chinese Science Bulletin, 51(14): 1683 - 1688 (in Chinese)

Zhang JX, Meng FC, Yu SY, Chen W and Chen SY. 2007. ^{39}Ar-^{40}Ar geochronology of high-pressure/low-temperature blueschist and eclogite in the North Altyn Tagh and their tectonic implications. Geology in China, 34(4): 558 - 564 (in Chinese with English abstract)

附中文参考文献

车自成，刘良，刘洪福，罗金海. 1995. 阿尔金山地区高压泥质岩石的发现及其产出环境. 科学通报，40: 1298 - 1300

车自成，刘良，罗金海. 2002. 中国及其邻区区域大地构造学. 北京：

科学出版社,207 - 369

崔军文,唐哲民,邓晋福. 2000 阿尔金断裂系. 北京: 地质出版社,1 - 249

葛肖虹,刘俊来. 1999. 北祁连造山带的形成与背景. 地学前缘,4: 223 - 229

郭召杰,张志诚,王建君. 1998. 阿尔金山北缘蛇绿岩带的 Sm-Nd 等时线年龄及其地质构造意义. 科学通报,43: 1981 - 1984

何国琦,李茂松,刘德权. 1994. 中国新疆古生代地壳演化及成矿. 乌鲁木齐: 新疆人民出版社,1 - 437

刘良,车自成,罗金海,王焰,高章鉴. 1996. 阿尔金山西段榴辉岩的确定及其地质意义. 科学通报,41(16): 1485 - 1488

刘良,车自成,王焰,罗金海,陈丹玲. 1999. 阿尔金高压变质岩带的特征及其构造意义. 岩石学报,15: 57 - 64

刘良,孙勇,罗金海,王焰,陈丹玲,张安达. 2003. 阿尔金英格利萨依花岗质片麻岩超高压变质. 中国科学(D 辑),33(12): 1184 - 1192

戚学祥,李海兵,吴才来,杨经绥,张建新,孟繁聪,史仁灯,陈松永. 2005a. 北阿尔金恰什坎萨依花岗闪长岩的锆石 SHRIMP U-Pb 定年及其地质意义. 科学通报,50(6): 571 - 576

戚学祥,吴才来,李海兵. 2005b. 北阿尔金喀孜萨依花岗岩锆石 SHRIMP U-Pb 定年及其构造意义. 岩石学报,21(3): 859 - 866

覃小锋,夏斌,黎春泉,李江,陆济璞,许华,周府生,胡贵昂,李乾. 2008. 阿尔金构造带西段前寒武纪花岗质片麻岩的地球化学特征及其构造背景. 现代地质,22(1): 34 - 44

宋述光,杨经绥. 2001. 柴达木盆地北缘都兰地区榴辉岩中透长石 + 石英包裹体: 超高压变质作用的证据. 地质学报,75(2): 180 - 185

吴才来,杨经绥,姚尚志,曾令森,陈松永,李海兵,戚学祥,Wooden JL,Mazdab FK. 2005. 北阿尔金巴什考供盆地南缘花岗杂岩体特征及锆石 SHRIMP 定年. 岩石学报,21(3): 849 - 858

吴才来,姚尚志,曾令森,杨经绥,Wooden JL,陈松永,Mazadab FK. 2007. 北阿尔金巴什考供—斯米尔布拉克花岗杂岩特征及锆石 SHRIMP U-Pb 定年. 中国科学(D 辑),37(1): 10 - 26

吴汉泉. 1980. 东秦岭和北祁连山的蓝闪片岩. 地质学报,54 (03): 195 - 208

吴峻,兰朝利,李继亮,俞良军. 2002. 阿尔金红柳沟蛇绿混杂岩中 MORB 与 OIB 组合的地球化学证据,岩石矿物学杂志,21(1): 24 - 30

新疆维吾尔自治区地质矿产局. 1993. 新疆维吾尔自治区区域地质志. 北京: 地质出版社,1 - 841

修群业,于海峰,刘永顺,陆松年,毛德宝,李惠民,李铨. 2007. 阿尔金北缘枕状玄武岩的地质特征及其锆石 U-Pb 年龄. 地质学报,81(6): 787 - 794

许志琴,杨经绥,张建新,姜枚,李海兵,崔军文. 1999. 阿尔金断裂两侧构造单元的对比及岩石圈剪切机制. 地质学报,73(3): 193 - 205

杨经绥,许志琴,李海兵,吴才来,崔军文,张建新,陈文. 1998. 我国西部柴北缘地区发现榴辉岩. 科学通报,43(14): 1544 - 1549

杨经绥,许志琴,宋述光等. 2000. 青海都兰榴辉岩的发现: 试论我国中央造山带中的高压—超高压变质带的分布及构造意义. 地质学报,2. (74): 156 - 168

杨经绥,宋述光,许志琴,吴才来,史仁灯,张建新,李海兵,万渝生,刘焰,邱海峻,刘福来,Maruyama S. 2001. 柴达木盆地北缘早古生代高压—超高压变质带中发现典型超高压矿物——柯石英. 地质学报,75(2): 175 - 179

杨经绥,吴才来,史仁灯. 2002. 阿尔金山红柳沟席桩岩墙群: 海底扩张的重要证据. 地质通报,21: 69 - 74

张建新,杨经绥,许志琴,孟繁聪,宋述光,李海兵,史仁灯. 2003. 阿尔金榴辉岩中超高压变质作用证据. 科学通报,47(3): 231 - 234

张建新,孟繁聪. 2006. 北祁连和北阿尔金含硬柱石榴辉岩: 冷洋壳俯冲作用的证据. 科学通报,51(14): 1683 - 1688

张建新,孟繁聪,于胜尧,陈文,陈松永. 2007. 北阿尔金 HP/LT 蓝片岩和榴辉岩的 Ar-Ar 年代学及其区域构造意义. 中国地质,34(4): 558 - 564