内蒙古西乌珠穆沁旗迪彦庙蛇绿岩的识别*

李英杰 王金芳 李红阳 董培培 刘玉翠 刘德武 白卉
LI YingJie, WANG JinFang, LI HongYang, DONG PeiPei, LIU YuCui, LIU DeWu and BAI Hui

石家庄经济学院,石家庄 050031
Shijiazhuang University of Economics, *Shijiazhuang* 050031, *China*
2011-12-01 收稿, 2012-02-16 改回.

Li YJ, Wang JF, Li HY, Dong PP, Liu YC, Liu DW and Bai H. 2012. Recognition of Diyanmiao ophiolite in Xi U jimqin Banner, Inner Mongolia. *Acta Petrologica Sinica*, 28(4):1282 – 1290

Abstract Firstly recognized Diyanmiao ophiolite occurs in Xing'anling-Mongolian Orogenic Belt (XMOB) between the Sino-Korean paleoplate and the Siberian paleoplate in the central sector of Inner Mongolia. According to field geological investigation and the preliminary results of petrology and geochemistry, we found Diyanmiao ophiolite consists of Baiyinbulage ophiolite zone and Naolaiketu ophiolite zone, each of them is about 3km wide, 30km long, and Diyanmiao ophiolite outcrops completely, including augite peridotite, beded-massive gabbro, anorthosite, spilite, pillow basalt, keratophyre, baschtauite, and chert from bottom to top. The chondrite-normalized REE patterns of augite peridotite represent a typical mantle section of the SSZ-type ophiolite. Pillow basalt has the island-arc tholeiite (IAT) features. The values of $Al_2O_3/(Al_2O_3+Fe_2O_3)$ of chert display the characteristics of continental margin.
Key words Ophiolite; Petrology; Geochemistry; IAT; Diyanmiao; Inner Mongolia

摘 要 新识别出的内蒙古西乌珠穆沁旗迪彦庙蛇绿岩位于中朝古板块与西伯利亚古板块之间的兴蒙造山带中部。通过对迪彦庙蛇绿岩进行详细的野外地质调查和岩石学、岩石地球化学的研究,发现迪彦庙蛇绿岩由蓉来可吐和白音布拉格两个蛇绿岩带组成,各带宽约 3km,延伸约 30km,蛇绿岩各单元出露齐全。岩性由下到上主要为蛇纹石化方辉橄榄岩、层状-块状辉长岩、斜长岩、细碧岩、枕状玄武岩、角斑岩-石英角斑岩及硅质岩。蛇纹石化方辉橄榄岩稀土配分模式具 SSZ 型蛇绿岩的地幔橄榄岩特征;枕状玄武岩具岛弧拉斑玄武岩(IAT)特征;硅质岩的 $Al_2O_3/(Al_2O_3+Fe_2O_3)$ 比值显示大陆边缘沉积环境特征。
关键词 蛇绿岩;岩石学;地球化学;岛弧拉斑玄武岩; 迪彦庙;内蒙古
中图法分类号 P588.125

蛇绿岩是非原地的上地幔和大洋地壳的岩石碎片,从板块分离至最终板块聚合的各个阶段(即威尔逊旋回的每个阶段)都会形成,在板块汇聚作用中卷入造山带 (Diek and Furnes, 2011;张进等,2012)。因此,蛇绿岩是造山带研究的核心内容之一,研究蛇绿岩对恢复古板块拼合过程、造山旋回及建立区域构造格架是至关重要的(张旗和周国庆,2001)。

位于中朝古板块与西伯利亚古板块之间的兴蒙造山带(中亚造山带在中国境内的部分,主要包括新疆北部和内蒙古),是在古生代经过俯冲-增生形成的复合造山带(Ruzhentsev and Mossakovskiy, 1996; Buchan *et al.*, 2002; Xiao *et al.*, 2003; Windley *et al.*, 2007)(图 1)。内蒙古是兴蒙造山带的重要组成部分,分布有多条蛇绿岩带。从 20 世纪 80 年代以来,很多学者对内蒙古蛇绿岩开展了大量的岩石学、地球化学、年代学、构造环境等方面的研究(如胡骁和牛树银,1986;邵济安,1986;曹从周等,1987;梁日暄,1994;包志伟等,1994;邵济安和唐克东,1996;黄金香等,2006),一般认为,内蒙古蛇绿岩可分为四个带,由南向北分别是:(1)温都尔庙-西拉木伦河一线;(2)索伦敖包-林西一线;(3)交其尔-锡林浩特一线;(4)二连浩特-贺根山一线(张旗和周国庆,2001 年)。其中,温都尔庙、索伦山和贺根山地区蛇绿岩的研究程度较高。根据已有资料,温都尔庙和贺根山蛇绿岩应形成于弧后盆地,索伦山产于弧前环境,总体上内蒙古蛇

* 本文受中国地质调查局项目(1212011120701)、河北省科技计划项目(11277106D、12276709D)和河北省教育厅科研计划项目(Z2010295)联合资助.
第一作者简介: 李英杰,女,1976 年生,硕士,讲师,岩石学和构造地质学专业,E-mail: liyingjie820@126.com

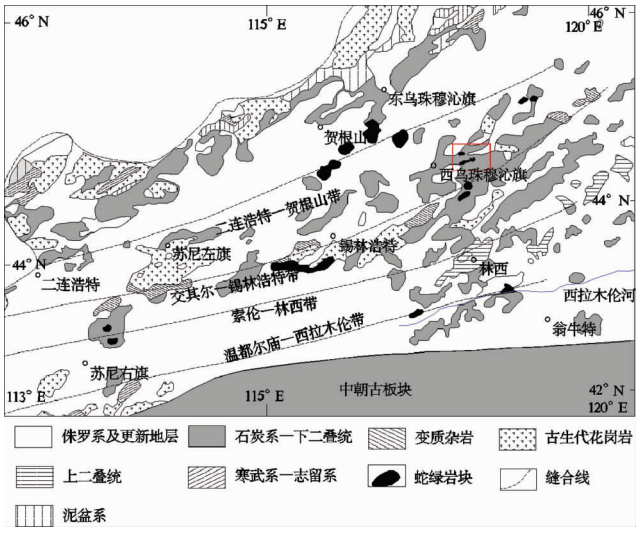


图 1 内蒙古西乌珠穆沁旗迪彦庙蛇绿岩区域构造简图

Fig. 1 Simplified regional tectonic map of Diyanmiao ophiolite in Xi U jimqin Banner of Inner Mongolian

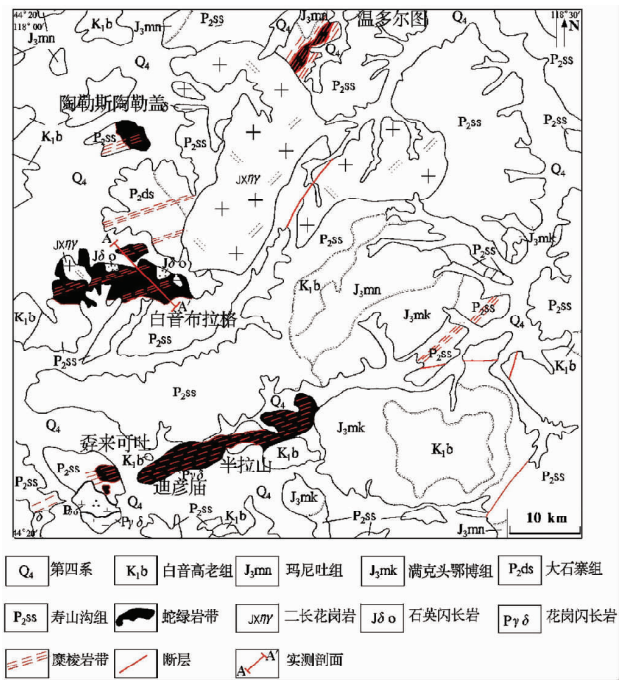


图 2 西乌珠穆沁旗迪彦庙蛇绿岩分布图

Fig. 2 Distribution of Diyanmiao ophiolite in Xi U jimqin Banner

绿岩属于 SSZ 型(张旗和周国庆,2001;Li, 2006; Miao *et al.*, 2008; 王树庆等,2008;周国庆,2008)。

笔者在开展中国地质调查局下发的《内蒙古 1∶5 万迪彦庙、沙日勒昭、太本庙、多尔博勒金和热木幅区调》项目时首次识别和填绘出西乌珠穆沁旗迪彦庙蛇绿岩,前人作为华力西期基性-超基性侵入岩和下二叠统寿山沟组砂岩和板岩。该蛇绿岩位于二连浩特-贺根山与交其尔-锡林浩特一线之间(图 1)。西乌珠穆沁旗迪彦庙蛇绿岩的确认,将为兴蒙造山带大地构造格架和地壳演化的研究提供依据。

1 蛇绿岩的野外地质特征

西乌珠穆沁旗迪彦庙蛇绿岩分为南北两个带:北部白音布拉格蛇绿岩带和南部舜来可吐蛇绿岩带(图 2)。

1.1 白音布拉格蛇绿岩带

白音布拉格蛇绿岩带出露于白音布拉格-陶勒斯陶勒盖-温多尔图一带,近 EW 向转 NE 向展布,带宽约 3km,断续延伸约 30km(图 2)。该带蛇绿岩的岩性主要为:蛇纹石化方辉橄榄岩、层状辉长岩、中粗粒-细粒均质块状辉长岩、斜长岩、细碧岩、枕状玄武岩、球颗玄武岩、角砾状玄武岩、角斑岩、石英角斑岩,其中以玄武岩、细碧岩最为发育,厚度最大,构成蛇绿岩的主体(图 3),局部细碧岩和枕状玄武岩中夹有纹层状硅质岩(硅质岩中是否有放射虫有待鉴定)、薄层状结晶灰岩及硅质泥岩。蛇绿岩剖面的岩石组合层序较为完整(图



图 3 白音布拉格蛇绿岩地质简图

Fig. 3 Geological sketch of the Baiyinbulage ophiolite

4),与世界上一些典型蛇绿岩剖面可以进行对比(科尔曼,1982),表现为底部为蛇纹石化方辉橄榄岩,向上依次为层状辉长岩、中粗粒-细粒均质块状辉长岩、斜长岩、细碧岩、枕状玄武岩和硅质岩,各单元断续呈背形分布。

1.2 孬来可吐蛇绿岩带

孬来可吐蛇绿岩带出露于孬来可吐-迪彦庙一带,近NEE向展布,带宽约3km,断续延伸约28km(图2);出露的主要岩性为:蛇纹石化方辉橄榄岩、层状辉长岩、中粗粒-细粒均质块状辉长岩、细碧岩、玄武岩、角斑岩、石英角斑岩、硅质岩,其中以细碧岩、细粒均质辉长岩最为发育,未见枕状玄武岩。本带蛇绿岩剖面的岩石组合层序自下而上仍表现为底部为蛇纹石化方辉橄榄岩,向上依次为层状辉长岩、中粗粒-细粒均质块状辉长岩、细碧岩、玄武岩、角斑岩、石英角斑岩,其中细碧岩、角斑岩、石英角斑岩中夹硅质岩和硅质泥岩,层序较为完整。

上述两个蛇绿岩带内普遍发育构造糜棱岩带。糜棱岩化和片理化作用强烈而明显,在强变形带中蛇纹石化方辉橄榄岩形成蛇纹石片岩,细粒均质辉长岩形成糜棱岩化片理化细粒辉长岩,细碧岩形成绿片岩,石英角斑岩形成绢云石英片岩、眼球状糜棱岩,结晶灰岩形成方解石(白云石)片岩,硅质泥岩形成千枚岩。

2 蛇绿岩的岩石组合特征

通过系统调查西乌珠穆沁旗迪彦庙蛇绿岩野外岩石产出特征和室内镜下观察,综合本区蛇绿岩剖面,建立西乌珠穆沁旗迪彦庙蛇绿岩石组合层序自下而上为:

(1)变质橄榄岩单元,(2)堆晶杂岩单元,(3)火山熔岩单元(表1),其上覆岩系出露纹层状硅质岩和硅质泥岩。

2.1 变质橄榄岩

该单元在孬来可吐和白音布拉格均有出露,分布于蛇绿岩的底部,与上覆的辉长岩呈韧性剪切带接触,变质橄榄岩发育强烈片理化。该单元主要岩性为蛇纹石化方辉橄榄岩,次为纯橄岩、二辉橄榄岩。岩石蛇纹石化强烈,局部绿泥石化、碳酸盐化,在强变形带形成蛇纹石片岩。局部方辉橄榄

表1 西乌珠穆沁旗迪彦庙蛇绿岩岩石组合特征

Table 1 Rock assemblage features of Diyanmiao ophiolite in Xi U jimqin Banner

岩石类型	岩性特征
火山熔岩	枕状玄武岩、球颗玄武岩、角砾状玄武岩、杏仁状细碧岩、块状细碧岩、角斑岩、石英角斑岩
堆晶杂岩	层状辉长岩、中粗粒块状辉长岩、细粒均质块状辉长岩、斜长岩
变质橄榄岩	方辉橄榄岩、纯橄榄岩、二辉橄榄岩

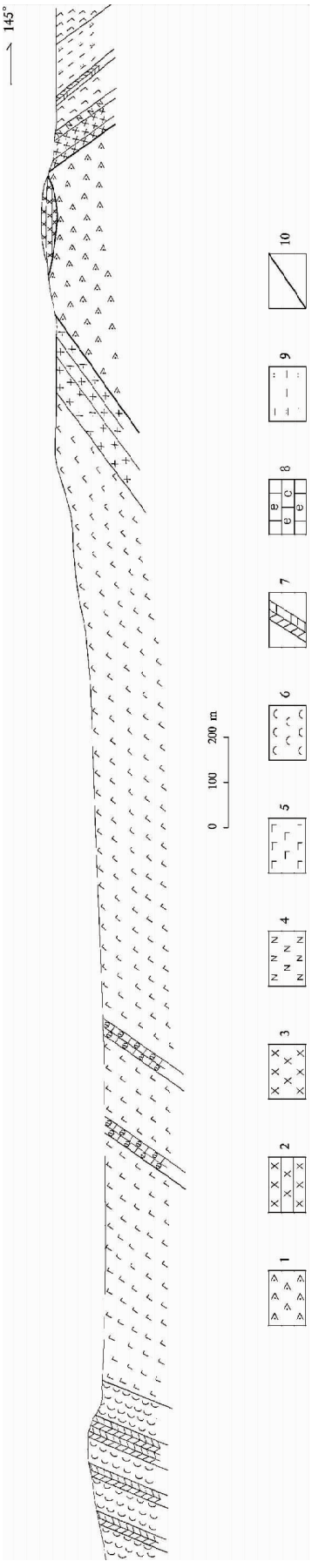


图4 白音布拉格蛇绿岩剖面图

1-蛇纹石化方辉橄榄岩;2-层状辉长岩;3-均质块状辉长岩;4-斜长岩;5-细碧岩;6-枕状玄武岩;7-硅质岩;8-生物碎屑灰岩;9-硅质泥岩;10-断层

Fig. 4 Profile of Baiyinbulage ophiolite

岩之上分布有蛇纹碳酸岩，岩石由高度破碎变形的蛇纹石角砾和碳酸盐基质组成。

蛇纹石化方辉橄榄岩 呈黑绿色，他形粒状变晶结构，块状构造、片状构造。主要矿物组成：橄榄石约 70% ~80%，斜方辉石约 20% ~30%，少量铬铁矿、磁铁矿、透辉石。橄榄石、辉石蚀变为蛇纹石，未蚀变的橄榄石显示折扭带状，颗粒边界模糊不清，可见波状消光、矿物的定向拉长、有时可见滑动双晶。

纯橄榄岩 岩石呈灰绿、黑绿色，鳞片变晶结构，交代残留结构，网格结构，块状、片状构造。橄榄石几乎全部为叶蛇纹石交代，析离出星点状磁铁矿。主要矿物组成：蛇纹石约 50% ~60%，绿泥石 30% 左右，磁铁矿约 5% ~10%，残留橄榄石 5% 左右，少量白云母。

二辉橄榄岩 出露很少，岩石呈灰黑色，块状、片状构造。叶片结构、纤维变晶结构，蛇纹石化强烈，偶见少量单斜辉石残晶。

2.2 堆晶杂岩

本区蛇绿岩中堆晶杂岩较为发育，出露面积较大。该单元岩性从下向上依次为层状辉长岩、中粗粒-细粒均质块状辉长岩，局部地段在辉长岩的顶部出露斜长岩（如白音布拉格）。辉长岩的矿物成分、结构、构造在垂向上呈现出明显的规律性变化：从下到上，矿物组成中暗色矿物-辉石的含量由多到少，由深色辉长岩到浅色辉长岩，至几乎全部由浅色矿物斜长石组成的斜长岩；在结晶程度上自下而上逐渐降低，由粗粒（局部伟晶结构）到中粗粒辉长岩，至细粒辉长岩；在构造上从下而上，由条带状、层状辉长岩，到均质块状辉长岩。其中细粒均质块状辉长岩在本区堆晶杂岩中最为发育，广泛出露于孬来可吐蛇绿岩东段。

辉长岩 根据结构构造可分为层状和块状两种类型。其中层状辉长岩具明显的条带状构造，由浅色矿物、暗色矿物或不同粒度相间分布的条带构成（图 5c）。根据辉石含量可分为深色辉长岩和浅色辉长岩。辉长岩镜下呈中粗粒-中细粒结构、变余辉长结构、辉长-辉绿结构，主要矿物组成：斜长石约 40% ~45%，辉石约 35% ~40%，副矿物为磁铁矿和钛铁矿，含量约为 5%。岩石蚀变较强，主要表现为斜长石的黝帘石化和辉石的纤闪石化。斜长石：自形到半自形，柱状，柱长约 0.30 ~0.50mm，隐约可见卡纳复合双晶，部分斜长石组成三角格状，其间充填辉石而构成辉绿结构。辉石几乎全为纤闪石化，部分被后期绿泥石交代而呈淡绿色调，纤闪石呈浅黄到黄绿色调，可见明显的闪石式解理，晶体大小一般约为 0.20 ~0.30mm。磁铁矿和钛铁矿相互共生产出，在岩石中均匀分布，多为不规则状，少量呈交代假象。

斜长岩 浅灰-灰白色，致密块状。中粗粒自形-半自形结构，几乎全部由基性斜长石组成，其含量占 90% 以上，铁镁矿物（辉石、橄榄石、角闪石）很少，含量小于 10%。含少量绿帘石、绢云母、以及锆石、磷灰石等副矿物。

2.3 火山熔岩

本单元为西乌珠穆沁旗迪彦庙蛇绿岩的重要组成单元，出露规模最为广泛，约占蛇绿岩出露面积的 70%。下部为块状玄武岩、块状细碧岩，上部为枕状玄武岩，局部发育球颗玄武岩、角砾状玄武岩、以及角斑岩、石英角斑岩等较酸的海底熔岩，夹纹层状硅质岩、结晶灰岩、硅质泥岩。

玄武岩、细碧岩 岩石主要呈黑灰色、深绿色、青绿色。发育枕状构造、块状构造、杏仁状构造，杏仁体多为石英和绿帘石。其中枕状玄武岩以发育枕状构造为特征，岩枕大小不等，小者 10 × 12cm，大者 30 × 80cm（图 5d），呈椭球状、肾状及圆球状，形态较规则。枕壳致密、坚硬，有明显的冷凝边。岩枕堆积不紧密，枕间胶结物仍为基性熔岩。镜下观察岩枕具拉斑结构、间粒结构、间隐结构、斑状结构，斑晶主要为斜长石，其次为少量单斜辉石，基质为钠长石和单斜辉石组成的间粒结构。枕间胶结物为显微隐晶质及绿泥石组成。球颗玄武岩呈灰紫色、灰黑色、灰绿色，风化面上可见到突起的浅色球颗，大小不等，直径为 1 ~4mm。具特征的球颗结构，镜下可见由放射状或束状斜长石组成的球颗。角砾状玄武岩以具角砾状构造为特征，灰紫色、灰绿色、或灰紫色和灰绿色混杂，角砾成分为玄武岩，胶结物仍为基性熔岩，角砾多为圆状，直径大小 1 ~20cm 不等。

角斑岩 岩石呈深褐色、浅绿色，具斑状结构，基质为微晶到隐晶质结构，致密似角质，块状构造。斑晶含量约 10%，斑晶以钠长石为主。钠长石自形，板状到板柱状，简单双晶，边缘有轻微的溶蚀现象；石英：他形粒状，晶体大小不等，大的可达 3.0mm，小的约 0.25mm，边缘普遍具有溶蚀港湾。基质由微晶钠长石和石英组成，微晶钠长石多为他形，晶体大小约 0.06mm。

石英角斑岩 岩石呈浅灰色、浅黄褐色，致密坚硬似角质。发育两种结构：一是斑状结构，斑晶主要是钠长石（更钠长石）和石英，具熔蚀结构，基质具霏细结构、显微花岗结构、球粒结构。另一种为无斑隐晶质结构，以基质中石英 > 20% 与角斑岩相区分。发育似层状构造、块状构造。

2.4 上覆岩系

该蛇绿岩的上覆岩系主要为纹层状硅质岩和硅质泥岩。硅质岩呈青灰色、青绿色、淡红色、紫红色（图 5e），发育纹层状构造、薄层状构造，致密、坚硬、性脆，部分纹层状硅质岩镜下呈残余生物结构的隐晶质结构（图 5f），初步鉴定为放射虫，矿物成分为石英、玉髓、蛋白石及粘土矿物等，见少量圆形、椭圆形放射虫遗迹（被玉髓取代），有不均匀的重结晶现象，具绿帘石、黝帘石化，沿着晚期裂隙常发育褐铁矿化，有些硅质岩不纯，和粘土矿物构成水平纹理构造。硅质泥岩呈灰黑色、黄褐色，薄板状构造、千枚状构造，局部夹有灰岩透镜体。

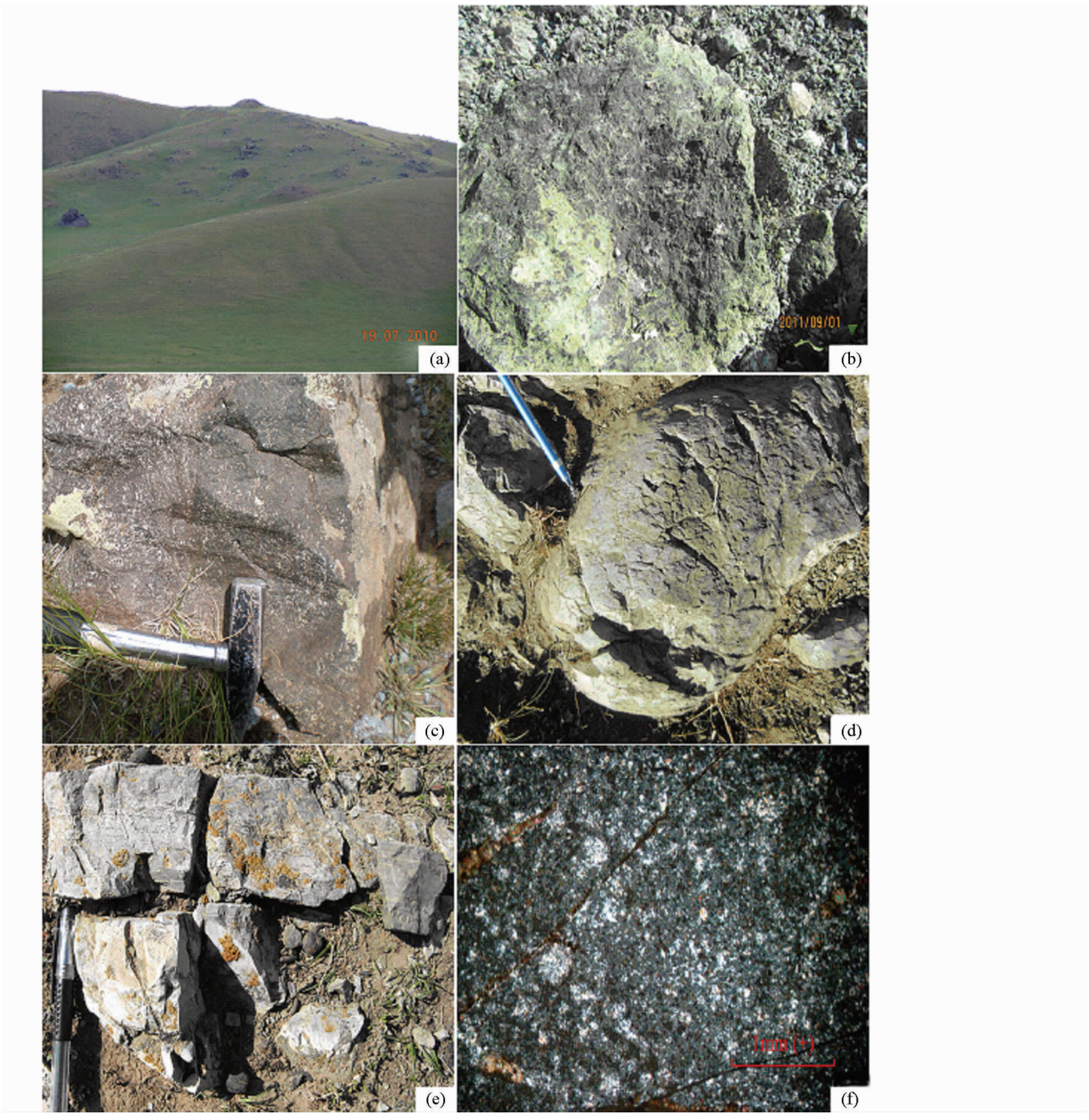


图 5 迪彦庙蛇绿岩野外和显微镜下照片

(a)-迪彦庙蛇绿岩野外露头;(b)-蛇纹石化方辉橄榄岩野外露头;(c)-层状辉长岩野外露头;(d)-枕状玄武岩野外露头;(e)-含放射虫硅质岩野外露头;(f)-含放射虫硅质岩显微镜下照片

Fig. 5 Field photographs and microphotographs of the Diyanmiao ophiolite

3 蛇绿岩的岩石地球化学特征

3.1 岩石地球化学特征

西乌珠穆沁旗迪彦庙蛇绿岩的化学成分见表 2,从表 2 可以看出以下特征:

(1) 变质橄榄岩单元主元素化学成分较稳定,Al_2O_3、CaO、K_2O、Na_2O 含量较低,MgO、SiO_2 含量稳定。变质橄榄岩的 $MgO/(MgO + FeO^T)$ 比值大致相同,为 0.83 ~ 0.84,体现了地幔残余的特征,略低于典型蛇绿岩中的比值(0.85 ~ 0.86)(科尔曼,1982)。AFM 三角图解中落在变质橄榄岩区及附近(图 6;科尔曼,1982)。

(2) 堆晶杂岩中两个辉长岩样品的化学分析结果在 AFM 图中都落在堆积岩区,比较变质橄榄岩单元,MgO/(MgO

表 2 迪彦庙蛇绿岩主化学组成(wt%)和微量元素丰度($\times10^{-6}$)

Table 2 Major (wt%) and trace ($\times10^{-6}$) elements analyzing results of Diyanmiao ophiolite

样品号	GS1214-5	TC13b06	TC13XT05	GS3432-1	GS3432	XT3434-1	GS4590-1	GS4590-2	GS4590-3	GS4592-1	GS4593
岩性	方辉橄榄岩	方辉橄榄岩	方辉橄榄岩	层状辉长岩	块状辉长岩	斜长岩	枕状玄武岩	枕状玄武岩	枕状玄武岩	纹层状硅质岩	纹层状硅质岩
SiO_2	40.38	40.99	40.53	45.53	46.84	49.32	50.17	48.96	53.26	77.21	77.23
Al_2O_3	0.88	1.12	0.68	16.35	15.25	26.82	14.12	14.61	12.83	11.56	11.51
Fe_2O_3	7.39	4.99	6.67	0.80	0.40	0.16	3.92	2.49	2.79	0.63	0.84
FeO	0.62	0.32	0.71	4.31	4.58	1.02	4.02	5.92	4.62	1.03	0.93
CaO	0.078	0.14	0.73	19.54	19.47	9.40	9.94	8.35	8.22	1.16	1.61
MgO	38.32	39.77	38.15	8.58	8.71	2.70	10.3	11.3	10.1	1.73	1.44
K_2O	0.01	0.014	0.0072	0.014	0.022	3.64	0.08	0.15	0.06	0.04	0.05
Na_2O	0.013	0.027	0.011	0.30	0.30	2.75	2.51	3.00	3.53	5.19	4.92
TiO_2	0.023	0.012	0.015	0.19	0.14	0.040	0.55	0.62	0.56	0.19	0.21
P_2O_5	0.011	0.009	0.012	0.029	0.043	0.021	0.031	0.032	0.034	0.038	0.047
MnO	0.045	0.05	0.069	0.13	0.14	0.039	0.163	0.171	0.352	0.021	0.025
LOI	12.31	12.69	12.5	3.81	3.65	4.03	4.05	4.24	3.48	1.15	1.13
La	0.23	0.18	0.32	0.16	0.34	0.15	1.61	0.74	0.76	4.54	6.67
Ce	0.41	0.31	0.62	0.48	0.65	0.17	2.41	1.99	1.9	10.75	14.5
Pr	0.052	0.041	0.086	0.11	0.12	0.051	0.59	0.41	0.39	1.77	2.33
Nd	0.25	0.16	0.37	0.72	0.65	0.28	3.52	2.49	2.41	8.42	11.28
Sm	0.066	0.02	0.07	0.38	0.3	0.10	1.29	1.2	1.06	2.5	3.2
Eu	0.023	0.029	0.038	0.19	0.17	0.14	0.51	0.47	0.42	0.61	0.84
Gd	0.087	0.028	0.072	0.5	0.4	0.15	1.7	1.82	1.54	2.77	3.56
Tb	0.016	0.0047	0.012	0.14	0.11	0.027	0.38	0.41	0.36	0.54	0.7
Dy	0.11	0.029	0.073	1.07	0.79	0.20	2.73	3.01	2.67	3.61	4.61
Ho	0.024	0.0066	0.014	0.23	0.18	0.041	0.6	0.68	0.58	0.77	0.98
Er	0.072	0.02	0.04	0.69	0.53	0.12	1.54	1.77	1.57	1.99	2.45
Tm	0.011	0.0036	0.0062	0.12	0.093	0.022	0.29	0.33	0.28	0.33	0.43
Yb	0.075	0.028	0.043	0.77	0.59	0.13	1.73	2.09	1.78	2	2.52
Lu	0.013	0.0057	0.0088	0.12	0.092	0.022	0.23	0.28	0.25	0.28	0.35
Y	0.77	0.2	0.53	6.01	4.74	1.17	13.2	15.24	12.95	20.76	24.24
Ni							144.1	183	160.5	10	10.3
Cr	1820	1450	1450	822	748	417	520.9	712.5	646.8	3.4	4.9
V	46.1	24.1	40.8	144	136	39.5	137.8	179.1	162.7	28.4	35.5
Zr	1.73	1.82	1.25	4.51	2.23	0.94	35.1	31	27.4	99.4	102.5
Hf	0.062	0.038	0.026	0.2	0.12	0.036	1.48	1.42	1.23	3.98	4.1
Ta	0.77	0.76	0.81	0.44	0.5	0.099	0.03	0.03	0.03	0.12	0.12
Sr	4.72	4.21	14.7	70.1	59.9	302	204	115	107	72	97
Nb	0.28	0.26	0.32	1.11	1.45	0.28	0.4	0.37	0.44	1.64	1.66
U	3.55	0.013	4.88	0.0094	0.025	0.0056	0.11	0.05	0.11	0.46	0.56
Th	0.054	0.032	0.037	0.087	0.17	0.042	0.18	0.07	0.14	1.23	0.91

注：样品由河北省区域地质矿产调查研究所实验室分析；主量成分、Zr、Sr 用 GB/T14506.28-2010 方法，Axios max X 射线荧光光谱仪测定分析；稀土元素、微量元素用 GB/T14506.30-2010 方法，X Serise2 等离子体质谱仪测定分析

$+FeO^T$)比值降低，为 0.61 ~ 0.63；Al_2O_3、CaO、TiO_2、K_2O、Na_2O 的含量增加。其中一个斜长岩的样，SiO_2 含量为 49.32%，与辉长岩相比，MgO、FeO 含量降低，Al_2O_3、TiO_2、K_2O、Na_2O 含量增加。

(3) 火山熔岩中枕状玄武岩 SiO_2 的含量为 48.96% ~ 53.26%，属于 SiO_2 不饱和的基性岩。以富 MgO(10.1% ~ 11.3%)，贫 K_2O (0.06% ~ 0.15%)、Na_2O (2.51% ~ 3.53%)、P_2O_5(0.031% ~0.034%)，以及 $Na_2O > K_2O$ 为特征，具原始岩浆成分特点。在 FAM 图解中落在枕状玄武岩和洋中脊玄武岩分区中。TiO_2 含量低(平均为 0.58%)，接近岛弧拉斑玄武岩(IAT)的 TiO_2 含量(平均为 0.8%；据 Sun，1980)。

(4) 硅质岩两个分析样，SiO_2 含量分别为 77.21%、77.23%，低于纯硅质岩 SiO_2 含量(91% ~99.8%)(Murray *et al.*，1992)，Al_2O_3 的含量分别为 11.51%、11.56%，Si/Al 为 5.81 和 5.82，远低于纯硅质岩 Si/Al (80 ~1400)(Murray *et*

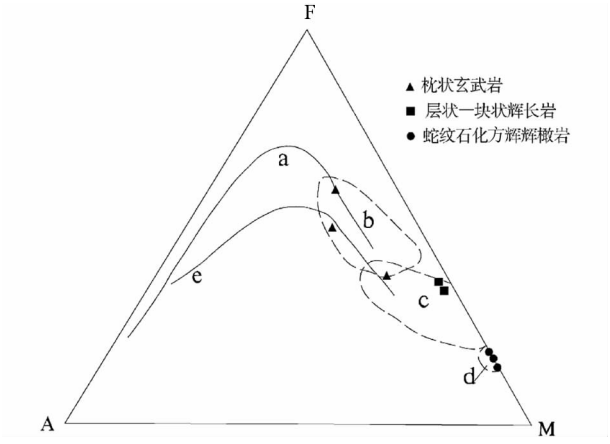


图 6 蛇绿岩组成的 AFM 图

a-拉斑玄武岩分异趋势;b-席状岩墙和枕状玄武岩,洋中脊玄武岩分区;c-堆晶杂岩成分区;d-变质橄榄岩分区;e-拉斑玄武岩系列和钙碱性系列分界线

Fig. 6 AFM diagram of the ophiolite compositions

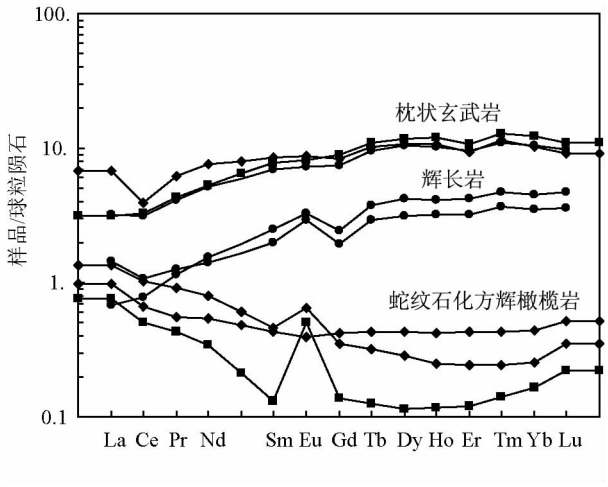


图 7 迪彦庙蛇绿岩稀土元素球粒陨石标准化配分曲线

Fig. 7 Chondrite-normalized REE pattern of the Diyanmiao ophiolite

al., 1992),表明它们含有较高比例的陆源泥质沉积物。据 Murray(1994)研究,$Al_2O_3/(Al_2O_3+Fe_2O_3)$ 比值可以作为用于判别硅质岩的形成环境的指标,洋中脊硅质岩的比值 < 0.4, 大洋盆地硅质岩为 0.4 ~ 0.7,大陆边缘硅质岩为 0.5 ~ 0.9,迪彦庙蛇绿岩的硅质岩样品比值为 0.93 ~ 0.94,属于大陆边缘形成环境。

3.2 稀土元素特征

西乌珠穆沁旗迪彦庙蛇绿岩的部分样品稀土元素分析结果见表 2,从该蛇绿岩各单元稀土元素球粒陨石标准化曲线图(图 7)中可以看出以下特征:

(1)变质橄榄岩单元蛇纹石化方辉橄榄岩稀土元素总量低,球粒陨石标准化的超镁铁质岩石稀土元素配分型式显示 LREE 富集的 U 型配分模式和正 Eu 异常,与 SSZ 型蛇绿岩的地幔橄榄岩相似(Elthon *et al.*, 1982, 1992; Pearce *et al.*, 1984)。另外,岩石富集相容元素 Cr, Ni 未分析出,与世界典型蛇绿岩的超镁铁质单元岩石地球化学组成类似。

(2)堆晶杂岩单元层状辉长岩的 ∑REE 高于变质橄榄岩单元蛇纹石化方辉橄榄岩,也高于球粒陨石的丰度,低于火山熔岩枕状玄武岩的稀土丰度,表现为蛇绿岩的层序从下而上,∑REE 在残留熔体中由低到高逐渐富集,这都与蛇绿岩中稀土元素伴随岩浆演化的地球化学特征相一致。同时,堆晶杂岩和火山熔岩的稀土元素分布型式相同,反应了两者的同岩浆成因特征。堆晶杂岩辉长岩显示 LREE 亏损型,有较明显的正铕异常,与绝大多数蛇绿岩有关的辉长岩 REE 特征相似(张旗和周国庆,2001)。

(3) 火山熔岩单元枕状玄武岩显示轻稀土(LERR)弱亏损的平坦型曲线,HERR 低(Yb 是球粒陨石的 6.99 ~ 8.42 倍),与 IAT 的 HERR(Yb 通常不到球粒陨石的 10 倍;据

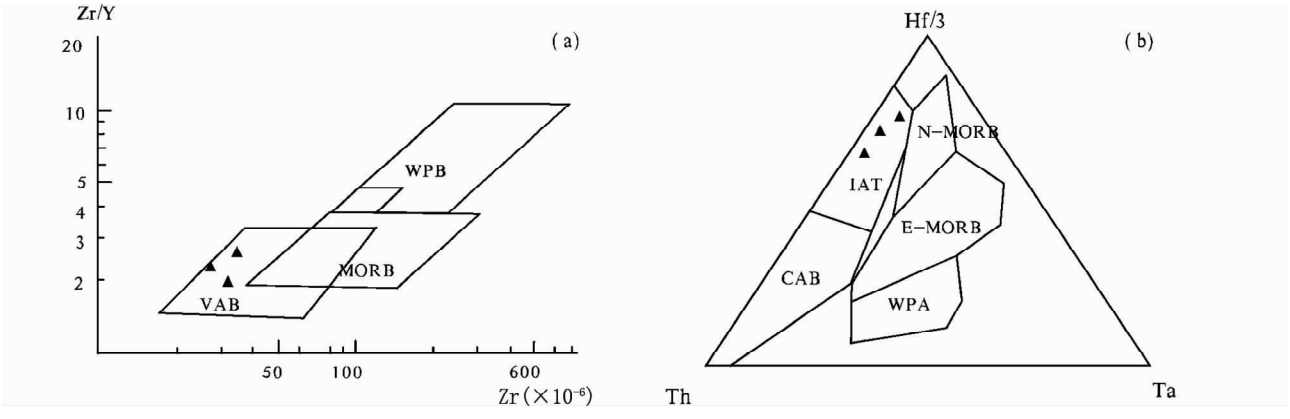


图 8 迪彦庙玄武岩的 Zr/Y-Zr 图解(a,据 Pearce, 1982)和 Hf/3-Th-Ta 图解(b,据 Wood, 1980)

N-MORB 正常洋中脊玄武岩;E-MORB 富集洋中脊玄武岩;CAB-钙碱性玄武岩;WPA-板内碱性玄武岩;IAT-岛弧拉斑玄武岩;VAB-岛弧玄武岩

Fig. 8 The diagram of Zr/Y-Zr (a, after Pearce, 1982) and Hf/3-Th-Ta (b, after Wood, 1980) for Diyanmiao basalts

Sun,1980)相似，反映迪彦庙蛇绿岩枕状玄武岩具有 IAT 的 ERR 特征。

4 讨论

从上述岩石学、地球化学特征可知,迪彦庙蛇绿岩的变质橄榄岩单元主要为方辉橄榄岩,具 LREE 富集的 U 型配分模式,可能与 SSZ 构造环境中复杂的源区(包括不同熔融程度的地幔橄榄岩)、丰富的流体活动(Melcher *et al.*, 2002)以及部分熔融的熔体与残留地幔橄榄岩的再反应(Kelemen *et al.*, 1992, 1995; Casey, 1997)有关;枕状玄武岩为轻稀土(LERR)弱亏损的平坦型曲线,显示其来源于地幔,形成环境可能为 MORB 或 SSZ,而枕状玄武岩 HERR 低,TiO_2 含量低,又不同于 MORB(HERR > 球粒陨石的 10 倍,TiO_2 平均为 1.5%,据 Sun, 1980; Pearce, 1983; Pearce *et al.*, 1984; Wilson, 1989),因此,迪彦庙枕状玄武岩具 IAT 特征。在玄武岩的大地构造环境 Zr/Y-Zr 判别图解(Pearce, 1982)上(图 8a),研究区玄武岩样品落在岛弧玄武岩区(VAB),应用 Wood (1980)的 Th-Hf-Ta 图解(图 8b),样品均落在岛弧拉斑玄武岩(IAT)区。硅质岩的 $Al_2O_3/(Al_2O_3 + Fe_2O_3)$ 比值显示为大陆边缘环境。结合区域地质构造发展史,认为西乌珠穆沁旗迪彦庙蛇绿岩的形成环境应为 SSZ 型。

以上对西乌珠穆沁旗迪彦庙蛇绿岩的认识是初步的,对其形成时代、成因和形成机制的研究尚在进行之中。

致谢 本文在野外调查和写作过程中得到中国地质调查局天津地质调查中心谷永昌、刘永顺,内蒙古地质调查院邵积东、鞠文信,河北省地质调查院宋立军等的热情指导和帮助;石家庄经济学院贺秋利、张红晨、宋鹏等也做了大量工作;两位审稿专家提出了宝贵的修改意见,在此一并表示衷心的感谢!

References

Bao ZW, Chen SH and Zhang ZT. 1994. Study on REE and Sm-Nd isotopes of Hegenshan ophiolite, Inner Mongolia. Geochimica, 23(4): 339 – 349(in Chinese with English abstract)

Buchan C, Pfander J, Kroner A, Brewer TS, Tomurtogoo O, Tomurhuu D, Cunningham D and Windley BF. 2002. Timing of accretion and collisional deformation in the Central Asian Orogenic Belt: Implications of granite geochronology in the Bayankhongor ophiolite zone. Chemical Geology, 192 (1 – 2): 23 – 45

Cao CZ, Tian CL and Yang FL. 1987. The discovery of the sheeted dike swarms and their geological significance in Solonshan-Hegenshan ophiolite zone, Inner Mongolia. In: Shenyang Institute of Geology and Mineral Resources of Ministry of Geology and Mineral Resources (ed.). Contributions to the Project of Plate Tectonics in Northern China (2). Beijing: Geological Publishing House, 125 – 135 (in Chinese with English abstract)

Casey JF. 1997. Composition of major- and trace-element geochemistry of abyssal peridotites and mafic platonic rocks with basalts from the MARK region of the Mid-Atlantic Ridge. In: Karson JA, Cannat M, Miller DJ and Elthon D (eds.). Proceeding of the Ocean Drilling Program, Scientific Results, 153: 181 – 241

Coleman RG. 1982. Ophiolites. Beijing: Geological Publishing House (in Chinese)

Dilek Y and Furnes H. 2011. Ophiolite genesis and global tectonics: Geochemical and tectonic fingerprinting of ancient oceanic lithosphere. Geological Society of America Bulletin, 123: 387 – 411

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. Geophys. Res., 87(10): 8717 – 8734

Elthon D, Stewart M and Ross DK. 1992. Composition trends of minerals in oceanic cumulates. J. Geophys. Res., 97: 15189 – 15199

Hu X and Niu SY. 1986. A study of Early Paleozoic subduction zone in Ontersum district, Inner Mongolia. In: Tang KD (ed.). Contributions to the Project of Plate Tectonics in Northern China (1). Beijing: Geological Publishing House, 87 – 101 (in Chinese with English abstract)

Huang JX, Zhao ZD, Zhang HF *et al.* 2006. Elemental and Sr-Nd-Pb isotopic geochemistry of the Wenduermiao and Bayanaobao-Jiaoqier ophiolites, Inner Mongolia: Constraints for the characteristics of the mantle domain of eastern Paleo-Asian Ocean. Acta Petrologica Sinica, 22(12): 2889 – 2900(in Chinese with English abstract)

Kelemen PB, Dick HJB and Quick JE. 1992. Formation of harzburgite by pervasive melt/rock reaction in the upper mantle. Nature, 358(6388): 635 – 641

Kelemen PB, Shimizu N and Salters VJM. 1995. Extraction of mid-ocean-ridge basalt from the upwelling mantle by focused flow of melt in dunite channels. Nature, 375: 747 – 753

Liang RX. 1994. The features of ophiolites in the central sector of Inner Mongolia and its geological significance. Regional Geology in China, 1: 37 – 45(in Chinese with English abstract)

Li JY. 2006. Permian geodynamic setting of Northeast China and adjacent regions: Closure of the Paleo-Asian Ocean and subduction of the Paleo-Pacific Plate. Journal of Asian Earth Sciences, 26(3 – 4): 207 – 224

Miao LC, Fan WM, Liu DY, Zhang FQ, Shi YR and Guo F. 2008. Geochronology and geochemistry of the Hegenshan ophiolitic complex: Implications for late-stage tectonic evolution of the Inner Mongolia-Daxinganling Orogenic Belt, China. Journal of Asian Earth Sciences, 32(5 – 6): 348 – 370

Melcher F, Meisel T, Puhl J *et al.* 2002. Petrogenesis and geotectonic setting of ultramafic rocks in the Eastern Alps: Constrains from geochemistry. Lithos, 65: 69 – 112

Murray RW, Buchholtz Ten Brink MR, Gerlach DC *et al.* 1992. Rare earth, and trace element composition of Monterey and DSDP chert and associated host sediment: Assessing the influence of chemical fractionation during diagenesis. Geochim. Cosmochim. Acta, 56: 2657 – 2671

Murray RW. 1994. Chemical criteria to identify the depositional environment of chert: General principles and applications. Sediment Geology, 90: 213 – 232

Pearce JA. 1982. Trace element distribution diagrams for the tectonic interpretation of granitic rocks. Journal of Petroleum, 25(4): 956 – 983

Pearce JA. 1983. The role of sub-continental lithosphere in magma genesis at destructive plate margins. In: Hawkesworth CJ and Norry MJ (eds.). Continental Basalts and Mantle Xenoliths. Nantwich Shiva, 230 – 249

Pearce JA, Lippard SJ and Roberts S. 1984. Characteristics and tectonic significance of supra-subduction zone ophiolites. In: Kokelaar BP and Howells MF (eds.). Marginal Basin Geology. Geological Society of London Special Publication, 16: 77 – 94

Ruzhentsev SV and Mossakovskiy AA. 1996. Geodynamics and tectonic evolution of the central Asian Paleozoic structures as the result of the interaction between the pacific and Indo-Atlantic segments of the Earth. Geotectonics, 29(4): 294 – 311

Shao JA. 1986. Early Paleozoic ophiolites in the central sector of Inner Mongolia and their significance for resuming the evolution history of earth crust. In: Tang KD (ed.). Contributions to the Project of Plate Tectonics in Northern China (1). Beijing: Geological Publishing House, 158 – 172 (in Chinese with English abstract)

Shao JA and Tang KD. 1996. Ophiolites and evolution of the Paleo-Mongolian Ocean. In: Zhang Q (ed.). Study on Ophiolites and Geodynamics. Beijing: Geological Publishing House, 117 – 120 (in Chinese)

Sun SS. 1980. Lead isotopic study of young volcanic rocks from mid-ocean ridges, ocean islands and island arcs. Phil. Trans. R. Soc. Lond., A297: 409 – 445

Wang SQ, Xu JF, Liu XJ *et al.* 2008. Geochemistry of the Chaokeshan ophiolite: Product of intra-oceanic back-arc basin? Acta Petrologica Sinica, 24 (12): 2869 – 2879 (in Chinese with English abstract)

Wilson M. 1989. Igneous Petrogenesis. London: Unwin Hyman

Windley BF, Alexeiev D, Xiao WJ, Kroner A and Badarch G. 2007. Tectonic models for accretion of the Central Asian Orogenic Belt. Journal of the Geological Society, 164: 31 – 47

Wood DA. 1980. The application of Th-Hf-Ta diagram to problems of tectonomagmatic classification and to establishing the nature of crustal contamination of basaltic lavas of the British Tertiary volcanic province. Earth and Planetary Science Letters, 50: 11 – 33

Xiao WJ, Windley BF, Hao J and Zhai M. 2003. Accretion leading to collision and the Permian Solonker Suture, Inner Mongolia, China: Termination of the Central Asian Orogenic Belt. Tectonics, 22(6): 1 – 21

Zhang J, Deng JF, Xiao QH *et al.* 2012. New advances in the study of ophiolites. Geological Bulletin of China, 31(1): 1 – 9 (in Chinese with English abstract)

Zhang Q and Zhou GQ. 2001. Ophiolite of China. Beijing: Science Press, 1 – 182 (in Chinese with English abstract)

Zhou GQ. 2008. Ophiolite: Some key aspects regarding its definition and classification. Journal of Nanjing University (Natural Sciences Edition), 44(1): 1 – 24 (in Chinese with English abstract)

附中文参考文献

包志伟, 陈森煌, 张祯堂. 1994. 内蒙古贺根山地区蛇绿岩稀土元素和 Sm-Nd 同位素研究. 地球化学, 23(4): 339 – 349

曹从周, 田昌烈, 杨芳林. 1987. 内蒙古索伦山-贺根山蛇绿岩带中席状岩墙群及其地质意义. 见: 地质矿产部沈阳地质矿产研究所编. 中国北方板块构造论文集(2). 北京: 地质出版社, 125 – 135

胡骁, 牛树银. 1986. 内蒙古温都尔庙地区早古生代板块俯冲带的研究. 见: 唐克东主编. 中国北方板块构造论文集(1). 北京: 地质出版社, 87 – 101

黄金香, 赵志丹, 张宏飞等. 2006. 内蒙古温都尔庙和巴彦敖包-交其尔蛇绿岩的元素与同位素地球化学: 对古亚洲洋东部地幔域特征的限制. 岩石学报, 22 (12): 2889 – 2900

科尔曼 RG. 1982. 蛇绿岩. 北京: 地质出版社

梁日暄. 1994. 内蒙古中段蛇绿岩特征及地质意义. 中国区域地质, (1): 37 – 45

邵济安. 1986. 内蒙古中部早古生代蛇绿岩及其在恢复地壳演化历史中的意义. 见: 唐克东主编. 中国北方板块构造论文集(1). 北京: 地质出版社, 158 – 172

邵济安, 唐克东. 1996. 蛇绿岩与古蒙古洋的演化. 见: 张旗主编. 蛇绿岩与地球动力学研究. 北京: 地质出版社, 117 – 120

王树庆, 许继峰, 刘希军等. 2008. 内蒙朝克山蛇绿岩地球化学: 洋内弧后盆地的产物? 岩石学报, 24(12): 2869 – 2879

张进, 邓晋福, 肖庆辉等. 2012. 蛇绿岩研究的最新进展. 地质通报, 31(1): 1 – 9

张旗, 周国庆. 2001. 中国蛇绿岩. 北京: 科学出版社, 1 – 182

周国庆. 2008. 蛇绿岩研究新进展及其定义和分类的再讨论. 南京大学学报(自然科学版), 44(1): 1 – 24