

· 专题研究 ·

北山造山带白云山蛇绿混杂岩的地球化学特征、时代及地质意义

孙立新, 张家辉, 任邦方, 牛文超, 任云伟, 张 阔

(中国地质调查局天津地质调查中心, 天津 300170)

摘 要: 白云山蛇绿混杂岩是北山造山带中红柳河-牛圈子-洗肠井蛇绿岩带的一部分, 由蛇纹石化二辉橄榄岩、蛇纹岩、辉长岩(堆晶辉长岩、块状辉长岩)、基性枕状熔岩(变玄武岩)及深海-次深海远洋、半远洋相沉积物(硅质岩、板岩)、白云岩等组成。其中辉长岩 LA-ICP-MS 锆石 U-Pb 测年结果为 496.4 ± 2.2 Ma, 指示蛇绿岩形成于晚寒武世; 混杂带中玄武岩地球化学特征为洋底玄武岩, 兼有洋岛碱性玄武岩(OIB)和洋脊玄武岩(MORB)的地球化学性质, 枕状熔岩与硅质岩交互产出, 指示其形成环境为深水洋盆。结合区域地质资料, 推测该蛇绿混杂岩带为寒武纪洋中脊存在的遗迹。

关键词: 蛇绿混杂岩; 岩石地球化学特征; 时代; 白云山; 北山地区

中图分类号: P588.12⁺4; P597

文献标识码: A

文章编号: 1000-6524(2017)02-0131-17

Geochemical characteristics and U-Pb age of Baiyunshan ophiolite mélange in the Beishan orogenic belt and their geological implications

SUN Li-xin, ZHANG Jia-hui, REN Bang-fang, NIU Wen-chao, REN Yun-wei and ZHANG Kuo
(Tianjin Center of Geological Survey, CGS, Tianjin 300170, China)

Abstract: The Baiyunshan ophiolite mélange is a part of the Hongliuhe-Niujuanzi-Xichangjing ophiolite belt in the Beishan orogenic belt and has a complete sequence composed of serpentinized lherzolite, serpentinite, gabbro (cumulate gabbro, massive gabbro), mafic pillow lavas (metabasalt) and bathyal-abyssal or pelagite-hemipelagite facies sediments (silicalite, slate), dolomite and some other kinds of rocks. Zircon LA-ICP-MS U-Pb dating results indicate that the gabbro has the age of 496.4 ± 2.2 Ma, indicating that this ophiolite was formed in Late Cambrian. Geochemical characteristics of pillow basalts in the ophiolite mélange show dual nature of ocean floor alkaline basalt (OIB) and middle ocean ridge basalt (MORB); in addition, pillow basalts appear alternately with silicalites. All the evidence suggests that they formed in the deepwater ocean basin. Regional geological analyses indicate that the Baiyunshan ophiolite mélange represents a relic of early Paleozoic middle ocean ridge.

Key words: ophiolite mélange; geochemical characteristics; age; Baiyunshan; Beishan area

Fund support: Project of China Geological Survey (12120114064601)

北山地区位于甘肃、新疆和内蒙古三省交界地带, 大地构造位处塔里木-华北古板块和西伯利亚古板块的交汇部位(任纪舜等, 1980; 李春昱, 1987),

隶属于中亚造山带南缘(左国朝等, 1990, 1996, 2003)。该地区蛇绿岩带发育, 自北向南分布着红石山-蓬勃山蛇绿岩带、马鬃山-小黄山蛇绿岩带、红柳

收稿日期: 2016-03-16; 接受日期: 2017-01-18

基金项目: 中国地质调查局地质调查项目(12120114064601)

作者简介: 孙立新(1964-), 男, 博士, 研究员, 主要从事区域地质调查、构造地质研究工作; E-mail: tjslixin@126.com。

河-牛圈子-白云山-洗肠井蛇绿岩带(杨合群等, 2010)。蛇绿岩作为古洋岩石圈存在的地质记录, 现已成为鉴别古大洋存在的重要依据(张旗等, 2001)。许多研究者曾先后对北山造山带蛇绿混杂岩组成、时代及其大地构造格局进行过研究(左国朝等, 1990, 1996, 2003; 周国庆等, 2000; 于福生等, 2000, 2006; 张旗等, 2001; 任秉琛等, 2001; 何世平等, 2002, 2005; 龚全胜等, 2003; 郭召杰等, 2006; 张元元等, 2008; 杨合群等, 2008, 2010, 2012; 代文军, 2011; 李向民等, 2012; 郑荣国等, 2012; 武鹏等, 2012; 侯青叶等, 2012; 胡新苗等, 2015)。然而, 一些基础地质问题, 如大地构造分界区及蛇绿岩的时代、性质尚未解决, 在蛇绿岩的形成时代上由于测年对象和测年方法的不同, 存在奥陶纪-志留纪(左国朝等, 1990)、中奥陶世-晚奥陶世早期(任秉琛等, 2001; 何世平等, 2002, 2005; 杨合群等, 2008, 2010, 2012)、早志留世(郭召杰等, 2006)、寒武纪(侯青叶等, 2012; 胡新苗等, 2015)等分歧; 蛇绿岩构造环境仍然存在分歧, 一种观点认为形成于弧后盆地(左国朝等, 1990; 郑荣国等, 2012); 另一种观点认为其形成于早志留世小洋盆环境(郭召杰等, 2006)或中奥陶世-晚奥陶世早期洋盆环境(任秉琛等, 2001; 何世平等, 2002, 2005; 杨合群等, 2008, 2010, 2012)。为了进一步揭示该地区蛇绿岩的性质, 本文对位于北山地区南带的红柳河-牛圈子-白云山-洗肠井蛇绿岩带中的白云山地区蛇绿混杂岩进行了系统调查研究, 探讨了白云山一带蛇绿岩形成时代、构造性质及其地质意义, 为基础地质研究提供资料。

1 白云山蛇绿岩带组成特征

白云山蛇绿岩带位于红柳河-牛圈子-白云山-月牙山-洗肠井蛇绿岩带中部, 岩石露头自嘉峪关至黑鹰山公路 138 km 处向东经白云山延长约 20 余 km, 在长 20 km、宽 2~3 km 的近东西向的狭长带状区域内, 蛇绿岩组分断续出露。该带向西与牛圈子、红柳河蛇绿岩相连, 向东与洗肠井月牙山蛇绿岩相接, 构成北山中部一条长达 500 km 的蛇绿岩带。白云山蛇绿岩北侧与志留系公婆泉群呈断层接触, 南侧与奥陶系或震旦系洗肠井群亦以断层为界, 古生代花岗岩类侵入其内, 其上被第四系所覆盖(图 1)。

野外地质调查表明, 由于后期构造作用的改造,

蛇绿岩的组成单元多被肢解, 除局部“层序”相对完整外, 大多以规模不等的构造岩块、岩片与基质构成的构造混杂岩形式产出(图 1b)。蛇绿混杂岩带由蛇纹岩、蛇纹石化二辉橄榄岩(图 2a)、辉长岩、枕状熔岩、紫红色硅质岩、灰色砂板岩、大理岩化白云岩等组成。白云山辉长岩内部和边部可见堆晶结构、条带状构造(图 2b), 白云山南部枕状玄武岩(图 2c)与硅质岩(图 2d)及板岩交互产出, 构成一构造岩片, 各岩块和构造岩片多为断层构造接触(图 3)。

白云山蛇绿混杂岩由蛇绿质岩块(或岩片)和混杂基质组成。岩块由大小不等的蛇纹石化二辉橄榄岩岩块、蛇纹岩岩块、辉长岩岩块及外来的白云质大理岩岩块等组成, 基质以蛇纹岩、片理化透镜化蛇纹石化二辉橄榄岩为主, 岩石剪切变形强烈, 破碎严重, 基质中嵌入大小不等的辉长岩岩块, 岩块相对变形较弱。蛇绿混杂岩岩块、岩片总体呈近东西向展布, 由于构造挤压、韧性变形的影响, 表现为东西走向的蛇绿混杂构造岩带, 其中的蛇纹岩片、二辉橄榄岩、辉长岩、白云质大理岩等岩块、岩片产状多为北倾, 岩块多呈透镜化构造包裹于强片理化的混杂基质中, 形态多样, 大小悬殊, 小者几十厘米, 大者可达几百米。泥砂质混杂基质由一套变灰绿色凝灰质石英砂岩、深灰色变质长石石英砂岩、薄层灰黑色硅质板岩、灰色板岩等组成, 普遍遭受变形呈片理化。

2 岩石学特征

白云山蛇绿混杂岩主要岩石类型的岩石学特征如下:

二辉橄榄岩呈纤状变晶结构、变余网环状构造, 主要矿物橄榄石部分已发生蛇纹石化、纤维闪石化, 残留斜方辉石和单斜辉石约占 30%, 磁铁矿约占 8%(图 2e)。

蛇纹岩岩石为灰绿色、黑绿色或黄绿色, 色泽不均匀, 质软、具滑感。主要矿物由蛇纹石组成, 局部可见滑石化。镜下见显微鳞片变晶或显微纤维变晶结构, 构造变形强烈, 呈片理化、透镜化、致密块状或带状、交代角砾状等构造。

辉长岩可以划分为条带状辉长岩(图 2b)和块状辉长岩两种类型。条带状辉长岩为灰色、灰白色, 条带状构造, 堆晶结构, 由普通辉石和斜长石组成(图 2f), 辉石为半自形粒状, 具角闪石化、绿泥石化, 斜长石呈半自形板长柱状, 具绢云母化。岩石堆晶条

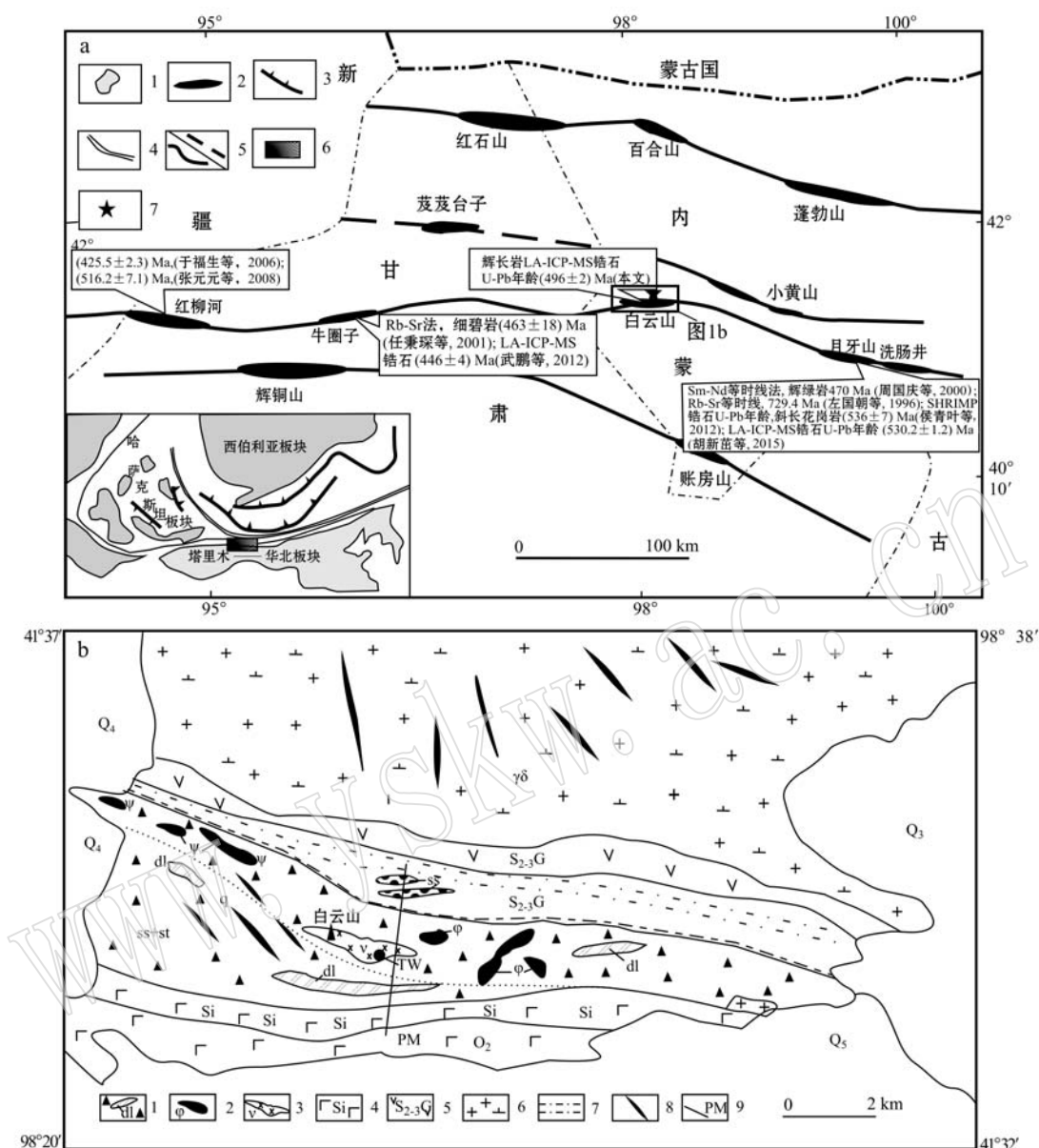


图1 白云山蛇绿混杂岩地质简图(a 据杨合群等, 2010; b 据甘肃省第二区域地质大队, 1972^①修编)

Fig. 1 Schematic geological map of ophiolite mélangé in Baiyunshan (a modified after Yang Hequn *et al.*, 2010; b modified after No. 2 Regional Geological Party of Gansu Province, 1972^①)

a: 1—板块(陆块); 2—蛇绿岩; 3—俯冲带; 4—主缝合带; 5—构造边界; 6—研究区; b: 1—构造混杂带; 2—蛇纹石化二辉橄榄岩岩块; 3—辉长岩岩块; 4—枕状玄武岩夹硅质岩和板岩; 5—公婆泉群火山岩; 6—花岗闪长岩; 7—公婆泉群变形砂板岩; 8—石英脉; 9—采样剖面; dl—白云岩; sl—砂板岩; ss+st—变质砂岩夹粉砂岩; st+si—粉砂岩夹硅质岩; Q_4 —第四系

a: 1—plate (massif); 2—ophiolite; 3—subduction belt; 4—major suture belt; 5—tectonic boundary; 6—study area; b: 1—tectonic mélangé suite; 2—serpentinized lherzolite blocks; 3—gabbro blocks; 4—pillow basalt and chert; 5—volcanic rocks of Gongpoquan Group; 6—granodiorite; 7—metamorphic sandstone siltstone of Gongpoquan Group; 8—quartz vein; 9—sampling profile; dl—dolomite; sl—sand slate; ss+st—metamorphic sandstone siltstone; st+si—siltstone and chert; Q_4 —Quaternary

带表现为辉石和斜长石矿物分层特征, 条带从几毫米至数厘米不等。块状辉长岩为灰色, 细粒结构, 块状构造, 主要矿物为普通辉石、斜长石和角闪石。普

通辉石为半自形粒状, 角闪石它形粒状, 两者均具绿泥石化。斜长石呈半自形板柱状, 部分具聚片双晶, 具钠黝帘石化、绢云母化。

① 甘肃省第二区域地质大队, 1972. 1:200 000 石板井幅地质图。

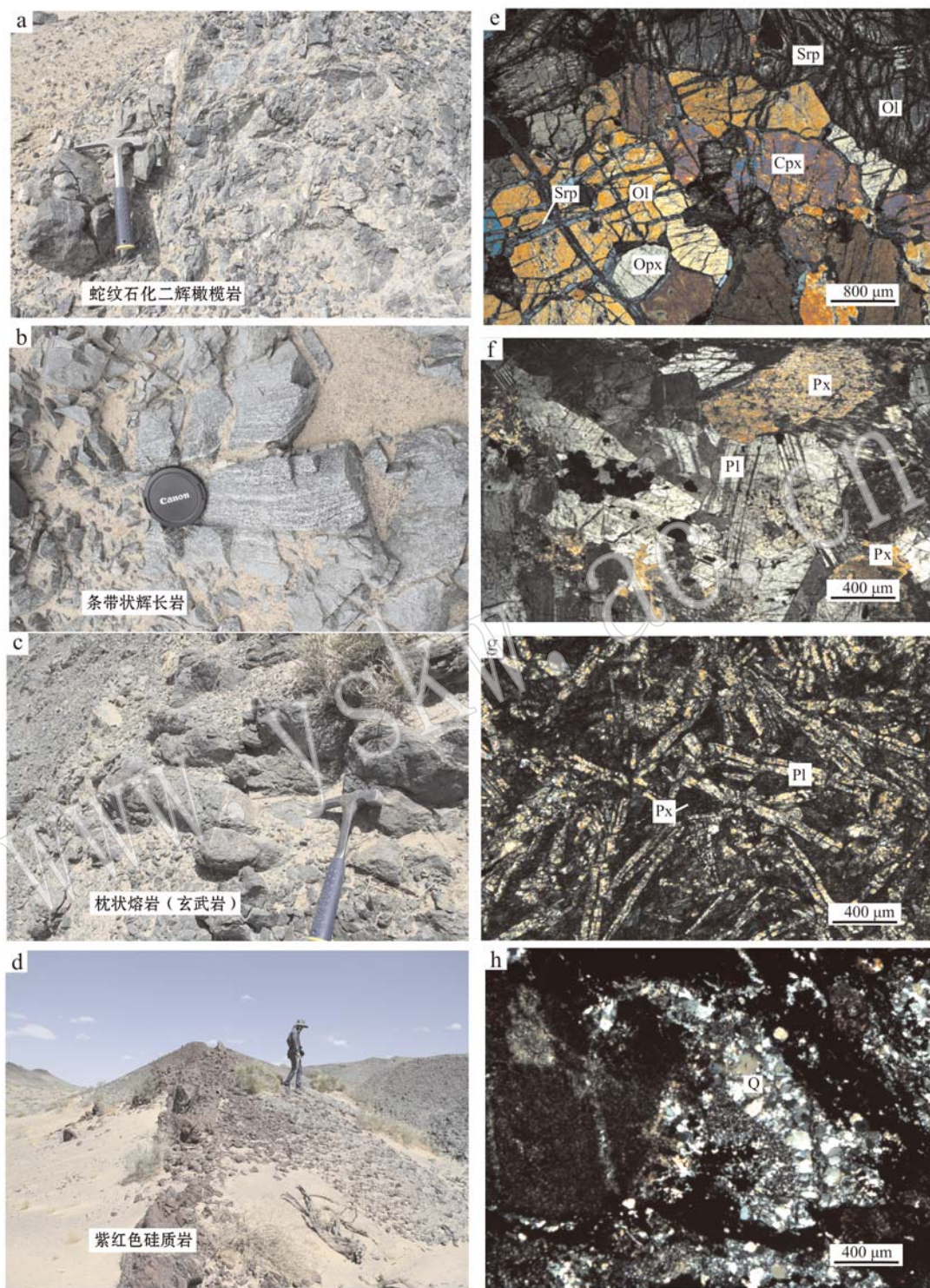


图 2 白云山蛇绿岩主要岩石野外照片(a~d)和镜下照片(e~h)(正交偏光)

Fig. 2 Major rocks (a~d) and microscopic (e~h) photos from Baiyunshan ophiolite mélangé belt (crossed nicols)

a、e—蛇纹石化二辉橄榄岩; b、f—条带状辉长岩; c、g—枕状玄武岩; d、h—紫红色硅质岩; Ol—橄榄石; Opx—斜方辉石; Cpx—单斜辉石;

Px—辉石; Pl—斜长石; Sep—蛇纹石; Q—石英

a、e—serpentinized lherzolite; b、f—banded gabbro; c、g—pillow basalt; d、h—purple chert; Ol—olivine; Opx—orthopyroxene;

Cpx—clinopyroxene; Px—pyroxene; Pl—plagioclase; Sep—serpentinize; Q—quartz

枕状熔岩主要为蚀变玄武岩, 样品(BY7-1~3)多具无斑填间结构, 少数具斑状结构。斑晶为普通辉石, 基质呈间粒结构, 长条状斜长石微晶呈杂乱分布, 其间充填绿泥石化辉石。样品(BY8-1~4)为球状玄武岩, 岩石结晶程度低, 纤维状辉石和斜长石呈束状、帚状集合体。枕状玄武岩(BY9-1~4)为灰黑色-深灰色, 多为无斑结构, 少数具有斑状结构, 基质呈粗玄结构(图2g), 主要矿物为浅紫色含钛普通辉石和斜长石, 普通辉石含量约25%~30%, 基性斜长石约55%~65%, 磁铁矿小于5%, 普通辉石具有纤闪石化、绿泥石化, 长石具轻微钠黝帘石化和绢云母化。

硅质岩呈灰色、紫红色, 薄层, 夹于粉砂质泥岩、板岩之中, 硅质多重结晶呈微晶石英, 含少量

绢云母、绿泥石和方解石等, 岩石普遍赤铁矿化(图2h)。

3 样品及分析方法

本文分析样品均采自白云山蛇绿混杂岩剖面(图3), 选择相对新鲜的岩石, 通过室内显微镜下仔细观察后, 挑选出蚀变较弱、较新鲜的二辉橄榄岩、辉长岩和玄武岩代表性样品, 测试分析在天津地质矿产研究所测试完成, 主量元素采用X射线荧光光谱法(XRF)测试, Fe_2O_3 、 FeO 应用氢氟酸-硫酸溶样、重铬酸钾滴定容量法测定, 分析精度优于2%, 微量元素使用等离子体质谱仪(ICP-MS)测试, 分析精度优于5%。

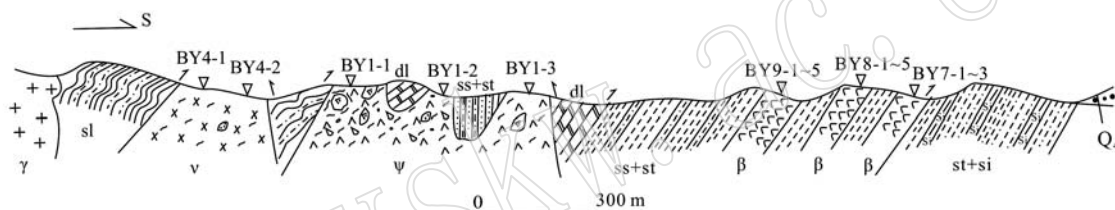


图3 白云山蛇绿混杂岩带剖面图

Fig. 3 Geological section of Baiyunshan ophiolite mélangé belt

γ—花岗岩; v—辉长岩; Ψ—蛇纹质混杂岩; β—枕状玄武岩; dl—白云岩; sl—砂板岩; ss+st—变质砂岩夹粉砂岩未分; st+si—粉砂岩夹硅质岩; Q₄—第四系; ▽—样品位置

γ—granite; v—gabbro; Ψ—serpentinized mélangé; β—pillow basalt; dl—dolomite block; sl—sand slate; ss+st—metamorphic sandstone siltstone slice; st+si—siltstone and chert; Q₄—Quaternary; ▽—sampling location

测年样品辉长岩(BY4-2)采自白云山, 经纬度为北纬 41°35′2.49″, 东经 98°24′43.73″。锆石 U-Th-Pb 测年在天津地质调查中心实验室进行, 锆石挑选由河北省区域地质矿产调查研究所实验室完成, 锆石阴极发光照相和 LA-MC-ICP-MS 定年在天津地质调查中心实验室完成, 使用标准锆石 91500 进行分馏校正, 激光束斑直径 20 μm, 分析方法参见 Liu 等(2009), 采用 ICP-MS DataCal 程序和 Isoplot (ver3.0)程序进行数据处理(Ludwig, 2003)。

4 地球化学特征

本次共测试 3 件超基性岩样品、2 件辉长岩样品和 11 件玄武岩样品, 它们的主量微量元素分析结果见表 1 所示。

4.1 超基性岩

4.1.1 主量元素

本次测试的 3 件超基性岩样品中 1 件为蛇纹岩, 另外 2 件为蛇纹石化二辉橄榄岩。其中蛇纹岩的 SiO_2 含量为 39.55%, Al_2O_3 为 1.47%, CaO 为 0.24%, MgO 和 $\text{Fe}_2\text{O}_3^{\text{T}}$ 的含量较高, $\text{Fe}_2\text{O}_3^{\text{T}}$ 为 11.67%, MgO 为 38.41%, Na_2O 含量小于 0.01% (表 1); 蛇纹石化二辉橄榄岩的 SiO_2 含量为 42.74%~43.70%, CaO 含量为 4.80%~4.91%, MgO 和 $\text{Fe}_2\text{O}_3^{\text{T}}$ 的含量较高, $\text{Fe}_2\text{O}_3^{\text{T}}$ 含量为 7.97%~9.07%, MgO 含量为 30.86%~32.34%, Na_2O 含量很低, Na_2O 含量为 0.032%~0.035%, $\text{Mg}^{\#}$ 为 75.92~80.01。 TiO_2 含量为 0.039%~0.049%, Al_2O_3 含量为 3.32%~3.45%; $\text{K}_2\text{O} + \text{Na}_2\text{O}$ 均小于 0.20%, 显示出高镁、低钛、贫碱和贫铝特征。

4.1.2 稀土元素

表 1 白云山蛇绿混杂岩主量元素($w_B/\%$), 稀土元素和微量元素($w_B/10^{-6}$)分析结果及特征参数表

Table 1 Analyses of major elements($w_B/\%$), trace elements and rare earth elements($w_B/10^{-6}$), from the ophiolite mélange in the Baiyunshan area																
样号	BY1-1	BY1-2	BY1-3	BY4-1	BY4-2	BY7-1	BY7-2	BY7-3	BY8-1	BY8-2	BY8-3	BY8-5	BY9-1	BY9-3	BY9-4	BY9-5
岩石	二辉橄榄岩	蛇纹岩	二辉橄榄岩	辉长岩	辉长岩	玄武岩	玄武岩	玄武岩	玄武岩	玄武岩	玄武岩	玄武岩	玄武岩	玄武岩	玄武岩	玄武岩
SiO ₂	43.70	39.55	42.74	47.52	46.86	48.84	49.23	51.71	46.21	46.68	5.33	43.26	54.68	43.20	48.56	46.96
TiO ₂	0.04	0.03	0.05	0.10	0.12	1.47	1.24	1.26	1.92	1.82	1.99	2.01	2.63	3.12	1.95	2.04
Al ₂ O ₃	3.45	1.47	3.32	19.79	20.38	15.92	14.26	14.15	16.29	15.86	16.16	16.63	16.36	19.09	16.13	16.98
Fe ₂ O ₃	3.76	6.67	2.78	0.69	0.98	2.39	2.29	1.86	1.79	1.38	1.76	1.38	5.06	10.04	1.69	2.46
FeO	4.05	1.28	3.97	3.14	3.87	7.78	5.04	5.17	7.69	7.46	8.33	8.88	6.02	7.33	6.80	6.56
MnO	0.14	0.08	0.11	0.09	0.09	0.15	0.15	0.14	0.16	0.15	0.16	0.16	0.2	0.18	0.16	0.17
MgO	30.86	38.41	32.34	9.07	9.26	6.98	4.52	4.14	6.87	6.55	7.01	8.03	2.88	4.13	4.74	5.55
CaO	4.91	0.24	4.80	14.54	13.16	8.59	16.04	14.77	12.11	13.30	11.78	11.17	3.08	2.68	11.76	11.52
K ₂ O	0.01	0.01	0.016	0.07	0.05	0.27	0.15	0.09	0.30	0.24	1.18	0.62	1.85	3.00	0.37	0.54
Na ₂ O	0.04	0.00	0.03	1.92	1.50	4.54	5.23	5.33	3.75	3.93	2.42	2.95	3.81	2.95	4.66	4.31
P ₂ O ₅	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	0.16	0.13	0.14	0.36	0.33	0.36	0.37	0.55	0.48	0.39	0.40
灼失	8.57	12.07	9.40	2.57	3.26	2.83	1.48	1.27	2.51	2.28	3.53	4.50	2.59	3.80	2.55	2.88
Σ	99.54	99.81	99.57	99.50	99.54	99.91	99.77	100.04	99.96	99.98	100.01	99.96	99.71	100.01	99.75	100.37
Cr	4 670	3 250	2 500	1 460	1 270	400	302	314	343	325	297	344	247	384	286	340
Ni	1 010	1 910	897	169	152	148	116	120	224	216	192	231	88.9	311	202	205
Co	86.7	97.1	74.4	30.7	37.0	45.3	33.3	35.9	44.1	43.4	43.7	47.3	43.2	61.4	42.4	44.3
Rb	5.20	5.30	5.30	4.20	4.60	8.10	7.80	5.40	8.70	0.97	27.50	17.30	52.90	88.80	11.10	15.80
Cs	0.60	0.05	0.30	0.06	0.06	0.41	0.42	0.17	0.70	0.55	2.40	1.70	3.63	6.16	0.78	1.08
Sr	19.6	15.2	17.2	248.0	168.0	243.0	154.0	137.0	336.0	155.0	259.0	278.0	193.0	180.0	251.0	346.0
Ba	7.01	2.01	11.70	17.30	18.70	71.30	45.70	57.00	133.00	112.00	334.00	179.00	293.00	1 210.00	127.00	193.00
V	81.5	40.5	75.5	98.9	92.6	217.0	176.0	184.0	223.0	207.0	218.0	218.0	168.0	218.0	206.0	221.0
Sc	23.10	7.89	25.80	25.90	19.00	32.20	27.60	29.80	29.60	28.80	27.80	28.20	30.10	33.20	29.00	29.50
Nb	0.17	0.09	0.22	0.07	0.06	4.90	3.96	4.16	21.80	20.20	22.40	22.40	20.90	24.90	23.30	24.40
Ta	0.02	0.01	0.02	0.01	0.01	0.35	0.28	0.29	1.55	1.46	1.58	1.64	1.58	1.86	1.68	1.74

续表 1
Continued Table 1

样号	BY1-1	BY1-2	BY1-3	BY4-1	BY4-2	BY7-1	BY7-2	BY7-3	BY8-1	BY8-2	BY8-3	BY8-5	BY9-1	BY9-3	BY9-4	BY9-5
岩石	二辉橄榄岩	蛇纹岩	二辉橄榄岩	辉长岩	辉长岩	玄武岩	玄武岩	玄武岩	玄武岩	玄武岩	玄武岩	玄武岩	玄武岩	玄武岩	玄武岩	玄武岩
Zr	1.42	1.01	2.11	2.31	3.14	92.90	73.20	75.80	161.00	151.00	164.00	167.00	160.00	186.00	170.00	178.00
Hf	0.05	0.04	0.07	0.11	0.13	2.82	2.20	2.28	4.24	3.92	4.22	4.39	4.33	5.04	4.34	4.58
Ga	2.57	1.60	1.91	10.30	9.90	17.20	14.90	14.80	17.60	17.10	18.80	18.60	19.20	24.20	17.20	18.30
U	0.07	0.01	0.14	0.12	0.06	0.18	0.24	0.18	0.91	0.69	0.68	0.7	0.54	0.57	1.52	1.63
Th	0.04	0.04	0.04	0.07	0.26	0.53	0.39	0.42	2.35	2.20	2.38	2.53	2.24	2.48	2.64	2.79
La	0.19	0.12	0.24	0.32	0.56	5.54	4.46	4.51	19.10	18.20	20.30	19.90	23.60	20.50	20.40	21.20
Ce	0.37	0.31	0.49	0.90	1.12	14.00	11.10	11.40	39.60	37.40	41.30	40.80	40.30	86.50	42.00	43.60
Pr	0.05	0.05	0.07	0.16	0.20	2.29	1.85	1.88	5.44	5.14	5.66	5.57	7.40	6.15	5.74	6.03
Nd	0.27	0.26	0.34	0.90	1.00	11.50	9.16	9.52	23.10	21.80	24.00	23.90	32.80	26.60	24.10	25.30
Sm	0.10	0.08	0.10	0.36	0.34	3.73	2.89	2.99	5.15	4.91	5.42	5.40	7.55	6.17	5.36	5.63
Eu	0.04	0.01	0.04	0.18	0.20	1.26	1.04	1.02	1.54	1.52	1.70	1.65	2.38	2.16	1.63	1.68
Gd	0.14	0.10	0.16	0.53	0.54	4.90	3.70	3.90	5.60	5.26	5.60	5.80	7.81	6.41	5.70	6.05
Tb	0.03	0.02	0.03	0.10	0.10	0.86	0.65	0.70	0.92	0.88	0.94	0.97	1.27	1.04	0.93	0.97
Dy	0.23	0.11	0.25	0.70	0.78	5.43	4.16	4.28	5.40	5.15	5.51	5.66	7.26	5.90	5.44	5.71
Ho	0.05	0.02	0.06	0.16	0.18	1.09	0.84	0.86	1.04	1.01	1.08	1.11	1.44	1.12	1.08	1.12
Er	0.17	0.06	0.18	0.46	0.54	2.94	2.30	2.36	2.95	2.84	3.00	3.15	3.82	3.12	2.96	3.04
Tm	0.03	0.01	0.03	0.07	0.08	0.43	0.34	0.34	0.43	0.41	0.43	0.45	0.54	0.44	0.44	0.45
Yb	0.18	0.06	0.19	0.44	0.54	2.65	2.04	2.10	2.73	2.60	2.71	2.83	3.37	2.67	2.70	2.82
Lu	0.03	0.01	0.03	0.07	0.08	0.39	0.31	0.32	0.42	0.38	0.42	0.44	0.52	0.40	0.41	0.44
Y	1.31	0.55	1.42	3.69	4.16	26.80	20.90	21.10	26.40	25.10	27.20	27.70	34.00	26.90	26.30	27.70

蛇纹石化二辉橄榄岩的 ΣREE 的含量为 $1.227 \times 10^{-6} \sim 2.212 \times 10^{-6}$, 稀土元素总量较低; 3件样品稀土配分曲线均为右倾, $(\text{La}/\text{Yb})_{\text{N}}$ 为 0.71 ~ 1.34, 显示出轻稀土元素富集的特点, 样品 δEu 的变化范围为 0.46 ~ 0.97, 显示弱的 Eu 负异常(图 4a)。

4.1.3 微量元素

白云山蛇纹石化二辉橄榄岩具富集相容元素 Cr

($2500 \times 10^{-6} \sim 4670 \times 10^{-6}$)、Co($74.4 \times 10^{-6} \sim 97.1 \times 10^{-6}$)、Ni($897 \times 10^{-6} \sim 1910 \times 10^{-6}$)及贫不相容元素的特征(表 1), 与蛇绿岩超镁铁单元岩石相似(Coleman, 1977)。在原始地幔标准化微量图解(图 4b)上, 蛇纹石化二辉橄榄岩微量元素配分曲线总体呈右倾趋势, 不相容元素(Sr、Ba、U 等)相对富集, 而高场强元素(Nb、Zr、Hf、Ti)相对亏损的特征。

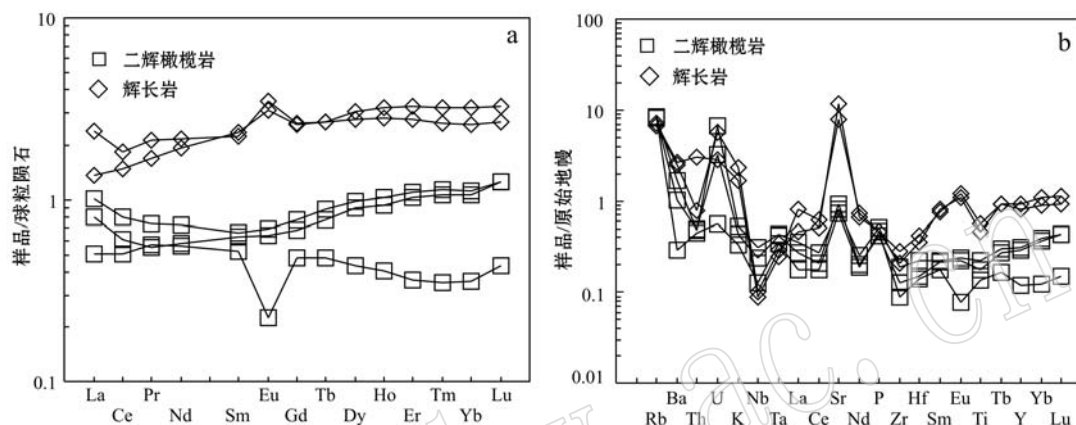


图 4 白云山蛇绿岩中二辉橄榄岩、辉长岩微量元素原始地幔标准化图解(a)和稀土元素球粒陨石标准化图(b)
(标准值据 Sun and McDonough, 1989)

Fig. 4 Primitive mantle-normalized multi-element spidergram (a) and chondrite-normalized REE patterns (b) for serpentinized pyroxene peridotite and gabbro in Baiyunshan ophiolite mélange (normalization values after Sun and McDonough, 1989)

4.2 辉长岩

4.2.1 主量元素

2件辉长岩样品的 SiO_2 含量为 46.86 % ~ 47.52 %, 平均为 47.19 %, 明显具有贫硅的特点。与中国及世界辉长岩的平均化学成分相比, 辉长岩以富铝、高钙、低钾、钛、磷为特征。辉长岩富铝(Al_2O_3 含量为 19.79 % ~ 20.38 %, 平均 20.09 %), 高钙(CaO 为 13.16 % ~ 14.54 %, 平均 13.85 %), MgO 含量为 9.07 % ~ 9.26 %, $\text{Mg}^\#$ 为 59.63 ~ 64.67, 略低于原生岩浆 $\text{Mg}^\#$ 的 68 ~ 75 (Willson, 1989); 低钾、钛和磷(K_2O 为 0.045 % ~ 0.066 %, 平均为 0.055 %; TiO_2 为 0.10 % ~ 0.12 %, 平均为 0.11 %; P_2O_5 为 0.01 %); Na_2O 含量为 1.5 % ~ 1.92 %, $\text{Na}_2\text{O} > \text{K}_2\text{O}$ 。

4.2.2 稀土元素

辉长岩 2 件样品的稀土元素含量低, ΣREE 的变化范围为 $5.35 \times 10^{-6} \sim 6.26 \times 10^{-6}$; 样品稀土元素配分曲线近于平直, 轻稀土元素相对重稀土元素亏损, $(\text{La}/\text{Yb})_{\text{N}}$ 为 0.49 ~ 0.70, 样品均具有明显的

正 Eu 异常, δEu 为 1.26 ~ 1.42, 显示有斜长石的结晶分异作用(图 4a)。

4.2.3 微量元素

在原始地幔标准化微量图解(图 4b)上, 辉长岩微量元素配分曲线总体上呈右倾趋势, 不相容元素(Sr、Ba、K、U 等)相对富集, 而高场强元素(Nb、Zr、Hf)相对亏损, 显示同源岩浆成因特征, 其中 Sr、Ba 的富集与斜长石的堆晶有关, 而 Nb、Zr、Hf 等的亏损反映岩浆或源区受到过地壳物质的混染或者流体对岩浆交代作用的影响。但辉长岩的 Nb/U 值低(0.62 ~ 1.06), 表明导致岩体成分变化的因素可能是源区流体交代作用的影响。

4.3 枕状玄武岩

4.3.1 主量元素

白云山玄武岩由于形成后遭受了不同程度的变质和蚀变, 导致一些性质活泼的主量元素(如 K、Na)和低场强元素在变质和蚀变过程中发生了迁移, 因此, 不采用 TAS 图对岩石分类, 而采用不活泼元素(如稀土和高场强元素)进行岩石分类和元素地球化

学特征研究。本区枕状玄武岩在 $Zr/TiO_2 - Nb/Y$ 图解(图 5)中,一部分位于碱性玄武岩区域(样品 BY8-1~4、BY9-1~4),岩石显微镜下可见细小粒状浅紫色含钛辉石斑晶,具少斑状结构,基质具间粒结构,部分具球颗结构;另一部分位于亚碱性玄武岩(样品 BY7-1~3)区域,岩石镜下呈无斑或少斑结构,矿物主要为斜长石和普通辉石。

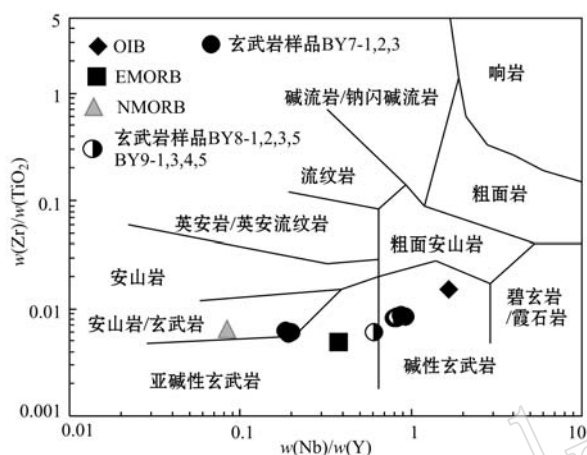


图 5 白云山蛇绿混杂带中枕状玄武岩的 $Zr/TiO_2 - Nb/Y$ 图(据 Pearce and Cann, 1973)

Fig. 5 $Zr/TiO_2 - Nb/Y$ plot of pillow lava in ophiolite mélangé of Baiyunshan (after Pearce and Cann, 1973)

从表 1 可见,白云山枕状玄武岩的 SiO_2 含量为 46.98%~52.35%, TiO_2 含量为 1.26%~2.71%,

部分 >2%, 属高 Ti 型; Al_2O_3 含量为 14.33%~17.42%, MgO 为 2.96%~8.41%, $Mg^\#$ 为 33~59, 平均 51, 低于原生岩浆的 $Mg^\#$ 68~75 (Willson, 1989), 表明岩浆可能经历了一定程度的结晶分异作用。 $FeO > Fe_2O_3$, CaO 含量为 11.81%~16.32%, 可能与次生碳酸盐杂质有关, 这与镜下观察的微裂隙中存在方解石的现象一致; $Na_2O + K_2O$ 为 3.73%~6.18%, 且 $Na_2O > K_2O$, 属于富钠玄武岩; 岩石 Na_2O 含量 (2.51%~5.40%) 远大于 K_2O 含量 (0.09%~3.12%)。 P_2O_5 含量为 0.13%~0.57%。

4.3.2 微量元素

在微量元素蛛网图(图 6b)中,缺乏汇聚板块边缘玄武岩特有的 Nb、Ta、Ti 的亏损,而 8 件枕状玄武岩样品呈现与洋岛玄武岩(OIB)具有协调一致的微量元素曲线分布特征,3 件枕状玄武岩呈现与 E-MORB 相一致的曲线模式,所有样品 Zr、Hf、Sm 具有一致的相似性。白云山枕状玄武岩的微量元素与 N-MORB 相比,全部样品富集 Rb、Ba、Th、Nb、Ta、Zr、Ti 等不相容元素, Y、Yb 相对亏损。

4.3.3 稀土元素

枕状玄武岩稀土元素总量分为两组,一组较高 (ΣREE 为 $107.71 \times 10^{-6} \sim 127 \times 10^{-6}$), 另一组为 ($44.84 \times 10^{-6} \sim 57.01 \times 10^{-6}$), 均明显高于洋脊玄武岩(MORB 的 ΣREE 为 39.11×10^{-6})。在球粒陨石标准化曲线图(图6a)上,一组稀土元素配分曲线

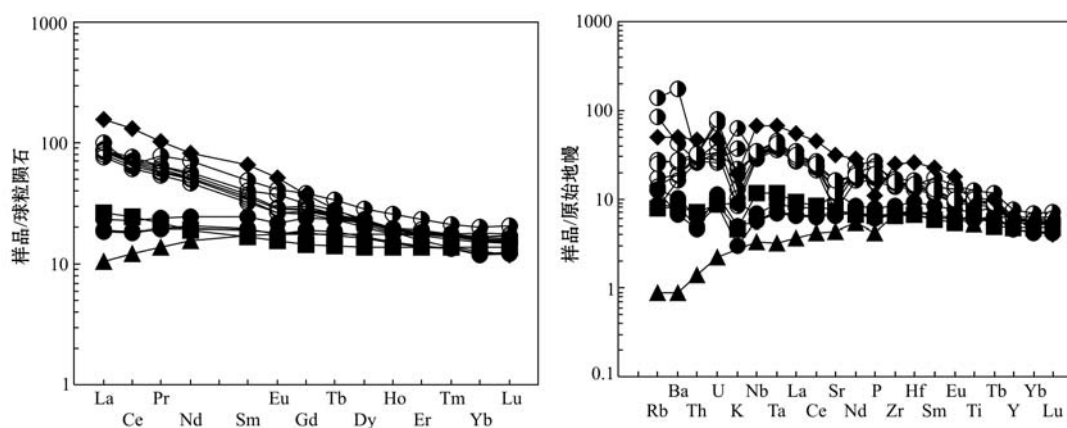


图 6 白云山枕状玄武岩稀土元素球粒陨石标准化图解(a)和微量元素原始地幔标准化图解(b)(标准值据 Sun and McDonough, 1989, 图例同图 5)

Fig. 6 Primitive mantle-normalized multi-element spidergram (a) and chondrite-normalized REE patterns (b) for pillow lava in Baiyunshan (normalization values after Sun and McDonough, 1989, legends as for Fig. 5)

为右倾, 为轻稀土元素 (LREE) 富集型, $LREE/HREE$ 为 $5.15 \sim 5.56$, 轻、重稀土元素分馏明显, $(La/Yb)_N$ 为 $4.44 \sim 5.18$, 与 OIB 曲线基本一致。另一组稀土曲线近于平直, 轻稀土富集, $LREE/HREE$ 为 $2.05 \sim 2.13$, 轻、重稀土元素分馏不明显, $(La/Yb)_N$ 为 $1.41 \sim 1.47$, 与 E-MORB 曲线基本一致。两组均无明显铕异常 (Eu^*/Eu 为 $0.86 \sim 1.08$), 表明岩浆没有发生明显的斜长石分离结晶作用。玄武岩样品中 8 件玄武岩样品与洋岛玄武岩稀土元素分配型式十分一致, 其他 3 件样品与 E-MORB 具有相似的稀土元素配分曲线 (图 6b), 与 N-

MORB 明显不同。

5 辉长岩锆石 U-Pb 测年

本文对蛇绿岩带中的辉长岩进行了 LA-MC-ICP-MS 锆石 U-Pb 测年, 其结果见表 2。辉长岩样品 (BY4-2) 的阴极发光图像显示, 锆石无色透明, 颗粒粒度为 $80 \sim 150 \mu m$, 锆石晶体形态有短柱状、柱状, 总体上自形到半自形, 柱状锆石的长宽比为 $1:1 \sim 2:1$, 锆石具有明显的宽板状-条带结构 (图 7), 为辉长岩锆石特点。

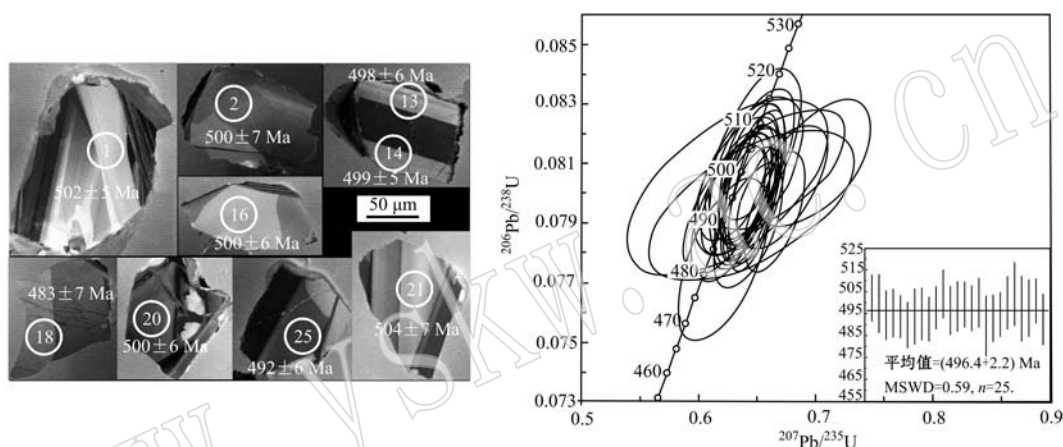


图 7 白云山辉长岩锆石 CL 图像及 U-Pb 年龄

Fig. 7 CL images and U-Pb concordia diagram of zircons from gabbro of Baiyunshan

由表 2 可以看出, 25 颗锆石 25 个测点的年龄都非常集中, 绝大多数位于谐和线上, $^{206}Pb/^{238}U$ 的年龄变化于 $490 \sim 504$ Ma 之间, 获得加权平均年龄为 496 ± 2.2 Ma (图 7), 相应测点的 Th、U 分别变化于 $4 \times 10^{-6} \sim 115 \times 10^{-6}$ 和 $44 \times 10^{-6} \sim 395 \times 10^{-6}$ 之间, Th/U 值主体为 $0.09 \sim 0.34$, 二者之间的相关性良好, 因此, 辉长岩的 U-Pb 年龄 496 ± 2.2 Ma 代表该辉长岩形成的时间, 揭示了蛇绿岩形成时代为晚寒武世。

6 讨论

6.1 白云山蛇绿岩形成时代

蛇绿岩是俯冲消失的古洋壳残片, 是洋壳形成、俯冲、消亡过程的产物, 探讨蛇绿岩的时代是一个十分复杂的问题, 以往人们无论是间接的推断, 还是直接的测定都难以得到理想的结果, 其原因是多方面

的, 原因之一是对蛇绿岩年龄的代表意义存在不同的认识。由于蛇绿岩是一套岩石组合的总称, 自下而上包括变形橄榄岩、超镁铁质堆晶岩、辉长岩、席状岩墙杂岩、枕状熔岩和深海沉积物, 每一个岩石端员代表不同的地质含义; 其次是不同的测年方法存在差异, 也会产生不同的年龄。因此, 每个岩石组成的年龄具有特定的时代意义, 在应用年龄时应分清测年对象和它代表的地质意义。

本文研究的白云山蛇绿岩是牛圈子-洗肠井蛇绿混杂岩带的重要组成部分。前人对红柳河-牛圈子-洗肠井蛇绿岩带的不同地段开展了大量的同位素年代学研究, 研究资料表明不同的测年方法和测年对象得出了不同的年龄值 (图 1a、表 3), 主要有新元古代和古生代 (志留纪、奥陶纪、寒武纪)。由于 Rb-Sr 或 Sm-Nd 等时线法测年对象不同, 测得年龄差距较大, 斜长花岗岩为 729.4 Ma, 辉长岩为 470 Ma, 细碧岩为 463.18 Ma (表 3)。Rb-Sr 等时线法方

表 2 白云山地区蛇绿岩中辉长岩 LA-MC-ICP-MS 锆石 U-Th-Pb 同位素分析结果
Table 2 Zircon LA-MC-ICP-MS U-Th-Pb analytical results of gabbro from the ophiolite in Baiyunshan area

BY4.2 点号	$w_B/10^{-6}$		Th/U	同位素比值								同位素年龄/Ma							
				$^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$		$^{207}\text{Pb}/^{235}\text{U}$		$^{207}\text{Pb}/^{206}\text{Pb}$		$^{208}\text{Pb}/^{232}\text{Th}$		$^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$		$^{207}\text{Pb}/^{235}\text{U}$		$^{207}\text{Pb}/^{206}\text{Pb}$			
	Pb	U		1 σ	1 σ	1 σ	1 σ	1 σ	1 σ	1 σ	1 σ	1 σ	1 σ	1 σ	1 σ	1 σ			
1	8	104	0.144 4	0.081 0	0.000 9	0.699 3	0.019 8	0.062 6	0.002 0	0.030 0	0.001 4	502	5	538	15	695	69		
2	7	91	0.127 7	0.080 6	0.001 1	0.642 8	0.018 9	0.057 9	0.002 0	0.029 0	0.001 5	500	7	504	15	525	76		
3	29	368	0.257 3	0.079 7	0.000 9	0.635 1	0.009 0	0.057 8	0.000 9	0.030 7	0.000 4	494	6	499	7	522	33		
4	26	326	0.213 8	0.079 9	0.000 9	0.638 9	0.009 5	0.058 0	0.000 8	0.031 0	0.000 3	495	6	502	7	531	31		
5	28	354	0.239 9	0.079 6	0.000 8	0.644 3	0.009 6	0.058 7	0.000 8	0.030 7	0.000 3	494	5	505	8	557	29		
6	13	167	0.153 3	0.078 9	0.000 8	0.642 9	0.012 0	0.059 1	0.001 2	0.031 1	0.000 7	490	5	504	9	570	43		
7	3	44	0.102 5	0.079 6	0.001 0	0.645 5	0.035 8	0.058 8	0.004 1	0.037 6	0.004 1	494	6	506	28	560	150		
8	21	272	0.211 1	0.079 8	0.001 0	0.648 5	0.009 5	0.058 9	0.000 8	0.030 9	0.000 5	495	6	508	7	565	29		
9	22	279	0.209 1	0.079 4	0.000 8	0.665 1	0.010 4	0.060 8	0.000 9	0.030 6	0.000 5	492	5	518	8	631	31		
10	28	337	0.340 3	0.080 3	0.000 8	0.642 0	0.009 3	0.058 0	0.000 8	0.032 1	0.000 3	498	5	504	7	530	29		
11	22	272	0.195 2	0.081 3	0.000 9	0.650 6	0.013 0	0.058 0	0.001 1	0.039 1	0.000 8	504	6	509	10	531	40		
12	12	163	0.117 4	0.080 0	0.000 9	0.634 7	0.013 7	0.057 5	0.001 3	0.029 8	0.001 1	496	6	499	11	511	51		
13	18	226	0.194 7	0.080 4	0.000 9	0.645 8	0.010 0	0.058 3	0.000 8	0.032 3	0.000 5	498	6	506	8	541	31		
14	29	360	0.233 8	0.080 5	0.000 8	0.633 8	0.014 2	0.057 1	0.001 4	0.031 7	0.000 7	499	5	498	11	495	54		
15	16	205	0.227 8	0.080 2	0.000 8	0.671 1	0.015 7	0.060 7	0.001 6	0.032 2	0.000 6	497	5	521	12	628	57		
16	6	75	0.120 9	0.080 6	0.000 9	0.747 3	0.028 4	0.067 2	0.003 0	0.039 2	0.002 7	500	6	567	22	844	92		
17	10	137	0.167 0	0.077 8	0.001 1	0.621 1	0.015 9	0.057 9	0.001 7	0.031 9	0.000 9	493	7	491	13	527	63		
18	13	172	0.151 6	0.079 5	0.000 9	0.624 2	0.014 9	0.057 0	0.001 5	0.033 8	0.001 1	493	5	492	12	491	60		
19	31	395	0.228 4	0.079 7	0.000 8	0.639 5	0.008 8	0.058 2	0.000 9	0.032 0	0.000 4	495	5	502	7	536	33		
20	22	281	0.093 4	0.080 6	0.001 0	0.644 8	0.011 3	0.058 0	0.000 9	0.034 6	0.000 9	500	6	505	9	530	34		
21	9	119	0.124 8	0.081 3	0.001 2	0.648 1	0.015 9	0.057 8	0.001 5	0.033 9	0.001 2	504	7	507	12	523	57		
22	5	67	0.190 7	0.080 2	0.001 2	0.624 8	0.035 0	0.056 5	0.003 9	0.029 7	0.002 5	497	7	493	28	472	154		
23	19	241	0.153 2	0.080 2	0.001 1	0.650 7	0.009 8	0.058 8	0.000 8	0.033 2	0.000 7	497	7	509	8	561	30		
24	15	195	0.198 9	0.080 8	0.000 8	0.665 6	0.024 4	0.059 7	0.002 5	0.031 0	0.001 2	501	5	518	19	595	92		
25	16	209	0.221 4	0.079 4	0.000 9	0.625 7	0.012 8	0.057 2	0.001 2	0.031 3	0.000 7	492	6	493	10	498	48		

表 3 牛圈子-洗肠井蛇绿岩带测年表

Table 3 Isotopic age of ophiolite from Niujuanzi to Xichangjing area

蛇绿岩产地	测试对象	测年方法	同位素年龄	作者, 年代
月牙山	斜长花岗岩	Rb-Sr 等时线法	729.4 Ma	左国朝等(1996)
月牙山	斜长花岗岩	Sm-Nd 等时线	470 Ma	周国庆等(2000)
牛圈子东	细碧岩	Rb-Sr 等时线法	463 ± 18 Ma	任秉琛等(2001)
红柳河	辉长岩	单颗粒锆石 U-Pb 法	425.5 ± 2.3 Ma	于福生等(2006)
红柳河	角闪石	³⁹ Ar- ⁴⁰ Ar 法	462 Ma 之前	郭召杰等(2006)
红柳河	辉长岩	SHRIMP-II 锆石 U-Pb 法	516.2 ± 7.1 Ma	张元元等(2008)
牛圈子	辉长岩	LA-ICP-MS 锆石 U-Pb 法	446.5 ± 4.0 Ma	武鹏等(2012)
月牙山	斜长花岗岩	SHRIMP-II 锆石 U-Pb 法	536 ± 7 Ma	侯青叶等(2012)
月牙山	斜长花岗岩	LA-ICP-MS 锆石 U-Pb 法	530.2 ± 1.2 Ma	胡新苗等(2015)

法的分析结果相差如此悬殊(斜长花岗岩为 729.4 Ma, 细碧岩为 463.18 Ma), 被测对象是不同时代的, 还是假等时线值得思考, 若是后者, 其年龄可能并不具地质意义。角闪石⁴⁰Ar-³⁹Ar 年龄为 462 Ma, 该年龄代表了构造改造的热事件年龄, 而不是岩石形成的年龄。至于辉长岩单颗粒锆石 U-Pb 年龄 425.5 ± 2.3 Ma, 由于受所选择锆石(继承锆石、岩浆锆石、蜕晶锆石)影响, 要获得理想的结果, 必须将不同特征的锆石在镜下挑选、分开, 选择岩浆锆石来测试。LA-MC-ICP-MS 和 SHRIMP-II 锆石 U-Pb 测年法, 可以避免被测岩石中继承锆石和蜕晶锆石的影响, 以获得较为理想的锆石 U-Pb 年龄。大洋斜长花岗岩是由大洋玄武质岩浆结晶分异形成的花岗质岩石, 对蛇绿岩形成和演化过程的精确年龄测定, 具有重要的意义。月牙山斜长花岗岩的 LA-ICP-MS 和 SHRIMP-II 锆石 U-Pb 年龄基本一致, 代表了月牙山蛇绿岩形成的时代。蛇绿岩中的层状辉长岩是岩浆房堆晶岩, 可代表岩石圈伸展(洋壳形成的岩浆岩活动时间), 红柳河辉长岩 SHRIMP-II 锆石 U-Pb 为 516.2 ± 7.1 Ma, 牛圈子辉长岩 LA-ICP-MS 锆石 U-Pb 为 446.5 ± 4.0 Ma, 两者差距较大, 可能不同时。白云山蛇绿岩中辉长岩的 LA-MC-ICP-MS 锆石 U-Pb 年龄为 496 ± 2.2 Ma, 与红柳河辉长岩年龄相近(在误差范围内), 其形成时代为寒武纪晚期。综合已有同位素年代学资料及相关区域地质资料, 认为该蛇绿岩形成时代可能始于寒武纪, 主体为奥陶纪。

6.2 牛圈子-白云山-洗肠井蛇绿岩的形成环境

大陆造山带中的蛇绿岩属于古洋岩石圈的残片, 在其组成、类型及形成环境上具有多样性和不完整的层序, 多数蛇绿岩以构造蛇绿混杂岩形式产出, 因此, 厘清蛇绿岩的形成环境对探讨造山带地质演化具有十分重要的意义。蛇绿岩是一套岩石组合的

总称, 完整的层序自下而上包括变形橄榄岩、超镁铁质堆晶岩、辉长岩、席状岩墙杂岩、枕状熔岩和深海沉积物。由于构造蚀变作用的改造, 超铁镁质岩石变形橄榄岩及其堆晶岩改造强烈, 多蛇纹石化, 判别构造环境存在难度, 但是作为蛇绿岩组成单元的枕状熔岩(玄武岩)则是判别构造环境的理想对象。

6.2.1 枕状玄武岩的形成环境

在不活动性元素地球化学判别图解 Zr/Y - Zr 图(图 8a)中, 玄武岩的 8 件样品成分点均落入板内玄武岩区域, 3 件样品落入洋中脊玄武岩和板内玄武岩界线处; 在 2 Nb - Zr/4 - Y 图中 8 件玄武岩样品落入板内碱性玄武岩区, 3 件玄武岩样品落入 N 型 MORB 和火山弧玄武岩区域(图 8c); 在 Th/Yb - Ta/Yb 图中 8 件玄武岩样品落入 OIB 和 E-MORB 之间, 3 件位于 E-MORB 附近(图 8b); 在 Hf/3 - Th - Nb/16 图中, 3 件玄武岩样品落入 N 型 MORB 区域, 8 件玄武岩样品落入 E 型 MORB 和板内拉斑玄武岩区域(图 8d)。

此外, 白云山玄武岩的多元素 MORB 标准化分配曲线(图 6), 显示出类似 OIB 或 E-MORB 的特征。洋岛型玄武岩是洋壳的重要组成部分, 具有 OIB 型地球化学特征的碱性岩浆通常来自岩石圈之下的软流圈地幔, 可以由不同的地幔端员混合而成(Weaver, 1991, 1996; Ernst and Buchan, 2003)。洋岛玄武岩可以形成于大洋板内如夏威夷(Zindler *et al.*, 1984)或洋脊附近的海山(Nohda, 2009), 也可以形成于弧后盆地的海山环境如日本海(Hilton *et al.*, 1997); 既可以形成于地幔柱上涌过程的大洋板内环境, 如夏威夷岛链火山喷发的早期和晚期发育有 OIB 型碱性玄武岩(Blichert-Toft *et al.*, 2003; Abouchami *et al.*, 2005; Frey *et al.*, 2005), 也可以是由岩石圈减薄造成的大陆伸展构造环境的产物,

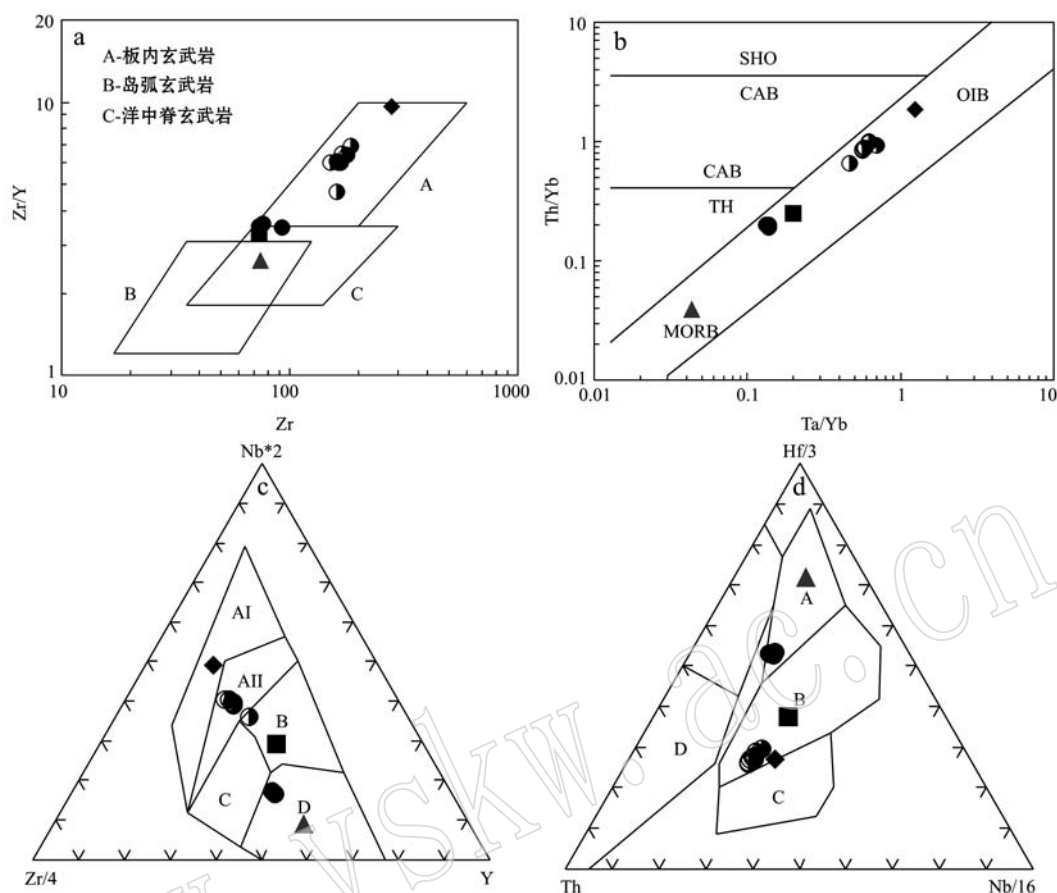


图8 白云山枕状玄武岩的地球化学图解(图例同图5)

Fig. 8 Geochemical diagrams for pillow lava in Baiyunshan area (legends as for Fig. 5)

a—Zr/Y—Zr图(Pearce 和 Norry, 1979): A—板内玄武岩; B—火山弧玄武岩; C—MORB; b—Th/Yb—Ta/Yb图(Pearce, 1982): SHO—钾玄岩; CAB—钙碱性玄武岩; OIB—洋岛玄武岩; MORB—洋中脊玄武岩; TH—拉斑玄武岩; c—2Nb—Zr/4—Y图(Meschede, 1986): AI—板内碱性玄武岩; AII—板内碱性玄武岩和板内拉斑玄武岩; B—E型MORB; C—板内拉斑玄武岩和火山弧玄武岩; D—N型MORB和火山弧玄武岩; d—Hf/3—Th—Nb/16图(Wood, 1980): A—N型MORB洋中脊玄武岩; B—E型MORB和板内拉斑玄武岩; C—碱性板内玄武岩; D—火山弧拉斑玄武岩

a—diagram of Zr/Y—Zr (after Pearce and Norry, 1979): A—interplate basalt; B—volcanic arc basalt; C—mid-ocean ridge basalt; b—diagram of Th/Yb—Ta/Yb (after Pearce, 1982): SHO—shoshonite; CAB—calc-alkali basalt; OIB—oceanic-island basalt; MORB—mid-ocean ridge basalt; TH—tholeiite; c—diagram of 2Nb—Zr/4—Y (after Meschede, 1986): AI—interplate alkaline basalt; AII—interplate alkaline basalt and interplate tholeiite; B—E-type MORB; C—interplate tholeiite and volcanic arc basalt; D—N-type MORB and volcanic arc basalt; d—diagram of Hf/3—Th—Nb/16 (after Wood, 1980): A—N-type MORB; B—E-type MORB and interplate tholeiite; C—interplate alkaline basalt; D—volcanic arc tholeiite basalt

如中国东部中生代碱性玄武岩(Xu *et al.*, 2004, 2007)。从白云山枕状玄武岩及其伴生的紫红色硅质岩的产出特征以及白云山枕状玄武岩的地球化学图解判别,认为白云山玄武岩中的OIB为洋岛环境,其中的E-MORB为洋中脊或大洋板内的产物,此时不具有岛弧,因而不是弧后盆地环境,更不是大陆伸展构造的产物。

6.2.2 枕状玄武岩源区特征

微量元素比值可以有效区分原始岩浆演化过程受流体或地壳混染的程度并指示源区性质,通常以Ba、La、Th、Nb、Ta、Zr、Hf和Yb等不相容元素较为

常用。由于La/Nb, Ba/Nb, Nb/Th等元素比值在海水蚀变和后期变质作用过程中有较高的稳定性,可以直接示踪源区性质(李曙光, 1993)。Fitton等认为,美国盆岭省玄武岩的La/Nb < 1.5,位于OIB范围内,起源于软流圈地幔;Sierra省的熔岩La/Nb > 1.5,可能起源于富集的岩石圈地幔(Fitton *et al.*, 1988)。白云山玄武岩8件样品(BY8-1~4, BY9-1~4)的La/Nb值为0.823~1.13 < 1.5, Zr/Nb值为7.30~7.66, Th/Nb为0.10~0.11,其Zr/Ba为0.14~1.35,与OIB具有相似的地球化学特征,反映其源区来自软流圈地幔。由于来自软流圈的玄武岩

浆相对高 Ti(如 OIB 的 TiO_2 含量平均为 2.86%),而来自岩石圈地幔的玄武岩浆相对低 Ti(Rollinson, 1993; Pearce, 1996),玄武岩样品(BY8-1~4、BY9-1~4)的 TiO_2 含量相对较高为 1.86%~2.71%,与 OIB 基本一致,也说明其来自软流圈地幔。其他 3 件玄武岩样品(BY7-1~3)的 La/Nb 为 1.08~1.13 < 1.5, Zr/Nb 为 18.22~18.96, Th/Nb 为 0.10~0.11, Zr/Ba 为 1.3~1.6,与 E-MORB 相近。Ryerson 和 Watson(1987)研究认为,洋中脊玄武岩的 Nb/Th 比值为 25,洋岛玄武岩的 Nb/Th 值为 10,岛弧玄武岩的 Nb/Th 值 < 5(Ryerson and Watson, 1987),白云山玄武岩的 Nb/Th 值为 8.75~10.15,与 OIB 十分接近。

关于牛圈子-白云山-洗肠井蛇绿岩的形成环境,长期以来存在较大分歧。一种观点认为红柳河-牛圈子-洗肠井蛇绿岩带是北山早古生代洋盆向南俯冲形成的弧后盆地俯冲消减的产物(左国朝等, 1990),时代为奥陶纪-志留纪;另一种观点认为其形成于洋盆环境,但时代上有分歧,存在早志留世小洋盆环境(郭召杰等, 2006)、中奥陶世-晚奥陶世早期洋盆环境(任秉琛等 2001;何世平等, 2002, 2005; 杨合群等, 2008, 2010, 2012)以及弧后盆地(郑荣国等, 2012)等不同认识。蛇绿岩(蛇绿混杂岩)作为造山带的重要组成单元,既可以形成于洋中脊,也可产生在岛弧、弧前和弧后盆地等多种环境中(张旗等, 2001)。按蛇绿岩产出的构造背景分为洋中脊(MORB)型和俯冲带之上(SSZ)型,前者代表典型大洋中脊;后者包括多种俯冲带之上岛弧、弧前和弧后盆地环境(Pearce, 1982)。SSZ 型变质橄榄岩的 TiO_2 含量为 0.01%~0.04%,洋中脊型变质橄榄岩的 TiO_2 含量为 0.03%~0.04%。本次研究的 3 件变质辉橄岩的 TiO_2 含量为 0.026%~0.037%,与 MORB 型的 TiO_2 含量一致,显示洋中脊的构造环境。前文研究表明白云山蛇绿岩形成于 496 ± 2.2 Ma,时代为寒武纪晚期。白云山蛇绿混杂岩中的辉长岩和基性枕状熔岩既有洋岛火山岩的特征,又有洋中脊玄武岩(MORB)的特征,揭示了白云山蛇绿岩形成于古生代寒武纪大洋盆地环境,代表古洋盆洋壳的碎片,是北山早古生代寒武纪-奥陶纪大洋盆地形成的产物。

6.3 地质意义

白云山蛇绿混杂岩作为红柳河-牛圈子-月牙山-洗肠井蛇绿混杂岩带的一部分,对研究北山地区造

山带的组成、重塑古大洋形成和演化具有重要的地质意义。

白云山蛇绿混杂岩是介于南部敦煌地块和北部早山-马鬃山微地块的早古生代板块缝合带。该界限的南侧是具有早前寒武纪结晶基底的敦煌地块,发育太古宇-古元古界基底岩系敦煌岩群以及中上元古界(长城纪古铜井群、蓟县纪平头山组、青白口纪野马街组、大豁落山组海相碳酸盐岩-碎屑岩)和寒武系-奥陶系(碳硅质岩、碎屑岩和碳酸盐岩)盖层沉积,显示出与塔里木板块类似的特征。该界限北侧为马鬃山-早山微地块。中元古代北山岩群和奥陶-志留纪公婆泉群,后者具有岛弧-弧后盆地性质的火山岩及火山碎屑岩、硅质岩、碳酸盐岩(又称公婆泉-东七一山火山弧),属于中亚造山带南缘北山造山带的组成部分。这些资料表明该蛇绿混杂岩代表塔里木板块与西伯利亚两大板块间聚合的位置,是北山造山带早古生代洋盆消亡的遗迹。

7 结论

(1) 白云山蛇绿岩中辉长岩 LA-ICP-MS 锆石 U-Pb 测年为 496 ± 2.2 Ma,其形成时代为晚寒武世。

(2) 蛇绿混杂岩中的枕状玄武岩与硅质岩地层序列以及玄武岩地球化学研究结果表明,该蛇绿混杂岩为 MORB 型蛇绿岩并混杂有洋岛玄武岩组分,代表北山造山带早古生代洋盆消亡的遗迹。

(3) 红柳河-洗肠井蛇绿混杂岩带为早古生代的缝合带,具有分划塔里木板块与西伯利亚板块界线的区域大地构造意义。

致谢 感谢天津地质调查中心耿建珍同志在实验和数据处理方面提供的帮助,感谢评审专家提出的宝贵修改意见。

References

- Abouchami W, Hofmann A W, Galer S J G, *et al.* 2005. Lead isotopes reveal bilateral asymmetry and vertical continuity in the Hawaiian mantle plume[J]. *Nature*, 434: 851~856.
- Blichert-Toft J, Weis D, Maerschalk C, *et al.* 2003. Hawaiian hotspot dynamics as inferred from the Hf and Pb isotope evolution of Mauna Kea volcano[J]. *Geochemistry Geophysics Geosystems*, 4: 8 704~

- 8 710.
- Coleman R G. 1977. Ophiolites-Ancient Oceanic lithosphere? [M]. Springer-Verlag, 1~77.
- Dai Wenjun. 2011. The formation background and tectonic significance of the ophiolite mélangé in the Niuquanzi area, Beishan, Gansu Province[J]. Journal of Mineralogy and Petrology, 31 (4): 44~51(in Chinese).
- Ernst R E and Buchan K L. 2003. Recognizing mantle plumes in the geological record[J]. Annual Reviews of Earth and Planetary Sciences, 31: 469~523.
- Fitton J G, James D, Kempton P D, *et al.* 1988. The role of lithospheric mantle in the generation of late Cenozoic basic magmas in the western United States[J]. Journal of Petrology, (Special Lithosphere Issue): 331~349.
- Frey E A, Huang S, Blichert-Toft J, *et al.* 2005. Origin of depleted components in basalt related to the Hawaiian hotspot: Evidence from isotope and incompatible element ratios[J]. Geochemistry Geophysics Geosystems, 6: 1~23.
- Gong Quansheng, Liu Mingqiang, Liang Minghong, *et al.* 2003. The tectonic facies and tectonic evolution of Beishan orogenic belt, Gansu[J]. Northwestern Geology, 36(1): 11~17(in Chinese with English abstract).
- Guo Zhaojie, Shi Hongyu, Zhang Zhi, *et al.* 2006. The tectonic evolution of the south Tianshan paleo-oceanic crust inferred from the spreading structures and Ar-Ar dating of the Hongliuhe ophiolite, NW China[J]. Acta Petrologica Sinica, 22(1): 95~102(in Chinese with English abstract).
- He Shiping, Ren Bingchen, Yao Wenguang, *et al.* 2002. The division of tectonic units of Beishan area, Gansu-Inner Mongolia[J]. Northwestern Geology, 35(4): 30~40(in Chinese with English abstract).
- He Shiping, Zhou Huiwu, Ren Bingchen, *et al.* 2005. Crustal evolution of Palaeozoic in Beishan area, Gansu and Inner Mongolia, China [J]. Northwestern Geology, 38(3): 6~15(in Chinese with English abstract).
- Hilton D R, McMurty G M and Kreulen R. 1997. Evidence for extensive degassing of the Hawaiian mantle plume from helium-carbon relationships at Kilauea volcano[J]. Geophysical Research Letters, 24: 3 065~3 068.
- Hou Qingye, Wang Zhong, Liu Jinbao, *et al.* 2012. Geochemistry characteristics and SHRIMP dating of Yueyashan ophiolite in Beishan Orogen[J]. Geoscience, 26(5): 1 008~1 018(in Chinese).
- Hu Xinzhuo, Zhao Guochun, Hu Xinyue, *et al.* 2015. Geological characteristics, formation epoch and geotectonic significance of the Yueyashan ophiolitic tectonic mélangé in Beishan area, Inner Mongolia[J]. Geological Bulletin of China, 34(2/3): 425~436(in Chinese).
- Li Chunyu. 1987. China and its adjacent northern areas of the ancient border of plate tectonics and the formation of the Eurasian continent [A]. Collected Works of Plate Tectonics in North China[C](in Chinese).
- Li Shuguang. 1993. Ba-Nb-Th-La diagrams used to identify tectonic environments of ophiolite[J]. Acta Petrologica Sinica, 9(2): 146~157(in Chinese with English abstract).
- Li Xiangmin, Yu Jiyuan, Wang Guoqiang, *et al.* 2012. Geochronology of Jijitai ophiolite in Beishan area, Gansu Province, and its geological significance[J]. Geological Bulletin of China, 31(12): 2 025~2 031(in Chinese with English abstract).
- Liu Yongsheng, Gao Shan, Hu Zhaochu, *et al.* 2009. Continental and oceanic crust recycling-induced melt-peridotite interactions in the Trans North China Orogen: U-Pb dating, Hf isotopes and trace elements in zircons from mantle xenoliths[J]. Journal of Petrology, 51: 537~571.
- Ludwig K R. 2003. User's manual for Isoplot/EX, Version 3.00[A]. Ageochronological Toolkit for Microsoft Excel: Berkeley Geochronology Center Special Publication[C], 4: 1~70.
- Meschede M. 1986. A method of discriminating between different types of mid-ocean ridge basalts and continental tholeiites with the Nb-Zr-Y diagram[J]. Chemical Geology, 56: 207~218.
- Nohda. 2009. Formation of the Japan Sea basin: Reassessment from Ar-Ar ages and Nd-Sr isotopic data of basement basalts of the Japan Sea and adjacent regions[J]. Journal of Asian Earth Sciences, 34: 599~609.
- Pearce J A. 1982. Trace element characteristics of lavas from destructive plate boundaries[A]. Thorpe R S. Andesites[C]. Wiley: Chichester, 525~548.
- Pearce J A. 1996. A user's guide to basalt discrimination diagrams[A]. Wyman D A. Trace Element Geochemistry of Volcanic Rocks: Applications for Massive Sulphide Exploration[C]. Geological Association of Canada Short Course Notes, 12: 79~113.
- Pearce J A and Cann J R. 1973. Tectonic setting of basic volcanic rocks determined using trace element analysis[J]. Earth Planetary Science Letters, 19: 290~300.
- Pearce J A and Norry M J. 1979. Petrogenetic implications of Ti, Zr, Y

- and Nb variations in volcanic rocks[J]. *Contrib. Mineral. Petrol.*, 69: 33~47.
- Ren Bingchen, He Shiping, Yao Wenguang, *et al.* 2001. Rb-Sr isotope age of Niuquanzi ophiolite and its tectonic significance in Beishan district, Gansu[J]. *Northwestern Geology*, 34 (2): 21~27 (in Chinese with English abstract).
- Ren Jishun, Jiang Chunfa, Zhang Zhengkun, *et al.* 1980. The Geotectonic Evolution of China[M]. Beijing: Science Press, 1~124 (in Chinese with English abstract).
- Rollison H R. 1993. Using Geochemical Data: Evaluation Presentation, Interpretation[M]. London: Longman Group UK Ltd., 1~352.
- Ryerson F J and Watson E B. 1987. Rutile saturation in magmas: Implications for Ti-Nb-Ta depletion in island-arc basalts[J]. *Earth Planet. Sci. Lett.*, 86: 225~239.
- Sun S S and McDonough W F. 1989. Chemical and isotopic systematics of oceanic basalts: implications for mantle composition and processes[A]. Saunders A D and Nory M J. *Magmatism in the Ocean Basins*. Geological Society Special Publication[C]. 42: 313~345.
- Weaver B L. 1991. Trace element evidence for the origin of ocean island basalt[J]. *Geology*, 19: 123~126.
- Weaver B L. 1996. The origin of ocean island basalt and member compositions trace element and isotopic constraints[J]. *Earth Planetary Science Letters*, 104: 381~397.
- Wilson M. 1989. *Igneous Petrogenesis*[M]. Oxford: Alden Press, 1~466.
- Wood D A. 1980. The application of a 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[J]. *Earth Planet. Science Letter*, 50: 11~30.
- Wu Peng, Wang Guoqiang, Li Xiangmin, *et al.* 2012. The age of Niuquanzi ophiolite in Beishan area of Gansu Province and its geological significance[J]. *Geological Bulletin of China*, 31 (12): 2032~2037 (in Chinese with English abstract).
- Xu Yigang. 2007. Diachronous lithospheric thinning of the North China Craton and formation of the Daxinganling-Taihangshan gravity lineament[J]. *Lithos*, 96: 281~298.
- Xu Yigang, Chung Sunlin, Ma Jinlong, *et al.* 2004. Contrasting Cenozoic lithospheric evolution and architecture in western and eastern Sino-Korean Craton: Constraints from geochemistry of basalts and mantle xenoliths[J]. *Journal of Geology*, 112: 593~605.
- Yang Hequn, Li Ying, Li Wenming, *et al.* 2008. General discussion on metallogenic, tectonic, setting of Beishan Mountain, Northwestern China[J]. *Northwestern Geology*, 41(1): 22~28 (in Chinese with English abstract).
- Yang Hequn, Li Ying, Zhao Guobin, *et al.* 2010. Character and structural attribute of the Beishan ophiolite[J]. *Northwestern Geology*, 43(1): 26~36 (in Chinese with English abstract).
- Yang Hequn, Zhao Guobin, Li Ying, *et al.* 2012. The relationship between Paleozoic tectonic setting and mineralization in Xinjiang-Gansu-Inner Mongolia juncture area[J]. *Geological Bulletin of China*, 31(2/3): 413~421 (in Chinese with English abstract).
- Yu Fusheng, Li Jinbao and Wang Tao. 2006. The U-Pb isotopic age of zircon from Hongliuhe ophiolites East Tianshan mountains, Northwest China[J]. *Acta Geoscientica Sinica*, 27(3): 213~216 (in Chinese with English abstract).
- Yu Fusheng, Wang Chunying, Qi Jiafu, *et al.* 2000. The clarification and tectonic implication of the early silurian ophiolite melange in hongliuhe area[J]. *Journal of Mineralogy and Petrology*, 20(4): 60~66 (in Chinese with English abstract).
- Zhang Qi and Zhou Guoqing. 2001. *Ophiolite of China*[M]. Beijing: Science Press, 1~182 (in Chinese).
- Zhang Yuanyuan and Guo Zhaojie. 2008. Accurate constraint on formation and emplacement age of Hongliuhe ophiolite, boundary region between Xinjiang and Gansu Provinces and its tectonic implications [J]. *Acta Petrologica Sinica*, 24(4): 803~809 (in Chinese with English abstract).
- Zheng Rongguo, Wu Tairan, Zhang Wen, *et al.* 2012. Geochemical characteristics and tectonic setting and of the Yueyashan-Xichangjing ophiolite in the Beishan Area[J]. *Acta Geologica Sinica*, 86(6): 961~971 (in Chinese with English abstract).
- Zhou Guoqing, Zhao Jianxin and Li Xianhua. 2000. Characteristics of Yueyashan ophiolite from western Inner Mongolia its tectonic setting geochemistry and Sm-Nd isotopic constraints[J]. *Geochimica*, 29(2): 108~119 (in Chinese with English abstract).
- Zindler A, Staudigel H and Batiza R. 1984. Isotope and trace element geochemistry of young Pacific seamounts: implications for the scale of upper mantle heterogeneity[J]. *Earth and Planetary Science Letters*, 70: 175~195.
- Zuo Guochao and He Guoqi. 1990. *Plate Tectonics and Metallogenic Regulations in Beishan Region*[M]. Beijing: Peking University Publication, 1~240 (in Chinese with English abstract).
- Zuo Guochao and Li Maosong. 1996. Formation and Evolution of the Early Paleozoic Lithosphere in the Beishan Area, Gansu-Inner

Monggu, China[M]. Lanzhou: Gansu Science and Technology Publication, 1~120(in Chinese).

Zuo Guochao, Liu Yike and Liu Chunyan. 2003. Frame work and evolution of the tectonic structure in Beishan Area across Gansu Province, Xinjiang Autonomous Region and Inner Mongolia Autonomous Region[J]. Acta Geologica Gansu, 12(1): 1~15(in Chinese with English abstract).

附中文参考文献

代文军. 2011. 甘肃北山牛圈子蛇绿混杂岩的形成环境及构造意义[J]. 矿物岩石, 31(4): 44~51.

龚全胜, 刘明强, 梁明宏, 等. 2003. 北山造山带大地构造相及构造演化[J]. 西北地质, 36(1): 11~17.

郭召杰, 史宏宇, 张志诚, 等. 2006. 新疆甘肃交界红柳河蛇绿岩中伸展构造与古洋盆演化过程[J]. 岩石学报, 22(1): 95~102.

何世平, 任秉琛, 姚文光, 等. 2002. 甘肃内蒙古北山地区构造单元划分[J]. 西北地质, 35(4): 30~40.

何世平, 周会武, 任秉琛, 等. 2005. 甘肃内蒙古北山地区古生代地壳演化[J]. 西北地质, 38(3): 6~15.

侯青叶, 王忠, 刘全宝, 等. 2012. 北山月牙山蛇绿岩地球化学特征及SHIMP定年[J]. 现代地质, 26(5): 1008~1018.

胡新苗, 赵国春, 胡新悦, 等. 2015. 内蒙古北山地区月牙山蛇绿质构造混杂岩带地质特征、形成时代及大地构造意义[J]. 地质通报, 34(2/3): 425~436.

李春昱. 1987. 我国北部边陲及邻区古板块构造与欧亚大陆的形成[A]. 中国北方板块构造文集[C].

李曙光. 1993. 蛇绿岩生成构造环境的Ba-Th-Nb-La判别图[J]. 岩石学报, 9(2): 146~157.

李向民, 余吉远, 王国强, 等. 2012. 甘肃北山地区芨芨台子蛇绿岩LA-ICP-MS锆石U-Pb测年及其地质意义[J]. 地质通报, 31(12): 2025~2031.

任秉琛, 何世平, 姚文光, 等. 2001. 甘肃北山牛圈子蛇绿岩铷锶同位素年龄及其大地构造意义[J]. 西北地质, 34(2): 21~27.

任纪舜, 姜春发, 张正坤, 等. 1980. 中国大地构造及其演化[M]. 北京: 科学出版社, 1~124.

武鹏, 王国强, 李向民, 等. 2012. 甘肃北山地区牛圈子蛇绿岩的形成时代及地质意义[J]. 地质通报, 31(12): 2032~2037.

杨合群, 李英, 李文明, 等. 2008. 北山成矿构造背景概论[J]. 西北地质, 4(1): 22~28.

杨合群, 李英, 赵国斌, 等. 2010. 北山蛇绿岩特征及构造属性[J]. 西北地质, 43(1): 26~36.

杨合群, 赵国斌, 李英, 等. 2012. 新疆-甘肃-内蒙古衔接区古生代构造北景与成矿的关系[J]. 地质通报, 31(2/3): 413~421.

于福生, 李金宝, 王涛. 2006. 东天山红柳河地区蛇绿岩U-Pb同位素年龄[J]. 地球学报, 27(3): 213~216.

于福生, 王春英, 漆家福, 等. 2000. 甘新交界红柳河地区早志留世蛇绿混杂岩的厘定及大地构造意义[J]. 矿物岩石, 20(4): 60~66.

张旗, 周国庆. 2001. 中国蛇绿岩[M]. 北京: 科学出版社, 1~182.

张元元, 郭召杰. 2008. 甘蒙交界红柳河蛇绿岩形成和侵位年龄的准确限定及大地构造意义[J]. 岩石学报, 24(4): 803~809.

郑荣国, 吴泰然, 张文, 等. 2012. 北山地区月牙山-洗肠井蛇绿岩的地球化学特征及形成环境[J]. 地质学报, 86(6): 961~971.

周国庆, 赵建新, 李献华. 2000. 内蒙古月牙山蛇绿岩特征及形成的构造背景: 地球化学和Sr-Nd同位素制约[J]. 地球化学, 29(2): 108~119.

左国朝, 何国琦. 1990. 北山板块构造及成矿规律[M]. 北京: 北京大学出版社, 1~240.

左国朝, 李茂松. 1996. 甘肃北山地区早古生代岩石圈形成与演化[M]. 兰州: 甘肃科学技术出版社, 1~120.

左国朝, 刘义科, 刘春燕. 2003. 甘新蒙北山地区构造格局及演化[J]. 甘肃地质, 12(1): 1~15.