第 57 卷 第 1 期
2024 年（总 231 期）

西 北 地 质
NORTHWESTERN GEOLOGY

Vol. 57 No. 1
2024（Sum231）

引文格式：张永玲，张治国，刘希军，等. 内蒙朝克山辉长岩中单斜辉石矿物化学特征及地质意义[J]. 西北地质，2024，57（1）：122−138. DOI：10.12401/j.nwg.2023027

Citation: ZHANG Yongling, ZHANG Zhiguo, LIU Xijun, et al. Mineralogical Chemistry Characteristics and Geological Significance of the Clinopyroxene from Chaokeshan Gabbro, Inner Mongolia[J]. Northwestern Geology, 2024, 57(1): 122−138. DOI: 10.12401/j.nwg.2023027

内蒙朝克山辉长岩中单斜辉石矿物化学特征及地质意义

张永玲[1]，张治国[1,*]，刘希军[2,3]，田昊[2]，李得超[2]，肖让[1]，肖尧[2]

（1. 河西学院土木工程学院，甘肃 张掖 734000；2. 桂林理工大学，广西隐伏金属矿产勘查重点实验室，广西有色金属隐伏矿床勘查及材料开发协同创新中心，广西 桂林 541004；3. 中国科学院新疆生态与地理研究所新疆矿产资源研究中心，新疆 乌鲁木齐 830011）

摘 要：内蒙贺根山带广泛发育古生代基性岩浆岩，为探讨其岩浆源区和岩石成因，进一步了解中亚造山带东段古生代构造背景，笔者对朝克山蛇绿岩进行了矿物学研究。矿物电子探针结果显示，辉长岩中单斜辉石均属于透辉石，既有碱性特征，也有拉斑特征，SiO_2 含量为 50.75%～52.99%，具有高的 Al_2O_3，含量为 2.03%～3.77%，相对亏损轻稀土元素 $(La/Sm)_N$=0.12～0.22 和高场强元素（HFSE；Nb、Ta、Zr、Hf、Ti 负异常），富集大离子亲石元素（LILEs），与辉长岩全岩的特征程度相一致，共同指示岩体母岩浆可能为亚碱性的拉斑玄武质岩浆向碱性玄武质岩浆演化的趋势。单斜辉石的平衡温度为 1 099～1 242 ℃，平衡压力为 1.5～6.4 kbar，深度为 5～21 km，显示明显的深源特征。结合前人研究成果，笔者认为朝克山蛇绿岩形成于弧后盆地环境。

关键词：朝克山蛇绿岩；单斜辉石；矿物学；弧后盆地

中图分类号：P588.14 **文献标志码：**A **文章编号：**1009-6248（2024）01-0122-17

Mineralogical Chemistry Characteristics and Geological Significance of the Clinopyroxene from Chaokeshan Gabbro, Inner Mongolia

ZHANG Yongling[1], ZHANG Zhiguo[1,*], LIU Xijun[2,3], TIAN Hao[2], LI Dechao[2], XIAO Rang[1], XIAO Yao[2]

（1. College of Civil Engineering, Hexi University, Zhangye 734000, Gansu, China；2. Guangxi Key Laboratory of Hidden Metallic Ore Deposits Exploration, College of Earth Sciences, Guilin, University of Technology, Guilin 541004, Guangxi, China；3. Xinjiang Research Center for Mineral Resources, Xinjiang Institute of Ecology and Geography, Chinese Academy of Sciences, Urumqi 830011, Xinjiang, China）

Abstract: Paleozoic mafic magmatic rocks are widely developed in Hegenshan belt of Inner Mongolia. In or-

---

收稿日期：2022-06-20；**修回日期：**2023-11-05；**责任编辑：**曹佰迪

基金项目：国家自然科学基金（92055208），广西自然科学基金杰出青年科学基金（2018GXNSFFA281009），广西八桂学者项目“有色金属成矿理论与勘查技术”（2018），甘肃省高等学校创新基金项目（2021A-118），广西研究生教育创新计划项目（YCBZ2021063）联合资助。

作者简介：张永玲（1977−），女，硕士，副教授，主要从事水利工程研究。E-mail：zhangyl5266@163.com。

*** 通讯作者：**张治国（1991−），男，博士，讲师，主要从事蛇绿岩及构造−岩浆作用研究。E-mail：zhangzhiguo1231@163.com。

der to explore the magmatic source and petrological genesis of these rocks and to further understand the Paleozoic tectonic setting of the eastern part of the Central Asian orogenic belt, the Chaokeshan ophiolites are studied by mineralogy. Mineral electron probe results show that the monocline in gabbro belongs to diopside, which has both alkaline and tholeitic characteristic, with SiO_2 (50.75% to 52.99%) and high Al_2O_3 (2.03% to 3.77%), and are relatively enriched large ion lithophile elements, but depleted in light rare earth elements ($(La/Sm)_N$= 0.12～0.22) and in high field strength elements (e.g. Nb, Ta, Zr, Hf, Ti), consistent with the characteristics of the whole gabbro rock, indicating that the parent magma of the pluton may be subalkaline tholeitic magma to alkaline basalt magma evolution trend. The temperature and pressure of clinopyroxene are 1 099～1 242 ℃, 1.5～6.4 kbar and 5～21 km respectively, suggesting obvious deep-derived characteristics. Combined with the previous research results, it’s suggest that the Chaokeshan ophiolites was likely produced in the back-arc tectonic setting.

Keywords：Chaokeshan ophiolites；clinopyroxene；mineralogy；back–arc basin

蛇绿岩通常被认为是构造侵位于大陆边缘造山带或陆缘的非原地的上地幔和已消失的古大洋地壳的岩石碎片，它是研究人员研究古洋盆和造山带构造演化、恢复和重建区域地质演化过程的最佳样品（Pearce et al., 1984; 臧遇时等, 2013; 杨剑洲等, 2019; Liu et al., 2020, 2021）。中亚造山带（Central Asian Orogenic Belt）是古亚洲洋经历早新元古代的裂解、古生代的俯冲增生拼贴以及晚古生代碰撞闭合造山而形成的世界最大的增生型造山带之一（图 1a）（Windley et al., 2007; Xiao et al., 2009; 张治国等, 2019; Zhang et al., 2021; 张向飞等, 2023）。中亚造山带东段内蒙古造山带内部发育多条不连续的NE–NEE

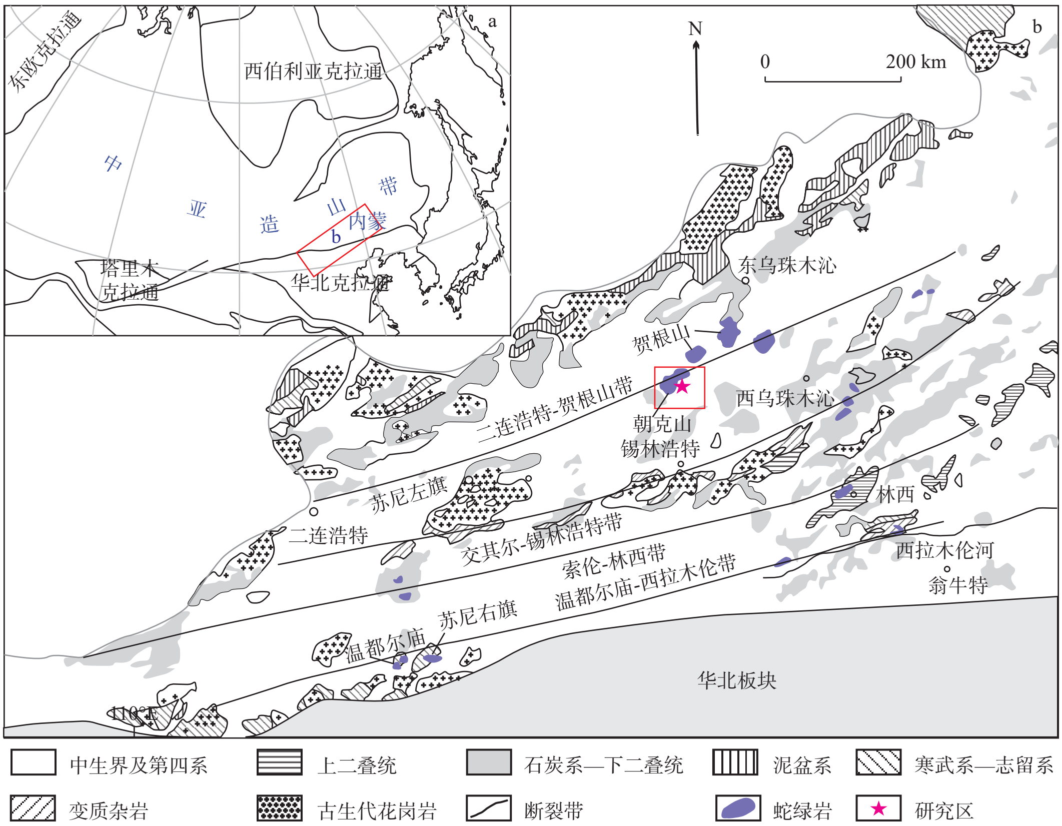


图1　中亚造山带主要构造单元构造图（a）及研究区大地构造位置示意图（b）（据王树庆等，2008）

Fig. 1　(a) Tectonic map of the main tectonic units of the Central Asian Orogenic Belt and (b) Geological map showing the tectonic units of study area

向蛇绿岩带、从北向南依次为二连浩特–贺根山蛇绿岩带、交其尔–锡林浩特蛇绿岩带、索伦–林西蛇绿岩带和温都尔庙蛇绿岩带(图 1b)(张旗等, 2001; Miao et al., 2008; 党智财等, 2022)。最北部的二连浩特–贺根山蛇绿岩带普遍被认为是华北板块和西伯利亚板块最后碰撞的缝合线向东延伸的部分(Miao et al., 2008; 黄波等, 2016),但该蛇绿岩带形成环境争议较大,主要观点有洋中脊成因(包志伟等, 1994; Nozaka et al., 2002)和俯冲带成因(洋内弧后盆地和岛弧边缘盆地)(Li, 2006; Miao et al., 2008; 王成等, 2018)。前人亦对贺根山蛇绿岩带的镁铁质岩的岩体野外地质特征、岩石学及岩石地球化学特征开展了大量研究(Miao et al., 2008; Jian et al., 2012; Wang et al., 2020; 黄波等, 2021),但对镁铁质岩石的矿物学工作还鲜有涉及。

单斜辉石是超镁铁质–镁铁质岩体中较为常见的造岩矿物,其化学成分记录了岩浆成因、岩浆物理化学条件以及岩浆形成的构造环境等多方面的重要信息(Nisbet et al., 1977; 邱家骧, 1987; 白志民, 2000; 鄢全树等, 2007; 闫纪元等, 2014),因而单斜辉石是研究超镁铁质–镁铁质岩体成因的重要物质?笔者对内蒙地区朝克山蛇绿岩中辉长岩中单斜辉石开展了系统的矿物学和矿物地球化学研究,旨在揭示该辉长岩的单斜辉石矿物化学特征,约束其岩浆性质、演化过程及其物理化学条件,探讨其岩石所属系列和成因特征,为朝克山蛇绿岩的成因提供约束。

1　地质背景和样品来源

朝克山蛇绿岩地处中亚造山带东段的内蒙–大兴安岭造山带,属于二连浩特–贺根山蛇绿岩带的一部分(图 1b)。朝克山蛇绿岩带出露面积约为 100 km^2,以构造混杂状产出为主,岩石层序不完整,主要由蛇纹石化的超镁铁质岩、火成堆晶结构的块状辉长岩、辉绿岩墙及深海沉积物等组成。围岩主要为晚侏罗世—早白垩世的基性和酸性火山岩、二叠纪—白垩纪基性和中酸性侵入体(黄波等, 2021)。蛇绿岩单元由蛇纹石化方辉橄榄岩、二辉橄榄岩、层状和块状辉长岩、辉绿岩、辉绿岩墙(脉)、斜长花岗岩、基性熔岩和硅质岩组成(图 2、图 3a、图 3b)。

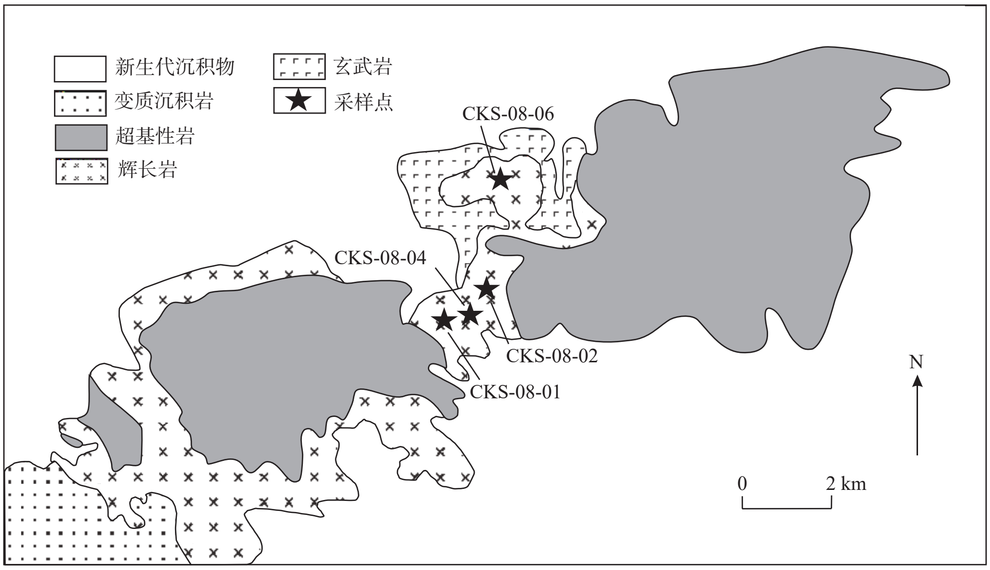
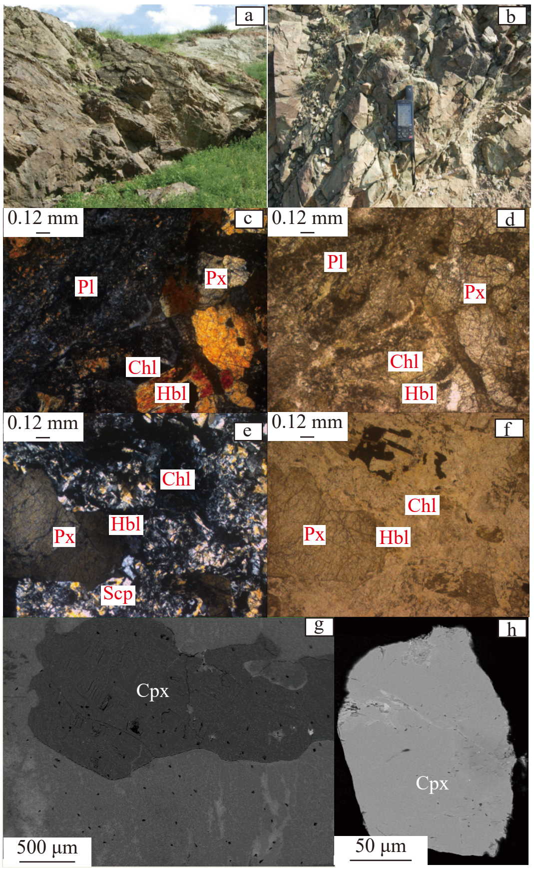


图2　朝克山地区地质简图(据王树庆等, 2008)

Fig. 2　Geological sketch of the Chaokeshan region

文中辉长岩样品采集于朝克山西南及北部。辉长岩呈辉长结构,交代假象结构,块状构造。主要造岩矿物为辉石、斜长石、角闪石、黑云母、磁铁矿、钛铁矿和磷灰石等,蚀变矿物为绢云母、绿帘石、绿泥石(Chl)等组成(图 3c~图 3f)。辉石呈自形、柱状,无色,辉石解理,主要为单斜辉石中的普通辉石,解理弯曲变形,主要粒径为 0.5~2 mm,含量约为 30%。斜长石呈半自形、柱状,强烈的蚀变为高岭石、方柱石等矿物的集合体,轻微的蚀变为绢云母化、绿帘石化,与辉石呈辉长结构、嵌晶含长结构,主要粒径为 0.2~



Pl. 斜长石；Cpx. 单斜辉石；Hbl. 角闪石；Chl. 绿泥石

图3　朝克山地区辉长岩的野外露头(a～b)、显微照片(d～f)及单斜辉石环带结构背散电子图(g～h)

Fig. 3　(a–b) Outcrop images, (d–f) Representative photomicrographs and (g–h) the backscattered electronicimages of the clinopyroxenes' ring–band structure of the Chaokeshan gabbro

2 mm, 部分粒径为 2～5 mm, 含量约为 55%。角闪石呈自形, 柱状, 浅绿-褐色, 闪石解理, 部分在辉石边部呈反应边, 粒径为 0.2～2 mm, 部分粒径为 2～5 mm, 含量约为 12%。黑云母呈他形、片状, 强烈的绿泥石化, 保留其特征残留, 粒径为 0.2～0.5 mm, 含量约为 2%。副矿物主要为磁铁矿、钛铁矿, 磷灰石等, 粒径为 0.1～1 mm。在电子背散射图像中, 单斜辉石颗粒具有无环带的特征(图 3g～图 3h)。

2　分析方法

矿物主量元素分析、原位微量元素分析, 以及全岩样品的主量元素分析均在桂林理工大学广西隐伏金属矿产勘查重点实验室完成。

2.1　电子探针单矿物主量元素分析

矿物主量元素分析所用的仪器为: JEOLJXA8230 型电子探针(EPMA)。分析前用透反射偏光显微镜(NIKONECLIPSE50iPOL)镜观察电子探针片并标记待分析的矿物颗粒。仪器分析条件为: 加速电压为 15 kV, 束流为 20 nA, 束斑直径为 5 μm, 使用 ZAF 法校正处理。矿物主量元素的详细操作流程以及分析方法参见 Huang 等(2007)。

2.2　单矿物原位微量元素分析

原位微量元素分析所用的的仪器为: ICP–MS 为 Agilent 7 500 型四级杆质谱仪。进样系统为 GeoLas HD 193 nm ArF 准分子激光剥蚀系统。测试分析方法同单矿物锆石 LA–ICP MS 锆石 U–Pb 定年, 矿物微量元素的详细操作流程以及分析方法参见 Liu 等(2010)。

3　地球化学特征

3.1　矿物主量元素

朝克山辉长岩中单斜辉石电子探针分析结果见表 1。朝克山单斜辉石 SiO_2 含量为 50.75%～52.99 %, TiO_2 含量为 0.27%～0.86 %, FeO^*含量为 5.08%～9.69 %, MgO 含量为 13.13%～15.81%, $Mg^\#$值为 71～84($Mg^\#$ = molar Mg/[Mg +Fe^{2+}] × 100; Mg 和 Fe^{2+}均为原子数), Na_2O 含量为 0.26%～0.43%, CaO 含量为 21.50%～24.39 % 和 Al_2O_3 含量为 2.03%～3.77 %。根据 Morimoto(1988)提出的辉石分类命名方案, 朝克山单斜辉石均位于 Q-J 图解(Q=Ca+Mg+Fe^{2+}, J=2Na^+)的 Ca-Mg-Fe 区域内(图 4a)。它们的 En(100 × Mg/[Mg + Ca + Fe])、Wo(100 × Ca/[Mg + Ca + Fe])和 Fs(100 × Fe/[Mg + Ca + Fe])(各元素均为原子数)值分别为 39～45、45～51 和 8～16, 在 En-Wo-Fs 三元图解中落在透辉石范围内(图 4b)。

3.2　矿物微量元素

朝克山辉长岩中单斜辉石微量结果见表 2。稀土总含量(ΣREE 含量)为 $53.53×10^{-6}$～$94.83×10^{-6}$, 稀土元素球粒陨石标准化 REE 配分模式(图 5a)表现为轻稀土元素亏损($[La/Sm]_N$ = 0.12～0.22), 重稀土元素平坦($[Gd/Yb]_N$ = 0.83～1.33), 无明显 Eu 异常(Eu/Eu* = Eu_N/ $[La_N*Sm_N]^{1/2}$ = 0.78～1.09), 表明原始岩浆在演化过程中经历了程度微弱的斜长石分离结晶作用。在原始地幔标准化微量元素蛛网图中(图 5b), 所有样品显示大离子亲石元素(LILE)相对富集, 高场强元素(HFSE)Nb、Ta、Zr、Hf、Ti 相对亏损, 与俯冲带岩浆

表 1　朝克山辉长岩的单斜辉石的主量元素组成分析结果表（%）

Tab. 1　Major element compositions (%) of clinopyroxene in Chaokeshan gabbro

样品	CKS-08-01-1	CKS-08-01-2	CKS-08-01-3	CKS-08-01-4	CKS-08-01-5	CKS-08-01-6	CKS-08-01-7	CKS-08-01-8	CKS-08-01-9	CKS-08-01-10
SiO_2	52.35	52.57	52.34	52.65	52.34	52.62	52.61	51.86	52.16	52.30
TiO_2	0.61	0.50	0.69	0.76	0.46	0.62	0.72	0.69	0.61	0.52
Al_2O_3	2.62	2.51	2.76	2.64	2.65	2.62	2.61	2.70	2.70	2.90
Cr_2O_3	0.37	0.28	0.38	0.39	0.35	0.35	0.36	0.38	0.38	0.38
FeO*	5.92	6.42	6.20	6.15	5.89	6.07	5.95	6.20	5.86	5.73
MnO	0.19	0.20	0.20	0.16	0.17	0.18	0.17	0.18	0.19	0.15
MgO	13.69	14.12	13.79	13.69	13.68	13.80	13.90	14.01	13.81	13.98
CaO	23.92	23.59	23.87	24.05	24.23	24.04	24.12	24.00	23.95	24.03
Na_2O	0.37	0.36	0.39	0.37	0.31	0.38	0.36	0.40	0.40	0.36
K_2O	0.00	0.00	0.00	0.00	0.01	0.00	0.00	0.00	0.01	0.00
Toal	100.03	100.55	100.62	100.84	100.08	100.67	100.80	100.43	100.06	100.34
Si	1.937	1.937	1.928	1.934	1.936	1.935	1.932	1.917	1.930	1.927
Al^{IV}	0.063	0.063	0.072	0.066	0.064	0.065	0.068	0.083	0.070	0.073
Al^{VI}	0.051	0.046	0.048	0.048	0.052	0.049	0.045	0.035	0.048	0.053
Ti	0.017	0.014	0.019	0.021	0.013	0.017	0.020	0.019	0.017	0.015
Cr	0.011	0.008	0.011	0.011	0.010	0.010	0.011	0.011	0.011	0.011
Fe^{2+}	0.183	0.198	0.191	0.189	0.182	0.187	0.183	0.192	0.181	0.176
Mn	0.006	0.006	0.006	0.005	0.005	0.005	0.005	0.006	0.006	0.005
Mg	0.755	0.775	0.757	0.750	0.754	0.756	0.761	0.772	0.762	0.768
Ca	0.948	0.931	0.942	0.946	0.960	0.947	0.949	0.950	0.949	0.949
Na	0.026	0.026	0.028	0.026	0.022	0.027	0.025	0.029	0.029	0.026
$Mg^{\#}$	80.46	79.69	79.86	79.89	80.54	80.22	80.65	80.11	80.79	81.32
Fs	9.72	10.38	10.11	10.02	9.61	9.87	9.65	10.02	9.57	9.32
En	40.02	40.72	40.06	39.78	39.77	40.02	40.21	40.34	40.26	40.56
Wo	50.26	48.90	49.83	50.21	50.62	50.12	50.13	49.64	50.16	50.12

样品	CKS-08-01-11	CKS-08-01-12	CKS-08-01-13	CKS-08-01-14	CKS-08-01-15	CKS-08-02-1	CKS-08-02-2	CKS-08-02-3	CKS-08-02-4	CKS-08-02-5
SiO_2	52.29	52.42	52.23	52.72	52.00	52.02	52.86	52.46	52.38	52.99
TiO_2	0.77	0.78	0.75	0.57	0.51	0.53	0.65	0.67	0.64	0.62
Al_2O_3	2.82	2.68	2.67	2.59	2.40	2.68	2.49	2.50	2.64	2.31
Cr_2O_3	0.40	0.38	0.33	0.35	0.41	0.27	0.24	0.23	0.31	0.24
FeO*	5.93	6.10	5.70	5.73	6.33	5.98	6.44	6.48	6.04	5.81
MnO	0.16	0.19	0.19	0.17	0.21	0.21	0.17	0.20	0.18	0.21
MgO	13.95	13.98	13.85	13.78	14.25	13.63	14.12	14.13	14.30	14.10
CaO	24.03	23.61	24.39	24.38	23.55	23.73	23.74	23.31	23.14	24.17
Na_2O	0.37	0.35	0.35	0.29	0.36	0.30	0.34	0.34	0.35	0.33
K_2O	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.01	0.00	0.00	0.00
Toal	100.71	100.48	100.46	100.58	100.02	99.35	101.05	100.32	99.97	100.79
Si	1.923	1.930	1.926	1.939	1.929	1.937	1.937	1.936	1.935	1.944
Al^{IV}	0.077	0.070	0.074	0.061	0.071	0.063	0.063	0.064	0.065	0.056
Toal	100.71	100.48	100.46	100.58	100.02	99.35	101.05	100.32	99.97	100.79
Si	1.923	1.930	1.926	1.939	1.929	1.937	1.937	1.936	1.935	1.944
Al^{IV}	0.077	0.070	0.074	0.061	0.071	0.063	0.063	0.064	0.065	0.056

续表1

样品	CKS-08-01-11	CKS-08-01-12	CKS-08-01-13	CKS-08-01-14	CKS-08-01-15	CKS-08-02-1	CKS-08-02-2	CKS-08-02-3	CKS-08-02-4	CKS-08-02-5
Al^{VI}	0.045	0.047	0.042	0.051	0.033	0.055	0.045	0.045	0.050	0.044
Ti	0.021	0.021	0.021	0.016	0.014	0.015	0.018	0.019	0.018	0.017
Cr	0.012	0.011	0.010	0.010	0.012	0.008	0.007	0.007	0.009	0.007
Fe^{2+}	0.182	0.188	0.176	0.176	0.196	0.186	0.197	0.200	0.187	0.178
Mn	0.005	0.006	0.006	0.005	0.007	0.006	0.005	0.006	0.006	0.007
Mg	0.765	0.767	0.761	0.755	0.788	0.757	0.771	0.777	0.788	0.771
Ca	0.947	0.931	0.964	0.960	0.936	0.947	0.932	0.922	0.916	0.950
Na	0.027	0.025	0.025	0.020	0.026	0.022	0.024	0.024	0.025	0.024
$Mg^{\#}$	80.75	80.34	81.24	81.09	80.06	80.25	79.63	79.55	80.84	81.22
Fs	9.63	9.96	9.25	9.31	10.22	9.86	10.38	10.53	9.87	9.39
En	40.39	40.67	40.05	39.93	41.04	40.04	40.58	40.94	41.67	40.59
Wo	49.98	49.37	50.70	50.76	48.74	50.10	49.04	48.54	48.46	50.02

样品	CKS-08-02-6	CKS-08-02-7	CKS-08-02-8	CKS-08-02-9	CKS-08-02-10	CKS-08-02-11	CKS-08-02-12	CKS-08-02-13	CKS-08-02-14	CKS-08-02-15
SiO_2	52.54	52.49	52.12	52.42	52.79	52.49	51.92	52.75	52.91	52.74
TiO_2	0.60	0.54	0.77	0.60	0.56	0.57	0.57	0.51	0.47	0.51
Al_2O_3	2.46	2.03	2.49	2.31	2.56	2.68	2.83	2.39	2.54	2.59
Cr_2O_3	0.24	0.28	0.27	0.25	0.42	0.36	0.29	0.28	0.20	0.27
FeO*	5.70	5.93	5.80	6.24	5.97	5.88	5.70	5.78	5.87	5.96
MnO	0.18	0.19	0.19	0.19	0.19	0.17	0.16	0.19	0.19	0.18
MgO	14.30	14.10	14.26	14.83	13.99	14.06	13.90	13.91	13.75	13.90
CaO	23.99	23.84	23.60	22.91	23.76	23.85	23.98	23.74	23.93	24.02
Na_2O	0.30	0.29	0.28	0.31	0.37	0.38	0.31	0.32	0.36	0.35
K_2O	0.01	0.00	0.00	0.01	0.01	0.00	0.01	0.01	0.01	0.00
Toal	100.31	99.69	99.78	100.07	100.61	100.44	99.68	99.86	100.24	100.52
Si	1.936	1.948	1.931	1.936	1.940	1.933	1.927	1.950	1.950	1.940
Al^{IV}	0.064	0.052	0.069	0.064	0.060	0.067	0.073	0.050	0.050	0.060
Al^{VI}	0.043	0.037	0.040	0.037	0.051	0.049	0.051	0.054	0.060	0.053
Ti	0.017	0.015	0.021	0.017	0.015	0.016	0.016	0.014	0.013	0.014
Cr	0.007	0.008	0.008	0.007	0.012	0.011	0.009	0.008	0.006	0.008
Fe^{2+}	0.176	0.184	0.180	0.193	0.184	0.181	0.177	0.179	0.181	0.183
Mn	0.005	0.006	0.006	0.006	0.006	0.005	0.005	0.006	0.006	0.006
Mg	0.786	0.780	0.787	0.816	0.767	0.772	0.769	0.767	0.755	0.762
Ca	0.947	0.948	0.937	0.906	0.935	0.941	0.953	0.940	0.945	0.947
Na	0.021	0.021	0.020	0.022	0.026	0.027	0.023	0.023	0.026	0.025
$Mg^{\#}$	81.73	80.92	81.41	80.90	80.68	80.99	81.30	81.11	80.68	80.60
Fs	9.21	9.62	9.44	10.06	9.73	9.56	9.31	9.47	9.62	9.70
En	41.17	40.81	41.35	42.62	40.65	40.74	40.50	40.66	40.15	40.28
Wo	49.63	49.57	49.21	47.32	49.61	49.69	50.19	49.87	50.23	50.02

续表1

样品	CKS-08-02-16	CKS-08-02-17	CKS-08-04-1	CKS-08-04-2	CKS-08-04-3	CKS-08-04-4	CKS-08-04-5	CKS-08-04-6	CKS-08-04-7	CKS-08-04-8
SiO_2	52.32	52.54	52.91	52.73	51.99	52.04	51.67	52.25	52.04	51.57
TiO_2	0.58	0.74	0.45	0.43	0.60	0.76	0.59	0.51	0.51	0.56
Al_2O_3	2.53	2.82	2.44	2.38	2.74	2.75	2.88	2.40	2.26	2.67
Cr_2O_3	0.21	0.23	0.48	0.42	0.41	0.50	0.45	0.41	0.38	0.50
FeO*	5.97	5.88	5.48	5.72	5.33	5.33	5.57	5.17	5.92	5.33
MnO	0.20	0.20	0.17	0.18	0.16	0.15	0.17	0.15	0.17	0.15
MgO	13.76	13.84	15.11	15.36	15.41	15.39	15.65	15.25	15.56	15.18
CaO	24.12	24.09	23.52	23.28	23.91	23.35	23.30	23.01	23.09	23.95
Na_2O	0.40	0.37	0.38	0.42	0.31	0.32	0.34	0.30	0.35	0.32
K_2O	0.00	0.00	0.00	0.02	0.00	0.02	0.00	0.01	0.00	0.00
Toal	100.09	100.70	100.93	100.94	100.87	100.60	100.61	99.45	100.27	100.23
Si	1.936	1.930	1.934	1.929	1.906	1.909	1.899	1.934	1.920	1.904
Al^{IV}	0.064	0.070	0.066	0.071	0.094	0.091	0.101	0.066	0.080	0.096
Al^{VI}	0.046	0.052	0.039	0.032	0.024	0.028	0.024	0.039	0.018	0.020
Ti	0.016	0.020	0.012	0.012	0.017	0.021	0.016	0.014	0.014	0.016
Cr	0.006	0.007	0.014	0.012	0.012	0.014	0.013	0.012	0.011	0.015
Fe^{2+}	0.185	0.181	0.167	0.175	0.163	0.164	0.171	0.160	0.183	0.165
Mn	0.006	0.006	0.005	0.006	0.005	0.005	0.005	0.005	0.005	0.005
Mg	0.759	0.758	0.823	0.838	0.842	0.842	0.857	0.841	0.856	0.836
Ca	0.956	0.948	0.921	0.912	0.939	0.918	0.917	0.912	0.912	0.948
Na	0.029	0.027	0.027	0.029	0.022	0.022	0.024	0.021	0.025	0.023
$Mg^{\#}$	80.42	80.76	83.10	82.72	83.76	83.73	83.36	84.02	82.40	83.55
Fs	9.72	9.57	8.76	9.09	8.40	8.51	8.80	8.36	9.37	8.45
En	39.95	40.17	43.07	43.52	43.32	43.77	44.06	43.97	43.87	42.90
Wo	50.33	50.26	48.17	47.40	48.29	47.72	47.14	47.67	46.77	48.65

样品	CKS-08-04-8	CKS-08-04-10	CKS-08-04-11	CKS-08-04-12	CKS-08-04-13	CKS-08-04-14	CKS-08-06-1	CKS-08-06-2	CKS-08-06-3	CKS-08-06-4
SiO_2	51.92	52.08	51.97	52.50	52.40	51.76	51.20	51.29	50.75	51.80
TiO_2	0.56	0.38	0.53	0.78	0.52	0.65	0.67	0.68	0.27	0.42
Al_2O_3	2.55	2.40	2.97	2.85	2.79	2.64	2.84	2.85	3.22	3.30
Cr_2O_3	0.41	0.38	0.35	0.48	0.43	0.42	0.01	0.01	0.03	0.11
FeO*	5.08	5.63	6.12	5.67	5.50	5.59	9.14	9.13	9.69	7.16
MnO	0.17	0.18	0.20	0.21	0.19	0.15	0.12	0.22	0.29	0.18
MgO	15.36	15.52	15.81	14.99	15.14	15.66	13.14	13.74	13.13	14.28
CaO	23.71	23.52	22.00	23.04	23.07	22.86	21.53	21.52	21.53	22.40
Na_2O	0.33	0.33	0.33	0.35	0.36	0.29	0.39	0.39	0.38	0.31
K_2O	0.00	0.00	0.01	0.01	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.01
Toal	100.10	100.41	100.28	100.88	100.39	100.02	99.03	99.82	99.29	99.97
Si	1.915	1.918	1.911	1.920	1.924	1.910	1.930	1.919	1.915	1.919
Al^{IV}	0.085	0.082	0.089	0.080	0.076	0.090	0.070	0.081	0.085	0.081
Al^{VI}	0.026	0.022	0.040	0.043	0.045	0.025	0.056	0.044	0.059	0.063

续表1

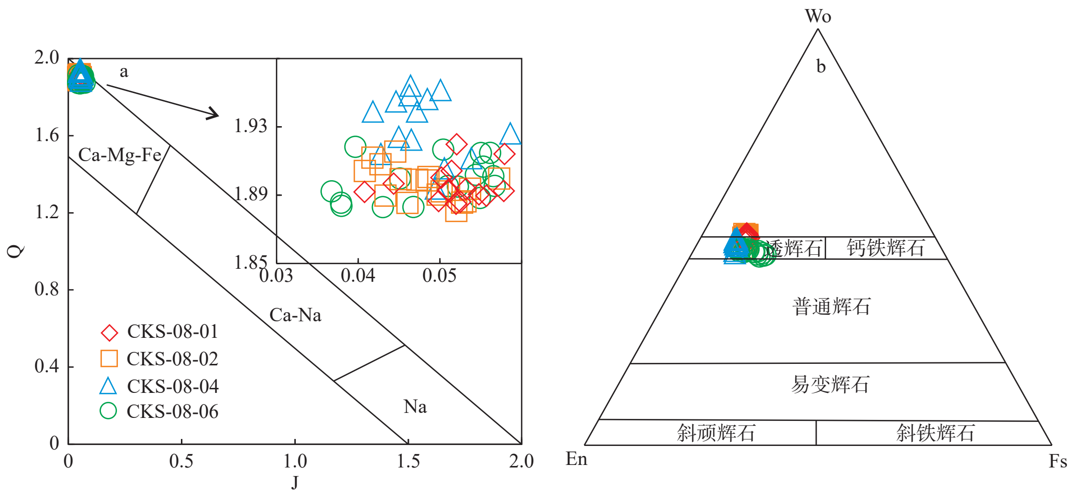
样品	CKS-08-04-8	CKS-08-04-10	CKS-08-04-11	CKS-08-04-12	CKS-08-04-13	CKS-08-04-14	CKS-08-06-1	CKS-08-06-2	CKS-08-06-3	CKS-08-06-4
Ti	0.015	0.011	0.015	0.022	0.014	0.018	0.019	0.019	0.008	0.012
Cr	0.012	0.011	0.010	0.014	0.013	0.012	0.000	0.000	0.001	0.003
Fe^{2+}	0.157	0.173	0.188	0.173	0.169	0.173	0.288	0.286	0.306	0.222
Mn	0.005	0.006	0.006	0.007	0.006	0.005	0.004	0.007	0.009	0.006
Mg	0.845	0.852	0.867	0.817	0.829	0.862	0.738	0.767	0.738	0.789
Ca	0.937	0.928	0.867	0.903	0.908	0.904	0.869	0.863	0.870	0.889
Na	0.024	0.023	0.023	0.025	0.025	0.021	0.028	0.028	0.028	0.023
$Mg^{\#}$	84.34	83.08	82.17	82.50	83.08	83.32	71.92	72.86	70.72	78.06
Fs	8.09	8.88	9.79	9.15	8.86	8.90	15.20	14.92	15.97	11.67
En	43.58	43.61	45.11	43.16	43.49	44.46	38.94	40.04	38.57	41.52
Wo	48.34	47.51	45.10	47.68	47.65	46.64	45.86	45.05	45.46	46.81

样品	CKS-08-06-5	CKS-08-06-6	CKS-08-06-7	CKS-08-06-8	CKS-08-06-9	CKS-08-06-10	CKS-08-06-11	CKS-08-06-12	CKS-08-06-13	CKS-08-06-14
SiO_2	51.34	50.95	52.18	51.95	52.18	50.99	52.03	51.41	51.50	51.50
TiO_2	0.79	0.54	0.47	0.59	0.49	0.83	0.64	0.86	0.66	0.75
Al_2O_3	3.32	3.77	3.09	2.99	3.17	3.58	2.74	2.78	3.36	3.52
Cr_2O_3	0.07	0.09	0.13	0.13	0.22	0.13	0.03	0.02	0.02	0.10
FeO*	7.93	6.13	5.69	5.66	6.03	8.45	8.68	9.52	8.14	7.15
MnO	0.21	0.18	0.16	0.14	0.18	0.20	0.20	0.23	0.21	0.18
MgO	13.84	14.50	14.82	14.79	15.11	13.45	13.84	13.32	14.02	14.37
CaO	21.86	22.05	22.38	22.55	22.32	21.88	21.80	21.50	22.18	22.24
Na_2O	0.38	0.26	0.26	0.26	0.36	0.43	0.38	0.39	0.39	0.36
K_2O	0.00	0.01	0.00	0.01	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
Toal	99.72	98.48	99.18	99.04	100.06	99.93	100.34	100.03	100.46	100.17
Si	1.913	1.908	1.934	1.930	1.922	1.902	1.931	1.922	1.908	1.905
Al^{IV}	0.087	0.092	0.066	0.070	0.078	0.098	0.069	0.078	0.092	0.095
Al^{VI}	0.059	0.074	0.069	0.061	0.059	0.060	0.051	0.045	0.054	0.058
Ti	0.022	0.015	0.013	0.016	0.014	0.023	0.018	0.024	0.018	0.021
Cr	0.002	0.003	0.004	0.004	0.006	0.004	0.001	0.000	0.001	0.003
Fe^{2+}	0.247	0.192	0.176	0.176	0.186	0.264	0.269	0.298	0.252	0.221
Mn	0.007	0.006	0.005	0.004	0.006	0.006	0.006	0.007	0.006	0.005
Mg	0.769	0.809	0.819	0.819	0.829	0.748	0.766	0.742	0.774	0.792
Ca	0.873	0.884	0.889	0.897	0.880	0.874	0.867	0.861	0.880	0.881
Na	0.027	0.019	0.019	0.018	0.025	0.031	0.027	0.028	0.028	0.026
$Mg^{\#}$	75.68	80.84	82.27	82.32	81.70	73.93	73.98	71.39	75.45	78.18
Fs	13.08	10.17	9.37	9.29	9.80	13.98	14.16	15.65	13.22	11.67
En	40.71	42.93	43.46	43.28	43.75	39.65	40.27	39.05	40.62	41.82
Wo	46.21	46.90	47.17	47.43	46.45	46.37	45.57	45.30	46.16	46.51

续表 1

样品	CKS-08-06-15	CKS-08-06-16	CKS-08-06-17	CKS-08-06-18
SiO_2	52.30	52.79	52.25	52.24
TiO_2	0.46	0.55	0.49	0.61
Al_2O_3	2.45	2.32	3.41	3.21
Cr_2O_3	0.13	0.06	0.24	0.18
FeO*	6.99	6.03	5.79	6.75
MnO	0.16	0.11	0.16	0.17
MgO	14.62	15.22	15.03	14.68
CaO	22.50	22.79	22.38	22.01
Na_2O	0.35	0.28	0.33	0.30
K_2O	0.00	0.01	0.00	0.01
Toal	99.96	100.17	100.07	100.16
Si	1.937	1.942	1.921	1.925
Al^{IV}	0.918	0.918	0.905	0.890
Al^{VI}	0.063	0.058	0.079	0.075
Ti	0.013	0.015	0.013	0.017
Cr	0.004	0.002	0.007	0.005
Fe^{2+}	0.216	0.185	0.178	0.208
Mn	0.005	0.003	0.005	0.005
Mg	0.807	0.835	0.823	0.806
Ca	0.893	0.898	0.881	0.869
Na	0.025	0.020	0.023	0.022
$Mg^{\#}$	78.86	81.82	82.22	79.51
Fs	11.29	9.67	9.46	11.04
En	42.12	43.51	43.73	42.83
Wo	46.58	46.82	46.81	46.14

注：$Mg^{\#}$ = 100*Mg/($Mg+Fe^{2+}$)；Fs= 100*Fe^{2+}/($Mg+Ca+Fe^{2+}$)；En= 100*Mg/($Mg+Ca+Fe^{2+}$)；Wo=100*Ca/($Mg+Ca+Fe^{2+}$)。



a. Q–J 图（Q＝$Ca+Mg+Fe^{2+}$，J＝2Na）；b. Wo–En–Fs 图解

图4　朝克山蛇绿岩中辉长岩的单斜辉石图解（据 Mahoney et al.，1998）

Fig. 4　Compositional variations of Clinopyroxenes in gabbros from the Chaokeshan ophiolitic

地球化学特征一致。

4　讨论

4.1　单斜辉石的演化

根据矿物和地球化学组成特征，火成岩中单斜辉石的组成变化可以很好地记录母岩浆初始组成的差异，主要由巨晶单斜辉石、堆积岩中的单斜辉石和斑晶-微晶单斜辉石 3 种类型，它们具有不同来源深度和成分（Nisbet et al., 1977）。单斜辉石中的 Al 的配位与温压关系密切，具有特殊意义。即高温低压条件下有利于 Al 在四次配位中代替 Si，而低温高压条件下有

利于 Al 在六次配位中代替其他阳离子。岩浆结晶分异的演化过程, 由地幔到地壳, 伴随高温向低温或高压向低压变化, 是 Al 由六次配位向四次配位转化的过程(陈光远等, 1987)。根据 Al^{VI}/Al^{IV}可以定性衡量单斜辉石的结晶压力(Aoki et al., 1968; Thompson, 1974; Wass, 1979), 划分不同压力下形成的单斜辉石(Aoki et al., 1973)。在 Al^{VI}-Al^{IV}图中(图 6a), 所有单斜辉石中 Al^{VI}变化范围为 0.18～0.23, Al^{IV}变化范围为 0.18～0.23; Al^{VI}/Al^{IV}变化范围为 0.18～0.23, 单斜辉石主要落在玄武岩包体中的单斜辉石区域内, 表明该套岩石形成于相对高温低压环境(Sherafat et al., 2012)。此外, 单斜辉石具有相对高 Si、低 Al 的特征, 单斜辉石在 Si–Al 图中(图 6b)均落入碱性或拉斑玄武岩中辉石斑晶区域。

火成岩中单斜辉石的 Si 与 Al 具有互不相容性, 故其组合能反映其母岩浆性质(Le Bas, 1962)。来自 SiO_2 不饱和碱性玄武质岩浆中的单斜辉石, 其四面体中 Si 的含量较低, 而 Al 的含量较高, 相反过饱和的拉斑玄武质岩浆中结晶出的单斜辉石, 其四面体中 Si 的含量较高, 而 Al 的含量较低(Kushiro, 1960)。透辉石中 Al_2O_3 的含量通常为 1%～3% (赖绍聪等, 2005)。本研究区的单斜辉石具有相对高的 Al_2O_3(2.03%～3.77 %)含量和较低的 SiO_2(50.75%～52.99%), 与不饱和碱性岩浆系列具有明显的对应关系。在 Al_2O_3–SiO_2 图中(图 7a), 样品全部落入亚碱性岩区域, 暗示其母岩浆可能为亚碱性岩浆。同时在 Ti–(Ca+Na)图中(图 7b), 除样品(CKS-08-06)为拉斑玄武系列, 其余均属于碱性玄武系列。综上所述, 朝克山岩体的母岩浆可能为亚碱性的拉斑玄武质岩浆向碱性玄武质岩浆演化的趋势。

表 2　朝克山辉长岩的单斜辉石的微量元素数据表(10^{-6})

Tab. 2　Trace element compositions of clinopyroxene in gabbro from the Chaokeshan(10^{-6})

样品	CKS-08-01-1	CKS-08-01-2	CKS-08-01-3	CKS-08-01-4	CKS-08-01-5	CKS-08-01-6	CKS-08-01-7	CKS-08-01-8	CKS-08-01-9	CKS-08-01-10
Sc	117.7	108.2	112.3	108.0	104.1	109.3	108.0	108.7	98.07	117.7
V	427.25	410.11	417.14	417.82	387.93	416.56	394.93	427.54	376.24	427.25
Cr	2 667	2 541	2 569	2 651	2 438	2 651	2 443	3 249	2 451	2 667
Co	33.09	33.20	35.99	33.74	34.98	36.30	34.34	35.52	34.47	33.09
Ni	135.9	139.4	155.9	157.6	179.4	154.2	139.8	131.1	167.7	135.9
Cu	7.24	12.75	14.01	5.87	36.38	7.54	0.58	3.35	21.82	7.24
Zn	27.70	24.85	25.61	27.55	27.00	26.30	26.70	28.50	32.53	27.70
Ga	4.56	4.50	4.84	4.57	4.42	4.62	3.66	4.91	4.50	4.56
Rb	0.44	0.11	0.00	0.16	0.00	0.01	0.00	0.27	0.19	0.44
Sr	7.20	8.21	8.18	6.74	11.11	8.93	6.32	6.93	6.89	7.20
Y	15.48	15.52	16.05	16.79	15.66	16.41	15.85	16.74	14.73	15.48
Zr	8.37	8.41	9.00	8.09	7.69	8.57	9.35	8.96	7.56	8.37
Nb	0.01	0.03	0.01	0.00	0.01	0.03	0.05	0.01	0.02	0.01
Sn	1.58	1.38	1.70	1.13	1.33	1.60	0.91	1.35	1.61	1.58
Sb	0.51	0.52	1.08	0.65	0.62	0.60	0.77	0.19	0.56	0.51
Ba	0.24	0.21	0.60	0.24	1.49	0.31	0.17	0.36	0.84	0.24
La	0.16	0.16	0.15	0.10	0.24	0.13	0.18	0.09	0.14	0.16
Ce	1.03	1.11	1.20	0.76	0.90	1.03	0.80	0.92	0.69	1.03
Pr	0.27	0.24	0.26	0.23	0.19	0.16	0.17	0.28	0.15	0.27
Nd	1.61	1.49	1.71	2.06	1.94	2.33	1.81	1.99	1.95	1.61
Sm	1.23	1.02	1.36	1.34	1.31	0.78	1.02	1.13	1.29	1.23
Eu	0.43	0.46	0.47	0.55	0.54	0.47	0.48	0.42	0.40	0.43

续表2

样品	CKS-08-01-1	CKS-08-01-2	CKS-08-01-3	CKS-08-01-4	CKS-08-01-5	CKS-08-01-6	CKS-08-01-7	CKS-08-01-8	CKS-08-01-9	CKS-08-01-10
Gd	2.36	2.13	2.18	1.80	1.71	2.09	1.60	2.14	2.23	2.36
Tb	0.40	0.33	0.53	0.42	0.36	0.44	0.33	0.45	0.40	0.40
Dy	2.99	2.61	3.00	3.08	2.60	2.97	2.68	3.15	2.50	2.99
Ho	0.59	0.66	0.64	0.59	0.70	0.62	0.65	0.64	0.57	0.59
Er	1.85	1.90	1.94	1.83	1.63	1.91	1.81	1.84	1.50	1.85
Tm	0.19	0.28	0.29	0.22	0.26	0.27	0.17	0.24	0.28	0.19
Yb	1.29	1.68	1.66	1.67	1.44	1.87	1.90	2.23	1.78	1.29
Lu	0.27	0.27	0.27	0.25	0.26	0.24	0.27	0.20	0.19	0.27
Hf	0.56	0.59	0.48	0.45	0.22	0.40	0.59	0.55	0.41	0.56
Ta	0.01	0.01	0.01	0.01	0.02	0.02	0.01	0.01	0.01	0.01

样品	CKS-08-01-11	CKS-08-01-12	CKS-08-02-1	CKS-08-02-2	CKS-08-02-3	CKS-08-02-4	CKS-08-02-5	CKS-08-02-6	CKS-08-02-7	CKS-08-02-8
Sc	110.8	95.55	108.2	106.0	123.6	104.9	116.1	112.5	123.9	128.0
V	425.11	370.42	415.3	399.8	428.2	392.8	402.6	396.6	414.4	410.5
Cr	2 685	2 429	1830	1 774	2 392	1 773	2 829	1861	2 397	1 784
Co	36.69	35.57	36.17	43.21	41.14	40.38	37.99	39.38	35.44	33.79
Ni	134.5	160.6	147.2	194.4	186.6	185.8	158.4	150.1	166.4	148.3
Cu	2.44	50.87	16.32	51.45	46.10	30.53	9.46	8.33	9.65	1.98
Zn	25.93	28.61	27.25	37.25	27.40	35.13	27.33	24.60	30.17	22.60
Ga	4.49	4.36	4.97	5.16	5.53	4.56	4.90	3.41	4.91	3.64
Rb	1.45	0.74	0.14	0.02	0.19	0.44	0.14	0.19	0.14	0.14
Sr	8.11	7.81	6.56	6.39	6.89	6.60	8.36	6.55	6.29	6.18
Y	17.24	14.35	16.44	14.76	15.91	16.16	15.98	15.17	16.39	15.39
Zr	9.85	7.55	8.87	8.41	8.68	7.65	8.84	7.37	9.30	7.50
Nb	0.02	0.00	0.00	0.02	0.03	0.01	0.01	0.00	0.02	0.02
Sn	1.54	1.47	1.47	1.35	1.42	1.77	1.44	1.52	1.18	1.61
Sb	0.47	0.23	1.39	0.59	0.14	0.28	0.35	0.26	0.32	0.74
Ba	0.00	0.96	0.41	0.30	0.25	0.31	0.12	0.25	0.19	0.18
La	0.13	0.16	0.17	0.13	0.18	0.19	0.09	0.15	0.07	0.10
Ce	1.13	0.89	0.83	0.67	0.73	0.90	0.76	0.58	0.78	0.70
Pr	0.33	0.26	0.20	0.21	0.18	0.18	0.18	0.24	0.21	0.15
Nd	1.80	2.13	2.08	2.40	1.56	1.97	1.90	1.55	2.16	1.73
Sm	0.73	1.18	1.36	1.14	1.33	0.94	0.96	1.17	1.22	1.15
Eu	0.34	0.49	0.47	0.33	0.52	0.30	0.58	0.42	0.38	0.40
Gd	2.82	1.86	2.10	2.03	2.37	2.50	1.84	2.03	2.05	2.32
Tb	0.44	0.47	0.48	0.41	0.42	0.39	0.38	0.30	0.37	0.36
Dy	3.10	2.53	2.87	2.74	2.96	2.80	2.53	2.74	3.37	3.09
Ho	0.63	0.58	0.68	0.57	0.64	0.61	0.54	0.61	0.74	0.53
Er	1.75	1.46	2.09	1.68	1.86	1.67	1.86	1.74	1.69	1.56

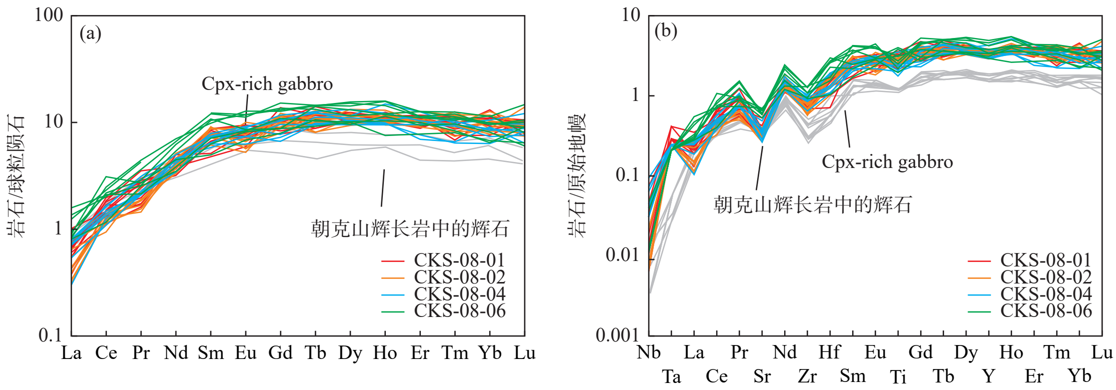
续表2

样品	CKS-08-01-11	CKS-08-01-12	CKS-08-02-1	CKS-08-02-2	CKS-08-02-3	CKS-08-02-4	CKS-08-02-5	CKS-08-02-6	CKS-08-02-7	CKS-08-02-8
Tm	0.25	0.30	0.30	0.21	0.30	0.24	0.23	0.24	0.25	0.29
Yb	1.85	1.57	1.66	1.73	1.99	1.41	1.72	1.32	2.15	1.77
Lu	0.26	0.23	0.24	0.26	0.25	0.20	0.21	0.19	0.25	0.23
Hf	0.31	0.49	0.54	0.42	0.40	0.52	0.59	0.42	0.52	0.39
Ta	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01

样品	CKS-08-02-9	CKS-08-02-10	CKS-08-02-11	CKS-08-04-1	CKS-08-04-2	CKS-08-04-3	CKS-08-04-4	CKS-08-04-5	CKS-08-04-6	CKS-08-04-7
Sc	95.94	107.1	105.8	109.5	113.7	115.2	98.30	92.56	110.4	107.3
V	359.1	404.5	402.1	387.8	347.8	393.9	323.3	325.4	423.9	412.8
Cr	1 589	1 657	1 729	3 133	3 011	2 949	2 466	2 762	3 518	2 997
Co	35.95	36.54	39.57	34.71	41.83	34.02	41.42	39.42	32.94	34.16
Ni	130.8	165.0	168.3	133.5	152.7	126.9	179.0	156.7	129.7	131.7
Cu	20.06	11.27	25.10	7.37	15.16	3.87	47.01	11.52	4.02	3.02
Zn	29.02	27.60	25.93	27.35	30.57	28.85	33.61	27.53	27.22	25.04
Ga	4.40	4.68	4.72	4.58	4.07	4.25	4.51	4.57	4.64	4.15
Rb	0.14	0.14	0.36	0.00	0.02	0.68	0.00	0.00	0.00	0.00
Sr	5.58	6.69	6.61	10.24	7.25	6.84	6.01	5.56	8.01	7.59
Y	13.08	14.14	16.19	15.79	13.13	16.85	13.67	13.67	19.44	17.08
Zr	6.48	6.79	6.34	10.51	7.20	10.95	9.88	9.50	11.50	9.56
Nb	0.02	0.02	0.01	0.05	0.04	0.03	0.02	0.00	0.07	0.03
Sn	1.57	0.87	1.57	0.76	0.68	1.56	1.72	1.04	1.47	1.18
Sb	0.40	0.31	0.14	0.47	0.76	0.37	0.51	0.70	0.22	0.82
Ba	0.18	0.54	0.10	0.44	0.28	0.10	0.56	0.47	0.18	0.01
La	0.10	0.08	0.09	0.18	0.13	0.19	0.07	0.17	0.18	0.17
Ce	0.85	0.74	0.79	0.91	0.67	0.99	0.77	0.86	1.01	0.82
Pr	0.16	0.18	0.14	0.20	0.20	0.30	0.21	0.21	0.28	0.20
Nd	1.83	1.56	1.98	1.94	1.62	2.33	2.15	1.60	2.02	2.09
Sm	1.20	1.40	1.10	1.12	0.96	1.14	0.89	1.12	1.21	0.99
Eu	0.45	0.33	0.35	0.49	0.36	0.52	0.43	0.43	0.53	0.51
Gd	2.36	1.85	1.63	2.12	1.49	2.40	1.37	1.96	2.19	1.58
Tb	0.30	0.45	0.37	0.47	0.37	0.47	0.36	0.36	0.46	0.42
Dy	2.38	2.91	2.54	2.62	2.42	3.37	2.67	2.42	2.93	2.81
Ho	0.56	0.65	0.66	0.54	0.55	0.69	0.56	0.54	0.84	0.60
Er	1.50	1.71	1.74	1.58	1.26	1.71	1.15	1.59	2.08	1.87
Tm	0.21	0.19	0.32	0.28	0.16	0.24	0.17	0.24	0.25	0.26
Yb	1.42	1.53	1.50	1.66	1.08	1.49	1.54	1.25	1.79	1.43
Lu	0.20	0.24	0.35	0.25	0.21	0.21	0.16	0.19	0.31	0.22
Hf	0.31	0.41	0.51	0.41	0.33	0.57	0.34	0.41	0.59	0.38
Ta	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01

续表2

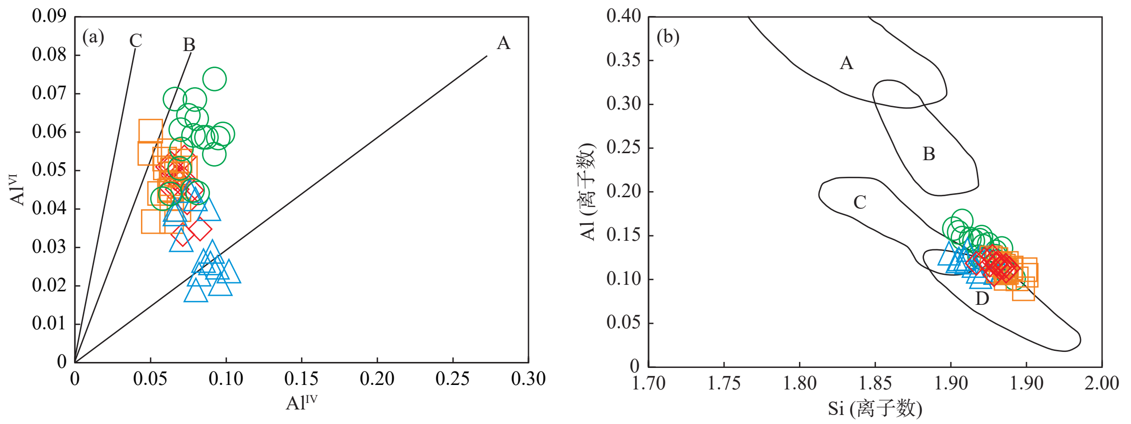
样品	CKS-08-06-1	CKS-08-06-2	CKS-08-06-3	CKS-08-06-4	CKS-08-06-5	CKS-08-06-6	CKS-08-06-7	CKS-08-06-8	CKS-08-06-9	CKS-08-06-10
Sc	135.2	128.9	133.5	130.9	128.6	119.3	113.1	129.9	135.2	128.9
V	403.7	460.0	462.1	337.9	443.4	475.0	410.2	521.3	403.7	460.0
Cr	1863	506.1	593.6	3 334	607.2	264.9	1 046	268.6	1863	506.1
Co	42.67	48.40	47.82	37.80	47.52	51.55	43.55	48.49	42.67	48.40
Ni	201.7	125.8	132.6	207.3	121.1	116.3	162.7	99.69	201.7	125.8
Cu	21.15	8.99	24.50	1.88	0.00	2.15	0.44	6.07	21.15	8.99
Zn	29.23	42.54	37.28	21.24	37.23	50.13	30.46	46.96	29.23	42.54
Ga	7.01	6.72	7.29	5.85	7.29	6.74	7.04	8.38	7.01	6.72
Rb	0.70	0.00	0.56	0.01	0.00	0.00	0.23	0.00	0.70	0.00
Sr	14.67	13.85	14.57	11.14	12.12	12.60	13.73	12.45	14.67	13.85
Y	15.12	19.10	18.31	13.29	20.75	22.25	17.23	22.97	15.12	19.10
Zr	14.41	14.25	14.56	10.60	14.78	14.16	12.17	17.56	14.41	14.25
Nb	0.03	0.01	0.01	0.00	0.00	0.00	0.03	0.01	0.03	0.01
Sn	1.45	1.59	1.81	1.27	1.52	1.63	1.19	1.33	1.45	1.59
Sb	0.00	0.00	0.07	0.01	0.00	0.01	0.06	0.04	0.00	0.00
Ba	1.91	2.67	2.27	0.00	0.00	1.87	0.31	2.66	1.91	2.67
La	0.22	0.32	0.21	0.19	0.29	0.20	0.38	0.28	0.22	0.32
Ce	1.29	1.23	1.23	0.71	1.42	1.52	1.27	1.29	1.29	1.23
Pr	0.20	0.34	0.30	0.24	0.40	0.42	0.24	0.48	0.20	0.34
Nd	1.78	3.09	2.59	1.62	0.00	3.28	2.52	3.88	1.78	3.09
Sm	1.09	1.84	1.72	0.96	1.88	1.50	1.59	1.91	1.09	1.84
Eu	0.48	0.65	0.77	0.47	0.69	0.74	0.68	0.71	0.48	0.65
Gd	2.24	3.12	3.05	1.80	2.70	2.61	2.79	3.38	2.24	3.12
Tb	0.39	0.54	0.52	0.34	0.54	0.54	0.50	0.56	0.39	0.54
Dy	2.58	3.85	3.59	2.55	3.61	3.95	2.93	4.10	2.58	3.85
Ho	0.59	0.81	0.72	0.43	0.89	0.90	0.68	1.05	0.59	0.81
Er	1.65	1.87	2.51	1.29	1.88	2.09	2.09	2.81	1.65	1.87
Tm	0.21	0.28	0.33	0.20	0.31	0.32	0.29	0.38	0.21	0.28
Yb	1.10	1.63	1.76	1.15	1.62	1.93	1.68	2.31	1.10	1.63
Lu	0.23	0.26	0.26	0.16	0.27	0.37	0.23	0.39	0.23	0.26
Hf	0.92	0.84	0.67	0.70	0.52	0.79	0.48	1.07	0.92	0.84
Ta	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01



标准化数据据 Sun 等(1989)；意大利亚平宁山脉北部辉长岩中单斜辉石数据来源于 Sanfippo 等(2011)

图5 朝克山蛇绿岩中辉长岩的单斜辉石 REE 球粒陨石标准化图 (a) 和不相容元素原始地幔标准化图解 (b)

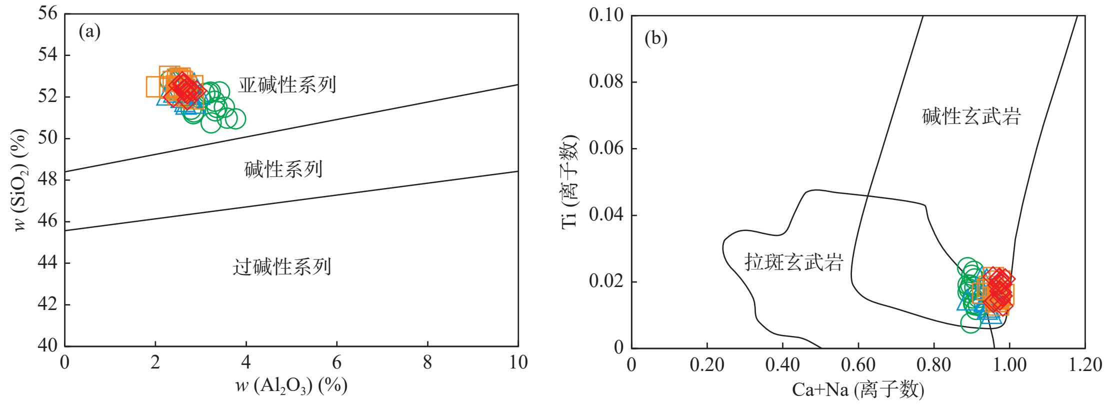
Fig. 5 (a)Chondrite–normalized rare earth element (REE) and(b) primitive mantle–normalized multi–element variation patterns for clinopyroxenes within the gabbroic rocks from the Chaokeshan ophiolitic



a. Al^{VI}-Al^{IV}图解（A 线条以下为火成岩中单斜辉石；A 与 B 之间为玄武岩包体中的单斜辉石；B 与 C 之间为麻粒岩中单斜辉石；C 线条以上为榴辉岩中单斜辉石）；b.Si-Al 图解（A 为巨晶单斜辉石；B.堆积岩中单斜辉石；C.碱性玄武岩中的斑晶；D.拉斑玄武岩中的斑晶）

图6　朝克山蛇绿岩中辉长岩的单斜辉石图解（据 Aoki et al.，1973; 邱家骧等，1996）

Fig. 6　Compositional variations of Clinopyroxenes in gabbros from the Chaokeshan ophiolitic



a. Al_2O_3–SiO_2 图解；b.Ti–(Ca+Na)图解

图7　朝克山蛇绿岩中辉长岩的单斜辉石图解（据邱家骧等，1996）

Fig. 7　Compositional variations of Clinopyroxenes in gabbros from the Chaokeshan ophiolitic

4.2　单斜辉石结晶温度和压力

确定单斜辉石与寄主岩石是否达到平衡，可由单斜辉石与熔体间的 Fe–Mg 分配系数也可用来探讨斑晶是否与全岩 Mg$^{\#}$值平衡（Streck, 2005）。该分配系数计算如下: $K_D(Fe–Mg)^{cpx-melt}=(FeO/MgO)_{cpx}/(FeO/MgO)_{melt}$。朝克山辉长岩中的单斜辉石斑晶与熔体之间的 Fe–Mg 分配系数计算结果见表 3。众多学者认为该分配系数为 0.2～0.4 时即可视为达到了平衡（Irving et al., 1984; Kinzler, 1997）。Putirka（2008）通过实验标定单斜辉石-熔体平衡温度和压力计算公式，并测定了 $K_D(Fe–Mg)^{cpx-melt}=0.28±0.08$ 达到平衡。Putirka（2008）通过实验标定单斜辉石–熔体之间的平衡温度和压力计算了朝克山辉长岩中单斜辉石的温度和压力。由计算结果（表 3）可知，虽然 4 个样品

表 3　单斜辉石-熔体平衡温度、压力、深度及其与全岩之间 Fe–Mg 分配系数表

Tab. 3　Temperature, pressure, depth of monoclinopyroxene melt equilibrium and Fe–Mg distribution coefficient with the whole rock

样品编号	P（kbar）	T（℃）	K_D（Fe-Mg）	深度（km）
CKS-08-01	3.2～5.8	1 099～1 184	0.289～0.298	10.50～19.29
CKS-08-02	2.8～5.6	1 122～1 194	0.292～0.296	9.36～18.52
CKS-08-04	2.1～6.4	1 169～1 242	0.293～0.299	7.07～21.05
CKS-08-06	1.5～5.6	1 168～1 193	0.275～0.282	4.79～18.33

注：按照 1 GPa 相当于 33 km 深度计算。

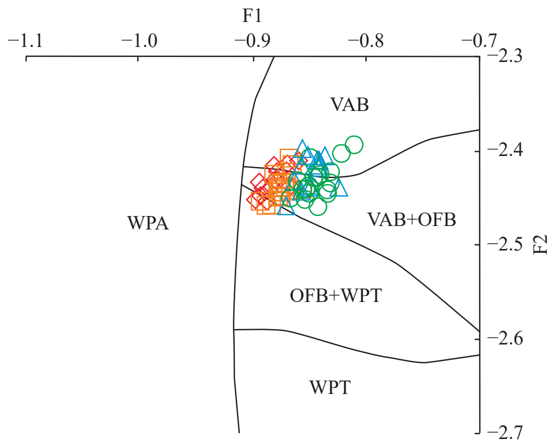
（CKS-08-01、CKS-08-02、CKS-08-04 和 CKS-08-06）同为朝克山辉长岩，但它们中的单斜辉石结晶温度、压力以及与熔体之间的平衡系数却不相同，CKS-08-01

辉长岩中的单斜辉石结晶温度为 1 099～1 184 ℃，与熔体之间的平衡系数为 0.289～0.298，平衡压力为 3.2～5.8 kbar，深度相当于 11～19 km，平均值为 14 km。CKS-08-02 辉长岩中的单斜辉石结晶温度为 1 122～1 194 ℃，与熔体之间的平衡系数为 0.292～0.296，平衡压力为 2.8～5.6 kbar，深度相当于 9～18 km，平均值为 15 km。CKS-08-04 辉长岩中的单斜辉石结晶温度为 1 169～1 242 ℃，与熔体之间的平衡系数为 0.293～0.299，平衡压力为 2.1～6.4 kbar，深度相当于 7～21 km，平均值为 14 km。CKS-08-06 辉长岩中的单斜辉石结晶温度为 1 168～1 193 ℃，与熔体之间的平衡系数为 0.275～0.282，平衡压力为 1.5～5.6 kbar，深度相当于 5～18 km，平均值为 13 km。所有辉长岩样品中的单斜辉石与熔体达到了平衡，且所有辉长岩中单斜辉石–熔体平衡深度相似。单斜辉石结晶温度较高，深度变化区间较大，辉石结晶深度（5～21 km）明显大于大洋地壳的平均厚度（5～6 km），反映了明显的深源特征。

4.3 单斜辉石形成的构造环境

前人对贺根山蛇绿岩带从镁铁质侵入岩和火山岩岩石化学和沉积岩及岩石组合角度已做过详细的工作，但是对朝克山研究甚少。王树庆等（2008）对朝克山蛇绿岩的全岩进行地球化学和同位素研究，从稀土配分模式上看，主要显示为 LREE 的亏损，类似于大洋中脊玄武岩（MORB）的特征。N-MORB 标准化的微量元素蛛网图上显示富集 LILEs、高场强元素（HFSE）Nb 和 Ta 相对亏损，与岛弧地球化学特征一致。蛇绿岩基性单元的同位素特征具有正的 $\varepsilon_{Nd}(t)$值（+8.4～+9.7），表明它们来自亏损地幔源区。文中朝克山辉长岩中的单斜辉石在球粒陨石标准化 REE 配分图上表现为轻稀土元素亏损，重稀土元素平坦，无明显 Eu 异常，类似于大洋中脊玄武岩（N-MORB）的特征。微量元素原始地幔标准化配分图显示大离子亲石元素（LILE）相对富集，高场强元素（HFSE）Nb、Ta、Zr、Hf 和 Ti 相对亏损，表明母岩浆形成过程中受到板片俯冲流体的影响，具有弧后盆地玄武岩的特征。在研究区单斜辉石 F1–F2 图解上（图 8），大多数样品落入岛弧和洋中脊区域。朝克山辉长岩中单斜辉石化学成分判定成岩构造环境判别结果与朝克山辉长岩的成岩构造环境一致。

综上所述，笔者所有这些证据均认为朝克山蛇绿岩兼有亏损型洋脊玄武岩（N-MORB）和岛弧玄武岩双重地球化学特征，反映其来源和形成过程受到洋脊扩张作用和俯冲消减作用共同控制，这种特征的蛇绿岩产出的构造环境形成于弧后盆地环境。



F1=−0.012*（SiO_2）−0.0807*（TiO_2）+0.0026*（Al_2O_3）−0.0012*（FeO）−0.0026*（MnO）+0.0087*（MgO）−0.0128*（CaO）−0.0419*（Na_2O）；
F2=−0.0469*（SiO_2）−0.0818*（TiO_2）−0.0212*（Al_2O_3）−0.0041*（FeO）−0.1435*（MnO）−0.0029*（MgO）+0.0085*（CaO）+0.016*（Na_2O）；
WPT.板块内部拉斑玄武岩；WPA.板块内部碱性玄武岩；
VAB.火山弧玄武岩；OFB.洋中脊玄武岩

图8 朝克山蛇绿岩中辉长岩的单斜辉石在 F1–F2 双因子判别图解（据邱家骧等，1987）

Fig. 8 F1–F2 factor discriminant diagram of compositional variations of Clinopyroxenes in gabbros from the Chaokeshan ophiolitic

5 结论

（1）朝克山蛇绿岩中单斜辉石化学成分特征指示岩浆为既有碱性系列特征，也有拉斑系列特征，富集 LILE，亏损 LREE 和 HFSE（如 Nb、Ta、Zr、Hf 和 Ti），与辉长岩全岩石的特征程度相一致，共同指示岩体母岩浆可能为亚碱性的拉斑玄武质岩浆向碱性玄武质岩浆演化的趋势。

（2）朝克山蛇绿岩中单斜辉石的结晶温度范围为 1 099～1 242 ℃，平衡压力为 1.5～6.4 kbar，形成深度 5～21 km，单斜辉石形成深度明显大于大洋地壳的平均厚度（5～6 km），反映了明显的深源特。

（3）综合前人的研究和单斜辉石的构造环境判别特征，这套蛇绿岩形成于弧后盆地环境。

参考文献（References）：

包志伟，陈森煌，张桢堂．内蒙古贺根山地区蛇绿岩稀土元素和 Sm-Nd 同位素研究［J］．地球化学，1994，23（4）：

339–349.
BAO Zhiwei, CHEN Senhuang, ZHANG Zhentang. Study on REE Sm-Nd isotopes of Hegenshan ophiolite, Inner Mongolla[J]. Geochimica, 1994, 23(4): 339–349.
白志民. 北京西山中生代火山岩中单斜辉石矿物化学及成因意义[J]. 岩石矿物学杂志, 2000, 19(2): 174–184.
BAI Zhimin. Mineral Chemistry and Genetic Significance of Clinopyroxenes from the Mesozoic Volcanic Rocks in Western Hills of Beijing[J]. Acta Petrologica et Mineralogica, 2000, 19(2): 174–184.
陈光远, 孙岱生, 殷辉安. 成因矿物学与找矿矿物学[M]. 重庆: 重庆出版社, 1987: 222–287.
CHEN Guangyuan, SUN Daisheng, YIN Huian. Genetic mineralogy and prospecting mineralogy[M]. Chongqing: Chongqing Press, 1987: 222-287.
党智财, 付超, 李俊建, 等. 内蒙古中部镁铁质-超镁铁质岩带铜镍成矿潜力探讨[J]. 西北地质, 2022, 55(1): 142–155.
DANG Zhicai, FU Chao, LI Junjian, et al. Discussion on the Copper and Nickel Metallogenic potentiality of Mafic-Ultramafic Rocks in Central Inner Mongolla[J]. Northwestern Geology, 2022, 55(1): 142–155.
黄波, 付冬, 李树才, 等. 内蒙古贺根山蛇绿岩形成时代及构造启示[J]. 岩石学报, 2016, 32(1): 158–176.
HUANG Bo, FU Dong, LI Shucai, et al. The age and tectonic implications of the Hegengshan ophiolite in Inner Mongolla[J]. Acta Petrologica Sinica, 2016, 32(1): 158–176.
黄波, 付冬, 周文孝, 等. 蛇绿混杂岩内基性岩锆石年龄的复杂性: 以内蒙古贺根山蛇绿岩为例[J]. 地质科学, 2021, 56(2): 596–614.
HUANG Bo, FU Dong, ZHOU Wenxiao, et al. Complexity of zircon ages of mafic rocks in ophiolitic mélanges: A case from the Hegenshan ophiolite, Inner Mongolia[J]. Chinese Journal of Geology, 2021, 56(2): 596–614.
赖绍聪, 秦江锋, 李永飞. 青藏北羌塘新第三纪玄武岩单斜辉石地球化学[J]. 西北大学学报(自然科学版), 2005, 35(5): 121–126.
LAI Shaocong, QIN Jiangfeng, LI Yongfei. Trace element Geochem istry and classification of the clinopyroxene in Cenozoic trachybasalt from north Qingtang area, Tibetan plateau[J]. Journal of Northwest University (Natural Science Edition), 2005, 35(5): 121–126.
邱家骧, 曾广策. 中国东部新生代玄武岩中低压单斜辉石的矿物化学及岩石学意义[J]. 岩石学报, 1987, (4): 1–9.
QIU Jiaxiang, ZENG Guangce. The main characteristics and petrological significance of low pressure clinopyroxenes in the Cenozoic basalts from eastern China[J]. Acta Petrologica Sinica, 1987, (4): 1–9.
邱家骧, 廖群安. 浙闽新生代玄武岩的岩石成因学与 Cpx 矿物化学[J]. 火山地质与矿产, 1996, 17(1): 16-25.
QIU Jiaxiang, LIAO Qunan. Petrogenesis and Cpx mineral chemistry of Cenozoic basalts from Zhejiang and Fujian of Eastern China[J]. Volcanology and Mineral Resources, 1996, 17(1): 16-25.
王成, 任利民, 张晓军, 等. 内蒙古贺根山蛇绿岩中玄武岩锆石U-Pb 年龄、地球化学特征及其地质意义[J]. 地质找矿论丛, 2018, 33(4): 617–626.
WANG Chen, REN Liming, ZHANG Xiaojun, et al. Zircon U-Pb age and geochemical characteristics of basalt of the Hegenshan ophiolite in Inner Mongolia and the geological significance[J]. Contributions to Geology and Mineral Resources Research, 2018, 33(4): 617–626.
王树庆, 许继峰, 刘希军, 等. 内蒙朝克山蛇绿岩地球化学: 洋内弧后盆地的产物?[J]. 岩石学报, 2008, 24(12): 2869–2879.
WANG Shuqing, XU Jifeng, LIU Xijun, et al. Geochemistry of the Chaokeshan ophiolite: Product of intra-oceanic back-arc basin?[J]. Acta Petrologica Sinica, 2008, 24(12): 2869–2879.
鄢全树, 石学法, 王昆山, 等. 南海新生代玄武岩中单斜辉石矿物化学及成因意义[J]. 岩石学报, 2007, 23(11): 2981–2989.
YAN Quanshu, SHI Xuefa, WANG Kunshan, et al. Mineral chemistry and its genetic significance of olivine in Cenozoic basalts from the South China Sea[J]. Acta Petrologica Sinica, 2007, 23(11): 2981–2989.
闫纪元, 李旭平, 鄢全树. 南海新生代玄武岩中单斜辉石地球化学特征及其地质意义[J]. 地质论评, 2014, 60(4): 824–838.
YAN Jiyuan, LI Xuping, YAN Quanshu. Geochemical Characteristics and Geological Implications of Clinopyroxenes in Cenozoic Basalts from the South China Sea[J]. Geological Review, 2014, 60(4): 824–838.
杨剑洲, 龚晶晶, 高健翁, 等. 北山造山带白云山蛇绿岩地幔橄榄岩成因及形成环境[J]. 西北地质, 2019, 52(3): 1–13.
YANG Jianzhou, GONG Jingjing, GAO Jianweng, et al. Petrogenesis and Geotectonic Setting of Mantle Peridotites from the Baiyunshan Ophiolite in Beishan Orogen[J]. Northwestern Geology, 2019, 52(3): 1–13.
臧遇时, 杨高学, 赵金凤. 蛇绿岩的定义、分类及其发展[J]. 西北地质, 2013, 46(2): 12–17.
ZANG Yushi, YANG Gaoxue, ZHAO Jinfeng. The Definition, Classification and Development of Ophiolites[J]. Northwestern Geology, 2013, 46(2): 12–17.
张旗, 周国庆. 中国蛇绿岩[M]. 北京: 科学出版社, 2001: 1−182.
ZHANG Qi, ZHOU Guoqing. Chinese ophiolite[M]. Beijing: Science Press, 2001: 1−182.
张向飞, 陈莉, 曹华文, 等. 中国新疆–中亚大地构造单元划分及演化简述[J]. 西北地质, 2023, 56(4): 1−39.
ZHANG Xiangfei, CHEN Li, CAO Huawen, et al. Division of Tectonic Units and Their Evolutions within Xinjiang, China to Central Asia[J]. Northwestern Geology, 2023, 56(4): 1−39.
张治国, 刘磊, 刘希军, 等. 新疆西准噶尔哈姆图斯火山岩年代学、地球化学特征及地质意义[J]. 桂林理工大学学报, 2019, 39(2): 258–269.
ZHANG Zhiguo, LIU Lei, LIU Xijun, et al. Geochronology and geochemistry of volcanic rocks from the Hamtus area in the western Junggar(Xinjiang) and their geological significance[J]. Journal of Guilin University of Technology, 2019, 39(2): 258–269.
Aoki K, Kushiro I. Some clinopyroxenes from ultramafic inclusions in Dreiser Weiher, Eifel[J]. Contributions to Mineralogy and

Petrology, 1968, 18(4): 326–337.

Aoki K I, Shiba I. Pyroxenes from lherzolite inclusions of Itinomegata, Japan[J]. Lithos, 1973, 6(1): 41–51.

Huang Xiaolong, Xu Yigang, Lo Chinghua, et al. Exsolution lamellae in a clinopyroxene megacryst aggregate from Cenozoic basalt, Leizhou Peninsula, South China: petrography and chemical evolution[J]. Contributions to Mineralogy and Petrology, 2007, 154: 691–705.

Irving A J, Frey F A. Trace element abundances in megacrysts and their host basalts: constraints on partition coefficients and megacryst genesis[J]. Geochimica et Cosmochimica Acta, 1984, 48(6): 1201–1221.

Jian Ping, Kroner A, Windley B F, et al. Carboniferous and Cretaceous mafic–ultramafic massifs in Inner Mongolia (China): A SHRIMP zircon and geochemical study of the previously presumed integral " Hegenshan ophiolite" [J]. Lithos, 2012, 142−143: 48–66.

Kinzler R J. Melting of mantle peridotite at pressures approaching the spinel to garnet transition: Application to mid - ocean ridge basalt petrogenesis[J]. Journal of Geophysical Research: Solid Earth, 1997, 102(B1): 853–874.

Kushiro I. Si-Al relation in clinopyroxenes from igneous rocks[J]. American Journal of Science, 1960, 258: 518–551.

Le Bsa M J. The role of aluminum in igneous clinopyroxenes with relation to their parentage[J]. American Journal of Science, 1962, 260(4): 267–288.

Li J Y. Permian geodynamic setting of Northeast China and adjacent regions: closure of the Paleo-Asian Ocean and subduction of the Paleo-Pacific Plate[J]. Earth and Planetary Science Letters, 2006, 26(3−4): 207–224.

Liu Chuanzhou, Wu Fuyuan, Wilde S A, et al. Anorthitic plagioclase and pargasitic amphibole in mantle peridotites from the Yungbwa ophiolite (southwestern Tibetan Plateau) formed by hydrous melt metasomatism[J]. Lithos, 2010, 114: 413–422.

Liu Xijun, Zhang Zhiguo, Xu Jifeng, et al. The youngest Permian Ocean in Central Asian Orogenic Belt: Evidence from Geochronology and Geochemistry of Bingdaban Ophiolitic Melange in Central Tianshan, northwestern China[J]. Geological Journal, 2020, 55(3): 2062–2079.

Liu Xijun, Xu Jifeng, Castillo P R, et al. Long-lived low Th/U Pacific-type isotopic mantle domain: Constraints from Nd and Pb isotopes of the Paleo-Asian Ocean mantle[J]. Earth and Planetary Science Letters, 2021, 567: 117006.

Mahoney J J, Fre R, Tejada M L G, et al. Tracing the Indian Ocean Mantle Domain Through Time: Isotopic Results from Old West Indian, East Tethyan, and South Pacific Seafloor[J]. Journal of Petrology, 1998, 39(7): 1285–1306.

Miao Laicheng, Fan Weiming, Liu Dunyi, et al. Geochronology and geochemistry of the Hegenshan ophiolitic complex: Implications for late-stage tectonic evolution of the Inner Mongolia-Daxinganling Orogenic Belt, China[J]. Journal of Asian Earth Sciences, 2008, 32(5−6): 348–370.

Morimoto N. Nomenclature of Pyroxenes[J]. Mineralogy and Petrology, 1988, 39: 55–76.

Nisbet E G, Pearce J A. Clinopyroxene composition in mafic lavas from different tectonic settings[J]. Contributions to Mineralogy and Petrology, 1977, 63(2): 149–160.

Nozaka T, Liu Yan. Petrology of the Hegenshan ophiolite and its implication for the tectonic evolution of northern China-Science-Direct[J]. Earth and Planetary Science Letters, 2002, 202(1): 89–104.

Pearce J A, Lippard S J, Roberts S. Characteristics and tectonic significance of supra-subduction zone ophiolites[J]. Geological Society, London, Special Publications, 1984, 16(1): 77–94.

Putirka K D. Thermometers and barometers for volcanic systems[J]. Reviews in Mineralogy and Geochemistry, 2008, 69(1): 61–120.

Sanfippo A, Tribuzio R. Melt transport and deformation history in a nonvolcanic ophiolitic section, northern Apennines, Italy: implications for crustal accretion at slow spreading settings[J]. Geochemistry, Geophysics, Geosystems, 2011, 12(7).

Sherafat S, Yavuz F, Noorbehesht I, et al. Mineral chemistry of Plio-Quaternary subvolcanic rocks, southwest Yazd Province, Iran[J]. International Geology Review, 2012, 54(13): 1497–1531.

Streck M J, Dungan M A, Bussy F, et al. Mineral inventory of continuously erupting basaltic andesites at Arenal volcano, Costa Rica: implications for interpreting monotonous, crystal-rich, mafic arc stratigraphies[J]. Journal of Volcanology and Geothermal Research, 2005, 140(1): 133–155.

Sun S S, Mcdonough W F. Chemical and isotopic systematics of oceanic basalts: Implications for mantle composition and processes[J]. In: Saunders A D, Norry M J (Eds.). Implications for Mantle Composition and Processes, Magmatism in the Ocean Basins[M]. Geological Society London Special Publication, 1989, 42: 313–345.

Thompson R N. Some high-pressure pyroxenes[J]. Mineralogical Magazine, 1974, 39(307): 768–787.

Wass S Y. Multiple origins of clinopyroxenes in alkali basaltic rocks[J]. Lithos, 1979, 612(2): 115–132.

Wang Yang, Gao Yongfeng, Santosh M, et al. Permian dyke swarm with bimodal affinity from the Hegenshan ophiolite-arc-accretionary belt, Central Inner Mongolia: Implications on lithospheric extension in a Carboniferous continental arc[J]. Lithos, 2020: 356–357.

Windley B F, Alexeie V D, Xiao Wenjiao, et al. Tectonic models for accretion of the Central Asian Orogenic Belt[J]. Journal of Geological Society London, 2007, 164: 31–47.

Xiao Wenjiao, Windley B F, Yuan C, et al. Paleozoic multiple subduction-accretion processes of the southern Altaids[J]. American Journal of Science, 2009, 309(3): 221–270.

Zhang Zhiguo, Liu Xijun, Xiao Wenjiao, et al. Geochemistry and Sr-Nd-Hf-Pb isotope systematics of late Carboniferous sanukitoids in northern West Junggar, NW China: Implications for initiation of ridge-subduction[J]. Gondwana Research, 2021, 99: 204–218.