

西秦岭同仁隆务峡蛇绿岩矿物成分特征及构造环境

王绘清 朱云海 林启祥 李益龙

(中国地质大学 地球科学学院, 湖北 武汉 430074)

摘 要: 同仁隆务峡蛇绿岩大地构造位置位于西秦岭造山带与中祁连带结合部, 其组成为: 地幔橄榄岩(纯橄岩、蛇纹石化纯橄岩)、超镁铁质堆晶单元(单辉橄榄岩、橄榄辉石岩)、镁铁质堆晶单元(含橄榄辉石岩、辉长岩等)及少量辉绿岩, 各单元均以断层接触、弱蚀变。镜下研究发现其岩浆结晶序列为橄榄石-单斜辉石-(斜方辉石)-斜长石, 与典型的 SSZ 型(Supra-Subduction Zone type)蛇绿岩结晶序列吻合。对各单元矿物电子探针研究发现: 橄榄石成分多为贵橄榄石, 单斜辉石则多为普通辉石和透辉石, 在利用其成分进行构造环境判别中, 本区蛇绿岩形成于与挤压背景密切相关的环境。该蛇绿岩表现出轻稀土元素略富集、重稀土元素平坦的稀土元素配分形式, 与 MORB 有较大差异。微量元素特征为相对富集大离子亲石元素 Ba、Rb、K, 而强烈亏损 Nb、P, 这恰与俯冲带组分特点吻合, 同时高场强元素构造判别图解佐证了前述构造环境的判定。研究区的蛇绿岩应形成于成熟度较高的岛弧环境中。

关键词: 隆务峡, 蛇绿岩, 构造环境, 电子探针, 岛弧, 西秦岭

中图分类号: P588.12; P574.2

文献标识码: A

文章编号: 1000-6524(2009)04-0316-13

Mineral characteristics and tectonic environment of Longwuxia Gorge ophiolite in Tongren, West Qinling area

WANG Hui-qing, ZHU Yun-hai, LIN Qi-xiang and LI Yi-long

(Earth Science Faculty, China University of Geosciences, Wuhan 430074, China)

Abstract: Located in Tongren of Qinghai Province, the Longwuxia Gorge ophiolite lies at the juncture between West Qinling and Middle Qilian orogenic belts and is composed of mantle peridotite (dunite, serpentinized dunite), ultramafic cumulate units (clinopyroxene-peridotites, olivine-pyroxenites), mafic cumulate units (olivine-bearing gabbro, gabbro etc.) and diabases. All these units are in contact with faults and have been weakly altered. Polarized light microscope studies of thin sections reveal that the crystallization sequences is Ol→Cpx→(Opx)→Pl, consistent well with the marked SSZ-type ophiolite crystallization sequence. EPMA analyses of the minerals show that olivines belong to the chrysolite family, and clinopyroxenes mostly have the composition similar to that of augite and diopside. Discrimination diagrams based on clinopyroxene geochemical data indicate that ophiolite originated in a compression tectonic background related closely to volcanic-arc. REE concentrations of most samples assume the chondrite-normalized distribution pattern with weak LREE enrichment, which is very different from the pattern of MORB. The enrichment of large ion lithophile trace elements (e.g., Ba, Rb and Sr) and the depletion of Nb, P are similar to things of the subduction zone components. High field strength elements discrimination diagrams also prove the above conclusion. In addition, the ophiolite is supposed to have been derived from a mature island arc tectonic environment, with the participation of some continental crust materials during the formation process.

Key words: Longwuxia Gorge; ophiolite; tectonic environment; EPMA; island arc; West Qinling

大陆造山带研究已成为大陆动力学研究的重要支柱之一,而处于秦岭、昆仑和祁连造山带交汇特殊地段的西秦岭地区更是研究的热点和难点(高延林等,1990;张二朋等,1993;张维吉等,1994;冯益民等,2002,2003;孙延贵等,2005)。以往的地质研究中,作为重要分划性界线的青海湖南缘(尖扎-武山-宝鸡-丹凤-信阳断裂带,其东段与中段两侧地质研究程度较高(张二朋等,1993),而西段特别是研究区内尖扎-武山断裂一带研究程度还不够,对其岩浆活动的研究也多以中酸性岩为主(张二朋等,1993;冯益民等,2003),少有报道基性-超基性岩浆活动,也从未发现有蛇绿岩特征的残片。张克信等(2007)在青海同仁县北、尖扎以南的隆务峡地区附近首次发现了超镁铁和镁铁质岩带,初步讨论了其地质背景和相应的主量、稀土元素地球化学特征,并提出该岩带可能为蛇绿岩的设想。作为出露在缝合带中的镁铁-超镁铁岩组合,蛇绿岩被认为是古大洋

岩石圈的残留,因而赋含了相当丰富的古大洋地幔动力学和大地构造学信息。本文首次对出露在隆务峡地区的蛇绿岩进行了详尽的矿物化学特征、微量元素的研究,厘定了该蛇绿岩岩片的类型,并对其形成的构造背景进行了详细讨论,以期勾勒秦岭和祁连接合部大地构造演化历史提供有价值的线索。

1 地质概况

研究区位于青海省同仁县,处于青藏高原东北缘与黄土高原交接处,大地构造位置位于西秦岭造山带与中祁连造山带接合部(图1),以北为中朝阿拉善地块,以南为古特提斯构造域。该区自北而南构造格局分别为北部大陆区西宁-兰州隆起(循化中新生成盆地、中祁连造山带)、隆务峡-甘加活动带(蛇绿混杂岩带)和西秦岭造山带。循化中新生成盆地地层以古近纪—新近纪红层为主,盆缘红层与基底

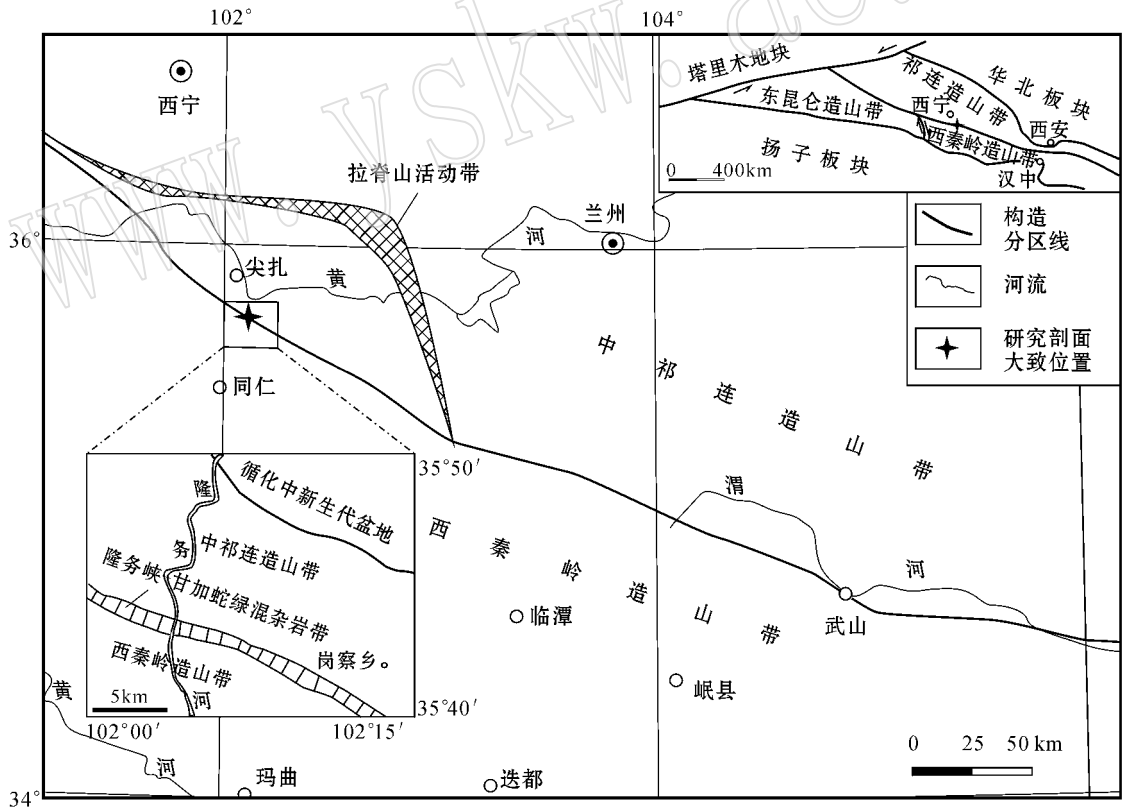


图 1 青海同仁及邻区构造背景简图 [据冯益民等(2003)、朱云海等(2006)^①]

Fig. 1 Schematic tectonic background of Tongren, Qinghai Province, and its adjacent area [after Feng Yimin *et al.* (2003) and Zhu Yunhai *et al.* (2006)^①]

① 朱云海,等. 2006. 1:5 万数字区域地质调查项目设计书奴家合幅(148E002001). 中国地质大学(武汉)地质调查研究院.

多为断层接触,局部为角度不整合接触;中祁连造山带的变质岩系大部分被三叠系和中新生代红层覆盖;隆务峡-甘加活动带宽度不大(在 1~2 km 之间),呈 NW-SE 向延伸,该活动带断层发育并多有矿化现象;晚古生界和中生界的碎屑岩+碳酸盐岩建造组成西秦岭造山带单元的主要部分,后期多遭受印支造山运动影响,遭受变质程度为绿片岩相的区域变质。

2 样品选择和分析方法

在前期工作中,张克信等(2007)完成了对隆务峡超镁铁-镁铁质岩的部分主量及稀土元素分析。在此基础上,相应样品的微量元素含量测定采用湖北省地质实验研究中心仪器中子活化分析(INAA)的方法对岩石粉末样品进行分析。新增样品的主量

元素由国土资源部华东矿产资源监督检测中心(南京地质矿产研究所实验测试中心)采用 X 射线荧光光谱测试,对应样品微量元素在中国地质大学(武汉)地质过程与矿产资源国家重点实验室完成,用电感耦合等离子质谱仪(ICP-MS)分析,分析精度优于 5%~10%。

为进一步研究其矿物特征,特从相应样品中挑出典型的岩石光片进行新鲜橄榄石、辉石、斜长石的电子探针研究。其中橄榄石来自纯橄岩、单辉橄榄岩和含橄榄石辉长岩,颗粒大小多在 1 mm 左右,裂隙发育。斜长石在橄榄辉石岩中偶见,以嵌于大颗粒辉石、橄榄石三角间隙形式存在(图 2b),且小于 0.5 mm;在辉长岩类中斜长石多有钠黝帘石化、绢云母化等,颗粒大小在 1.0~2.0 mm 之间。所有岩石类型中都可见辉石,且镜下多显示出单斜辉石的特点;在单辉橄榄岩及橄榄辉石岩中辉石粒度普

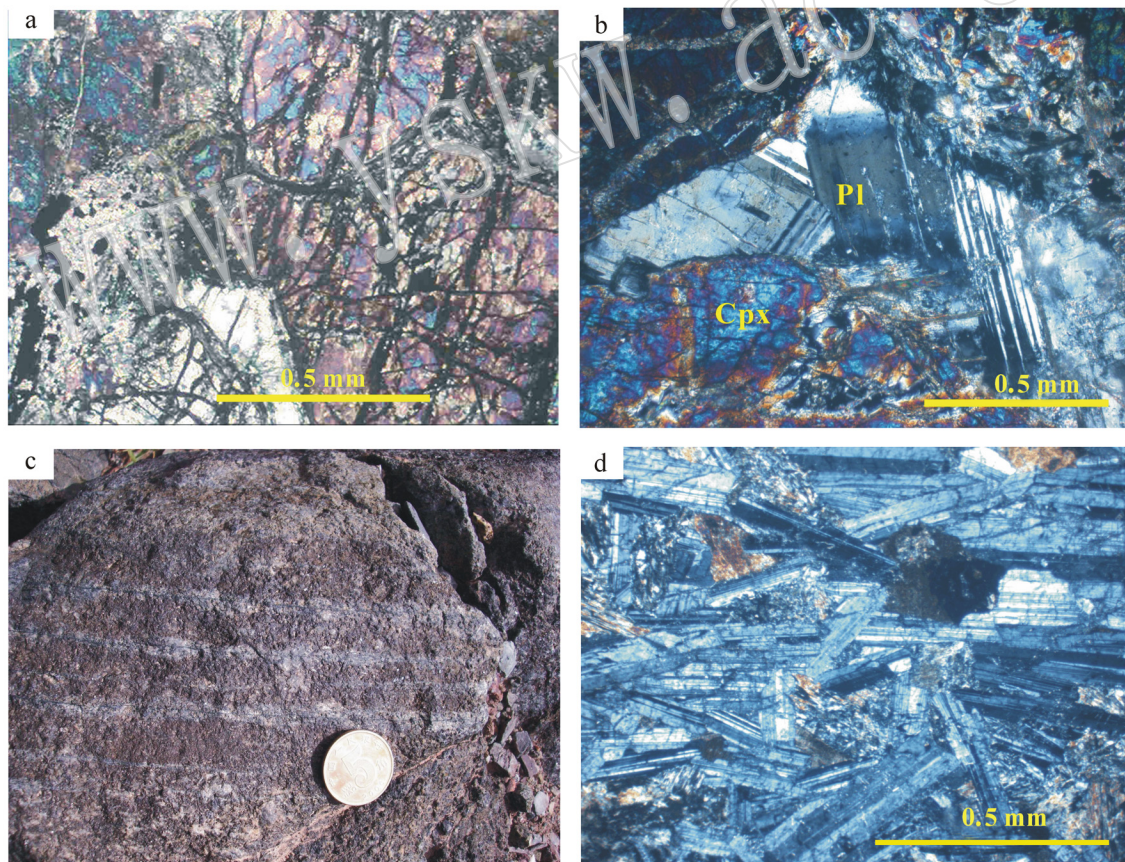


图 2 蛇绿岩野外和显微照片

Fig. 2 Field photo and microphotographs of ophiolite

a—纯橄岩结构特征,正交; b—橄榄辉石岩中充填于大颗粒间隙的斜长石,正交; c—含橄榄石辉长岩堆晶层理野外露头; d—辉长岩堆晶结构,正交

a—characteristics of microstructure of dunite, polarized light; b—plagioclase filled in interspace of larger grains, polarized light; c—outcrop of cumulate crystal beddings in olivine-bearing gabbro; d—cumulate crystal texture, polarized light

遍较之橄榄石要粗,多在 1.5~3.0 mm 之间,个别达粗粒级别;在辉长岩类中辉石粒度在较广的范围内浮动,但普遍为细粒级别;镜下单斜辉石未见成分环带,超镁铁岩类中辉石多有蛇纹石化,而镁铁质辉长岩辉绿岩则多见纤闪石化等。

电子探针采用中国地质大学地质过程与矿产资源国家重点实验室(GPMC)的 JXA-8100 电子探针仪,加速电压 15 kV,电子束 20 nA。每个元素背底扫描时间为 5 s,分析扫描时间为 20 s。使用天然氧化物和硅酸盐作标样。自然和人工样品的重复分析对于大部分元素的精度优于±2%。单矿物至少有 2 个分析点,每个矿物分析结果满足下列条件才采用:氧化物总和=100.0±2.0%。

3 隆务峡蛇绿岩特征

3.1 蛇绿岩岩相特征

结合野外观察、镜下鉴定,隆务峡蛇绿岩组成为纯橄岩、单辉橄榄岩、橄榄辉石岩、含橄榄石辉长岩、辉长岩和辉绿岩。由于后期强烈的褶皱造山运动,本区蛇绿岩各单元接触关系多为断层接触,断层产

状陡倾,不同岩性组合的蛇绿岩组成单元产出形态常呈透镜状、似层状或不规则状,多沿构造带线状分布。纯橄岩具变质变形橄榄岩的特征,橄榄石裂纹极为发育,颗粒较大,彼此间多为直边三联点接触并普遍蛇纹石化和伊丁石化(图 2a);副矿物可见细小的铬铁矿及磁铁矿颗粒,它们多呈自形形态散布于薄片,铬铁矿边缘具红、褐色晕。橄榄辉石岩也普遍蛇纹石化,其表面呈蜡状光泽,镜下可见充填于大颗粒间隙的斜长石(图 2b)。橄榄辉石岩与辉长岩类(含橄榄石辉长岩、辉长岩)堆晶层理比较明显(图 2c、2d)。在含橄榄石辉长岩中见有具浅玫瑰红-淡绿弱多色性紫苏辉石。辉长岩类和辉绿岩中的辉石、斜长石普遍遭受蚀变,其中辉石多见纤闪石化,斜长石则多钠黝帘石化、绢云母化等。从岩相特征可以看出,岩浆结晶顺序应为橄榄石-单斜辉石-(斜方辉石)-斜长石。

3.2 蛇绿岩地球化学特征

3.2.1 矿物化学成分特征

隆务峡蛇绿岩各类岩石矿物探针数据见表 1 至表 3。纯橄岩的橄榄石成分 Fd(%)在 90.3 左右,为镁橄榄石,而单辉橄榄岩中橄榄石成分 Fd(%)要低不

表 1 隆务峡蛇绿岩橄榄石化学成分
Table 1 Chemical composition of olivine in Longwuxia Gorge ophiolite

岩性	样品号	SiO ₂	TiO ₂	Al ₂ O ₃	Cr ₂ O ₃	FeO*	MnO	MgO	CaO	Na ₂ O	K ₂ O	Total	Fo
纯橄岩	D2032-2-3-1	40.91	0.01	0.00	0.01	9.51	0.13	48.77	0.02	0.01	0.01	99.38	90.2
	D2032-2-3-2	40.96	0.00	0.01	0.00	9.49	0.14	49.85	0.01	0.03	0.01	100.50	90.4
	D2032-2-3-3	40.85	0.01	0.02	0.00	9.52	0.12	49.23	0.02	0.01	0.01	99.79	90.3
单辉橄榄岩	Pm45-35-1-1	37.42	0.02		0.01	25.14	0.37	37.17	0.08	0.05	0.01	100.27	72.7
	Pm45-35-1-2	37.89	0.01	0.01	0.00	24.53	0.31	37.15	0.08	0.07	0.02	100.08	73.2
	Pm45-35-1-3	37.53	0.00		0.01	24.28	0.34	37.52	0.06	0.04	0.01	99.78	73.6
	Pm45-35-1-4	37.43	0.00			27.90	0.46	35.76	0.06		0.00	101.62	69.8
	Pm45-35-1-5	37.79	0.01		0.06	27.16	0.41	36.57	0.07		0.01	102.07	70.8
	Pm45-35-2-1	38.01	0.01	0.03		21.71	0.32	39.09	0.08	0.03	0.02	99.28	76.4
	Pm45-35-2-2	37.73	0.06			23.45	0.31	38.69	0.07	0.01	0.02	100.34	74.8
	Pm45-35-2-3	37.85	0.00	0.01		23.81	0.35	38.33	0.04	0.08	0.00	100.47	74.3
	Pm45-35-2-4	38.24			0.02	23.68	0.39	38.01	0.02		0.02	100.37	74.3
	Pm45-35-2-5	38.50	0.04		0.01	24.04	0.34	37.27	0.08	0.13	0.03	100.43	73.6
橄榄辉石岩	Pm80-62-1-1	37.26	0.03		0.02	25.63	0.36	36.70	0.06		0.00	100.05	72.0
	Pm80-62-1-2	37.12				25.60	0.37	36.77	0.04	0.04	0.00	99.93	72.1
	Pm80-62-1-3	36.90	0.02	0.01	0.02	25.29	0.40	36.11	0.08	0.05	0.03	98.90	72.0
	Pm80-62-1-4	37.25	0.03			25.20	0.34	36.59	0.05	0.01	0.01	99.49	72.3
	Pm80-62-1-5	38.18	0.01	0.01	0.02	26.19	0.37	35.73	0.05		0.01	100.57	71.1
含橄榄石辉长岩	Pm80-61-1-1	38.02	0.05	0.01		25.45	0.40	36.36	0.03	0.02	0.02	100.35	72.0
	Pm80-61-1-2	37.35	0.02			24.96	0.32	36.71	0.04	0.03	0.03	99.45	72.6
	Pm80-64-1-1	36.61	0.02		0.05	25.65	0.33	37.31		0.06		100.02	72.4
	Pm80-64-2-1	37.67	0.01			24.90	0.37	37.47	0.05	0.04	0.03	100.54	73.0
	Pm80-64-2-2	37.10	0.06			25.13	0.38	37.80	0.01	0.01	0.01	100.49	73.0

FeO* : 以 FeO 表示的全铁含量。

表 2 隆务峡蛇绿岩单斜辉石化学成分

Table 2 Chemical composition of clinopyroxenes in Longwuxia Gorge ophiolite

$w_B/\%$

岩性	样品号	SiO ₂	TiO ₂	Al ₂ O ₃	Cr ₂ O ₃	FeO*	MnO	MgO	CaO	Na ₂ O	K ₂ O	Total	Mg [#]
单辉橄榄岩	Pm45-35-1-1	52.26	0.50	2.50	0.63	5.40	0.19	16.62	20.71	0.30		99.10	0.85
	Pm45-35-1-2	52.90	0.26	1.95	0.34	5.06	0.13	16.09	20.86	0.36	0.08	98.03	0.85
	Pm45-35-1-3	51.08	0.80	2.89	0.66	6.33	0.18	15.65	21.26	0.25		99.12	0.82
	Pm45-35-1-4	51.57	0.54	2.93	0.57	6.67	0.22	15.62	21.61	0.28		100.01	0.81
	Pm45-35-1-5	51.91	0.62	2.11	0.58	6.77	0.16	15.07	20.72	0.24	0.01	98.20	0.80
	Pm45-35-2-1	53.05	0.23	2.19	0.61	4.70	0.20	16.65	21.10	0.36	0.01	99.09	0.86
	Pm45-35-2-2	51.93	0.58	2.86	0.66	5.10	0.20	16.77	19.89	0.38	0.03	98.40	0.86
	Pm45-35-2-3	51.94	0.41	1.96	0.60	5.54	0.19	15.24	22.24	0.18	0.01	98.30	0.83
	Pm45-35-2-4	51.53	0.40	2.42	0.57	6.10	0.18	15.90	21.04	0.28		98.43	0.82
橄榄辉石岩	Pm80-62-1-1	51.38	0.68	3.01	0.48	5.95	0.23	15.65	20.56	0.48	0.11	98.52	0.83
	Pm80-62-1-2	50.63	0.98	2.83	0.57	7.15	0.24	15.62	20.59	0.37	0.02	98.99	0.80
	Pm80-62-1-3	51.12	0.56	2.60	0.46	6.72	0.19	15.79	20.39	0.34	0.00	98.16	0.81
含橄榄石辉长岩	Pm80-61-1-1	51.04	0.69	3.39	0.67	8.02	0.22	15.52	19.51	0.53	0.18	99.76	0.78
	Pm80-61-1-2	50.70	0.87	2.89	0.48	6.70	0.21	15.02	21.24	0.35	0.03	98.48	0.80
	Pm80-64-1-1	52.75	0.71	2.38	0.29	7.73	0.17	17.64	18.08	0.47	0.06	100.28	0.80
	Pm80-64-1-2	51.45	0.76	3.20	0.62	5.82	0.16	15.92	20.45	0.45	0.03	98.87	0.83
	Pm80-64-2-1	52.12	0.45	2.35	0.38	6.67	0.22	15.11	20.55	0.32		98.16	0.80
辉长岩 辉绿岩	Pm80-54-1-1	51.39	0.53	1.72	0.09	11.45	0.18	13.93	19.97	0.31	0.05	99.61	0.69
	Pm80-55-1-2	51.51	0.56	1.95	0.45	10.62	0.26	13.70	20.77	0.38	0.03	100.23	0.70
	Pm80-56-1-1	51.96	0.48	1.50	0.02	10.38	0.25	13.78	21.45	0.30	0.03	100.15	0.70
	Pm80-57-1-1	50.52	0.60	2.86	0.33	9.68	0.23	14.62	18.62	0.39	0.28	98.12	0.73
	Pm80-60-1-1	52.06	0.62	2.07	0.39	7.28	0.21	15.80	20.99	0.37	0.01	99.81	0.80
	Pm80-65-2-2	55.37	0.19	2.25	0.51	7.16	0.25	21.69	10.42	0.57	0.01	98.41	0.84
	Pm80-65-3-1	51.60	0.67	2.71	0.58	7.62	0.26	15.28	21.01	0.37	0.01	100.10	0.78
	Pm80-69-1-1	52.18	0.58	2.88	0.53	8.43	0.21	15.99	18.26	0.53	0.01	99.60	0.77
	Pm80-69-2-1	52.05	0.57	2.21	0.50	6.95	0.17	16.34	20.78	0.30	0.01	99.88	0.81
	Pm80-70-1-3	52.56	0.52	2.15	0.38	6.47	0.21	16.21	20.70	0.28		99.48	0.82
	Pm80-71-1-1	52.23	0.52	2.41	0.63	6.86	0.20	16.11	20.89	0.35		100.19	0.81
	Pm80-68-1-1	51.78	0.40	2.01	0.63	8.43	0.21	17.36	18.26	0.29	0.02	99.38	0.79
	Pm80-70-2-1	52.47	0.52	2.50	0.52	6.73	0.20	16.20	21.14	0.37	0.02	100.67	0.81
	Pm80-53-1-2	52.35	0.37	1.96	0.43	6.50	0.17	15.75	21.74	0.37	0.01	99.64	0.81
	Pm80-66-1-1	51.87	0.49	2.06	0.49	8.04	0.20	15.01	21.20	0.33	0.01	99.71	0.77
	Pm80-58-1-2	55.24	0.32	1.68	0.19	13.60	0.22	19.60	8.35	0.20	0.04	99.44	0.72
	Pm80-59-1-1	51.40	0.45	1.75	0.34	10.09	0.25	14.24	21.04	0.37		99.93	0.72

FeO* : 以 FeO 表示的全铁含量 ; Mg[#] = Mg/Mg + Fe。

少,但多在 70 以上,为贵橄榄石。辉石多为单斜辉石且投点多在透辉石及普通辉石区(图 3),同时部分辉石含 Ti 较高,在偏光镜下显示出钛普通辉石特征的淡紫褐-淡黄褐的多色性;偶有的斜长石计算牌号高达 80。橄榄辉石岩中橄榄石 Fc(%)含量相对降低,为 71~72,仍为贵橄榄石并向透铁橄榄石靠近;单斜辉石成分与单辉橄榄岩类似,多为透辉石和普通辉石(图 3);镁铁岩类(含橄榄石辉长岩、辉长岩和辉绿岩)含橄榄石辉长岩中橄榄石成分 Fc(%)为 71~72,其斜长石牌号在 70 以上,为倍长石;单斜辉石则投点在普通辉石区,少量在透辉石、易变辉石区(图 3),结合镜下特征可判断易剥辉石的存在(透辉石和普通辉石的变种,具细密的裂理);斜长石牌号范围为 45~70,多在 60 上下,为拉长石。

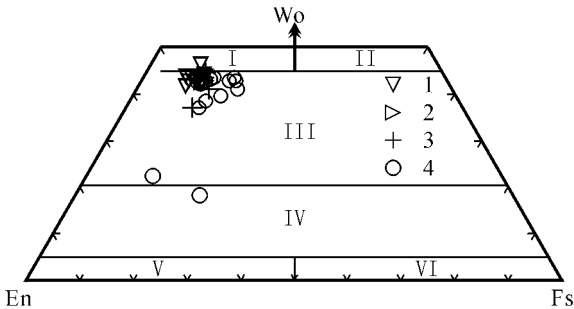


图 3 隆务峡蛇绿岩辉石的 Wo-En-Fs 图解

Fig. 3 Wo-En-Fs diagram for pyroxene classification of Longwuxia Gorge ophiolite

I—透辉石; II—钙铁辉石; III—普通辉石; IV—易变辉石;
V—斜顽辉石; VI—斜铁辉石; 1—单辉橄榄岩; 2—橄榄辉石岩;
3—含橄榄石辉长岩; 4—辉长岩、辉绿岩

I—diopside; II—hedenbergite; III—augite; IV—pigeonite; V—clinoenstatite; VI—clinoferrosillite; 1—clinopyroxene peridotite; 2—olivine pyroxenite; 3—olive-bearing gabbros; 4—gabbros and diabase

表 3 隆务峡蛇绿岩斜长石化学成分

Table 3 Chemical composition of plagioclase in Longwuxia Gorge ophiolite

$w_B/\%$

岩性	样品号	SiO ₂	TiO ₂	Al ₂ O ₃	Cr ₂ O ₃	FeO*	MnO	MgO	CaO	Na ₂ O	K ₂ O	Total	An
单辉 橄榄岩	Pm45-35-1-1	48.02	0.06	32.88		0.22	0.02		15.97	2.25	0.02	99.43	80
	Pm45-35-2-1	47.79	0.05	31.87	0.03	0.26	0.01	0.25	15.67	2.19	0.12	98.24	80
	Pm45-35-2-2	47.72	0.07	32.55		0.14	0.02	0.01	15.56	2.38	0.06	98.50	78
含橄榄 石辉长 岩	Pm80-61-1-1	47.73	0.01	32.99		0.17		0.02	15.83	2.55	0.08	99.38	77
	Pm80-64-1-1	47.50	0.02	33.00		0.21	0.00		15.86	2.52	0.13	99.23	78
	Pm80-64-2-1	48.67	0.06	32.85	0.01	0.22	0.00	0.00	15.81	2.47	0.07	100.17	78
	Pm80-64-2-2	48.07	0.02	32.65		0.23	0.01	0.03	15.87	2.26	0.13	99.25	80
辉长岩 辉绿岩	Pm80-54-1-1	55.64	0.04	27.91		0.20	0.02	0.06	10.37	4.68	0.22	99.14	55
	Pm80-54-1-2	52.91	0.12	28.77	0.00	0.22	0.00	0.00	11.68	4.60	0.38	98.69	58
	Pm80-54-2-1	55.54	0.06	27.71	0.01	0.15	0.01	0.02	10.66	4.89	0.30	99.36	55
	Pm80-54-2-2	53.46	0.06	28.95	0.01	0.21	0.01		11.98	4.71	0.20	99.58	58
	Pm80-55-1-1	54.17	0.01	29.15		0.20	0.01	0.01	11.96	4.52	0.19	100.21	59
	Pm80-55-1-2	56.62	0.06	27.32		0.09		0.02	9.87	5.71	0.21	99.89	49
	Pm80-56-1-1	53.34	0.03	28.43		0.26		0.03	11.20	4.94	0.28	98.50	56
	Pm80-56-1-2	55.83	0.07	27.71	0.02	0.20		0.02	9.60	5.98	0.43	99.87	47
	Pm80-57-1-1	54.53	0.08	28.27	0.01	0.31		0.02	11.78	3.22	0.47	98.69	67
	Pm80-57-1-2	52.77	0.03	28.97		0.28	0.02	0.01	12.00	4.55	0.22	98.84	59
	Pm80-57-2-2	53.23	0.03	29.62	0.02	0.17	0.01	0.02	12.35	4.56	0.28	100.28	60
	Pm80-60-1-1	52.30	0.09	30.60		0.24	0.02	0.77	12.04	3.85	0.27	100.19	63
	Pm80-60-1-2	51.07	0.03	30.16		0.13	0.01	0.00	13.34	3.79	0.26	98.79	66
	Pm80-65-2-1	52.97	0.05	29.98	0.01	0.11		0.02	13.06	4.08	0.17	100.45	64
	Pm80-65-2-2	50.78	0.07	30.68		0.18	0.00	0.01	13.85	3.12	0.25	98.94	71
	Pm80-65-3-1	52.69	0.05	29.50	0.02	0.24		0.04	12.66	4.14	0.32	99.64	63
	Pm80-65-3-2	53.30	0.09	29.52		0.19	0.01	0.02	12.50	4.49	0.09	100.22	61
	Pm80-69-1-1	48.14	0.07	32.44	0.04	0.20	0.01	0.03	15.98	2.23	0.04	99.19	80
	Pm80-69-2-1	53.71	0.04	28.91	0.00	0.27	0.02	0.02	11.45	4.51	0.28	99.20	58
	Pm80-69-2-2	53.45	0.06	29.02	0.02	0.22	0.02	0.01	12.06	4.53	0.28	99.66	60
	Pm80-69-2-3	56.11	0.06	27.81	0.05	0.27	0.03	0.04	9.81	5.31	0.37	99.86	51
	Pm80-69-2-4	53.77	0.05	29.36	0.00	0.23			12.26	4.34	0.19	100.18	61
	Pm80-70-1-1	52.01	0.02	29.45	0.03	0.22		0.03	12.00	4.50	0.25	98.50	60
	Pm80-70-1-2	51.43	0.07	30.12	0.02	0.21	0.01	0.04	12.83	3.80	0.26	98.80	65
	Pm80-71-1-1	52.00	0.08	30.58		0.21	0.02	0.01	13.27	3.91	0.18	100.22	65
	Pm80-71-1-2	53.13	0.08	29.11	0.01	0.18		0.03	11.59	4.72	0.22	99.07	58
	Pm80-71-2-1	52.41	0.05	29.09		0.20	0.00	0.05	11.73	4.35	0.23	98.12	60
	Pm80-71-2-2	53.75	0.09	28.53	0.02	0.32		0.02	11.63	4.64	0.31	99.31	58
	Pm80-66-1-1	56.08	0.07	27.12		0.22		0.01	9.84	5.72	0.31	99.37	49
	Pm80-66-1-2	53.04	0.08	29.08	0.06	0.32		0.02	11.43	4.34	0.32	98.68	59
	Pm80-68-1-1	52.43	0.05	29.64		0.24	0.00	0.00	12.05	4.16	0.22	98.77	62
	Pm80-70-2-1	54.15	0.07	27.60		0.21	0.02	0.04	10.40	5.40	0.38	98.26	52
	Pm80-53-1-1	54.41	0.05	28.37	0.01	0.20		0.03	10.48	4.52	0.14	98.20	56
	Pm80-58-1-1	52.78	0.01	29.07	0.01	0.25			12.26	4.38	0.27	99.03	61
	Pm80-58-1-2	55.85	0.05	27.49		0.24		0.02	10.30	5.78	0.18	99.91	50
	Pm80-59-1-1	53.92	0.03	28.59		0.32		0.06	11.73	4.89	0.32	99.86	57
	Pm80-59-1-2	52.92	0.04	29.24	0.02	0.31	0.01	0.02	12.40	4.47	0.21	99.62	61

FeO*：以 FeO 表示的全铁含量。

3.2.2 主量、稀土元素地球化学特征

隆务峡蛇绿岩部分主量和稀土元素数据见张克信等(2007) ,新增样品分析数据见表 4。

从蛇绿岩的 Harker 图解(图 4)中可以看到 ,随着 MgO 含量的增加 ,SiO₂、TiO₂、Al₂O₃、Na₂O、K₂O 和 P₂O₅ 含量减少 ,而 Fe₂O₃、MnO 与 FeO 含量则显示出一定的增加趋势 ,反映了岩石成分在超镁铁端员的长石矿物减少 ,镁铁质矿物增加 ;镁铁岩类中 Al₂O₃ 含量具有一定稳定性 ,反映了岩石中长石含量的一致性 ,这与薄片观察是一致的。CaO 含量的折线趋势反映了在岩石结晶作用过程中出现新的矿物相 ,具体来说当 MgO 含量低于 10 % 时 ,CaO 和 MgO 呈正相关 ,表明斜长石和单斜辉石同时从液相中结晶沉淀而移出 ;当 MgO 含量高于 10 % 时 ,CaO 和 MgO 呈负相关 ,因为这部分变化趋势受到橄榄石控制。

据 Irvine 和 Baragar(1971)的碱度判别及 Miyashiro(1974)的钙碱性-拉斑质判别图解(图 5)可以看到该套岩石多属于亚碱性系列 ,钙碱性成分明显 ,部分呈拉斑质-钙碱性过渡成分的特点 ;另有一些镁铁质岩石拉斑质成分非常明显 ,结合镁铁质岩石的普遍高钾含量(0.4 % ,图 4)表示该种具拉斑系列性质的镁铁岩不大可能是深海性拉斑质(Abyssal tholeiites)岩石系列 ,而与岛弧拉斑系列类似(Miyashiro , 1974)。

该区蛇绿岩成分在 Coleman(1977)的 Al₂O₃ - CaO - MgO 图解中投点在变质橄榄岩、超镁铁质堆晶岩和镁铁质堆晶岩(图 6)成分范围 ,从图中可以看到此蛇绿岩超镁铁-镁铁岩应多由堆晶作用产生 ,其演化趋势线(也可从 Harker 图解得到验证)明显指示随着橄榄石和辉石矿物的晶出 ,岩石中的长石含量逐渐增加 ,而在变质橄榄岩范围的样品则反映

表 4 隆务峡蛇绿岩主量($w_B/\%$)及稀土 $w_B/10^{-6}$)元素(部分)分析结果
Table 4 Major elements($w_B/\%$) and REE($w_B/10^{-6}$) analyses of Longwuxia Gorge ophiolite

岩性	纯橄岩		单辉橄岩	橄辉石岩	含橄辉石辉长岩		辉绿岩
样品号	D2032-2-1	D2032-2-3	D2032-3-1	D2032-3-2	D2032-2-2	D2032-3-4	D2032-3-3
SiO ₂	36.05	36.19	38.93	43.18	44.00	44.86	49.66
TiO ₂	0.34	0.32	0.29	0.21	0.30	0.24	1.29
Al ₂ O ₃	1.15	1.20	2.46	13.63	11.40	15.40	16.72
Fe ₂ O ₃	17.96	11.25	14.99	1.28	5.88	3.19	2.93
FeO	6.93	8.86	6.84	7.45	4.77	6.02	6.28
MnO	0.30	0.23	0.28	0.16	0.15	0.14	0.14
MgO	32.34	30.35	29.64	16.49	14.88	12.79	7.70
CaO	1.43	2.39	3.34	8.75	11.17	11.80	8.99
Na ₂ O	0.02	0.03	0.15	0.74	0.70	1.15	3.61
K ₂ O	0.10	0.11	0.63	2.24	0.50	0.60	0.88
P ₂ O ₅	0.02	0.03	0.04	0.01	0.02	0.01	0.22
L. O. I.	2.57	8.17	1.84	5.49	5.79	3.42	1.19
Total	99.21	99.13	99.43	99.63	99.56	99.62	99.61
La	1.36	1.95	3.42	1.42	1.79	1.41	13.59
Ce	3.06	4.74	7.17	3.33	4.15	3.11	30.57
Pr	0.39	0.66	0.89	0.50	0.62	0.45	4.10
Nd	1.68	3.11	3.71	2.48	3.25	2.35	18.50
Sm	0.47	0.83	0.90	0.74	1.02	0.72	4.68
Eu	0.13	0.18	0.22	0.42	0.47	0.50	1.22
Gd	0.49	0.97	0.95	0.95	1.25	0.87	4.91
Tb	0.08	0.15	0.15	0.17	0.21	0.15	0.81
Dy	0.53	0.99	0.98	1.05	1.34	0.94	5.07
Ho	0.11	0.21	0.21	0.22	0.28	0.20	1.06
Er	0.34	0.54	0.55	0.60	0.75	0.52	2.81
Tm	0.06	0.09	0.09	0.09	0.11	0.08	0.43
Yb	0.46	0.55	0.60	0.59	0.64	0.47	2.90
Lu	0.09	0.09	0.10	0.09	0.10	0.07	0.41
ΣREE	9.26	15.05	19.94	12.64	15.98	11.83	91.05

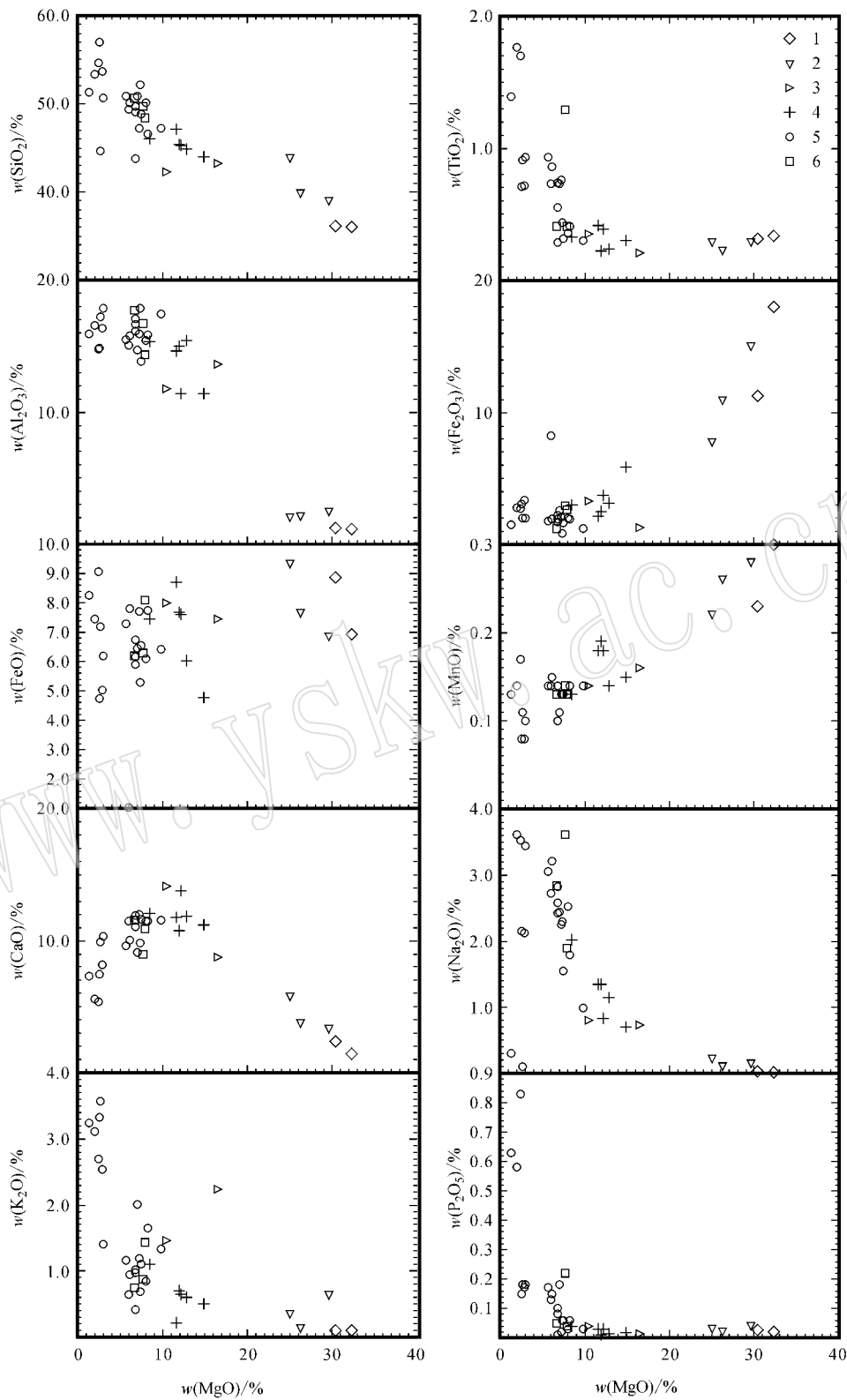


图 4 隆务峡蛇绿岩 Harker 图解

Fig. 4 Harker plot of Longwuxia Gorge ophiolite

1—纯橄岩；2—单辉橄榄岩；3—橄榄辉石岩；4—含橄榄石辉长岩；5—辉长岩；6—辉绿岩

1—dunite；2—clinopyroxene peridotite；3—olivine pyroxenite；4—olivine-bearing gabbros；5—gabbro；6—diabase

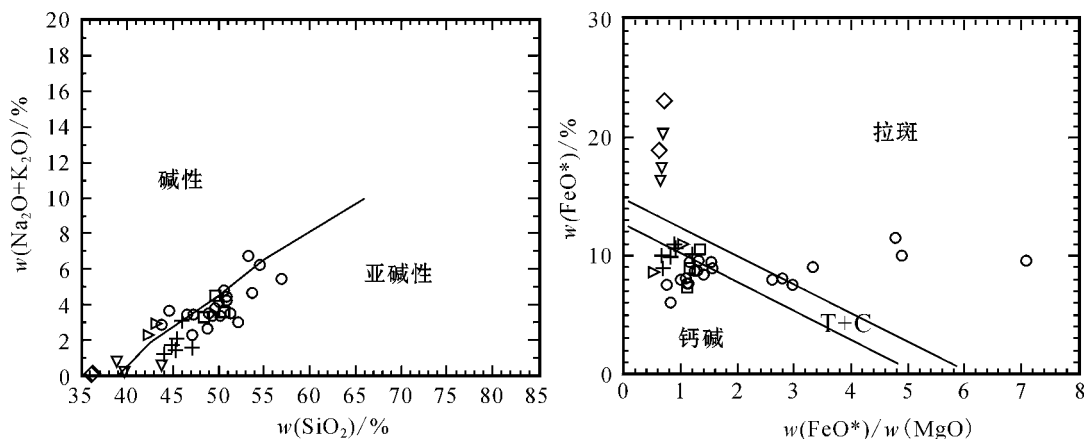


图 5 隆务峡蛇绿岩碱度(据 Irvine, 1971)及系列(据 Miyashiro, 1974)判别图解(图例如图 4)

Fig. 5 $\text{Na}_2\text{O} + \text{K}_2\text{O} - \text{SiO}_2$ diagram (from Irvine, 1977) and Rock series (from Miyashiro, 1974) of Longwuxia Gorge ophiolite (Symbols as for Fig. 4)

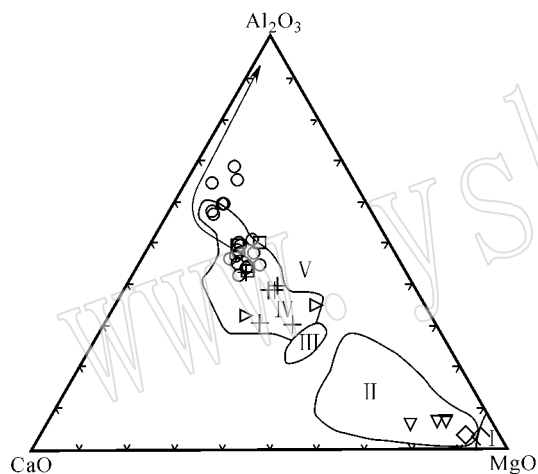


图 6 隆务峡蛇绿岩 $\text{Al}_2\text{O}_3 - \text{CaO} - \text{MgO}$ 图解
(据 Coleman, 1977)

Fig. 6 $\text{Al}_2\text{O}_3 - \text{CaO} - \text{Mg}$ diagram of Longwuxia Gorge ophiolite (from Coleman, 1977)

I—变质橄榄岩(或地幔橄榄岩); II—超镁铁质堆晶岩; III—科马提岩; IV—镁铁质堆晶岩; V—大洋中脊玄武岩平均成分(MAR); 箭头线表示 Skaergaard 液体趋势线, 图例同图 4

I—meta-peridotite (mantle sequences); II—ultramafic cumulate sequences; III—komatiite; IV—mafic cumulate sequences; V—mean mid-ocean ridge basalt (MAR); arrow-line shows trend of Skaergaard liquid; symbols as for Fig. 4

了研究区蛇绿岩地幔层序部分。

在稀土元素配分图(图 7)可以看出该蛇绿岩均显示出轻稀土元素略富集、重稀土元素平坦的特征, 另外纯橄岩还表现出一定的轻稀土元素略富集至 V 型过渡的配分型。其中地幔橄榄岩稀土元素总量最低, 其 ΣREE 小于 15×10^{-6} , 而超镁铁堆晶单元(单辉橄榄岩、橄榄辉石岩) $\Sigma\text{REE} = 18.96 \times 10^{-6} \sim$

35.15×10^{-6} , 平均 31.66×10^{-6} [数据见张克信等 (2007) 及本文表 4], 总体轻稀土元素略富集的特征与现代大洋地幔橄榄岩的特征截然不同, 原因可利用 Melcher 等 (2002) 的研究成果解释: 底劈上升的地幔单元经过石榴石稳定区, 由于石榴石具有富集重稀土元素的属性, 所以石榴石从底劈地幔单元熔体的首先晶出可导致熔融残留相相对富集轻稀土元素。纯橄岩及单辉橄榄岩具 Eu 的负异常, 而辉石岩类及含橄榄石辉长岩具 Eu 的正异常, 这与橄榄石的首先晶出导致未结晶液相富 Eu 有关。镁铁质单元(辉长岩、辉绿岩等)稀土元素总量范围较广, 总体较之超镁铁单元含量要高出不少, 同时该类岩石中 Eu 既有正异常又有负异常, 这可能与结晶过程中斜长石和单斜辉石比例有关。一般来说, 在玄武质岩石中, 单斜辉石是相对亏损 Eu 的, 且稀土元素在其中的分配系数整体高于斜长石, 只不过斜长石相对富集 Eu (Schnetzler and Philpotts, 1970)。

3.2.3 微量元素地球化学特征

研究区蛇绿岩微量元素分析结果见表 5。其微量元素含量总体趋势是从超镁铁质岩(纯橄岩、单辉橄榄岩、橄榄辉石岩)到镁铁质岩(辉长岩类、辉绿岩)逐渐增加, 且相对富集大离子亲石元素 Ba 、 Rb 、 K (特别是 Rb 和 K 在蛛网图中表现出明显的峰值), 而亏损 Nb 、 P (图 8); 蛛网图中明显的 Nb 与 P 谷指示地壳物质可能参与了岩浆过程, 因为负的 Nb 、 P 异常通常是大陆地壳的特征。微量元素 Sr 表现出一定的特殊性, 橄岩类 Sr 为负异常, 辉石岩类正异常, 而镁铁质的岩石正负异常均有, 该特点可从

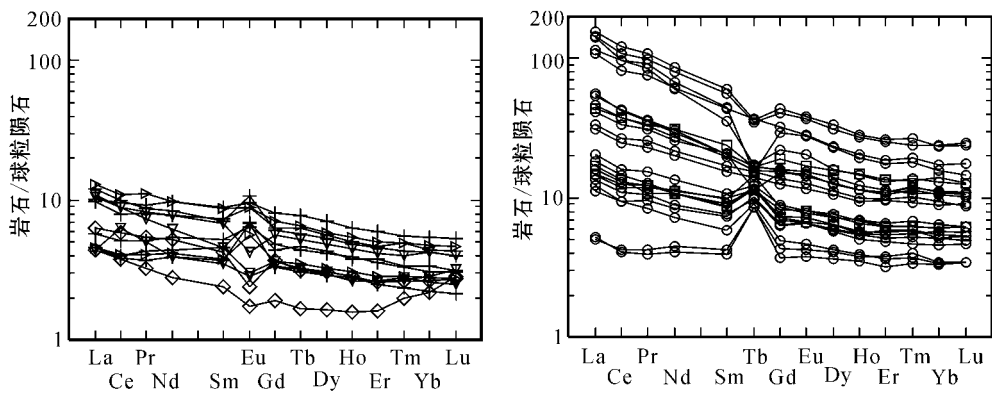


图 7 隆务峡蛇绿岩稀土元素配分图(球粒陨石标准化值据 Boynton,1984 图例同图 4)

Fig. 7 Chondrite-normalized rare earth element patterns of Longwuxia Gorge ophiolite(Chondrite normalization values from Boyton , 1984 ; symbols as for Fig. 4)

表 5 隆务峡蛇绿岩微量元素分析结果 $w_B/10^{-6}$

Table 5 Trace element analyses of Longwuxia Gorge ophiolite

岩性	编号	Ba	Rb	Th	Nb	Ta	Sr	Zr	Hf	Y	Cr	Ni	Co	V	Cu	Pb	Zn
纯橄 岩	D2032-2-1 *	13.2	2.52	0.46	0.54	0.06	10.7	12.6	0.33	3.25	3118	935	178	184	3.04	1.05	195
	D2032-2-3 *	9.25	3.12	0.55	0.81	0.07	11.5	19.2	0.60	5.52	4 368	834	142	210	6.16	0.80	144
单辉 橄榄岩	D2032-3-1 *	38.4	21.1	1.00	0.95	0.10	14.5	24.1	0.67	5.44	1 463	766	151	130	38.2	0.91	133
	Pm45-35-1	64.3	9.6	0.43	0.43	0.05	29.4	14.6	0.5	5.24	29.4	751	109	141	11.4	3	124
	Pm45-35-2	85.1	17.6	0.98	0.96	0.09	41.3	27.1	1	8.2	41.3	742	110	155	13.1	4	127
橄榄辉 石岩	D2032-3-2 *	65.3	110	0.11	0.22	0.03	126	7.33	0.30	5.86	727	320	61.7	105	7.56	1.52	67.4
	Pm80-62-1	177	85.6	0.86	1.3	0.25	151	35.4	1.1	13.3	1202	296	60.8	193	136	7.3	77.2
含橄榄 石辉长岩	D2032-2-2	74.1	21.2	0.28	0.30	0.04	243	13.0	0.46	7.28	1 053	572	102	130	7.26	3.31	87.9
	D2032-3-4 *	56.1	18.9	0.08	0.10	0.02	307	6.45	0.29	5.13	777	320	79.6	111	41.6	3.09	74.6
	Pm45-30-1	120	10.6	1.14	0.92	0.11	238	20.4	1.2	11.6	687	251	54.7	123	79.7	5	100
	Pm80-61-1	156	59.8	0.58	1	0.24	232	29	1	8.94	484	201	44.9	140	33.5	5.5	64.6
	Pm80-64-1	97	40.8	0.72	0.6	0.2	185	29.8	1	10.6	1230	309	65.3	205	23	3.8	76.2
	Pm80-64-2	81.9	46	0.26	0.39	0.19	211	14.8	0.6	6.72	808	242	48.4	126	7	37.4	72.3
	Pm45-34-1	134	31.3	2.12	2.53	0.21	259	43.9	1.6	10.9	429	104	29.5	130	24.3	7.8	60.2
	Pm45-36-1	180	70.6	1.06	1.08	0.12	311	20.8	0.9	6.7	311	181	42.5	143	10.2	5.7	64.5
	Pm80-54-1	565	95.7	9.5	20	1.6	217	296	8.1	50.5	10.5	15.1	28	127	266	32.5	125
	Pm80-54-2	922	110	6.7	22.8	1.6	352	210	6.5	34.7	13.7	17.1	25	140	225	24.1	104
辉长岩	Pm80-55-1	416	101	4.4	5.3	0.47	248	101	2.9	20.3	372	92.3	26.5	156	52.6	7.8	54.3
	Pm80-56-1	113	63.2	0.93	1.7	0.24	217	32.1	1.1	8.86	369	140	36.5	131	27.4	5.1	53.5
	Pm80-57-1	211	52.2	1.4	2.3	0.33	314	36.2	1.1	12	352	105	29.4	152	36	6.2	58.6
	Pm80-57-2	280	86.4	1.2	1.4	0.26	299	40.1	1.3	9.71	452	159	41.8	136	62.8	7.5	65.3
	Pm80-60-1	238	41.8	0.93	0.9	0.23	358	32.5	1.1	9.01	363	128	29.6	146	15.2	1.4	50.2
	Pm80-65-2	140	53.9	0.71	0.38	0.17	394	13	0.7	5.49	308	97.2	26.8	148	21.6	3.6	50.6
	Pm80-65-3	122	73.5	0.16	0.3	0.19	328	14.2	0.7	6.13	308	93.4	36.7	273	36.3	8.1	51.6
	Pm80-69-1	280	40.1	1.1	4.2	0.46	366	47	1.9	17.8	257	76.1	34.5	170	101	11.6	71.9
	Pm80-69-2	307	58.2	5.2	7.6	0.68	285	130	3	20.1	70.5	21.7	27.4	162	41.9	19.2	91.3
	Pm80-70-1	196	166	5.1	7.1	0.65	239	142	3	19.5	63.4	20.3	24.2	154	41.6	12.4	73.8
	Pm80-71-1	484	112	13.7	11.8	1.1	599	154	5.4	23.9	85.3	30.4	35.4	121	7 955	15.1	173
	Pm80-71-2	538	131	15.2	12.5	1.4	573	136	5	31.9	63.2	30.9	42.5	105	8 003	21.5	163
	Pm80-66-1	127	22.6	0.49	1.3	0.27	291	21.1	1	11.9	327	93.3	36.2	177	12.3	3.5	68.8
	Pm80-68-1	183	29	1.8	3.8	0.42	291	47	1.7	16.7	234	73	30.7	159	20.3	8.3	55
	Pm80-70-2	273	51.6	3.4	6	0.57	299	115	2.8	20.3	232	66.1	31.9	178	114	14.7	78.9
	Pm80-53-1	260	151	9.5	22.3	1.6	131	390	8.4	46.5	11.4	11.7	19	91.2	179	23.5	127
辉绿岩	D2032-3-3 *	198	16.2	0.96	5.59	0.36	218	85.0	2.37	28.9	330	143	44.8	212	132	5.99	86.2
	Pm80-58-1	179	33.2	1.4	1.8	0.29	312	40.3	1.3	9.77	318	116	32.4	134	19.6	5.9	60.1
	Pm80-59-1	317	75.6	1.1	1.5	0.26	311	37.8	1.1	15.6	469	156	38.3	155	146	2.8	62.3

分析单位：* 号由中国地质大学(武汉)地质过程与矿产资源国家重点实验室测试 ,其他由湖北省地质实验研究中心完成。

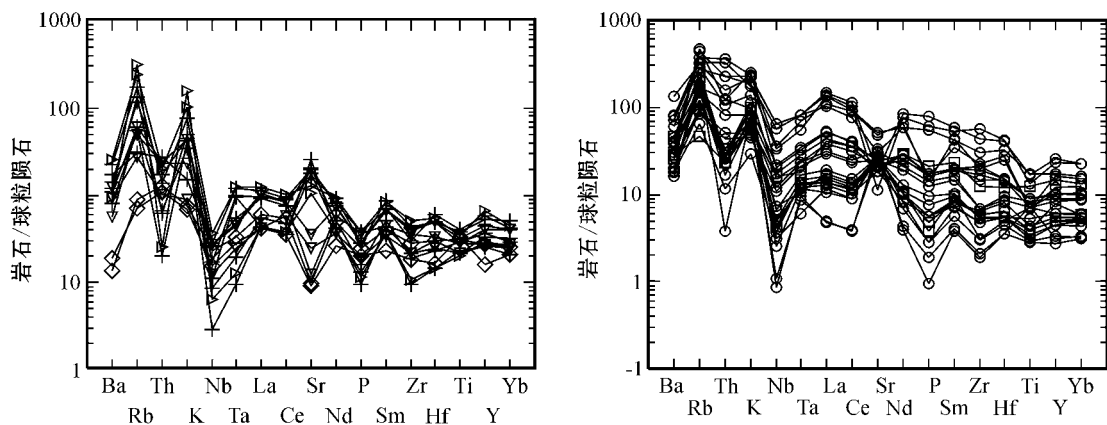


图 8 隆务峡蛇绿岩微量元素蛛网图(球粒陨石标准化值据 Thompson, 1982, 图例同图 4)

Fig. 8 Chondrite-normalized trace element patterns of Longwuxia Gorge ophiolite (Chondrite normalization values from Thompson, 1982, Symbols as for Fig. 4)

以下几个方面解释: 正的 Sr 异常与相对富集 Sr 的斜长石参与了堆晶作用有关; 同时负的 Sr 异常则与 Sr 元素在流体中较强的活动性有相当大的关系, 薄片下镁铁质岩石明显的蚀变现象(如角闪石化、绿泥石化、帘石化等)可以证明此点假设。

4 蛇绿岩形成构造环境探析

单斜辉石的晶体化学和地球化学性质具有主要成分与岩浆成分相似, 出现频率高、较宽的结晶区间、矿物相对稳定、若遭蚀变容易识别等特点, 因此可以作为研究岩浆成因的良好标型矿物。大量研究表明单斜辉石的成分与地质构造背景存在一定的联系 (Nisbet and Pearce, 1977; Beccaluva, 1989; Hebert, 1989; Yamasaki *et al.*, 2006)。在本区缺乏火山岩(特别是在判别构造环境中具有较大优势的玄武岩)的情况下, 单斜辉石的研究将有利于该蛇绿岩的构造环境反演。

结合研究区镁铁质单元单斜辉石电子探针分析数据, 利用 Nisbet 和 Pearce (1977) $F_2 - F_1$ 判别图解(图 9)可以看到, 基性侵入岩中辉石成分投点多在火山弧玄武岩和洋底玄武岩的混合区, 说明形成环境为岛弧或洋底; 同时结合 Beccaluva 等(1989)的 $TiO_2 - SiO_2/100 - Na_2O$ 图解(图 10)可以看到虽然投点位于多个构造区交合处, 但是研究区蛇绿岩形成的背景与洋中脊拉张构造背景(MORB)联系不大, 却与挤压的岛弧环境(IAT)关系密切。

又考虑到微量元素特别是高场强元素在地质过

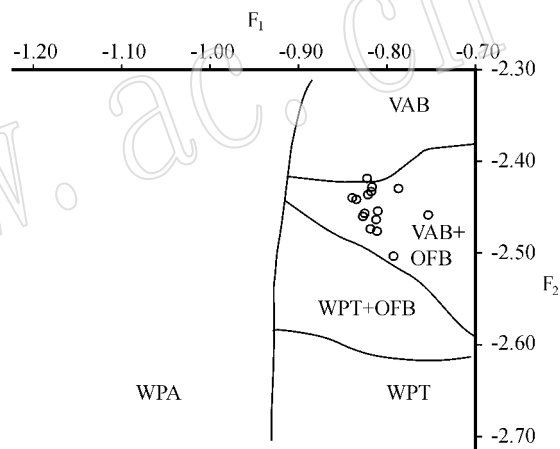


图 9 隆务峡蛇绿岩镁铁质单元单斜辉石探针数据 $F_2 - F_1$ 判别图解(据 Nisbet 和 Pearce, 1977)

Fig. 9 Plot of discriminant functions $F_2 - F_1$ (from Nisbet and Pearce, 1977) for mafic masses of Longwuxia Gorge ophiolite
VAB—火山弧玄武岩; OFB—洋底玄武岩; WPT—板内拉斑玄武岩; WPA—板内碱性玄武岩
VAB—volcanic-arc basalt; OFB—ocean-floor basalt; WPT—intraplate tholeiitic basalt; WPA—intraplate alkalic basalt

程中的相对不活动性, 此类元素的构造判别图或多或少能反映研究区岩石的形成环境的特征。据 Wood (1980) 的 Th-Hf-Ta 图解(图 11), 研究区蛇绿岩镁铁质岩石也多投点于火山弧玄武岩大区(VAB), 且 Hf/Th 比值均小于 3, 进一步属于火山弧玄武岩区的钙碱性玄武岩亚区。Miyashiro (1975) 的研究成果指出在成熟的岛弧环境(具薄的海洋型地壳)中多见拉斑质岩石, 而在成熟的岛弧环境(具厚的陆型地壳)多见拉斑质-钙碱性岩石, 即

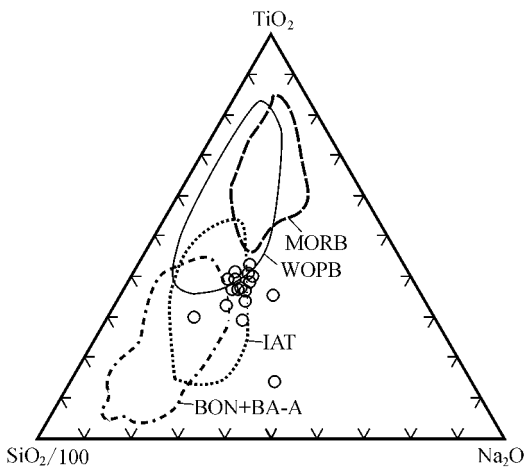


图 10 隆务峡蛇绿岩镁铁质单元单斜辉石探针数据的 $\text{TiO}_2 - \text{SiO}_2/100 - \text{Na}_2\text{O}$ 图解 (据 Beccaluva 等, 1989)

Fig. 10 $\text{TiO}_2 - \text{SiO}_2/100 - \text{Na}_2\text{O}$ diagram (from Beccaluva *et al.*, 1989) for mafic masses of Longwuxia Gorge ophiolite

MORB—洋中脊玄武岩; WOPB—大洋板内玄武岩; IAT—岛弧拉斑玄武岩; BON + BA-A—玻安岩 + 玄武安山岩-安山岩

MORB—mid-ocean ridge basalts; WOPB—intraoceanic plate basalt; IAT— island-arc tholeiite; BON + BA - A—boninite and basaltic andesite - andesite

于难熔矿物(金红石、锆石等)中的高场强元素(Nb、Zr、Ti、P 等)更多地留在源区残余固相中,而大离子亲石元素(K、Rb、Ba、LREE 等)则倾向富集于形成的岩浆和流体体系,因此俯冲带(或消减带中)组成的火山岩和侵入岩多显示 HFSE 相对于 LILE 亏损的特征。综合前述的分析可以判断研究区蛇绿岩应形成于高度成熟的岛弧环境(同时也不能排除在岩浆过程中或多或少混染了地壳物质)。

5 讨论及结论

结合地质和地球化学特征可以基本厘定研究区蛇绿岩的存在,然而本区蛇绿岩又体现出与典型剖面的不同:由于出露在造山带,强烈的构造作用可能导致了研究区蛇绿岩剖面顶界(具枕状构造玄武岩)的缺失,空间上体现出沿造山带区域构造线呈透镜状、似层状展布的特点,各单元多以断层为接触关系;地球化学特征特别是橄榄岩稀土元素的 LREE 略富集的配分型式与大洋橄榄岩的 LREE 亏损型相异,却与中国大多数蛇绿岩特别是造山带蛇绿岩地幔橄榄岩单元 LREE 富集特点相近(王希斌等,1995)。

研究区蛇绿岩组成大致为:具有变质组构的纯橄岩构成蛇绿岩层序地幔单元;单辉橄榄岩和橄榄辉石岩则构成蛇绿岩的超镁铁质堆晶单元;含橄榄石辉长岩、辉长岩构成镁铁质堆晶单元;出露较少的辉绿岩则构成蛇绿岩浅成的基性侵入岩单元。蛇绿岩形成的构造环境至少可从以下几个方面得到线索:① 镜下岩相研究可以看到岩浆结晶序列为橄榄石-单斜辉石(斜方辉石)-斜长石,这与 MORB 型蛇绿岩(结晶序列为 Ol-Pl-Cpx)相左,却与典型 SSZ (Supra-Subduction Zone,俯冲带上或消减带)型蛇绿岩吻合(据 Pearce 等,1984);② 矿物化学特别是对单斜辉石的研究可以判断该蛇绿岩形成环境与火山弧、岛弧密切相关;③ 应用蛇绿岩微量元素特别是高场强元素对构造环境判别的尝试发现其形成的构造环境多为挤压大背景;④ 轻稀土元素略富集的稀土元素配分型式表明其不大可能形成于洋中脊(正常 MORB 稀土元素配分曲线体现为重稀土元素略富集)。因此,研究区蛇绿岩类型应系 SSZ 型,形成构造环境为岛弧背景,是在挤压大背景下局部引张形成新洋壳,而其表现出的钙碱性特征和明显 Nb、P 负异常指示着岛弧成熟度较高且或多或少的陆壳物质可能参与了岩浆过程。

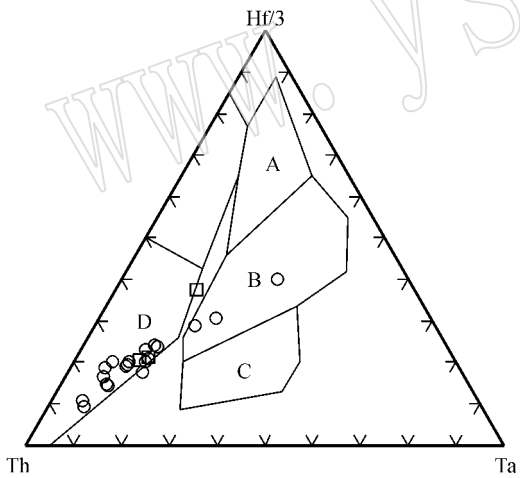


图 11 隆务峡蛇绿岩镁铁质单元 Th - Hf - Ta 判别图 (据 Wood, 1980)

Fig. 11 Th - Hf - Ta discrimination diagram for mafic masses of Longwuxia Gorge ophiolite (after Wood, 1980)

A—洋中脊玄武岩 (MORB); B—板内玄武岩 (WPB) + 洋中脊玄武岩 (MORB); C—板内玄武岩 (WPB); D—火山弧玄武岩 (VAB)

图例同图 4

A—mid-ocean ridge basalt (MORB); B—intraplate basalt (WPB) + mid-ocean ridge basalt (MORB); C—intraplate basalt (WPB); D—volcanic-arc basalt (VAB); symbols as for Fig. 4

随着岛弧的成熟度增高钙碱性物质也逐渐增加。且随俯冲洋壳下插加深、温度升高,洋壳板片会发生变质和脱水,导致富流体条件下的部分熔融,造成赋存

目前认为秦岭-祁连造山带是一个具有复杂洋陆演化历史的复合型造山带,该造山带是由一系列微板块与许多小洋盆组成的多岛小洋盆,具有软碰撞和多旋回的特点(殷鸿福等,1998)。研究区蛇绿岩的发现证实了板块间经历过开裂-缝合过程的事实,而构造环境的反演则还原了蛇绿岩产生的背景。为探讨研究区构造环境与秦岭-祁连造山带演化的关系,该区蛇绿岩的年代学研究仍在继续,其研究将会使秦岭-祁造山带耦合过程得到相应的补充。

致谢 野外工作得到张克信、寇晓虎等的支持;室内工作得到郑曙、王海涛等的帮助;文章撰写过程中,匿名审稿人提出了宝贵意见,在此一并表示感谢。

References

- Beccaluva L, Macciotta G, Piccardo G B, *et al.* 1989. Clinopyroxene composition of ophiolite basalts as petrogenetic indicator[J]. *Chemical Geology*, 77: 165~182.
- Boynton W V. 1984. Geochemistry of the rare earth elements: meteorite studies[A]. Henderson P. *Rare Earth Element Geochemistry*[C]. Amsterdam: Elsevier, 63~114.
- Coleman R G. 1977. Ophiolite, Ancient Oceanic Lithosphere? [M]. Berlin: Springer-Verlag: 1~140.
- Feng Yimin, Cao Xuanduo, Zhang Erpeng, *et al.* 2003. Tectonic evolution framework and nature of the West Qinling orogenic belt[J]. *Northwestern Geology*, 36(1): 1~10 (in Chinese with English abstract).
- Hebert R and Laurent R. 1989. Mineral chemistry of ultramafic and mafic plutonic rocks of the Appalachian ophiolites, Quebec, Canada [J]. *Chemical Geology*, 77: 265~286.
- Irvine T N and Baragar W R A. 1971. A Guide to the chemical classification of the common volcanic rocks[J]. *Canadian Journal of Earth Sciences*, 8: 523~548.
- Melcher F, Meisel T, Puhl J, *et al.* 2002. Petrogenesis and geotectonic setting of ultramafic rocks in the eastern Alps: constraints from geochemistry[J]. *Lithos*, 65: 69~112.
- Miyashiro A. 1974. Volcanic rock series in island arcs and active continental margin[J]. *American Journal of Science*, 274: 321~355.
- Miyashiro A. 1975. Classification, characteristics, and origin of ophiolites[J]. *Journal of Geology*, 83: 249~281.
- Nisbet E G and Pearce J A. 1977. Clinopyroxene composition in mafic lavas from different tectonic settings[J]. *Contribution Mineral Petrology*, 63: 149~160.
- Pearce J A, Lippard S J and Roberts S. 1984. Characteristics and tectonic significance of supra-subduction zone ophiolite[A]. *Geological Society, London, Special Publications*[C], 16: 77~94.
- Schnetzler C C and Philpotts J A. 1970. Partition coefficients of rare-earth elements between igneous matrix material and rock-forming mineral phenocrysts, II[J]. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 34: 331~340.
- Thompson R N. 1982. British Tertiary volcanic province[J]. *Scottish Journal of Geology*, 18: 59~107.
- Wang Xibin, Bao Peisheng and Rong He. 1995. Rare Earth Elements Geochemistry of the Mantle Peridotite in the Ophiolite Suites of China[J]. *Acta Petrologica Sinica*, 11(suppl.): 24~41 (in Chinese with English abstract).
- 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 and Planetary Science Letters*, 50: 11~30.
- Yamasakia T, Maeda J and Mizuta T. 2006. Geochemical evidence in clinopyroxenes from gabbroic sequence for two distinct magmatisms in the Oman ophiolite[J]. *Earth and Planetary Science Letters*, 251(1~2): 52~65.
- Yin Hongfu and Zhang Kexin. 1998. Evolution and characteristics of the central orogenic belt[J]. *Earth Science—Journal of China University of Geosciences*, 23(5): 438~442 (in Chinese with English abstract).
- Zhang Erpeng, Niu Daodun, Huo Youguang, *et al.* 1993. *Geologic-Tectonic features of Qinling-Dabashan Mountains and Adjacent Region*[M]. Beijing: Geological Publishing House, 1~12, 226~275 (in Chinese with English abstract).
- Zhang Kexin, Zhu Yunhai, Lin Qixiang, *et al.* 2007. Discovery of a mafic-ultramafic belt in the Rongwoxia area, Tongren, Qinghai, China[J]. *Geological Bulletin of China*, 26(6): 661~667 (in Chinese with English abstract).

附中文参考文献

- 冯益民, 曹宣铎, 张二朋, 等. 2002. 西秦岭造山带构造山过程及动力学[M]. 西安: 西安地图出版社, 1~35, 61~97.
- 冯益民, 曹宣铎, 张二朋, 等. 2003. 西秦岭造山带的演化、构造格局和性质[J]. *西北地质*, 36(1): 1~10.
- 高延林, 吴向农, 左国朝, 等. 1990. 关于中国南北板块界线的新认识——昆仑-秦岭缝合带[A]. 中国地质学会构造专业委员会. 国际大陆岩石圈构造演化与动力学讨论会第三届全国构造会议论文集(1)[C]. 北京: 地质出版社.
- 孙延贵, 郭安林, 马小红. 2005. 秦昆三向联结构造与构造过程[A]. 青海省地质学会. 青藏高原东北部地质研究——青海省地质学会成立四十周年文集[C]. 北京: 地质出版社, 11~17.
- 王希斌, 鲍佩生, 戎合. 1995. 中国蛇绿岩中变质橄榄岩的稀土元素地球化学[J]. *岩石学报*, 11(增刊): 24~41.
- 殷鸿福, 张克信. 1998. 中央造山带的演化及其特点[J]. *地球科学——中国地质大学学报*, 23(5): 438~442.
- 张二朋, 牛道韞, 霍有光, 等. 1993. 秦巴及邻区地质-构造特征概论[M]. 北京: 地质出版社, 1~12, 226~275.
- 张克信, 朱云海, 林启祥, 等. 2007. 青海同仁县隆务峡地区首次发现镁铁质-超镁铁质岩带[J]. *地质通报*, 26(6): 661~667.
- 张维吉, 孟宪陶, 胡健民, 等. 1994. 祁连-北秦岭造山带接合部位构造特征与造山过程[M]. 西安: 西北大学出版社, 161~171.