

西秦岭北缘关子镇蛇绿岩的形成时代:来自辉长岩中 LA-ICP-MS 锆石 U-Pb 年龄的证据

裴先治,丁仁平,李佐臣,刘战庆,李高阳,李瑞保,王飞,李夫杰

西部地质资源与地质工程教育部重点实验室,长安大学地球科学与资源学院,西安,710054

内容提要:西秦岭北缘天水地区关子镇蛇绿岩由变质基性火山岩(斜长角闪片岩)和蛇纹岩、变辉石岩、变辉长岩等构造岩块组成。其中的变质基性火山岩具有 N-MORB 的地球化学特征,显示关子镇蛇绿岩是洋脊型蛇绿岩残片。对蛇绿岩中的辉长岩进行了 LA-ICP-MS 锆石 U-Pb 定年,得到²⁰⁶Pb/²³⁸U 加权平均年龄为(499.7±1.8)Ma (MSWD=2.2),代表了辉长岩的结晶年龄,表明关子镇蛇绿岩是晚寒武世在西秦岭北缘李子园—关子镇—武山洋盆扩张过程中岩浆活动的产物,代表了东秦岭早古生代商丹古洋盆在西秦岭造山带北缘向西延伸的组成部分。

关键词:蛇绿岩;辉长岩;LA-ICP-MS;锆石 U-Pb 年龄;晚寒武世;天水地区;西秦岭

西秦岭北缘天水地区分布有较多的不同时代的火山岩系和侵入岩系(甘肃省地质矿产局,1989;宋志高等,1991a,1991b;夏林圻等,1991;张维吉等,1994;张国伟等,2001,2004;冯益民等,2002;陆松年等,2003,2004,2005;裴先治等,2004a,2004b,2005a,2005b,2006,2007a,2007b;丁仁平等,2004,2006;胡波等,2005;张宏飞等,2006,2006;赖绍聪等,2006;刘会彬等,2006;杨钊等,2006;Zhang H F et al.,2006;Pei X Z et al.,2007)。其中已经识别出了早古生代关子镇蛇绿岩(裴先治等,2004a)和李子园群岛弧型火山—沉积岩系以及流水沟、百花基性—中基性岛弧型岩浆杂岩等(裴先治等,2005a,2005b,2007a,2007b;Pei X Z et al.,2007)。而关子镇蛇绿岩是东秦岭商丹早古生代古缝合带的向西延伸部分(张国伟等,2001,2004;冯益民等,2002;裴先治等,2004a;丁仁平等,2004;杨钊等,2006)。然而,由于对该区广泛分布的不同时代、不同环境火山岩系尚缺少详细的研究工作,尤其是缺乏同位素年代学研究,直接影响到对该区大地构造格架的确定以及祁连与秦岭造山带之间构造关系的认识。

在对天水地区区域构造、变质地层和火山岩系的调查以及对出露于天水关子镇地区的蛇绿岩进行初步厘定并进行了岩石学和岩石地球化学研究基础

上(裴先治等,2004a),本文对关子镇蛇绿岩中的辉长岩利用阴极发光(CL)和激光剥蚀等离子质谱(LA-ICP-MS)单颗粒锆石原位分析方法进行 U-Pb 年代学研究,以确定以关子镇蛇绿岩为代表的古洋盆的形成时代,为深入研究西秦岭造山带早古生代构造格架和形成演化以及秦岭造山带与祁连造山带构造衔接关系等重要地质问题提供精确的同位素年代学制约。

1 区域地质概况

关子镇蛇绿岩属于原划前寒武系或早古生代“牛头河群”变质地层。该地层分布于甘肃西部天水、清水、秦安、张家川和陕西宝鸡、陇县地区。20世纪70~80年代以来,由于在一些浅变质沉积地层中陆续发现了一些古生物化石,因此将这些变质地层置于奥陶—志留系,并将分布于渭河以北分布于葫芦河流域的浅变质地层命名为“葫芦河群”。90年代以来的专题研究对该区变质地层的认识和划分取得了重要进展。宋志高等(1991a,1991b)将原划“牛头河群”进行了解体,将分布于张家川—陇县一带的中深变质岩系称为“陇山群”、天水甘泉寺—花庙河一带的中深变质岩系沿用东秦岭的“秦岭群”,将夹持于这两套前寒武系中深变质岩系之间的浅变

注:本文为国家自然科学基金项目(编号 40572121、40234041)、教育部科学技术研究重点项目(编号 104175)和中国地质调查局地质调查项目(编号 200013000154)资助的成果。

收稿日期:2007-06-28;改回日期:2007-09-02;责任编辑:郝梓园。

作者简介:裴先治,男,1963年生。博士,教授(博士生导师),主要从事构造地质学和区域地质学研究。通讯地址:710054,西安市雁塔路南段126号,西部地质资源与地质工程教育部重点实验室,资源学院;Email:peixzh@sina.com。

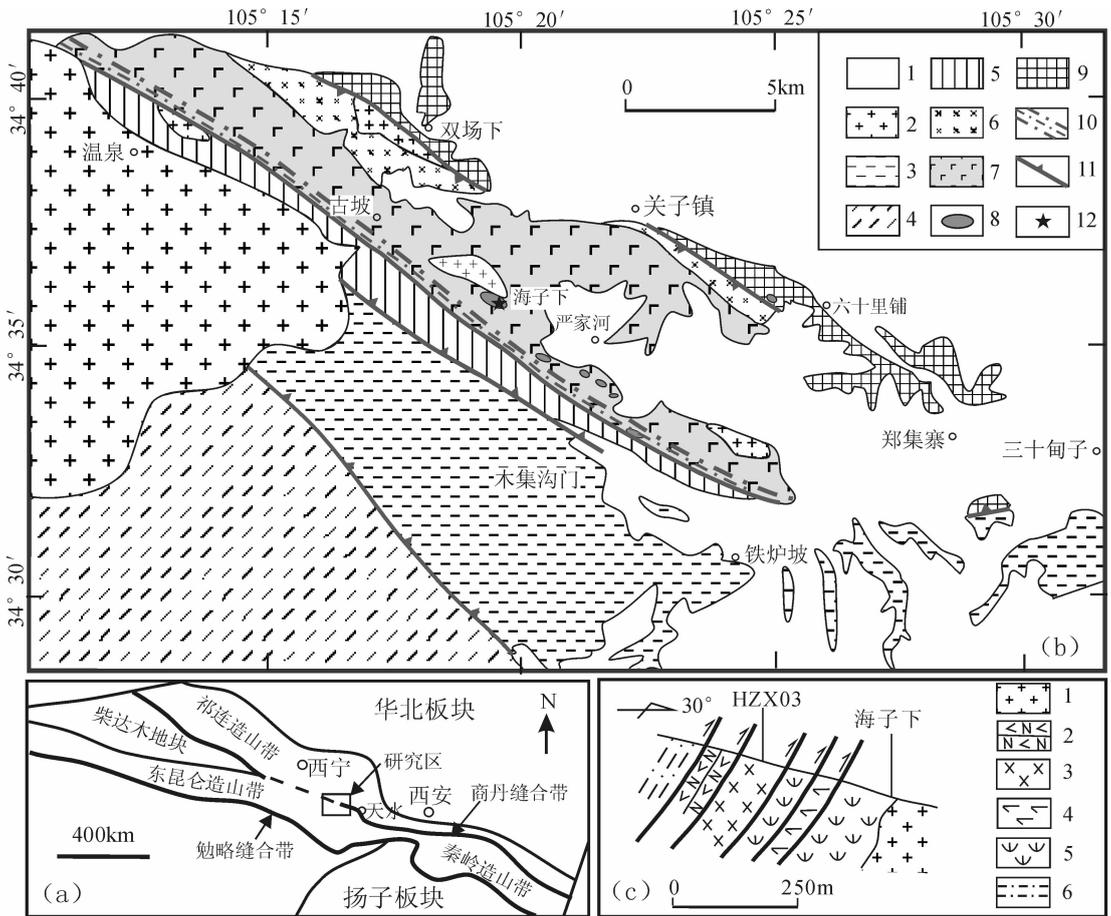


图 1 西秦岭北缘大地构造位置(a)、天水地区关子镇蛇绿岩地质略图(b)和采样位置剖面图(c)

Fig. 1 Tectonic map of the northern margin of the West Qinling(a), geological sketch map of Guanzhen ophiolite

in Tianshui area(b) and cross section of sampling location(c)

(b): 1—新生界; 2—印支期花岗岩; 3—上泥盆统大草滩群; 4—太阳寺岩组石英片岩单位; 5—早古生代李子园群火山-沉积岩系; 6—流水沟变质辉长岩-辉长闪长岩体; 7—8: 关子镇蛇绿岩; 7—变质基性火山岩/斜长角闪片岩; 8—蛇纹岩、变质辉石岩及变质辉长岩; 9—元古界秦岭岩群中深变质杂岩; 10—糜棱岩带; 11—逆冲断层/逆冲型韧性剪切带; 12—同位素年龄采样位置; (c): 1—花岗岩; 2—斜长角闪片岩; 3—辉长岩; 4—辉石岩; 5—蛇纹岩; 6—糜棱岩带

(b): 1—Cenozoic; 2—Indosinian granite; 3—Upper Devonian Dacaotan Group; 4—quartz schist unite of Early Palaeozoic Taiyangsi Formation; 5—volcanic-sedimentary rock of Early Palaeozoic Liziyuan Group; 6—Liushuigou meta-gabbro—gabbro-diorite; 7-8—Guanzhen ophiolite; 7—metamorphic basic volcanic rock; 8—serpentinite, pyroxenite and gabbro; 9—metamorphic rock of Paleoproterozoic Qinling complex group; 10—mylonite zone; 11—thrust/thrust ductile shear zone; 12—sampling location of isotopic age; (c): 1—granite; 2—plagioclase-amphibole-schist; 3—gabbro; 4—pyroxenite; 5—serpentinite; 6—mylonite zone

质岩系划分为早古生代“葫芦河群”，并包含分布于天水关子镇一带的基性火山岩系和清水红土堡—秦安杨家寺一线的基性火山岩系和中酸性火山岩系。张维吉等(1994)仍沿用了陇山群和秦岭群(牛头河群)，但将分布于秦岭群与陇山群之间的原“葫芦河群”分解为震旦系—奥陶系葫芦河群(变质碎屑岩组和变质基性火山岩组)和上奥陶统陈家河群(浅变质碎屑岩组和中酸性火山岩组)，将分布于秦岭群南侧的中浅变质地层命名为震旦系—早古生代“李子园群”(相当于东秦岭丹凤群)。

作者等近年通过 1:25 万区域地质调查(裴先治等, 2004)^①, 对该区变质地层进行了较详细研究对比, 并从中划分出一些变质侵入体和一些新的岩石地层单位。其中将分布于元古界秦岭群南侧的早古生代“李子园群”(丹凤群)进一步解体为以下 6 部分: ① 新元古代木其滩岩组, 主要由斜长角闪片岩等组成, Sm-Nd 等时线年龄 $932 \pm 54 \text{Ma}$; ② 早古生代关子镇蛇绿岩(裴先治等, 2004a)(图 1); ③ 早古生代李子园群(狭义)浅变质火山—沉积岩系(丁仁平等, 2004; 裴先治等, 2006); ④ 早古生代流水沟变

质中基性岩浆杂岩体(裴先治等, 2005a, 2006b; Pei X Z et al., 2007); ⑤ 早古生代太阳寺岩组被动陆缘型沉积岩系(丁仁平等, 2004; 裴先治等, 2006); ⑥ 中泥盆世舒家坝群上部的碳酸盐岩组。

关子镇蛇绿岩及其中的变质基性火山岩南侧以大型韧性剪切带/糜棱岩带与早古生代李子园群相邻, 北侧则以片麻状变质辉长—闪长岩体与古元古代秦岭岩群相隔(图 1b)。在变质基性火山岩系南侧还出现有蛇纹岩(变质橄榄岩)、变质辉石岩和变质辉长岩构造块体, 它们组成了一个不完整的蛇绿岩组合(图 1c)。该蛇绿岩带向西被温泉花岗岩体吞没, 至武山一带复又出现并与武山蛇绿岩相连接。

2 蛇绿岩基本地质特征

天水关子镇地区蛇绿岩出露较好, 以发育大套变质基性火山岩(斜长角闪片岩)为特征。在关子沟东侧的海子下有蛇绿岩较完整剖面出露(图 1c), 从南到北依次出露有斜长角闪片岩(变质基性火山岩)、变中细粒辉长岩、变辉石岩(包括阳起石岩)、蛇纹岩(变质橄榄岩), 其间均为断层接触关系, 构成不同岩性岩片叠置体, 南侧为一大型长英质糜棱岩带, 北侧被印支期小型中细粒—中粒似斑状黑云母二长花岗岩侵入, 大套变质基性火山岩就出露在该蛇绿岩带的北侧。因此, 该蛇绿岩主体由变质基性火山岩(斜长角闪片岩)组成。本文的锆石 U-Pb 年代学研究样品就采自海子下与变辉石岩、蛇纹岩(变质橄榄岩)共生的辉长岩中(图 1c)。

天水关子镇地区蛇绿岩带中的基性火山岩属于中浅变质火山岩系。其中蛇纹岩(变质橄榄岩)为墨绿色, 块状构造, 主要由蛇纹石等组成, 常透闪石化、

碳酸岩化; 变辉石岩呈灰黑色, 块状或片麻状构造, 主要由辉石(>90%)和少量基性斜长石(<10%)组成, 辉石多已变为角闪石或阳起石, 但多保留辉石假象, 基性斜长石常帘石化、绢云母化, 发育定向组构; 变辉长岩呈灰黑色, 片麻状构造, 中细粒—中粒变余辉长结构, 主要由辉石(55%~60%)和基性斜长石(40%~45%)组成, 辉石多变为角闪石, 但可保留有辉石假象, 普遍发育定向组构。斜长角闪片岩为暗绿—黑绿色, 片状构造, 细粒变晶结构, 主要组成矿物为角闪石(60~65%)、斜长石(35%~40%), 少量绿帘石、阳起石等, 具有强烈的定向排列。在部分地段可见发育有残余枕状构造, 且变形岩枕压扁拉长呈定向排列, 长 15~25cm, 宽 7~15cm 不等。

关子镇蛇绿岩中镁铁质—超镁铁质岩的主量元素和微量元素分析结果见表 1。关子镇蛇绿岩中的蛇纹岩(变质橄榄岩)的化学成分稳定、变化范围较小, SiO_2 含量为 38.82%~39.00% 之间, 显示富 Mg、贫 Al、Ca 和碱特征, $\text{Mg}^\#$ 值(根据 $\text{MgO}/(\text{MgO} + \text{FeO}) \times 100$ 的摩尔比计算)和 $\text{MgO}/(\text{MgO} + \text{FeO})$ 较高, 分别为 94.92~96.55 之间和 0.75%~0.81% 之间, $\text{Mg}^\#$ 值大于 90, 表明为方辉橄榄岩, 且代表了原始地幔经过部分熔融的残留地幔橄榄岩(Frey, 1984)。在 Coleman(1977)的 Al_2O_3 -CaO-MgO 和 $\text{Na}_2\text{O} + \text{K}_2\text{O}$ -FeO-MgO 图解中(图 2), 均位于变质橄榄岩区域, 表明是以方辉橄榄岩为主要岩石类型。Cr、Ni、Co 含量较高, 而稀土总量 $\sum \text{REE}$ 极低, $(\text{La}/\text{Yb})_N$ 介于 5.44~20.44 之间, $(\text{La}/\text{Sm})_N$ 介于 2.70~20.66 之间, 显示出 LREE 略富集、MREE 较 HREE 略亏损的下凹型或 U 型分布曲线(图 3a), 这种 REE 配分模式是高度亏损的残余地

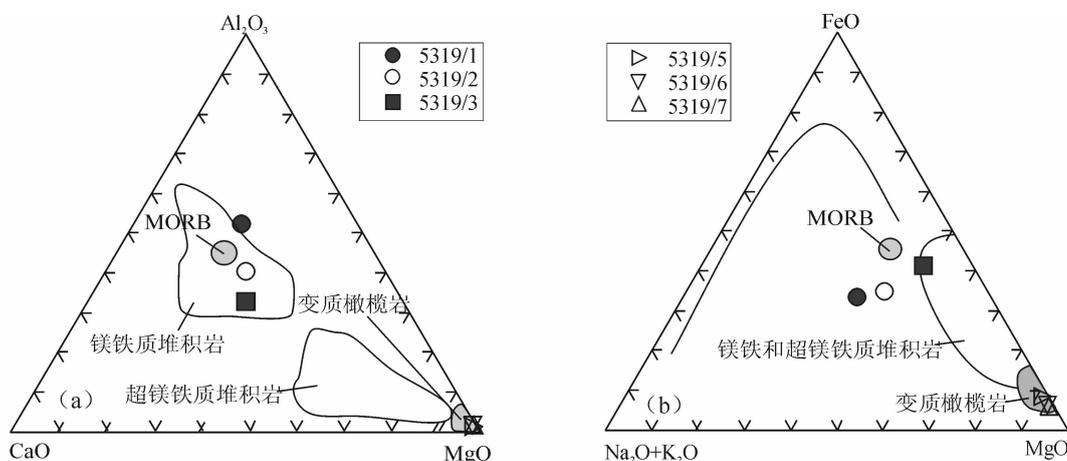


图 2 关子镇蛇绿岩中超镁铁—镁铁质岩的 ACM(a)和 AFM(b)图解

Fig. 2 ACM(a) and AFM(b) diagrams of ultramafic-mafic rocks in the Guanzizhen ophiolite

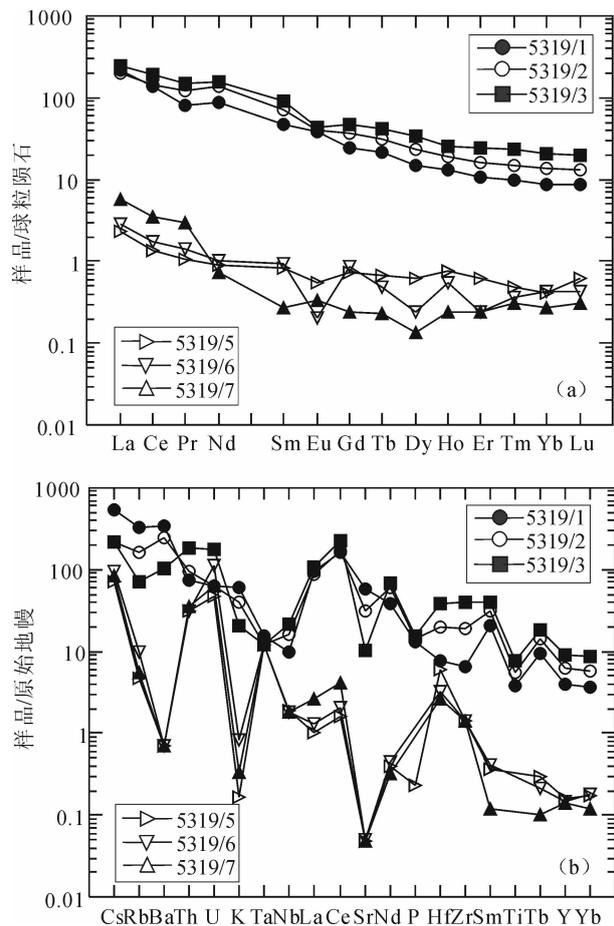


图 3 关子镇蛇绿岩中超镁铁—镁铁质岩的球粒陨石标准化稀土元素配分型式(a)和原始地幔标准化(b)蛛网图(球粒陨石标准化数据据 Boynton, 1984; 原始地幔标准化数据据 Sun et al., 1989; MORB 标准化数据据 Pearce, 1982)

Fig. 3 Chondrite-normalized REE distribution patterns (a) and primitive mantle-normalized (b) trace element spidergrams for ultramafic-mafic rocks in the Guanzizhen ophiolite(chondrite-normalized date after Boynton, 1984; primitive mantle-normalized date after Sun et al., 1989; MORB-normalized date after Pearce, 1982)

幔、蛇绿岩、造山带二辉橄榄岩和地幔包体最常见的型式(Frey, 1984)。Eu 呈正异常或负异常(δEu 为 0.23~1.34),属于蛇绿岩中的地幔残留岩石,并且与地幔橄榄岩中方辉橄榄岩的微量元素地球化学特征基本一致(Coleman, 1977; Frey, 1984; 史仁灯, 2005)。在原始地幔标准化的微量元素蛛网图上(图 3b),明显亏损不相容元素 Nb、Ta 等,代表了高度亏损的地幔残余,但明显富集 Zr、Hf 强不相容元素,这可能与方辉橄榄岩中含有尖晶石有关(Frey,

表 1 关子镇蛇绿岩中超镁铁质—镁铁质岩的主量元素(%)、微量元素和稀土元素($\times 10^{-6}$)分析结果

Table 1 Major(%), trace elements and REE($\times 10^{-6}$) compositions of ultramafic-mafic rocks from

Guanzizhen Ophiolite

序号	1	2	3	4	5	6
样品号	5319/5	5319/6	5319/7	5319/3	5319/1	5319/2
岩石名称	蛇纹岩			变辉石岩	变辉长岩	
产地	海子下	海子下	海子下	海子下	海子下	海子下
SiO ₂	37.82	38.88	39.00	43.09	48.74	47.78
TiO ₂	0.00	0.00	0.00	1.68	0.81	1.22
Al ₂ O ₃	0.56	0.67	0.6	11.85	17.65	13.38
Fe ₂ O ₃	9.89	7.09	7.30	2.93	1.41	2.23
FeO	3.44	2.61	2.39	10.56	6.82	8.00
CaO	0.22	0.33	0.25	12.2	8.29	9.74
MgO	36.1	37.01	37.53	12.26	7.72	9.88
MnO	0.09	0.10	0.06	0.23	0.16	0.16
K ₂ O	0.01	0.05	0.02	1.24	3.6	2.45
Na ₂ O	0.047	0.045	0.085	1.13	2.00	2.35
P ₂ O ₅	0.01	0	0	0.67	0.58	0.61
灼失	11.53	12.33	12.13	0.76	1.14	1.52
总量	99.717	99.115	99.365	98.6	98.92	99.32
Mg [#]	94.92	96.19	96.55	67.41	66.85	68.75
Cr	290	339	262	361	162	195
Ni	984	731	807	118	60.8	70.6
Co	122	97.4	104	54	29.3	34.7
Rb	2.95	6.25	3.45	45.2	209	104
Cs	2.3	3	2.7	6.85	17.3	6.9
Sr	1	1.06	1	218	1220	669
Ba	5	5	5	716	2380	1730
V	7.27	6.28	4.49	310	162	290
Nb	1.37	1.29	1.32	15.2	7.1	11.5
Ta	0.5	0.5	0.5	0.5	0.63	0.5
Zr	16.2	16.2	15.9	454	72.6	217
Hf	1.85	0.98	0.82	11.7	2.4	6.03
U	1.0	2.33	1.33	3.73	1.33	1.33
Th	2.62	2.68	2.96	15.7	6.28	7.95
Y	0.73	0.68	0.64	41.7	18.2	28.8
La	0.71	0.88	1.80	74.9	66.0	61.3
Ce	1.11	1.39	2.81	152	112	117
Pr	0.13	0.17	0.36	17.9	9.71	14.6
Nd	0.53	0.61	0.44	92.9	53	81.4
Sm	0.16	0.18	0.053	17.8	9.32	14.1
Eu	0.04	0.015	0.025	3.14	2.86	2.88
Gd	0.19	0.22	0.062	12.3	6.39	9.44
Tb	0.032	0.023	0.011	1.99	1.02	1.51
Dy	0.20	0.078	0.044	10.7	4.72	7.6
Ho	0.056	0.04	0.017	1.86	0.94	1.37
Er	0.13	0.051	0.051	5.20	2.20	3.45
Tm	0.016	0.012	0.01	0.76	0.32	0.48
Yb	0.086	0.089	0.058	4.29	1.79	2.87
Lu	0.02	0.014	0.01	0.65	0.28	0.43
ΣREE	3.41	3.77	5.75	396.39	270.55	318.43
(La/Yb) _n	5.44	6.51	20.44	11.50	24.29	14.07
(La/Sm) _n	2.70	2.97	20.66	2.56	4.31	2.65
δEu	0.71	0.23	1.34	0.62	1.08	0.73

注:中国地质调查局宜昌地质矿产研究所岩矿测试室分析,其中主量元素用常规湿法分析(%),微量元素和稀土元素 ICP-AES 法分析(10^{-6})。

1984)。Frey(1984)、王希斌等(1995)总结世界典型地区蛇绿岩和中国蛇绿岩中变质橄榄岩的地球化学特点时都指出,绝大部分地幔橄榄岩呈 LREE 富集型,与现代大洋蛇绿岩中的地幔橄榄岩的 LREE 亏损型明显不同。Melcher 等(2002)利用部分熔融模式和蚀变模式解释了蛇绿岩中地幔橄榄岩的 U 型 LREE 富集的原因。

变辉石岩和变辉长岩的 SiO_2 含量分别为 43.09% 和 47.78%~48.74% 之间, $\text{Mg}^\#$ 值较高(66.85~68.75 之间),介于印度洋辉长岩的 $\text{Mg}^\#$ 值范围(32~88),属于蛇绿岩中的镁铁质堆晶岩(图 2)(Coleman, 1977),成分接近 MORB 分布范围;变辉石岩和变辉长岩的 ΣREE 明显高于变质橄榄岩,为 $270.55 \times 10^{-6} \sim 396.39 \times 10^{-6}$ 之间, $(\text{La}/\text{Yb})_N$ 介于 11.50~24.29 之间, $(\text{La}/\text{Sm})_N$ 介于 2.56~4.31 之间,显示出 LREE 富集、HREE 相对亏损的稀土元素分布曲线(图 3a), δEu 呈弱的正异常或负异常(δEu 为 0.62~1.08),显示没有富钙斜长石的堆积,这与典型蛇绿岩中堆晶辉长岩的 LREE 亏损和正 Eu 异常的分配型式不同(Coleman, 1977),显示出具有 E-MORB 特征或属于 E-MORB-OIB 过渡类型(Saunders, 1984; Sun, et al., 1989),而可能属于蛇绿岩中的上部层位辉长岩(Coleman, 1977)。与原始地幔相比,富集大离子亲石元素、亏损高场强元素(图 3b)。辉长岩中 LREE 和部分大离子亲石元素的富集可能也与岩石邻近印支期花岗岩类侵入体引起的蚀变、花岗岩脉体的贯入和绿片岩相区域变质作用有关(Coleman, 1977; Frey, 1984; Melcher 等, 2002)。

蛇绿岩中变质基性火山岩的岩石类型主要为玄武岩,少数为玄武安山岩,属于拉斑玄武岩系列。根据裴先治等(2004)的研究结果,变质玄武岩的 SiO_2 含量变化在 46.14%~51.50% 之间,而变质玄武安山岩的 SiO_2 含量为 53.57%~56.54%。 TiO_2 含量较低,变化范围为 0.40%~1.48% 之间(平均 0.93%); MgO 含量中等,为 5.08%~8.16%,相应的 $\text{Mg}^\#$ 变化范围为 49~61,且 $\text{FeO} > \text{Fe}_2\text{O}_3$ 。稀土元素配分模式图显示为 LREE 呈平坦型和略亏损型 REE 配分模式,类似于 N-MORB,具有低的 ΣREE 和 LREE/HREE 比值,变化范围分别为 $26.72 \sim 61.41 \times 10^{-6}$ 和 1.10~1.92, $(\text{La}/\text{Yb})_N$ 介于 0.54~1.31 之间,平均为 0.85, $(\text{La}/\text{Sm})_N$ 为 0.86~1.39,无明显的 Eu 异常或弱的正异常(δEu 为 0.90~1.16),基本与 N-MORB 相似。变质基性火山岩

样品的 N-MORB 标准化微量元素分布图显示出具有洋脊玄武岩和过渡型玄武岩的特征,大离子亲石元素 Rb、Ba、Th、Ta 略富集,而其它多数高场强元素(HFSE)丰度(除 Sc、Cr 外)具有接近 1 的平坦型分布型式。岩石地球化学特征表明,关于镇蛇绿岩中的变质基性火山岩总体属于 N-MORB 型玄武岩,是洋脊型蛇绿岩的重要组成部分。

3 蛇绿岩中辉长岩的 LA-ICP-MS 锆石 U-Pb 年龄

本次工作为了获取蛇绿岩的形成时代,采用 LA-ICP-MS 法对蛇绿岩中辉长岩的岩浆锆石进行了 U-Pb 同位素年龄测试。该辉长岩样品(HZX03)采自关于镇南的海子下,采样点地理坐标为: $\text{N}34^\circ 35' 48.7''$, $\text{E}105^\circ 19' 13.6''$ 。与变辉石岩、蛇纹岩(变质橄榄岩)共生(图 1c),因此无疑可以代表蛇绿岩的形成年龄。

3.1 测试方法

本文研究的锆石样品(HZX03)是从野外采集的约 15kg 辉长岩大样中分选出来的。样品采用常规方法进行粉碎至 80~100 目,并用常规浮选和电磁选方法进行分选,再在双目镜下挑选出晶形和透明度较好的锆石颗粒作为测定对象。将锆石颗粒粘在双面胶上,然后用无色透明的环氧树脂固定,待环氧树脂充分固化后,对其表面进行抛光至锆石内部暴露,然后进行反射光和投射光照相。锆石的阴极发光(CL)显微照相在中国科学院地质与地球物理研究所的 Cameca 电子探针仪器上完成,分析电压为 15kV,电流为 19nA。

锆石原位 U-Pb 同位素年龄分析在西北大学大陆动力学国家重点实验室的 LA-ICP-MS 仪器上用标准测定程序进行。分析仪器为 Elan 6100DRC 型四极杆质谱仪和 Geolas200M 型激光剥蚀系统,激光器为 193nm ArF 准分子激光器。激光剥蚀斑束直径为 $30\mu\text{m}$,激光剥蚀样品的深度为 20~40 μm 。锆石年龄计算采用国际标准锆石 91500 作为外标,元素含量采用美国国家标准物质局人工合成硅酸盐玻璃 NIST SRM610 作为外标, ^{29}Si 作为内标元素进行校正。样品的同位素比值和元素含量数据处理采用 GLITTER(4.0 版, Macquarie University) 软件,并采用 Andersen(2002) 软件对测试数据进行普通铅校正,年龄计算及谐和图采用 ISOPLOT(2.49 版)(Ludwig, 2003) 软件完成。详细的实验原理和流程及仪器参数见袁洪林等(2003)和 Yuan H L 等

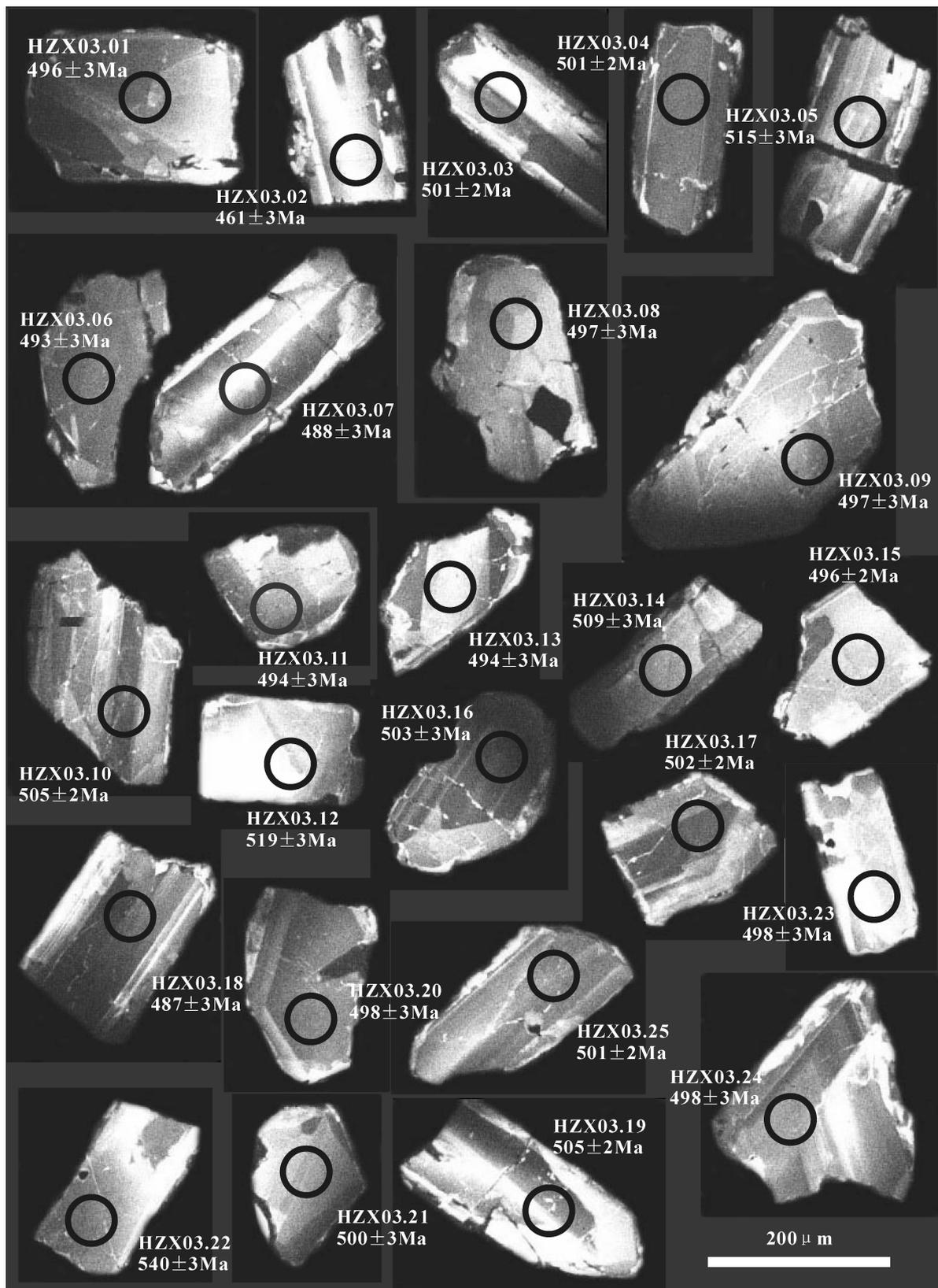


图 4 关子镇蛇绿岩中辉长岩(HZX03)锆石的阴极发光(CL)图像和年龄值

Fig. 4 Cathodoluminescence (CL) images of selected analyzed zircons from gabbros (sample HZX03) in the Guanzizhen ophiolite, the Western Qinling

圈和数字分别表示锆石 U-Pb 分析位置、测点编号和 $^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$ 表面年龄值

Circle and number are analysis location and number of samples respectively; other numbers are $^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$ age

(2003, 2004)。

3.2 锆石特征

从样品(HZX03)中选取的锆石为淡黄色—无色透明短柱状、半截锥状、中长柱状晶体,粒度多为80~180 μm 之间。阴极发光图像(图4)显示锆石内部结构较为复杂,大致上有4种基本类型。第一种类型为明暗相间的条带结构,大部分锆石结构属于此类(如 HZX03.02、HZX03.03、HZX03.10、HZX03.13、HZX03.14、HZX03.17、HZX03.18、HZX03.25);第二种类型表现为较宽的环带结构(如 HZX03.06、HZX03.07、HZX03.19、HZX03.20、HZX03.21),表明锆石结晶时岩浆温度较高,有利于微量元素快速扩散,形成较宽的结晶环带(吴元保等,2004);第三种为扇形分带结构(如 HZX03.01、HZX03.08、HZX03.12、HZX03.19、HZX03.24);第四种类型表现为内部较均匀、无明显分带或环带结构特征(如 HZX03.04、HZX03.06、HZX03.09、HZX03.15、HZX03.16、HZX03.22、HZX03.23),表明结晶环境相对比较稳定。这4种类型都属于岩浆结晶锆石(图4)(吴元保等,2004)。个别锆石颗粒具有窄的不完整浅色边(如 HZX03.07、HZX03.11、HZX03.13),为变质增生边。对样品(HZX03)共分析测试了25个点,其锆石 U-Pb 分析测试数据见表2。

锆石的 ^{232}Th 含量变化较大,介于 85.36×10^{-6} ~ 992.82×10^{-6} (多数在 101.85×10^{-6} ~ 422.13×10^{-6} 之间), ^{238}U 含量也变化较大,介于 172.15×10^{-6} ~ 886.88×10^{-6} (多数在 255.48×10^{-6} ~ 505.66×10^{-6} 之间),且 ^{232}Th 、 ^{238}U 含量呈现出较好的正相关关系(图5),Th/U比值除颗粒 HZX03.04

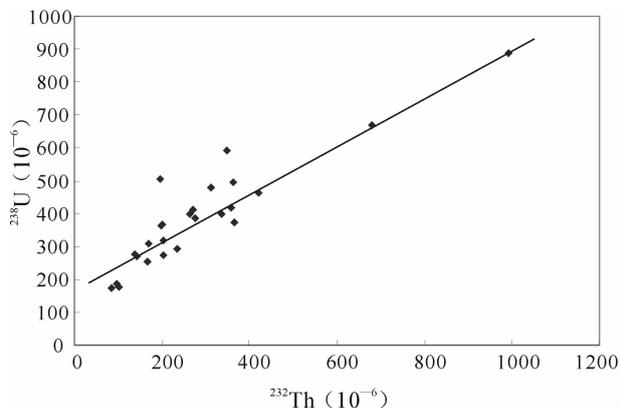


图5 关子镇蛇绿岩中辉长岩的锆石 Th-U 图解

Fig. 5 Zircon Th-U diagram of the gabbro in the Guanzizhen ophiolite

的相对较低(为0.39)、颗粒 HZX03.15 和 HZX03.22相对较高(分别为1.02和1.12)外,其他测点的Th/U比值变化范围较小,介于0.50~0.98之间,且绝大多数Th/U比值 >0.4 ,表明了典型岩浆成因锆石特征(Vavra G, 1996, 1999; 简平等, 2003a; 吴元保等, 2004)。这些特征表明所有测年锆石颗粒应是从同一岩浆中结晶形成的。

3.3 测试结果

所有分析测试的锆石在U-Pb年龄一致曲线图上构成比较集中的主锆石群,锆石 $^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$ 年龄比较集中分布在461~540Ma之间,其中有1个测点(HZX03.02)的 $^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$ 年龄明显偏低,为 $461 \pm 3\text{Ma}$,另一个测点(HZX03.22)的 $^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$ 年龄明显偏高,为 $540 \pm 3\text{Ma}$,并且其具有所有测点中最高的 ^{206}Pb (321.64×10^{-6})、 ^{232}Th (992.82×10^{-6})、 ^{238}U (886.68×10^{-6})含量和Th/U比值(1.12)。这两个锆石颗粒明显偏离了主锆石群。除此之外,其余23个测点的 $^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$ 年龄介于487~519Ma之间,其 $^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$ 加权平均年龄为(500.3 ± 2.8)Ma(MSWD=6.6)(图6a)。由于该年龄值误差较大(MSWD=6.6),为了比较准确地确定蛇绿岩的形成时代,把 $^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$ 年龄值明显偏离误差范围且有不同程度铅丢失的5个测点(HZX03.05、HZX03.07、HZX03.12、HZX03.14、HZX03.18)剔除后,其余18个测点的 $^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$ 年龄介于494~505Ma之间,其 $^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$ 加权平均年龄为(499.7 ± 1.8)Ma(MSWD=2.2)(图6b)。

因此,本文将关子镇蛇绿岩中辉长岩的主体结晶时代确定为(499.7 ± 1.8)Ma。由于国际地层表和中国区域年代地层(地质年代)表中的寒武纪与奥陶纪界线年龄值分别为500Ma和490Ma,本文采用中国区域年代地层(地质年代)表的划分方案,将其形成时代确定为晚寒武世(全国地层委员会, 2002)。

4 讨论与结论

造山带蛇绿岩是古洋壳存在的物质记录,也是威尔逊板块构造旋回的初始时间端元。研究表明,蛇绿岩中辉长岩是地幔(大洋地幔或大陆地幔)部分熔融后又经历了岩浆结晶分异作用的产物,其成岩年龄对于蛇绿岩同位素地质年代学研究具有重要意义(简平等, 2003a, 2003b; 闫全人等, 2005, 2006)。此外,辉长岩中锆石组成相对比较简单,同位素体系封闭较好,往往是组成单一的岩浆锆石,因而其同位

表 2 天水地区关子镇蛇绿岩中辉长岩 LA-ICP-MS 锆石 U-Pb 同位素分析结果

Table 2 LA-ICP-MS zircon U-Pb isotopic analysis date from gabbro of Guanzizhen ophiolite in Tianshui area

测试点号	元素含量($\times 10^{-6}$)及比值				同位素比值								表面年龄(Ma)							
	^{206}Pb	^{232}Th	^{238}U	Th/U	$^{207}\text{Pb}/$ ^{206}Pb	1σ	$^{207}\text{Pb}/$ ^{235}U	1σ	$^{206}\text{Pb}/$ ^{238}U	1σ	$^{208}\text{Pb}/$ ^{232}Th	1σ	$^{207}\text{Pb}/$ ^{206}Pb	1σ	$^{207}\text{Pb}/$ ^{235}U	1σ	$^{206}\text{Pb}/$ ^{238}U	1σ	$^{208}\text{Pb}/$ ^{232}Th	1σ
HZX03.01	122.76	199.51	363.96	0.55	0.05795	0.00100	0.63878	0.00908	0.07993	0.00043	0.02618	0.00023	528	22	502	6	496	3	522	5
HZX03.02*	89.55	202.69	274.89	0.74	0.05748	0.00236	0.58710	0.02365	0.07408	0.00056	0.02299	0.00015	510	92	469	15	461	3	459	3
HZX03.03	126.12	365.36	371.83	0.98	0.06080	0.00092	0.67743	0.00797	0.08079	0.00041	0.02662	0.00017	632	17	525	5	501	2	531	3
HZX03.04	171.02	196.95	505.66	0.39	0.06562	0.00087	0.73082	0.00686	0.08077	0.00038	0.03107	0.00022	794	12	557	4	501	2	618	4
HZX03.05*	61.53	101.85	176.96	0.58	0.06800	0.00120	0.78059	0.01159	0.08324	0.00047	0.03055	0.00028	869	21	586	7	515	3	608	5
HZX03.06	84.39	165.79	255.48	0.65	0.06195	0.00105	0.67884	0.00947	0.07946	0.00043	0.02658	0.00022	672	21	526	6	493	3	530	4
HZX03.07*	137.85	357.09	417.34	0.86	0.05783	0.00170	0.62683	0.01800	0.07861	0.00052	0.02438	0.00012	524	66	494	11	488	3	487	2
HZX03.08	61.98	96.24	186.81	0.52	0.05783	0.00110	0.63952	0.01054	0.08019	0.00046	0.02522	0.00026	523	26	502	7	497	3	503	5
HZX03.09	56.91	85.36	172.15	0.50	0.05968	0.00119	0.65908	0.01154	0.08009	0.00048	0.02673	0.00029	592	27	514	7	497	3	533	6
HZX03.10	133.87	263.40	398.70	0.66	0.05997	0.00089	0.67422	0.00766	0.08153	0.00041	0.02715	0.00019	602	16	523	5	505	2	541	4
HZX03.11	100.52	169.98	307.61	0.55	0.05817	0.00116	0.63871	0.01224	0.07963	0.00043	0.02468	0.00011	536	45	502	8	494	3	493	2
HZX03.12*	133.75	275.19	385.76	0.71	0.06083	0.00172	0.70364	0.01934	0.08389	0.00057	0.02587	0.00013	633	62	541	12	519	3	516	3
HZX03.13	119.32	200.53	366.18	0.55	0.05685	0.00117	0.62441	0.01242	0.07966	0.00044	0.02476	0.00011	486	47	493	8	494	3	494	2
HZX03.14*	156.16	422.13	462.02	0.91	0.05818	0.00127	0.65907	0.01391	0.08216	0.00044	0.02546	0.00010	537	49	514	9	509	3	508	2
HZX03.15	217.46	678.82	667.42	1.02	0.05836	0.00117	0.64355	0.01249	0.07998	0.00041	0.02478	0.00010	543	45	505	8	496	2	495	2
HZX03.16	92.69	137.66	277.41	0.50	0.05959	0.00097	0.66620	0.00898	0.08111	0.00045	0.02772	0.00024	589	20	518	5	503	3	553	5
HZX03.17	197.17	348.40	592.28	0.59	0.05616	0.00072	0.62673	0.00561	0.08096	0.00039	0.02648	0.00016	459	12	494	4	502	2	528	3
HZX03.18*	133.91	270.79	410.31	0.66	0.05912	0.00127	0.63946	0.01323	0.07845	0.00045	0.02427	0.00011	571	48	502	8	487	3	485	2
HZX03.19	133.22	336.22	398.90	0.84	0.06531	0.00091	0.73393	0.00768	0.08152	0.00041	0.02756	0.00017	784	14	559	4	505	2	550	3
HZX03.20	104.56	203.09	318.53	0.64	0.05797	0.00105	0.64137	0.00995	0.08027	0.00047	0.02512	0.00022	529	24	503	6	498	3	501	4
HZX03.21	89.32	143.56	271.60	0.53	0.05883	0.00096	0.65434	0.00872	0.08069	0.00044	0.02484	0.00021	561	20	511	5	500	3	496	4
HZX03.22*	321.64	992.82	886.68	1.12	0.06383	0.00176	0.76967	0.02068	0.08745	0.00056	0.02681	0.00013	736	60	580	12	540	3	535	3
HZX03.23	96.84	235.47	293.85	0.80	0.05932	0.00140	0.65728	0.01503	0.08037	0.00048	0.02485	0.00011	579	53	513	9	498	3	496	2
HZX03.24	161.59	363.96	496.34	0.73	0.05855	0.00090	0.64767	0.00789	0.08025	0.00042	0.02480	0.00017	550	17	507	5	498	3	495	3
HZX03.25	156.46	312.76	478.12	0.65	0.06242	0.00090	0.69508	0.00750	0.08078	0.00041	0.02465	0.00017	689	14	536	4	501	2	492	3

注:加*号者未参加年龄计算。

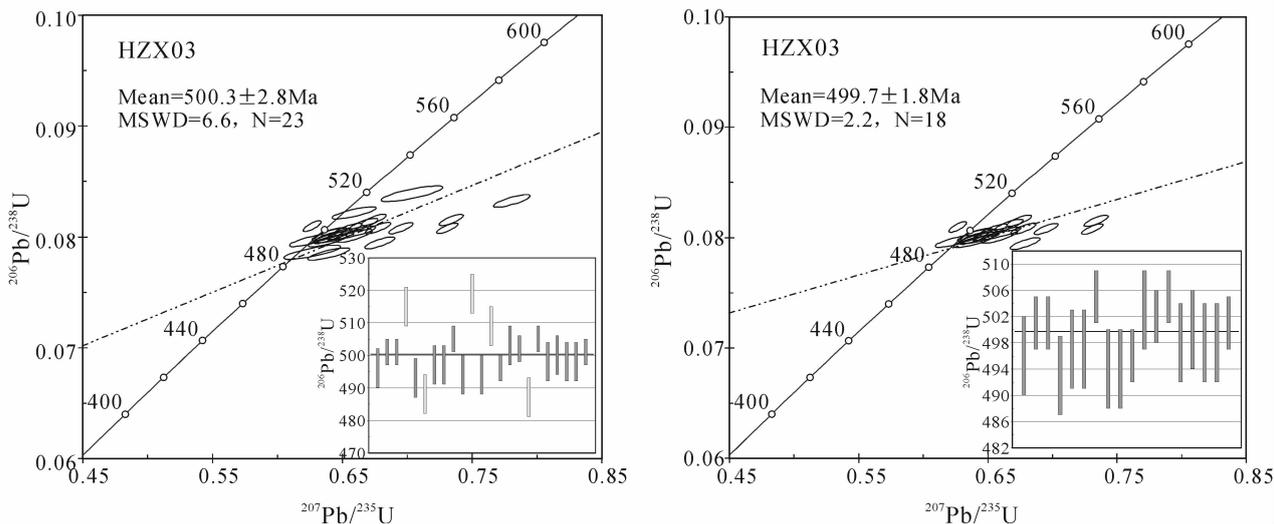


图6 关子镇蛇绿岩中变辉长岩(HZX03)LA-ICP-MS 锆石 U-Pb 年龄谱和图

Fig. 6 Zircon LA-ICP-MS U-Pb concordia diagram of sample from gabbros (sample HZX03) in the Guanzizhen Ophiolite

素年龄的地质意义单一而明确,即辉长岩的结晶年龄可以直接反映从地幔中部分熔融分离出来的时代,也即蛇绿岩或洋壳的形成时代(Dunning and Peterson,1988;简平等,2003a,2003b;闫全人等,2005,2006)。尽管有时辉长岩由于壳幔物质的相互作用而混染有少量继承锆石,但可以揭示更多岩石成因和构造环境方面的信息(简平等,2003a,2003b)。前人已对蛇绿岩中辉长岩的岩浆锆石利用 SHRIMP 和 LA-ICP-MS U-Pb 测年方法进行了蛇绿岩所代表的洋盆扩张时代的研究(简平等,2003a,2003b;史仁灯等,2004;史仁灯,2007;闫全人等,2005,2006;王冉等,2006;徐学义等,2006;杨钊等,2006),并取得了可靠的蛇绿岩形成时代的年代学证据。

本文关子镇蛇绿岩中辉长岩的 LA-ICP-MS 锆石 U-Pb 测年结果表明,以关子镇蛇绿岩为代表的西秦岭北缘古洋盆的扩张时代为 $499.7 \pm 1.8\text{Ma}$ 的晚寒武世期间。

天水地区关子镇蛇绿岩的北侧紧邻流水沟变质中基性岩浆杂岩,主要由变质的辉长岩-辉长闪长岩-闪长岩组成,其地球化学特征表明属于形成于岛弧环境的深成岩浆组合,而非蛇绿岩的组成部分(裴先治等,2005a,2005b,2007a,2007b,2007c)。其中在关子镇流水沟地区已经确定变质中基性岩浆杂岩的 TIMS 法锆石 U-Pb 同位素年龄为 $507.5 \pm 3.0\text{Ma}$ (裴先治等,2005a,2005b;Pei X Z, et al., 2007),辉长(闪长)岩的 LA-ICP-MS 锆石 U-Pb 同位素年

龄为 $471.1 \pm 1.4\text{Ma}$ ($\text{MSWD} = 1.03$) (杨钊等,2006),天水东南李子园地区百花基性—中基性岛弧型岩浆岩杂岩中辉长岩的 LA-ICP-MS 锆石 U-Pb 同位素年龄为 $449.7 \pm 3.1\text{Ma}$ ($\text{MSWD} = 1.9$) (裴先治等,2007c),表明西秦岭北带岛弧型岩浆岩的形成时代为奥陶纪,同时也间接限定了其南侧的关子镇蛇绿岩的形成时限为寒武纪,从而揭示出西秦岭北带以关子镇蛇绿岩为代表的古洋盆的扩张形成时代以及发生洋壳的俯冲作用及产生火山-岩浆岛弧的时限为奥陶纪。

已有的研究(宋志高等,1991a,1991b;张维吉等,1994;张国伟等,2001,2004;张本仁等,2002;陆松年等,2003,2004,2005;张宏飞等,2005,2006;张宗清等,1994,2006;裴先治等,1997,2004,2005a,2005b,2006,2007a,2007b,2007c;Zhang H F, et al., 2006;Pei X Z, et al., 2007)和野外地质调查表明,关子镇蛇绿岩带是东秦岭早古生代商丹古缝合带在西秦岭的西延部分,在天水地区是介于造山带基底杂岩秦岭岩群与南侧泥盆系沉积地层之间的一个复杂的、包括有不同成因岩块的构造混杂岩带。虽然众多的研究表明,东秦岭与西秦岭造山带在地壳组成和结构上具有很大的差异性(张国伟等,2001),但东秦岭地区的商丹蛇绿岩带仍然延伸到了西秦岭北缘天水地区,它们向西的进一步延伸可能与柴达木盆地北缘早古生代蛇绿岩带相连接,但需要进一步研究和对比。

天水地区关子镇蛇绿岩以及洋脊型拉斑玄武岩

(N-MORB)的厘定以及形成时代的确定,表明本区存在已消失的早古生代早期古洋壳岩石,是东秦岭商丹古洋盆在新元古代晚期—早古生代早期期间扩张过程中岩浆活动的产物(张维吉等,1994;张国伟等,2001,2004;张本仁等,2002;张宗清等,1994,2006;陆松年等,2003,2004,2005;裴先治等,2004,2005a,2005b,2006,2007a,2007c;Pei X Z, et al., 2007),是西秦岭北缘李子园—关子镇—武山蛇绿岩带的组成部分。这对于恢复重建秦岭造山带与祁连造山带之间的构造关系以及华北陆块与扬子陆块之间构造作用过程等均具有重要的大地构造意义。

致谢:研究工作得到西北大学张国伟院士和中国科学技术大学李曙光院士的热情指导;LA-ICP-MS 锆石 U-Pb 测年得到西北大学大陆动力学国家重点实验室的大力支持,柳小明博士、第五春荣博士在仪器测试和数据处理方面给予很大帮助,在此一并致谢!

注 释

① 裴先治,丁仁平,李勇,等. 2004. 天水市幅(148C002003)1:250000 区域地质调查(修测)成果报告. 长安大学地质调查研究院.

参 考 文 献

丁仁平,裴先治,李勇,胡波,赵欣,郭俊锋. 2004. 西秦岭天水地区“李子园群”的解体及其构造环境浅析. 地质通报, 23(12):1209~1214.

丁仁平,裴先治,刘会彬,李佐臣,孙仁奇,刘战庆,孟勇. 2006. 西秦岭天水地区新元古代花岗岩片麻岩的锆石 LA-ICP-MS 定年及其地质意义. 中国地质,33(6):1217~1225.

甘肃省地质矿产局. 1989. 甘肃省区域地质志. 北京:地质出版社,5~140.

冯益民,曹宣铎,张二朋,等著. 2002. 西秦岭造山带构造造山过程及动力学. 西安:西安地图出版社,1~263.

胡波,裴先治,丁仁平,杨吉,赵小明,李佐臣. 2005. 甘肃天水地区红土堡变基性岩的地球化学特征及其构造意义. 地质通报, 24(3):258~263.

简平,刘敦一,张旗,张福勤,石玉若,施光海,张履桥,陶华. 2003. 蛇绿岩及蛇绿岩中浅色岩的 SHRIMP U-Pb 测年. 地学前缘,10(4):439~456.

简平,刘敦一,孙晓猛. 2003. 滇川西部金沙江石炭纪蛇绿岩 SHRIMP 测年:古特提斯洋演化的同位素年代学制约. 地质学报, 77(2):1~13.

赖绍聪,张国伟,秦江锋,李永飞,刘鑫. 2006. 青藏高原东北缘伯阳地区第三系流纹岩地球化学及岩石成因. 地学前缘, 13(4):212~220.

刘会彬,裴先治,丁仁平,李佐臣,孙仁奇. 2006. 西秦岭天水市元龙地区新元古代花岗岩片麻岩锆石 LA-ICP-MS U-Pb 定年及其地质意义. 地质通报,25(11):1315~1320.

陆松年,李怀坤,陈志宏,等著. 2003. 秦岭中—新元古代地质演化及对 RODINIA 超级大陆事件的响应. 北京:地质出版社,1~194.

陆松年,陈志宏,李怀坤,郝国杰,周红英,相振群. 2004. 秦岭造山带中—新元古代(早期)地质演化. 地质通报, 23(2):107~112.

陆松年,陈志宏,李怀坤,郝国杰,相振群. 2005. 秦岭造山带中两条新元古代岩浆岩带. 地质学报, 79(2):165~173.

裴先治. 1997. 东秦岭商丹构造带的组成与构造演化. 西安:西安地图出版社,1~120.

裴先治,丁仁平,胡波,李勇,张国伟,郭俊锋. 2004a. 西秦岭天水地区关子镇蛇绿岩的厘定及其地质意义. 地质通报,23(12):1202~1208.

裴先治,丁仁平,胡波,李勇,郭俊锋,李佐臣. 2004b. 西秦岭天水地区新生代酸性火山岩地球化学特征及其构造意义. 岩石矿物学杂志,23(3):227~236.

裴先治,李勇,陆松年,陈志宏,丁仁平,胡波,李佐臣,刘会彬. 2005a. 西秦岭天水地区关子镇中基性岩浆杂岩锆石 U-Pb 同位素年龄及其地质意义. 地质通报,24(1):23~29.

裴先治,李佐臣,丁仁平,李勇,胡波,刘会彬. 2005b. 西秦岭天水地区岛弧型基性岩浆杂岩的地球化学特征及形成时代. 中国地质, 32(4):529~540.

裴先治,刘会彬,丁仁平,李佐臣,胡波,孙仁奇,侯育红. 2006. 西秦岭天水地区李子园群变质火山岩的地球化学特征及其地质意义. 大地构造与成矿学,30(2):193~205.

裴先治,孙仁奇,丁仁平,刘会彬,李佐臣,刘战庆,孟勇. 2007a. 陇东地区陶家店闪长岩 LA-ICP-MS 锆石 U-Pb 测年及其地质意义. 中国地质,34(1):8~16.

裴先治,丁仁平,张国伟,刘会彬,李佐臣,李王晔,刘战庆,孟勇. 2007b. 西秦岭北缘新元古代花岗岩片麻岩的 LA-ICP-MS 锆石 U-Pb 年龄及其地质意义. 地质学报,81(6):772~786.

裴先治,丁仁平,张国伟,刘会彬,李佐臣,李高阳,刘战庆,孟勇. 2007c. 西秦岭天水地区百花基性岩浆杂岩的 LA-ICP-MS 锆石 U-Pb 年龄及地球化学特征. 中国科学 D 辑:地球科学,37(增刊 1):224~234.

全国地层委员会. 2002. 中国区域年代地层(地质年代)表说明书. 北京:地质出版社,1~72.

史仁灯,杨经绥,吴才来,Wooden J. 2004. 北祁连玉石沟蛇绿岩形成于万震旦世是 SHRIMP 年龄证据. 地质学报,78(5):649~657.

史仁灯. 2005. 蛇绿岩研究进展、存在问题及思考. 地质论评,51(6):681~693.

史仁灯. 2007. 班公湖 SSZ 型蛇绿岩年龄对班—怒洋时限制约. 科学通报,52(2):223~227.

宋志高,张治洮,张莓,贾群子. 1991a. 陕、甘边界“牛头河群”的分解及其构造意义. 中国地质科学院西安地质矿产研究所所刊,第 31 号,1~14.

宋志高,贾群子,张治洮,张莓. 1991b. 北秦岭—北祁连(天水—宝鸡间)早古生代火山岩系及其构造连接关系的研究. 中国地质科学院西安地质矿产研究所所刊,第 34 号,1~82.

王冉,夏斌,周国庆,张玉泉,杨之青,李文铅,韦栋梁,钟立峰,徐力峰. 2006. 西藏吉定蛇绿岩中辉长岩 SHRIMP 锆石 U-Pb 年龄. 科学通报,51(1):114~117.

王希斌,鲍佩声,戎合. 1995. 中国蛇绿岩中变质橄榄岩的稀土元素地球化学. 岩石学报,11(增刊):24~41.

- 徐学义,李向民,马中平,夏林圻,夏祖春,彭素霞. 2006. 北天山巴音沟蛇绿岩形成于早石炭世:来自辉长岩 LA-ICPMS 锆石 U-Pb 年龄的证据. *地质学报*, 80(8):1168~1176.
- 闫全人,王宗起,刘树文,李秋根,张宏远,王涛,刘敦一,石玉若,简平,王建国,张德会,赵建. 2005. 西南三江提斯洋扩张与晚古生代东冈瓦那裂解:来自甘孜蛇绿岩辉长岩的 SHRIMP 年代学证据. *科学通报*, 50(2):158~166.
- 闫全人,王宗起,刘树文,石玉若,李秋根,闫臻,王涛,王建国,张德会,张宏远. 2006. 青藏高原东缘构造演化的 SHRIMP 锆石 U-Pb 年代学框架. *地质学报*, 80(9):1285~1294.
- 杨钊,董云鹏,柳小明,张津海. 2006. 西秦岭天水地区关子镇蛇绿岩锆石 LA-ICP-MS U-Pb 定年. *地质通报*, 25(11):1321~1325.
- 吴元保,郑永飞. 2004. 锆石成因矿物学研究及其对 U-Pb 年龄解释的制约. *科学通报*, 49(16):1589~1604.
- 夏林圻,夏祖春,任有祥,等著. 1991. 祁连-秦岭山系海相火山岩. 武汉:中国地质大学出版社,1~304.
- 袁洪林,吴福元,高山,柳小明,徐平,孙德有. 2003. 东北地区新生代侵入体的锆石激光探针 U-Pb 年龄测定与稀土元素成分分析. *科学通报*, 48(14):1511~1520.
- 张本仁,高山,张宏飞,韩吟文,等著. 2002. 秦岭造山带地球化学. 北京:科学出版社,1~187.
- 张国伟,张本仁,袁学诚,肖庆辉,著. 2001. 秦岭造山带与大陆动力学. 北京:科学出版社,1~855.
- 张国伟,郭安林,姚安平. 2004. 中国大陆构造中的西秦岭—松潘大陆构造结. *地学前缘*, 11(3):23~32.
- 张宏飞,靳兰兰,张利, Nigel Harris, 周炼,胡圣虹,张本仁. 2005. 西秦岭花岗岩类地球化学和 Pb-Sr-Nb 同位素组成对基底性质及其构造属性的限制. *中国科学(D辑)*, 35(10):914~926.
- 张宏飞,靳兰兰,张利,袁洪林,周炼,张本仁. 2006. 基底岩系和花岗岩类 Pb-Nb 同位素组成限制祁连山带的构造属性. *地球科学—中国地质大学学报*, 31(1):57~65.
- 张旗,周国庆. 2001. 中国蛇绿岩. 北京:地质出版社,1~182.
- 张维吉,孟宪陶,胡健民,裴先治,樊双虎,等著. 1994. 祁连—北秦岭造山带接合部位构造特征与造山过程. 西安:西北大学出版社,1~283.
- 张宗清,刘敦一,付国民. 1994. 北秦岭变质地层同位素年代研究. 北京:地质出版社,1~191.
- 张宗清,张国伟,刘敦一,王宗起,唐索寒,王进辉. 2006. 秦岭造山带蛇绿岩、花岗岩和碎屑沉积岩同位素年代学和地球化学. 北京:地质出版社,1~348.
- Anderson T. 2002. Correction of common Pb in U-Pb analyses that do not report ^{204}Pb . *Chemical Geology*, 192:59~79.
- Boynton W V. 1984. Geochemistry of the rare earth elements: meteorite studies. In: Henderson P (ed.). *Rare Earth Element Geochemistry*. Elsevier Science Publishers B. V., 63~114.
- Coleman R G. 1977. *Ophiolites: Ancient Oceanic Lithosphere*. Berlin: Springer-Verlag, 1~140.
- Dunning G R, Peterson R P. 1988. U/Pb ages of ophiolites and arc-related cratons of the Norwegian Caledonides; Implications for the development of impetus. *Contribution to Mineralogy and Petrology*, 98:12~23.
- Frey F A. 1984. Rare earth element abundance in upper mantle rocks. In: Henderson P (ed.). *Rare Earth Element Geochemistry*. Elsevier Science Publishers B. V., 153~203.
- Ludwig K R. 2003. *Isoplot/Ex version 2.49. A Geochronological Toolkit for Microsoft Excel*. Berkeley: Berkeley Geochronology Center Special Publication No. 1a, 1~56.
- Melcher F, Meisel T, Puhl J, Koller F. 2002. Petrogenesis and geotectonic setting of ultramafic rocks in the Eastern Alps: constrains from geochemistry. *Lithos*, 65:69~112.
- Yuan H L, Wu F Y, Gao S, Liu X M, Xu P, Sun D Y. 2003. Determination of U-Pb age and rare earth element concentration of zircons from Cenozoic intrusions in northeastern China by laser ablation ICP-MS. *Chinese Science Bulletin*, 48(22):2411~2421.
- Yuan H L, Gao S, Liu X M, Li H M, Gunther D, Wu F Y. 2004. Accurate U-Pb age and trace element determinations of zircon by laser ablation-inductively coupled plasma-mass spectrometry. *Geostandards and Geoanalytical Research*, 28(3):353~370.
- Pei Xianzhi, Li Zuochen, Liu Huibin, Li Gaoyang, Ding Saping, Li Yong, Hu Bo, Guo Junfeng. 2007. Geochemical characteristics and zircon U-Pb isotopic ages of island-arc basic igneous complexes from the Tianshui area in West Qinling. *Frontier of Earth Science in China*, 2(1):49~59.
- Pearce J A. 1982. Trace element characteristics of lavas from destructive plate boundaries. In: Thorpe R S (ed), *Andesite*. Chichester: Wiley, 525~548.
- Saunders A D. 1984. The rare element characteristics of igneous rocks from the ocean basins. In: Henderson P (ed.). *Rare Earth Element Geochemistry*. Elsevier Science Publishers B. V., 205~236.
- Sun S S, McDonough W F. 1989. Chemical and isotopic systematics of oceanic basalts: implications for mantle composition and processes. In: Saunders A D, Norry M J, (eds). *Magmatism in the Ocean Basin*. Geological Society Special Publication, 42:313~345.
- Vavra G, Gebauer D, Schmid R. 1996. Multiple zircon growth and recrystallization during polyphase Late Carboniferous to Triassic metamorphism in granulites of the Ivrea Zone (Southern Alps): An ion microprobe (SHRIMP) study. *Contribution to Mineralogy and Petrology*, 122:337~358.
- Vavra G, Schmid R, Gebauer D. 1999. Internal morphology, habit and U-Th-Pb microanalysis of amphibole to granulite facies zircon: Geochronology of the Ivrea Zone (Southern Alps). *Contribution to Mineralogy and Petrology*, 134:380~404.
- Zhang H F, Zhang B R, Nigel Harris, Zhang L, Chen Y L, Chen N S, Zhao Z D. 2006. U - Pb zircon SHRIMP ages, geochemical and Sr - Nd - Pb isotopic compositions of intrusive rocks from the Longshan - Tianshui area in the southeast corner of the Qilian orogenic belt, China: Constraints on petrogenesis and tectonic affinity. *Journal of Asian Earth Sciences*, 27:751~764.

LA-ICP-MS Zircon U-Pb Dating of the Gabbro from the Guanzizhen Ophiolite in the Northern Margin of the Western Qinling and Its Geological Significance

PEI Xianzhi, DING Saping, LI Zuochen, LIU Zhanqing, LI Gaoyang, LI Ruibao, WANG Fei, LI Fujie
Key Laboratory of Western Geological Resources and Geological Engineering of Ministry of Education, College of Earth Sciences and Resources, Chang'an University, Xi'an, 710054

Abstract

The Guanzizhen ophiolite in the Tianshui area, located in the northern margin of the western Qinling, is composed of metamorphic basic volcanic rock and massive rocks such as serpentinite, metapyroxenite and metagabbro. The geochemical features of metamorphic basic volcanic rock show its N-type MORB, indicating that the Guanzizhen ophiolite is the remains of the oceanic ridge ophiolite. LA-ICP and MS zircon U-Pb dating of gabbro from the Guanzizhen ophiolite suggests an isotopic age of 499.7 ± 1.8 Ma (MSWD = 2.2), which indicates that the Guanzizhen ophiolite was the product of magmatic activity during the process of extension of Liziyuan-Guanzizhen-Wushan ocean basin along the northern margin of the Western Qinling in the late Cambrian, and was a component of the Shangda paleobasin during Paleocene which extended westward along the northern margin of the Qinling orogenic belt.

Key words: ophiolite; gabbro; LA-ICP-MS; zircon U-Pb age; late Cambrian; Tianshui area; Western Qinling