

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

裴先治¹ 李佐臣¹ 丁仁平^{1,2} 李 勇¹ 胡 波¹ 刘会彬¹

(1. 长安大学地球科学与国土资源学院, 陕西 西安 710054; 2. 甘肃省地质调查院, 甘肃 兰州 730000)

摘要:天水地区关子镇流水沟变质中基性岩浆杂岩主要由变质辉长岩—辉长闪长岩—闪长岩组成, 百花变质岩浆杂岩主要由辉石岩—辉长(闪长)岩—闪长岩—石英闪长岩组成, 构成较完整的同源岩浆演化序列。基性—中基性岩浆岩的地球化学特征表明其属于拉斑玄武岩系列, 稀土元素分布型式呈 REE 近平坦型—LREE 轻微富集型, 微量元素原始地幔标准化的蛛网图和 MORB 标准化蛛网图上的分布型式总体很相似, 富集大离子亲石元素(LILE)Cs、Ba、Sr、Th、U 而相对亏损 Rb、K 和高场强元素(HFSE)Nb、P、Zr、Sm、Ti 和 Y, 显示同源岩浆演化成因特征。微量元素构造环境判别显示其形成于岛弧构造环境。关子镇流水沟变质中基性岩浆杂岩的 TIMS 法锆石 U—Pb 同位素年龄为(507.5±3.0)Ma, 代表了杂岩体的形成时代, 表明西秦岭北带岛弧型岩浆岩的形成时代为晚寒武世, 同时也揭示出以关子镇蛇绿岩为代表的古洋盆的俯冲作用及产生岛弧型岩浆活动的时限可能为晚寒武世—早奥陶世。

关键词:基性岩浆杂岩; 地球化学; 岛弧环境; 锆石 U—Pb 年龄; 早古生代; 天水地区; 西秦岭

中图分类号: P588 .12, P597+.3 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-3657(2005)04-0529-12

西秦岭天水地区地处青藏高原东北缘, 其大地构造位置处于中央造山系中段祁连造山带和北秦岭造山带的接合部位, 同时也横跨在中国中部南北向构造带上, 是古亚洲构造域、特提斯构造域和滨太平洋构造域复合叠加的构造部位。由于该地区处于祁连造山带和秦岭造山带的衔接、过渡、转换、交接部位, 它与两造山带之间既有相似或共同之处, 也有许多差异与独特之处, 这对于深入研究华北板块与扬子板块之间聚合与离散的多期复合造山过程、造山带接合部位组成、结构、构造、演化与造山机制的转换以及造山过程与动力学等一系列涉及中国大陆大地构造格架及其演化、大陆造山带和大陆动力学等重大基础地质问题, 具有十分重要的科学意义。

前人曾进行西秦岭天水地区有关区域地层和大地构造等方面的开创性研究工作, 为本次研究奠定了良好基础^[1-3]。关子镇流水沟—双场下一带以及百花—利桥一带分布有较多的加里东期中基性杂岩体、花岗岩类和印支期花岗岩类以及元古宙—早古生代中深变质岩系。近年在进行天水市幅 1:25 万区域地质调查过程中, 于关子镇流水沟—双场下一带原划分

为古元古界秦岭岩群/牛头河群或震旦系—早古生代李子园群变质地层中以及百花林场一带原划分为中元古界宽坪岩群变质地层中^[4], 新发现并识别出一套发育强烈定向组构的变质辉石岩—辉长岩—辉长闪长岩单元, 后者与分布于百花—利桥一带原称为“百花岩体”的闪长岩—石英闪长岩等单元共同组成了“百花岩浆杂岩体”。由于这些变质岩浆杂岩体普遍经历了较强烈的韧性构造变形和变质作用改造, 致使人们长期以来按照变质地层划归为不同的构造岩石地层单位, 影响了对西秦岭北部造山带组成、结构构造和形成演化的正确认识。根据区域地质填图资料将这些变质深成杂岩体从原划分变质地层单位中分别解体出来, 前者称为“流水沟中基性杂岩体”, 后者称为“百花基性杂岩体”(图 1)。笔者初步报道了新发现的这些变质基性杂岩体的地球化学资料和年代学资料, 并对其形成的构造环境和大地构造意义进行了初步探讨。

1 区域地质背景

天水关子镇地区流水沟中基性岩浆杂岩体主要分布于

收稿日期: 2005-02-17; 改回日期: 2005-06-15

基金项目: 国家自然科学基金项目(40234041, 40572121)、教育部科学技术研究重点项目(104175)和中国地质调查局地质大调查项目(200013000154)资助。

作者简介: 裴先治, 男, 1963 年生, 博士, 教授, 主要从事构造地质学和区域地质学研究; E-mail: peixzh@sina.com。

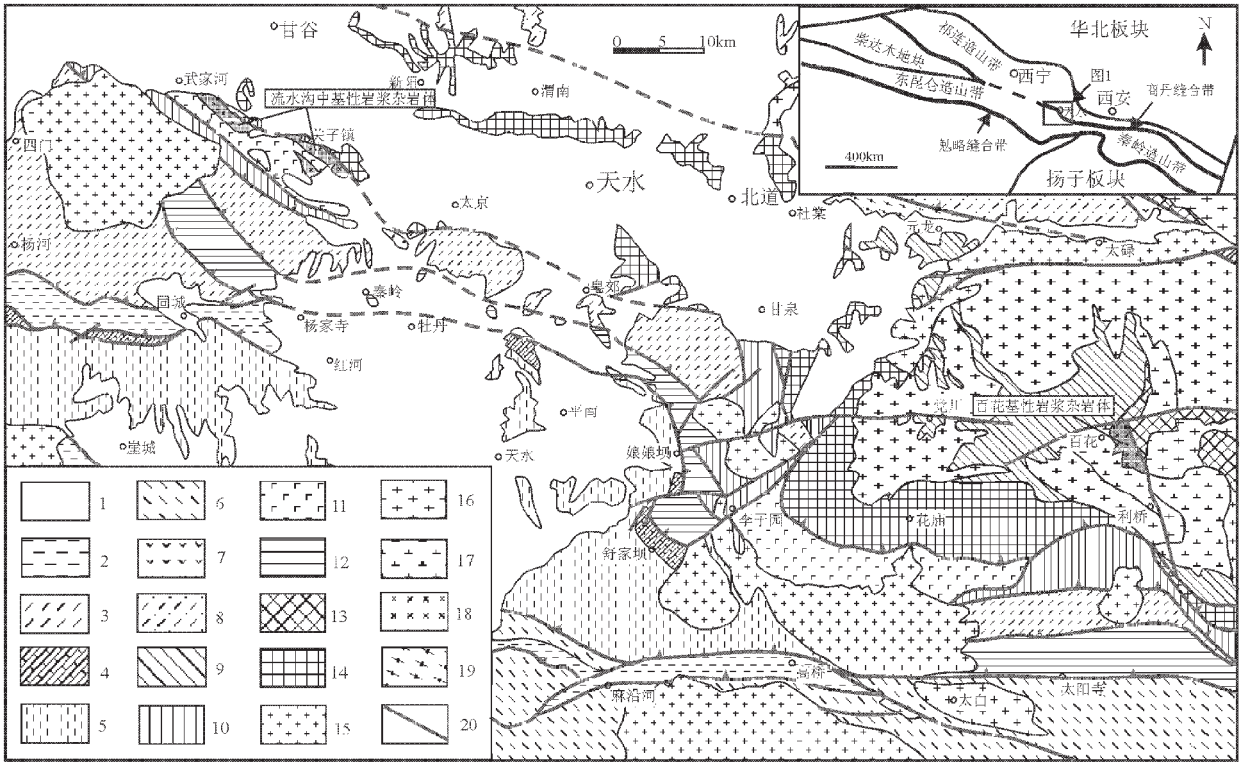


图1 西秦岭天水地区地质略图

- 1—中—新生界;2—石炭系;3—上泥盆统大草滩群;4—中泥盆统舒家坝群灰岩单位;5—中泥盆统舒家坝群浊积岩单位;
- 6—中上泥盆统西汉水群;7—下古生界红土堡基性火山岩;8—下古生界葫芦河群变质碎屑岩;9—下古生界草滩沟群;
- 10—下古生界李子园群;11—下古生界关子镇蛇绿岩;12—下古生界太阳寺岩组;13—中元古界宽坪岩群;14—古元古界秦岭岩群;
- 15—印支期花岗岩;16—晚加里东期—早海西期花岗岩;17—加里东期闪长岩—石英闪长岩;18—早古生代变形辉长岩—辉长闪长岩;
- 19—变形花岗岩体;20—逆冲断层/断层

Fig.1 Geological sketch map of the Tianshui area, West Qinling

- 1—Meso—Cenozoic;2—Carboniferous;3—Upper Devonian Dacatouan Group;4—Middle Devonian Shujiaba Group limestone unit;
- 5—Middle Devonian Shujiaba Group turbidite unit;6—Middle—Upper Devonian Xihanshui Group;7—Lower Paleozoic Hongtubao basic volcanic rocks;8—Lower Paleozoic Huluhe Group meta-detrital rock;9—Lower Paleozoic Caotangou Group;
- 10—Lower Paleozoic Liziyuan Group;11—Lower Paleozoic Guanzizhen ophiolite;12—Lower Paleozoic Taiyangsi Formation;
- 13—Mesoproterozoic Kuanping Group;14—Paleoproterozoic Qinling Group;15—Indosinian granitoids;16—Late Caledonian—early Hercynian granitoids;17—Caledonian diorite—quartz diorite;18—Early Paleozoic deformed gabbro—gabbro diorite;19—Deformed granite;20—Thrust and faults

天水市以西的关子镇长沟—流水沟、甘谷双场—武山武家河一线,岩体形态为不规则状,呈 NWW—SEE 向延伸,东西两端及中部被新生代地层所覆盖。东北侧与古元古界秦岭岩群片麻岩和大理岩单位呈构造接触关系,使杂岩体向北韧性逆冲于古元古界秦岭岩群之上;西南侧与早古生代关子镇蛇绿岩单位(由具 N—MORB 特征的变质基性火山岩和蛇纹岩、变辉石岩、变辉长岩构造块体组成)呈构造接触关系^[4],其间也发育韧性剪切变形带,致使两者发育的构造面平行一致,在不同地段向南或北陡倾。在双场一带还有与印支期温泉花岗岩体岩性完全相同的糜棱岩化浅肉红色中粗粒似斑状二长花岗岩体侵入于中基性岩浆杂岩体中。

天水百花—利桥地区的百花基性岩浆杂岩体主要分布于天水北道区利桥乡以北的百花林场—散岔一带,岩体形态为不规则状,受后期新岩体的上侵挤位和吞蚀,形态更为复杂。区域内百花杂岩体总体呈 NW 走向,东北侧与中元古界宽坪岩群黑云母斜长片麻岩和大理岩以及泥盆纪仙坪二长花岗岩体相邻,西北侧与早古生代草滩沟群浅变质岛弧型火山岩—沉积岩系呈侵入接触关系,西南侧与泥盆纪熊山沟中粗粒似斑状二长花岗岩体侵入并呈断层接触关系。杂岩体南侧由北向南分布有古元古界秦岭岩群长英质片麻岩和富铝片麻岩及大理岩、关子镇—木其滩蛇绿岩残片(蛇纹岩片、变质基性火山岩)、早古生代李子园群云母石英片岩夹大理岩、

绿片岩组合以及晚泥盆世大草滩群含砾碎屑岩系,其间均为构造接触关系。根据 1:5 万区域地质调查资料,百花杂岩体侵入于宽坪岩群、奥陶纪草滩沟群变质地层中,后被泥盆纪仙坪花岗岩体(Rb-Sr 全岩等时年龄 396 Ma)侵入,故其时代可限定为早古生代。

2 岩浆杂岩的岩石学特征

2.1 流水沟变质中基性岩浆杂岩体

通过野外地质填图和综合分析,关子镇流水沟变质中基性杂岩体可分出 3 种岩石类型:变辉长岩、变辉长闪长岩和变闪长岩。由于岩石已经历较强的变形变质作用改造,普遍发育强烈的定向组构,原生矿物组合基本已被变质矿物组合所取代,但各岩性单位之间的界限仍表现清楚,且在变形较弱地带仍能看到岩石具有变余辉长结构等岩浆组构,表现为暗色矿物角闪石集合体具有辉石形态特征,还有细粒辉石岩、辉长岩等扁豆体状或透镜体状暗色包体(图 2),长一般 10~20 cm,宽 4~12 cm,长轴方向与矿物定向排列方向一致。镜下主要矿物由斜长石、角闪石、绿帘石、石英以及少量绿泥石、绢云母等的不等量组成。副矿物主要是榍石、锆石、磁铁矿、磷灰石。矿物粒径一般为 0.5~2.5 mm,中细粒柱状变晶结构,片麻状构造。主要矿物角闪石及斜长石呈集合体强烈定向排列,局部发育成糜棱岩的组构特点。

2.2 百花变质岩浆杂岩体

通过野外调研和综合分析,百花变质岩浆杂岩体可分出 5 种岩石类型:①变辉石岩:大部分呈大小不等的块体包裹

在辉长岩中,变形较弱,主要由角闪石(90%~94%)和斜长石组成,中—中细粒自形—半自形粒状结构,块状—弱片麻状构造,角闪石大部分保留有辉石的短柱状晶形;②变辉长岩—辉长闪长岩:与变辉石岩共同分布于百花林场东—枣儿坪一带。岩石发育定向组构,主要由角闪石(48%~74%)、斜长石(25%~48%)及少量黑云母组成,中粗粒—中细粒半自形粒状结构、变余辉长结构,局部变形弱域角闪石尚保留有辉石假象;③变闪长岩:分布于阴崖东—百花—利桥一带,主要由角闪石(20%~35%)、斜长石(55%~60%)、黑云母(2%~12%)及少量石英组成,半自形中粗粒粒状结构,内部常见有辉长岩包体,形态呈扁豆体、透镜体状,大小不等,并呈定向排列,长轴方向与矿物定向排列方向一致;④石英闪长岩:主要分布于利桥南—杨河—下仙坪一带。主要由角闪石(15%~25%)、斜长石(40%~67%)、石英(5%~15%)及少量黑云母、钾长石组成,半自形—他形中细粒—中粗粒粒状结构,内部也常见辉长岩等包体;⑤黑云母斜长花岗岩:主要分布于利桥南龙门—周家沟一带,中粒似斑状结构,块状构造—弱片麻状构造,斑晶小于 5%,以板状斜长石为主,少量浑圆状石英;基质主要由斜长石(45%~65%)、石英(20%~35%)、黑云母(5%±)组成。这一系列岩浆岩组合具有岛弧型岩浆活动特点。由于岩石也已经历较强的韧性剪切变形和变质作用改造,普遍发育强烈的定向组构,原生矿物组合基本已被变质矿物组合所取代,但在变形较弱地带仍能看到岩石具有变余辉长结构等岩浆组构,表现为暗色矿物角闪石集合体具有辉石形态特征,在闪长岩、石英闪长岩中还有中细粒辉石岩、辉长岩等暗

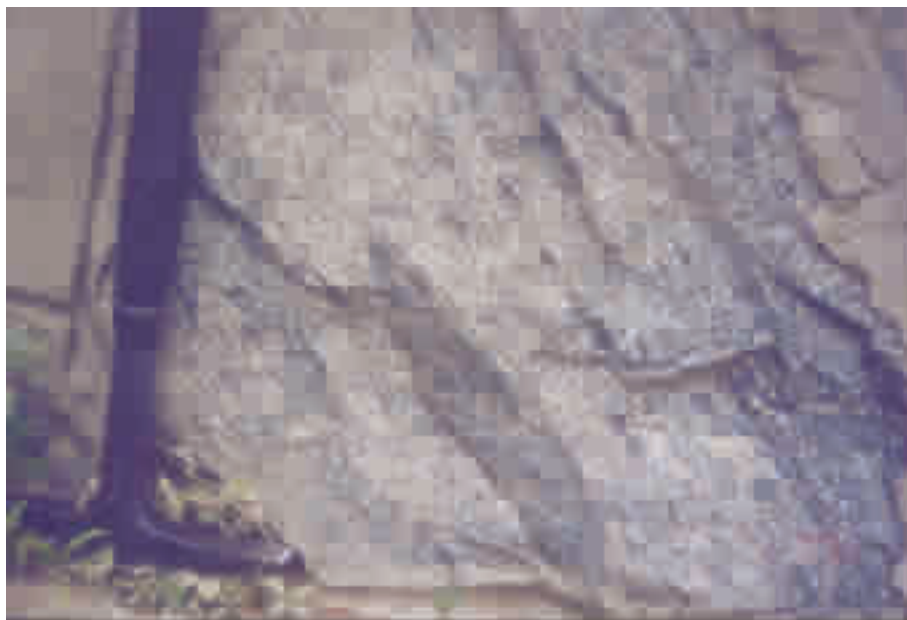


图 2 天水关子镇赵家磨南变质辉长闪长岩中暗色辉长岩变形包体及其定向组构

Fig.2 Deformed enclaves and oriented fabrics of dark-colored gabbro in the Zhaojiamuo metagabbro diorite at Guanzizhen, Tianshan

表1 天水流水沟中基性岩浆杂岩和百花基性岩浆杂岩的常量元素(%)、稀土和微量元素($\mu\text{g/g}$)成分
 Table 1 Major element(%), REE and trace element ($\mu\text{g/g}$) compositions of the Liushuigou intermediate-basic igneous complex and Baihua basic igneous complex from Tianshui, West Qinling

样品号	5022/1	5019/2	5325/1	5116/1	5116/2	5116/3	5116/4	5116/5
岩体名称	流水沟杂岩体			百花杂岩体				
岩石名称	变辉长岩	变辉长闪长岩	变闪长岩	变辉石岩	变辉石岩	中粗粒变辉长岩	中细粒变辉长岩	细粒变辉长岩
产地	流水沟	双场下	韩家沟	枣儿坪	枣儿坪	枣儿坪	枣儿坪	枣儿坪
SiO ₂	52.47	55.94	61.74	45.18	43.08	48.32	52.48	46.10
TiO ₂	0.88	0.37	0.30	0.30	0.24	0.25	0.76	0.84
Al ₂ O ₃	17.73	15.86	14.42	11.71	13.83	15.45	17.29	17.24
Fe ₂ O ₃	3.76	2.57	2.02	5.94	4.29	3.02	3.62	4.65
FeO	5.96	7.99	5.18	6.08	6.64	5.00	6.98	8.00
CaO	11.76	8.86	9.60	10.24	10.84	11.93	9.55	11.92
MgO	3.92	4.86	3.80	16.09	16.00	11.90	5.07	7.52
MnO	0.247	0.176	0.08	0.19	0.17	0.16	0.18	0.23
K ₂ O	0.20	0.19	0.10	0.29	0.14	0.12	0.19	0.15
Na ₂ O	1.52	1.96	1.59	1.02	0.84	0.83	1.75	1.46
P ₂ O ₅	0.416	0.061	0.04	0.08	0.05	0.05	0.11	0.16
灼失	0.90	1.04	0.68	2.28	3.36	2.12	0.56	0.76
总量	99.763	99.877	99.55	99.40	99.48	99.15	98.54	99.03
FeO*	9.34	10.30	7.00	11.42	10.50	7.71	10.23	12.18
Mg [#]	53.96	52.01	56.65	82.50	81.11	80.92	56.41	62.61
Cr	9.10	72.1	50.6	478	427	362	32.0	26.2
Ni	10.0	18.1	16.2	234	222	124	9.25	10.5
Co	22.1	27.6	17.4	69.6	68.8	40.4	27.6	39.0
Rb	8.0	6.4	3.95	8.50	4.60	3.95	3.90	2.50
Cs	4.8	4.6	2.85	1.75	1.55	1.30	1.25	1.35
Sr	390	84	176	115	244	251	302	812
Ba	61	34	138	349	58.2	63.2	98.1	675
V	330	280	199	191	123	147	294	393
Sc	21	44		36.8	32.4	48.4	43.9	61.8
Nb	8.9	1.4	1.38	1.05	1.07	1.04	2.21	2.70
Ta	1.2	0.5	0.5	0.5	0.5	0.5	0.67	0.83
Zr	84	51	42.7	48.0	39.8	40.8	62.3	59.8
Hf	2.7	1.5	1.37	1.87	1.50	1.43	2.05	2.27
U	2.0	1.4	1.33	1.00	1.16	1.00	1.13	1.00
Th	5.0	1.7	3.34	1.74	0.12	0.96	0.56	0.68
Y	22.8	8.76	8.26	4.85	4.03	8.96	19.8	22.4
La	21.3	1.96	3.65	3.23	1.5	2.00	7.19	5.66
Ce	35.2	4.73	6.24	4.49	2.22	3.68	15.2	13.6
Pr	4.35	0.89	0.88	0.5	0.25	0.71	2.21	2.15
Nd	19.6	3.53	3.35	2.67	1.89	3.72	10.70	11.9
Sm	4.10	1.05	1.13	0.73	0.61	1.16	3.18	3.73
Eu	1.35	0.36	0.33	0.28	0.25	0.38	0.90	1.07
Gd	4.61	1.15	1.26	0.98	0.78	1.48	3.52	3.99
Tb	0.74	0.23	0.24	0.18	0.14	0.25	0.62	0.74
Dy	4.83	1.66	1.66	1.24	0.99	1.90	4.29	5.48
Ho	0.96	0.39	0.43	0.25	0.21	0.40	0.93	1.08
Er	2.74	1.17	1.26	0.64	0.65	1.25	2.82	3.42
Tm	0.42	0.18	0.18	0.092	0.09	0.19	0.44	0.48
Yb	2.50	1.17	1.17	0.61	0.47	1.11	2.57	3.08
Lu	0.33	0.15	0.20	0.096	0.086	0.16	0.36	0.43
LREE/HREE	5.01	2.05	2.43	2.91	1.97	1.73	2.53	2.04
REE	103.03	18.62	21.98	15.99	10.14	18.39	54.93	56.81
(La/Yb) _n	5.61	1.10	2.06	3.49	2.10	1.19	1.84	1.21
(Ce/Yb) _n	3.59	1.03	1.36	1.88	1.21	0.85	1.51	1.13
δEu	0.95	1.01	0.85	1.02	1.12	0.90	0.83	0.85

注:由中国地质调查局宜昌地质矿产研究所岩矿测试中心分析。

色包体。各岩性单位之间界线截然。副矿物主要是榍石、锆石、磁铁矿、磷灰石。笔者重点研究其中的基性岩浆岩部分(变辉石岩、变辉长岩)。

3 岩浆杂岩的地球化学特征和形成构造环境

选择天水关子镇流水沟中基性岩浆杂岩变辉长岩、变辉长闪长岩、闪长岩和百花岩浆杂岩中的变辉石岩、变辉长(闪长)岩的新鲜岩石样品进行分析测试(表 1)。常量元素用常规湿法、容量法分析,其中灼失用重量法分析,微量元素和稀土元素用电感耦合等离子发射光谱法(ICP-AES)分析。常量元素的分析精度(相对标准差)一般小于 1%,微量元素和稀土元素分析精度优于 5%。

3.1 流水沟变质中基性岩浆杂岩

岩石的 SiO_2 含量为 52.47%~61.74%, TiO_2 含量较低,为 0.30%~0.88%, 低于 MORB 和 OIB, 而与岛弧玄武岩接近。 $\text{Mg}^\#$ 值($\text{MgO}/(\text{MgO}+\text{FeO}) \times 100$ 的摩尔比)较低,为 52.01~56.65, 反映了岩浆经历了一定程度的结晶分异作用的演化。全铁 FeOT 含量变化于 7.00%~10.30% 之间, 全碱 ALK ($\text{Na}_2\text{O}+\text{K}_2\text{O}$) 为 1.69%~2.12%, 且 $\text{Na}_2\text{O} > \text{K}_2\text{O}$ 含量, K_2O 含量低(0.10%~0.20%), 显示出富钠低钾, 属于低钾系列。岩石在 TAS 分类图解^[15,19](图 3-a)上落入辉长岩、辉长闪长岩和闪长岩区域, 并具有亚碱性系列特征。在 $\text{TiO}_2-\text{Zr}/\text{P}_2\text{O}_5/10000$ 图解^[7](图 3-b)和 AFM 图解(图 3-c)上均表明为拉斑玄武岩系列。

岩石的稀土元素分布型式呈 REE 近平坦型—LREE 略富集型(图 4-a), LREE 相对 HREE 略微富集, 稀土元素总量为 $\sum \text{REE} = (18.62 \sim 103.03) \mu\text{g}/\text{g}$, LREE/HREE 比值为 2.05~5.01, (La/Yb)_n = 1.10~5.61, (La/Sm)_n = 1.13~3.16, δEu 为 0.85~1.01, 具有很弱的负 Eu 异常—无异常。与岛弧型火山岩的稀土元素配分型式相似^[18,19]。

在岩石微量元素原始地幔标准化的蛛网图上(图 4-b), 显示富集大离子亲石元素(LILE)Cs、Ba、Sr、Th、U, 相对亏损 Rb 和高场强元素(HFSE)Nb、P、Sm、Ti 和 Y, 类似于低钾岛

弧拉斑玄武岩。在岩石微量元素 MORB 标准化蛛网图上(图 4-c), 显示出 Th 的明显富集和不相容元素的富集以及 K、Nb、P、Ti、Cr 的亏损, 略具有 Ba、Sc 的正异常, 具有岛弧拉斑玄武岩和钙碱性玄武岩特征^[20,21]。特别是 Nb 的负异常是岛弧火山岩的显著标志, 反映了板块俯冲环境中岩浆岩的典型特征^[9]。变辉长岩和变辉长闪长岩的 Zr 含量为(51~84) $\mu\text{g}/\text{g}$, 与岛弧低钾拉斑玄武岩 Zr 含量接近, Zr/Y 比值为 3.68~5.83, 与岛弧玄武岩和洋脊玄武岩接近; Ti/Y 比值为 231~253, Ti/V 比值为 7.93~16.00, Nb/Y 比值为 0.16~0.39, 与岛弧玄武岩相近; Th/Ta 比值为 3.40~4.17, 明显 > 2, 属于岛弧玄武岩范围^[9]。变闪长岩的 Th 含量为 3.34 $\mu\text{g}/\text{g}$, La 含量为 3.65 $\mu\text{g}/\text{g}$, La/Yb 比值为 3.12, Zr/Y 比值为 5.17, Ti/V 比值为 9.05, Ti/Zr 比值为 42.15, 与岛弧安山岩的微量元素特征非常类似^[19,23]。在 Ti-Zr-Y 图解、Ti-Zr-Sr 图解^[24]和 La-Y-Nb 图解^[25]上样品主要落在岛弧玄武岩区(图 5)。在 Ba/Nb-Ba 图解、La/Nb-La 图解^[26]和 Ti-V 图解^[27]均落在岛弧玄武岩(VAB)区域(图 6), 并且显示 La/Nb 明显 > 1 (为 1.40~3.08), 明显不同于 MORB 和 OIB。

上述岩石的地球化学特征表明, 天水地区关子镇流水沟中基性岩浆杂岩中各类火成岩均表现出岛弧火山岩的地球化学特征, 揭示出其总体形成于古岛弧构造环境, 是岛弧岩浆分异结晶作用的产物, 而不属于岛弧岩浆杂岩南侧分布的具有 N-MORB 特征的关子镇蛇绿岩的组成部分^[14]。

3.2 百花变质基性岩浆杂岩

变辉石岩的 SiO_2 含量为 43.08%~45.18%, TiO_2 含量较低, 为 0.24%~0.30%, 低于 MORB 和 OIB, 而与岛弧玄武岩接近。 MgO 含量和 $\text{Mg}^\#$ 值较高, 分别为 16.00%~16.09% 和 81.11~82.50, 反映存在辉石的堆晶作用。全铁 FeOT 含量变化于 10.50%~11.42%, 全碱 ALK 为 0.98%~1.31%, 且 $\text{Na}_2\text{O} > \text{K}_2\text{O}$ 含量, 显示出富钠低钾。变辉长(闪长)岩 SiO_2 含量为 46.10%~52.48%, TiO_2 含量较低, 为 0.25%~0.84%, 低于 MORB 和 OIB, 也与岛弧玄武岩接近, 反映其源区可能与俯冲到深部的洋壳有关。 MgO 含量和 $\text{Mg}^\#$ 值较高且变化大, 分

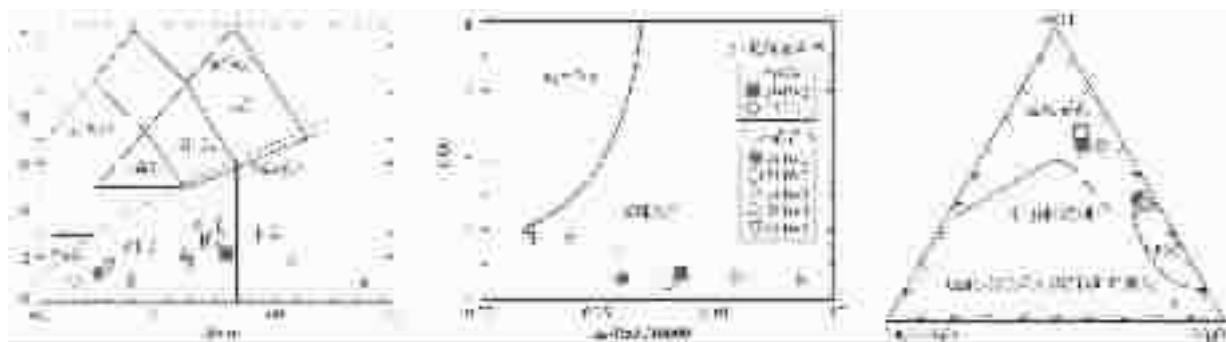


图 3 天水地区基性—中基性岩浆杂岩的分类图解(据参考文献[12~14])

Fig.3 Diagrams of basic and intermediate-basic igneous complexes in the Tianshui area (after [15~17])

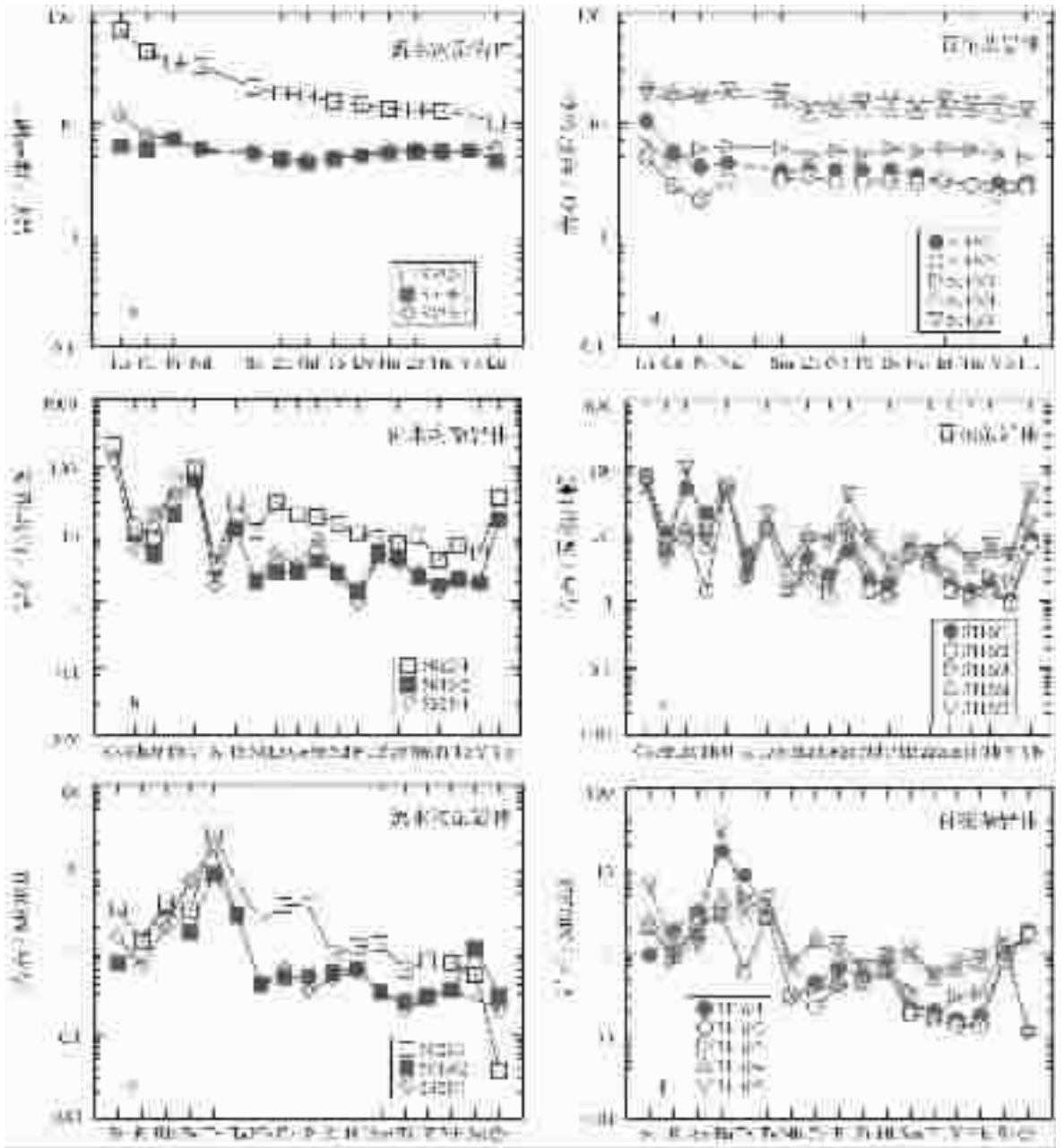


图 4 天水地区基性—中基性岩浆杂岩的球粒陨石标准化 REE 型式(a,d)、原始地幔标准化(b,e)和 MORB 标准化(c,f)微量元素蛛网图(球粒陨石标准化数据据 Boynton, 1984;原始地幔标准化数据据 McDonough 等, 1992; MORB 标准化数据据 Pearce 等, 1982;转引自[28])

Fig. 4 Chondrite-normalized REE patterns (a,d) and primitive mantle-normalized (b, e) and MORB-normalized (c, f) trace element spidergrams for basic and intermediate-basic igneous complexes in the Tianshui area (chondrite-normalized data after Boynton, 1984; mantle-normalized data after McDonough et al., 1992; MORB-normalized data after Pearce et al., 1982)

别为 5.07%~11.90%和 56.41~80.92,反映原始岩浆在上升过程中经历了一定程度的结晶分异作用的演化。全铁 FeOT 含量变化于 7.71%~12.18%,全碱 ALK 为 0.95%~1.95%,且 Na₂O>K₂O 含量,显示出富钠低钾。岩石在 TAS 分类图解^[15,16]上落入辉石岩、辉长(闪长)岩区域,并具有亚碱性系列特征(图 3-

a)。在 TiO₂-Zr/P₂O₅/10000 图解^[17]和 AFM 图解上均表明为拉斑玄武岩系列(图 3-b, 3-c)。

变辉石岩的稀土元素分布型式呈 REE 近平坦型—LREE 轻微富集型(图 4-d),LREE 与 HREE 之间分馏不明显,稀土元素总量为 Σ REE=(10.14~15.99)μg/g,LREE/

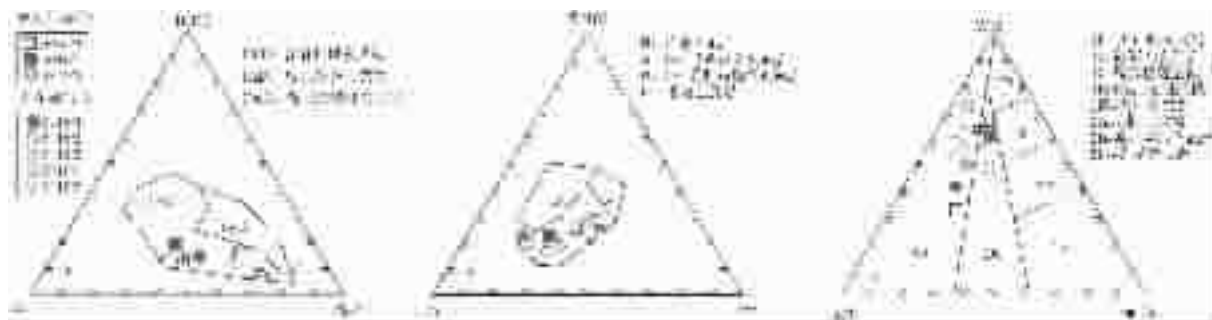
图 5 天水地区基性—中基性岩浆杂岩的 Ti-Zr-Y、Ti-Zr-Sr 图解^[24]和 La-Y-Nb 图解^[25]

Fig. 5 Ti-Zr-Y and Ti-Zr-Sr diagrams of the Liushuigou basic and intermediate-basic igneous complex in the Tianshui area (after [24,25])

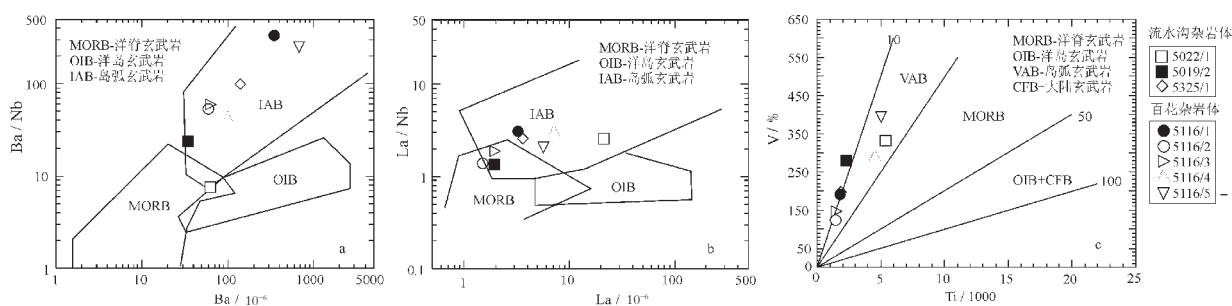
图 6 天水基性—中基性岩浆杂岩的 Ba/Nb—Ba、La/Nb—La 图解^[23]和 Ti-V 图解^[24]

Fig. 6 Ba/Nb vs. Ba and La/Nb vs. La diagrams of basic and intermediate-basic igneous complexes from the Tianshui area (after [23,24])

HREE 比值为 1.97~2.91, $(La/Yb)_n=2.10\sim3.49$, $(La/Sm)_n=1.50\sim2.69$, δEu 为 1.02~1.12, 具有很弱的正 Eu 异常, 暗示有斜长石的堆晶作用。变辉长(闪长)岩的稀土元素分布型式也同样呈 REE 近平坦型—LREE 轻微富集型(图 4-d), 与变辉石岩的配分模式非常相似, LREE 与 HREE 之间分馏不明显, 稀土元素总量高于变辉长岩且变化较大, $\sum REE$ 为 $(18.39\sim56.81)\mu g/g$, LREE/HREE 比值为 1.73~2.53, $(La/Yb)_n=1.19\sim1.84$, $(La/Sm)_n=0.92\sim1.38$, δEu 为 0.83~0.90, 具有很弱的负 Eu 异常, 暗示有斜长石的结晶分异作用, 与岛弧型火山岩的稀土元素配分型式相似^[18,19]。

在岩石微量元素原始地幔标准化的蛛网图上(图 4-e), 变辉石岩和变辉长(闪长)岩的分布型式总体相似, 即都显示富集大离子亲石元素(LILE)Cs、Ba、Sr、Th、U, 而相对亏损 Rb 和高场强元素(HFSE)Nb、P、Sm、Ti 和 Y, 显示同源岩浆演化成因特征。在岩石微量元素 MORB 标准化蛛网图上(图 4-f), 变辉石岩和变辉长(闪长)岩的分布型式总体相似, 显示出相容元素的富集以及 K、Nb、P、Zr、Ti、Y 的亏损, 略具有 Ba、Sc 的正异常, 且变辉石岩比变辉长(闪长)岩更加亏损 Nb、Ti、Y、Yb, 明显不同于 MORB 和 OIB, 而具有岛弧拉斑玄武岩和钙碱性玄武岩特征^[17,18]。特别是 Nb 的亏损是板块俯

冲产生岛弧环境岩浆岩的显著特征^[9]。变辉长(闪长)岩的 Zr 含量为 $(40.8\sim62.3)\mu g/g$, 与岛弧拉斑玄武岩 Zr 含量接近, Zr/Y 比值较低, 为 2.67~4.55, 与岛弧玄武岩接近; Ti/Y 比值为 167~230, Ti/V 比值为 10.20~15.51, Nb/Y 比值为 0.11~0.12, 与岛弧玄武岩相近。在 Ti-Zr-Y 图解、Ti-Zr-Sr 图解^[24]和 La-Y-Nb 图解^[25]上样品主要落在岛弧玄武岩区(图 5)。在 Ba/Nb—Ba 图解、La/Nb—La 图解^[26]和 Ti-V 图解上^[27]均落在岛弧玄武岩(VAB)区域(图 6), 并且显示 $La/Nb>1$ (为 1.40~2.64), 明显不同于 MORB 和 OIB。

上述岩石的地球化学特征表明, 天水地区百花岩浆杂岩中各类基性火成岩是活动陆缘岛弧岩浆活动的产物, 揭示出其总体形成于古岛弧构造环境, 是相对原始的岛弧环境岩浆分异结晶作用的产物。

从岩石组成上看, 关子镇流水沟变质中基性杂岩体由变辉长岩、变辉长闪长岩和变闪长岩 3 种岩石类型组成, 而百花变质岩浆杂岩主要由辉石岩—辉长岩、辉长闪长岩—闪长岩—石英闪长岩—黑云母斜长花岗岩等 5 种岩石类型组成, 后者具有更多的岩石类型和较好的岩浆分异演化, 构成较完整的同源岩浆演化序列; 从地球化学特征看, 关子镇流水沟变质中基性杂岩体和百花变质岩浆杂岩体中的辉长岩类具

有相似的地球化学特征,均属于拉斑玄武岩系列,均具有REE近平坦—LREE轻微富集型的稀土元素分布型式,微量元素原始地幔标准化的蛛网图和MORB标准化蛛网图上的分布型式总体很相似,富集大离子亲石元素(LILE)Cs、Ba、Sr、Th、U,而相对亏损Rb、K和高场强元素(HFSE)Nb、P、Zr、Sm、Ti和Y,显示同源岩浆演化特征,微量元素构造环境判别显示其形成于岛弧构造环境。从岩浆演化上看,百花岩浆杂岩比流水沟中基性岩浆杂岩具有更好的岩浆结晶分异演化特征,表现为发育有闪长岩和石英闪长岩等中性—中酸性岩石类型。因此,虽然它们空间分布上和岩石组成上有差异,但同类岩石的地球化学特征和形成构造环境相同,且都形成于早古生代时期。

4 岩浆杂岩的锆石 U-Pb 同位素年龄

本次工作为了获取关于镇流水沟岩浆杂岩体的形成时代,采用热电离质谱法(TIMS法)对岩体中的锆石进行了U-Pb同位素年龄测试。

4.1 测试方法

TIMS法U-Pb年龄测定在天津地质矿产研究所同位素年代学实验室进行,采集的岩石样品经过仔细清洗之后粉碎至全部通过100目筛,然后按照常规方法分选锆石。在双目实体显微镜下人工挑选适合进行U-Pb同位素测年的锆石,尽量挑选无包裹体、无裂纹、透明度高的锆石。锆石U-Pb定

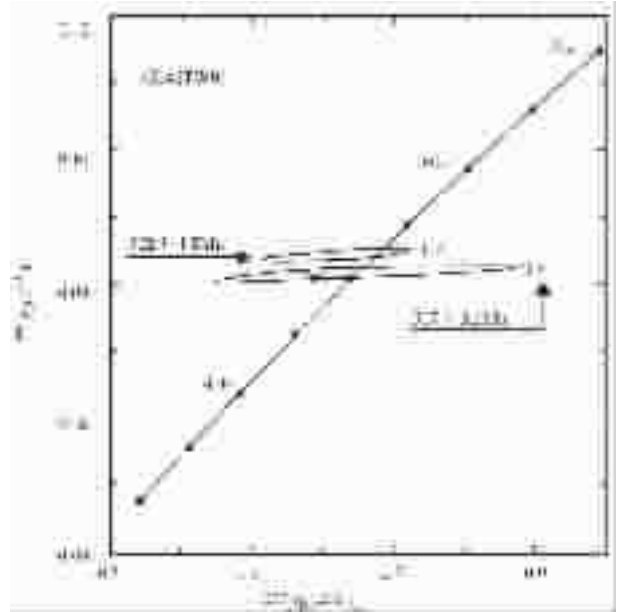


图7 天水关子镇流水沟片麻状辉长闪长岩(QL46TW01)锆石U-Pb同位素年龄谐和图

Fig.7 Zircon U-Pb concordia diagram of the Liushuigou gneissic gabbro-diorite (sample QL46TW01) from the Guanzizhen area, Tianshui

表2 天水关子镇流水沟片麻状辉长闪长岩(QL46TW01)TIMS法锆石U-Pb年龄测定结果
Table 2 TIMS single-grain zircon U-Pb age data for the Liushuigou gneissic gabbro-diorite (sample QL46TW01) from Guanzizhen, Tianshui

点号	样品情况 锆石特征	重量/ μg	质量分数 $/\mu\text{g}\cdot\text{g}^{-1}$		样品中普通铅含量 /ng	同位素原子比					表面年龄/Ma		
			U	Pb		$\frac{^{206}\text{Pb}}{^{204}\text{Pb}}$	$\frac{^{208}\text{Pb}}{^{206}\text{Pb}}$	$\frac{^{206}\text{Pb}}{^{238}\text{U}}$	$\frac{^{207}\text{Pb}}{^{235}\text{U}}$	$\frac{^{207}\text{Pb}}{^{206}\text{Pb}}$	$\frac{^{206}\text{Pb}}{^{238}\text{U}}$	$\frac{^{207}\text{Pb}}{^{235}\text{U}}$	$\frac{^{207}\text{Pb}}{^{206}\text{Pb}}$
1	浅黄色透明半截锥状	10	818	98	0.180	169	0.1204	0.08447 (32)	0.6623 (358)	0.05686 (289)	522.8	516.0	486.1
2	黄色透明半截锥状	5	638	83	0.100	133	0.1092	0.08444 (84)	0.6191 (848)	0.05318 (691)	522.6	489.3	336.4
3	浅黄色透明短柱状	10	874	99	0.180	202	0.1518	0.08201 (78)	0.6513 (245)	0.05758 (199)	508.3	509.3	513.8
4	黄色透明双锥短柱状	5	520	120	0.240	53	0.1375	0.08192 (81)	0.7384 (960)	0.06538 (791)	507.6	561.5	786.4
5	黄色透明中长柱状	5	397	78	0.150	61	0.08092	0.08160 (108)	0.6038 (1286)	0.05367 (1084)	505.7	479.7	357.1
6	淡黄色透明柱状	10	550	71	0.190	118	0.08190	0.08023 (50)	0.5800 (563)	0.05243 (482)	497.5	464.5	304.2

注:天津地质矿产研究所陈志宏,周红英测定。在测定 $^{206}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$ 原子比率时已对实验室空白(Pb质量为0.050 ng, U质量为0.002 ng)及稀释剂作了校正;其他比率中的铅同位素均为放射成因铅同位素;括号内的数字为(2 σ)绝对误差,例如:0.08447(32)表示:0.08447 \pm 0.00032(2 σ);测定结果:1~2号点 $^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$ 表面年龄统计权重平均值为(522.8 \pm 1.8) Ma;3~5号点 $^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$ 表面年龄统计权重平均值为(507.5 \pm 3.0) Ma;3~6号点 $^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$ 表面年龄统计权重平均值为(504.5 \pm 7.9) Ma

年采用同位素稀释法进行。锆石的溶解及 U、Pb 的分离在 Krogh 程序的基础上做相应的改进。锆石在 0.25ml 容积的氟塑料容器内用高纯氢氟酸-硝酸混合溶剂溶解,并使用 ^{208}Pb - ^{235}U 混合稀释剂。锆石溶解后的样品溶液蒸干后,用硅胶-磷酸溶液将 U 和 Pb 加在同一单铯带灯丝上,在 VG354 型质谱仪上用高灵敏度 Daly 检测器进行 U-Pb 同位素测定。在灯丝温度为 1300°C~1400°C 时采集 Pb 同位素数据,升至 1450°C~1500°C 时采集 U 同位素数据。所有 U-Pb 同位素数据均对质量歧视效应做了校正。实验室全流程 Pb 空白为 0.030~0.050 ng, U 空白为 0.002~0.004 ng。

4.2 测试结果

样品采自关子镇流水沟,采样点地理坐标为 N34°36.787', E105°23.259'。从样品(QL46TW01)中选取的锆石为浅黄色透明短柱状、半截锥状、中长柱状晶体。利用热电离质谱法(TIMS)测定了 6 个锆石 U-Pb 同位素数据点(表 2、图 7),获得了误差范围内基本一致的同位素年龄。从测定结果看,该测年样品锆石中普遍含有较高的普通 Pb,表现为实验空白扣除和稀释剂校正后的 $^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$ 比值比较低,最高者达 202,而最低者仅为 53。因而采用 $^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$ 表面年龄加权平均值代表锆石的形成时代。从该样品的 6 个测点来看,其中 3、4、5、6 号测点分别对应自形程度较好的柱状锆石,3、4、5 号测点具有完全一致的 $^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$ 表面年龄,且 3 号测点具有 3 组完全谐和一致的表面年龄,而 4、5 号测点都为单个锆石颗粒的测年结果,最具代表意义。因此 3、4、5 号测点的 $^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$ 表面年龄加权平均值(507.5±3.0)Ma 能很好地代表岩石的侵位结晶年龄。6 号测点年龄偏低可能因测试因素造成的,而 1、2 号测点为较粗大的半截锥状锆石晶体,不排除包有老的锆石残核的可能,所以 $^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$ 表面年龄偏高。因此,选择 3~5 号测点的 $^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$ 表面年龄加权平均值(507.5±3.0)Ma 作为关子镇流水沟岩浆杂岩体的成岩年龄。

5 大地构造意义

天水地区关子镇流水沟变质中基性岩浆杂岩和百花基性岩浆杂岩的地球化学特征表明其形成于岛弧构造环境,是岛弧环境下形成的辉长岩-辉长闪长岩-闪长岩和辉石岩-辉长(闪长)岩-闪长岩-石英闪长岩岩浆组合。在该岛弧岩杂岩带南侧,最近笔者确定了关子镇蛇绿岩的存在,蛇绿岩主要分布在天水市以西的关子镇-武家河地区、天水市东南的李子园-木其滩-夏家坪一带。蛇绿岩主要由具有 N-MORB 特征的变质玄武岩以及呈构造块体产出的蛇纹岩、变辉石岩、变辉长岩等组成^[4],其最新获得的变质玄武岩全岩 Sm-Nd 等时线年龄为(544±47)Ma(MSWD=1.7),表明蛇绿岩的形成时代主要为寒武纪早期。同时,该蛇绿岩带西延至武山北-鸳鸯镇-桦林沟一线,那里同样发育有变质玄武岩以及蛇纹岩(变质橄榄岩)和变辉石岩、变辉长岩。此外,在蛇绿岩带南侧还存在早古生代李子园群(狭义)岛弧-弧

前盆地沉积-火山岩组合以及天水利桥地区奥陶纪草滩沟群岛弧型钙碱性中酸性火山岩-沉积岩组合。这就意味着,在天水地区的西秦岭北带,存在一个由关子镇蛇绿岩为代表的古洋盆和以关子镇流水沟岛弧型中基性岩浆杂岩、百花岛弧型基性-中酸性岩浆杂岩以及奥陶纪草滩沟群岛弧型中酸性火山岩-沉积岩组合为代表的古火山-岩浆岛弧带构成的活动陆缘构造格局^[10,14],为重建早古生代期间西秦岭北部造山带的古洋陆构造格局和俯冲碰撞造山过程以及确定秦岭与祁连造山带早古生代期间的构造交接关系等提供了非常重要的地质依据。

笔者报道的天水地区关子镇流水沟变质中基性岩浆杂岩的 TIMS 法锆石 U-Pb 同位素年龄(507.5±3.0)Ma 表明,西秦岭北带岛弧型岩浆岩的形成时代主要为晚寒武世,以关子镇蛇绿岩为代表的古洋盆的俯冲作用及产生火山-岩浆岛弧的时限可能为晚寒武世-早奥陶世。近来,陆松年等^[28]报道了东秦岭地区商南县富水岛弧型基性岩浆杂岩体的 TIMS 法锆石 U-Pb 同位素年龄为(514.3±1.3)Ma,凤县罗汉寺岛弧型火山岩 TIMS 法锆石 U-Pb 同位素年龄为(523±26)Ma^[28];杨经绥等报道了东秦岭超高压榴辉岩和片麻岩的 SHRIMP 法锆石 U-Pb 年龄为(507±38)Ma^[29-31];许志琴等^[32]和杨经绥等^[30]报道了柴北缘早古生代火山-岩浆岛弧带的 TIMS 法锆石 U-Pb 同位素年龄为 515~486 Ma,柴北缘超高压变质带的 TIMS 法和 SHRIMP 法锆石 U-Pb 年龄为 495~440 Ma^[30-32]。这些年代学证据与研究区以关子镇蛇绿岩为代表的古洋壳发生俯冲作用的时期和形成岛弧型岩浆作用的时代非常接近。由此可以认为东秦岭早古生代商丹古缝合带^[7,9-10,29-33],向西延伸经过西秦岭北带的水天地区(李子园-关子镇-武山蛇绿构造杂岩带)^[7,9-14,29-34],再向西可以与柴达木北缘俯冲碰撞带相连接^[29-31],而古洋盆发生俯冲作用的时期以及火山-岩浆岛弧带的形成时限应为晚寒武世-早奥陶世。

6 结论

(1)西秦岭北带天水地区关子镇流水沟变质中基性岩浆杂岩主要由变辉长岩-辉长闪长岩-闪长岩组成,地球化学特征表明其形成于岛弧构造环境。百花变质岩杂岩主要由变辉石岩-辉长岩和辉长闪长岩-闪长岩-石英闪长岩-斜长花岗岩组成,构成同源岩浆结晶分异演化的完整系列,其中变质基性杂岩的地球化学特征也表明其形成于相对原始的岛弧构造环境。

(2)天水地区关子镇流水沟变质中基性岩浆杂岩的 TIMS 法锆石 U-Pb 同位素年龄为(507.5±3.0)Ma,代表了杂岩体的形成时代,表明西秦岭北带岛弧型岩浆岩的形成时代为晚寒武世,同时也揭示出以关子镇蛇绿岩为代表的古洋盆的俯冲作用及产生岛弧型岩浆活动的时限可能为晚寒武世-早奥陶世。

致谢:野外工作中得到西北大学张国伟院士、中国科学

技术大学李曙光院士以及中国科学院地质与地球物理研究所孟庆任研究员的指导。文中锆石 U-Pb 年龄是与陆松年研究员、陈志宏研究员一起野外采集样品,由天津地质矿产研究所同位素年代学实验室完成的,在此表示诚挚的感谢!

参考文献 (References):

- [1] 甘肃省地质矿产局. 甘肃省区域地质志[M]. 北京:地质出版社, 1989. 5~140.
Bureau of Geology and Mineral Resources of Gansu Province. Regional Geology of Gansu Province[M]. Beijing: Geological Publishing House, 1989.5~140(in Chinese with English abstract).
- [2] 甘肃省地质矿产局. 甘肃省岩石地层[M]. 武汉:中国地质大学出版社, 1997. 1~294.
Bureau of Geology and Mineral Resources of Gansu Province. Stratigraphy (Lithostratic) of Gansu Province[M]. Wuhan: China University of Geosciences Press, 1997. 1~294(in Chinese).
- [3] 夏林圻,夏祖春,任有祥,等. 祁连-秦岭海相火山岩[M]. 武汉:中国地质大学出版社, 1991.59~105.
Xia Linqi, Xia Zuchun, Ren Youxiang, et al. The Marine Facies Volcanic Rocks of Qilian and Qinling Mountains [M]. Wuhan: China University of Geosciences Press, 1991.59~105 (in Chinese with English abstract).
- [4] 宋志高,张治洮,张莓,等. 陕、甘边界“牛头河群”的分解及其构造意义[J]. 中国地质科学院西安地质矿产研究所所刊, 1991, 31: 1~14.
Song Zhigao, Zhang Zhitao, Zhang Mei, et al. The disintegration of “Niutouhe Group” in the juncture region of Shaanxi -Gansu Provinces and its significance in tectonics [J]. Bulletin of the Xi'an Institute of Geology and Mineral Resources, CAGS, 1991, 31: 1~14 (in Chinese with English abstract).
- [5] 宋志高,贾群子,张治洮等. 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[J]. 中国地质科学院西安地质矿产研究所所刊, 1991, 34: 1~82.
Song Zhigao, Jia Qunzi, Zhang Zhitao, et al. The early Palaeozoic volcanic rock series and its interconnection relationship between the North Qinling and the North Qilang Orogens [J]. Bulletin of the Xi'an Institute of Geology and Mineral Resources, CAGS, 1991, 34: 1~82(in Chinese with English abstract).
- [6] 张二朋,牛道韞,霍有光,等. 中华人民共和国秦岭—大巴山及邻区地质图(1:100万)[M]. 北京:地质出版社, 1992.
Zhang Erpeng, Niu Daoyun, Huo Youguang, et al. Geological Map of Qinling-Daba Mountains and Adjacent Region of the People's Republic of China (Scale 1/1000000) [M]. Beijing: Geological Publishing House, 1992(in Chinese).
- [7] 张二朋,牛道韞,霍有光,等. 秦岭及邻区地质—构造特征梗概[M]. 北京:地质出版社, 1993. 1~291.
Zhang Erpeng, Niu Daoyun, Huo Youguang, et al. Geologic-Tectonic Features of Qinling-Dabashan Mountains and Adjacent Regions[M]. Beijing: Geological Publishing House, 1993.1~291 (in Chinese with English abstract).
- [8] 张维吉,孟宪恂,胡健民,等. 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, 1994. 1~283.
Zhang Weiji, Meng Xianxun, Hu Jianmin, et al. Tectonics of Conjoint Area between the Qilian and Qinling Orogens [M]. Xi'an: Northwest University Press, 1994. 1~283 (in Chinese with English abstract).
- [9] 冯益民,曹宣铎,张二朋,等. 西秦岭造山带构造山过程及动力学. 西安:西安地图出版社, 2002.1~263.
Feng Yimin, Cao Xuanduo, Zhang Erpeng, et al. Structure, Orogenic Process and Dynamics of the West Qinling. Xi'an: Xi'an Cartographic Publishing House, 2002.1~263(in Chinese).
- [10] 张国伟,张本仁,袁学诚,等. 秦岭造山带与大陆动力学[M]. 北京:科学出版社, 2001. 1~855.
Zhang Guowei, Zhang Benren, Yuan Xuecheng, et al. Qinling Orogenic Belt and Continental Dynamics [M]. Beijing: Science Press, China, 2001.1~855(in Chinese).
- [11] 王靖华,张复新,于在平,等. 秦岭金属矿床成矿系列与大陆造山带构造动力学背景[J]. 中国地质, 2002, 29(2): 192~196
Wang Jinghua, Zhang Fuxin, Yu Zaiping, et al. Minerogenetic series of metallic ore deposits in the Qinling Mountains and tectonodynamic background of the continental orogenic belts [J]. Geology in China, 2002, 29 (2): 192~196 (in Chinese with English abstract).
- [12] 杨志华,郭俊锋,苏生瑞,等. 秦岭造山带基础地质研究新进展[J]. 中国地质, 2002, 29(3): 246~256.
Yang Zhihua, Guo Junfeng, Su Shengrui, et al. New advances in the geological study of the Qinling orogen [J]. Geology in China, 2002, 29(3): 246~256 (in Chinese with English abstract).
- [13] 李永军,赵仁夫,刘志武,等. 西秦岭三叠纪沉积盆地演化[J]. 中国地质, 2003, 30(3): 268~273.
Li Yongjun, Zhao Renfu, Liu Zhiwu, et al. Triassic sedimentation and basin evolution in the western Qinling [J]. Geology in China, 2003, 30(3): 268~273 (in Chinese with English abstract).
- [14] 裴先治,丁仁平,胡波,等. 西秦岭天水地区关子镇蛇绿岩的厘定及其地质意义[J]. 地质通报, 2004. 23(12): 1202~1208.
Pei Xianzhi, Ding Saping, Hu Bo, et al. Definition of the Guanzizhen ophiolite in Tianshui area, western Qinling, and its geological significance [J]. Geological Bulletin of China, 2004, 23 (12): 1202~1208(in Chinese with English abstract).
- [15] Le Maitre R W. A Classification of Igneous Rocks and Glossary of Terms, Recommendations of the International Union of Geological Sciences Subcommission on the Systematics of Igneous Rocks [M]. Blackwell Scientific Publications, 1989.
- [16] Middlemost E A K. Naming material in the magma/igneous rock system[J]. Earth Science Reviews, 1994, 37: 215~224.
- [17] Winchester J A, Floyd P A. Geochemical discrimination of different magma series and their differentiation products using immobile elements[J]. Chemical Geology, 1977, 20: 325~343.
- [18] Henderson P. Rare Earth Element Geochemistry[M]. New York: Elsevier Science Publications B. V. 1984.

- [19] Wilson M. Igneous Petrogenesis: a global tectonic approach[M]. London:Unwin Hyman, 1989.1~466.
- [20] Pearce J A. Trace element characteristics of lavas from destructive plate boundaries[A]. In: Thorpe R S (ed.), Andesite[C]. Chichester: Wiley, 1982.525~548.
- [21] Pearce J A.玄武岩判别图“使用指南”[J]. 国外地质, 1984, 11: 1~13. Pearce J A. A “users guide” to basalt discrimination diagrams[J]. Guowai Dizhi, 1984, 11: 1~13(in Chinese).
- [22] Gill J B. Orogenic Andesites and Plate Tectonic[M]. Berlin:Springer-Verlag, 1981. 358.
- [23] Condie K C. Geochemical changes in basalts and andesites across the Archaean-Proterozoic boundary: identification and significance [J]. Lithos, 1989, 23: 1~18.
- [24] Pearce J A, Cann J R. Tectonic setting of basic volcanic rocks determined using trace element analysis [J]. Earth Planet Sci Lett, 1973, 19: 290~300.
- [25] Cabanis B, Lecolle M. Le diagramme La/10-Y/15-Nb/8: un outil pour la discrimination des series volcaniques et la mise en evidence des processus de mélange et/ou de contamination crutael [J]. C R Acad Sci Ser II, 1984, 309: 2023~2029.
- [26] 李曙光. 蛇绿岩生成构造环境的 Ba-Th-Nb-La 判别图[J]. 岩石学报, 1993, 9(2): 146~157. Li Shuguang. Ba-Nb-Th-La diagrams used to identify tectonic environments of ophiolite[J]. Acta Petrologica Sinica, 1993, 9(2): 146~157(in Chinese with English abstract).
- [27] Shervais J W. Ti-V plots and the petrogenesis of modern and ophiolitic lavas[J]. Earth Planet Sci Lett, 1982, 59: 101~118.
- [28] 陆松年, 李怀坤, 陈志宏. 塔里木与扬子新元古代热-构造事件特征、序列和时代——扬子与塔里木连接(YZ-TAR)假设[J]. 地学前缘, 2003, 10(4): 321~326. Lu Songnian, Li Huaijun, Chen Zhihong. Characteristics, sequence and ages of Neoproterozoic thermo-tectonic events between Tarim and Yangzi Blocks—— a hypothesis of Yangzi-Tarim connection [J]. Earth Science Frontiers, 2003, 10(4): 321~326(in Chinese with English abstract).
- [29] 杨经绥, 许志琴, 裴先治, 等. 秦岭发现金刚石: 横贯中国中部巨型超高压变质带新证据及古生代和中生代两期深俯冲作用的识别[J]. 地质学报, 2002, 76(4): 484~495. Yang Jingsui, Xu Zhiqin, Pei Xianzhi, et al. Discovery of diamond in North Qinling: evidence for a giant UHPM belt across Central China and recognition of Paleozoic and Mesozoic dual deep subduction between North China and Yangtze Plates [J]. Acta Geologica Sinica, 2002, 76(4): 484~495 (in Chinese with English abstract).
- [30] 杨经绥, 刘福来, 吴才来, 等. 中央碰撞造山带中两期超高压变质作用: 来自含柯石英锆石的定年证据[J]. 地质学报, 2003, 77(4): 463~477. Yang Jingsui, Liu Fulai, Wu Cailai, et al. Two ultrahigh-pressure metamorphic events recognized in the Central Orogenic Belt of China: evidence from the U-Pb dating of coesite-bearing zircons [J]. Acta Geologica Sinica, 2003, 77(4): 463~477 (in Chinese with English abstract).
- [31] Yang Jingsui, Xu Zhiqin, Dobrzhinetskaya Larissa, et al. Discovery of metamorphic diamonds in central China: an indication of a > 4000km-long zone of deep subduction resulting from multiple continental collisions[J]. Terra Nova, 2003, 15(6): 370~379.
- [32] 许志琴, 杨经绥, 吴才来, 等. 柴达木北缘超高压变质带形成与折返的时限及机制[J]. 地质学报, 2003, 77(2): 163~176. Xu Zhiqin, Yang Jingsui, Wu Cailai, et al. Timing and mechanism of formation and exhumation of the Qaidam ultra-pressure metamorphic belt[J]. Acta Geologica Sinica, 2003, 77(2): 163~176 (in Chinese with English abstract).
- [33] 裴先治. 东秦岭商丹构造带的组成与构造演化[M]. 西安: 西安地图出版社, 1997.1~184. Pei Xianzhi. Compositions and Tectonic Evolution of the Shangdan Structural Zone in the East Qinling, China[M]. Xi'an: Xi'an Cartographic Publishing House, 1997.1~184 (in Chinese with English abstract).
- [34] 杨军录, 冯益民, 潘晓平. 武山蛇绿岩的特征、同位素年代及其地质意义[J]. 前寒武纪研究进展, 2001, 24(2): 98~106. Yang Junlu, Feng Yimin, Pan Xiaoping. Characteristics, isotopic age of Wushan ophiolite and its geological significance [J]. Progress in Precambrian Research, 2001, 24(2): 98~106 (in Chinese with English abstract).

Geochemical characteristics and zircon U–Pb ages of island–arc basic igneous complexes in the Tianshui area, West Qinling

PEI Xian–zhi¹, LI Zuo–chen¹, DING Sa–ping^{1,2}, LI Yong¹, HU Bo¹, LIU Hui–bin¹

(1. Faculty of Earth Sciences and Land Resources, Chang'an University, Xi'an 710054, Shaanxi, China;

2. Gansu Institute of Geological Survey, Lanzhou 730000, Gansu, China)

Abstract: The Liushuigou intermediate–basic meta–igneous complex at Guanzizhen, Tianshui, is composed mainly of metagabbro–metagabbro diorite–metadiorite, and the Baihua basic meta–igneous complex consists mainly of pyroxenite–gabbro (–diorite)–diorite–quartz diorite. They form a relatively complete comagmatic evolutionary series. The geochemical characteristics of basic to intermediate–basic igneous rocks indicate that they belong to a tholeiite suite. Their chondrite–normalized REE patterns are of nearly flat and slightly LREE–enriched type, and their primitive mantle–normalized and MORB–normalized trace element spidergrams are generally similar; the LILEs Cs, Ba, Sr, Th and U are enriched, while Rb and K and the HFSEs Nb, P, Zr, Sm, Ti and Y are depleted. All these show comagmatic evolutionary and genetic characteristics. The tectonic environment discrimination by trace elements reveals that these igneous complexes formed in an island–arc setting. The TIMS single–zircon U–Pb age for the Liushuigou intermediate–basic meta–igneous rocks in the Guanzizhen area is 507.5 ± 3.0 Ma, representing the age of these igneous complexes, which indicates that island–arc–type magmatic rocks in the north zone of the West Qinling are Late Cambrian in age and also reveals that the timing of subduction of the paleo–ocean basin represented by the Guanzizhen ophiolite and resulting island–arc–type magmatic activity is probably Late Cambrian to Early Ordovician.

Key words: basic igneous complex; geochemistry; island–arc setting; zircons U–Pb age; Early Paleozoic; Tianshui area; West Qinling

About the first author: PEI Xian–zhi, male, born in 1963, doctor and professor, mainly engages in the study of regional geology and tectonics; E–mail: peixzh@sina.com.