北秦岭斜峪关群和草滩沟群火山岩成因的地球化学 和同位素约束、SHRIMP 年代及其意义

闫全人^{1,2)}, 王宗起¹⁾, 陈隽璐³⁾, 闫臻¹⁾, 王涛¹⁾, 李秋根¹⁾, 姜春发¹⁾, 张宗清¹⁾
1) 中国地质科学院地质研究所, 北京, 100037; 2) 北京离子探针中心, 100037
3) 中国地质调查局西安地质矿产研究所, 710054

内容提要:地球化学分析结果表明:北秦岭斜峪关群基性熔岩的 LREE 轻度富集,(La/Yb)_N=1.31~3.27, 中一酸性熔岩的 LREE 显著富集,(La/Yb)_N=4.22~26.54。草滩沟群基性火山岩 LREE 中度富集,(La/Yb)_N= 2.50~2.97,中一酸性熔岩的 LREE 显著富集,(La/Yb)_N=4.57~10.15。低 δ Eu 值(0.62~1.14)暗示斜峪关群 和草滩沟群火山岩初始玄武质岩浆的分离结晶程度很低、初始岩浆中斜长石分异作用很弱,大离子亲石元素明显 富集,而相对 N-MORB 较低的高场强元素丰度,特别是明显的 Ta、Nb 低谷,展示了典型的岛弧火山岩的特征。同 位素地球化学分析揭示,斜峪关群和草滩沟群火山岩的初始 Sr 比值为 0.703438~0.708329,初始 Nd 比值为 0.511948~0.512327,多集中于 0.512003~0.512327 间, ϵ_{Nd} 均为正值(+5.42~+12.81),表明二群火山岩主要来 自富集地幔源区。斜峪关群和草滩沟群火山岩的岩浆源区为混染的富集地幔源区,是俯冲板片熔融和地壳混染的 产物,形成于岛弧构造环境。SHRIMP 锆石 U-Pb 测年表明斜峪关群基性熔岩形成时代为早奥陶世(472±11 Ma),其中的古老捕晶锆石(1294±34 Ma)表明斜峪关群火山岩的岩浆源区存在元古宙地壳混染。

关键词:斜峪关群;草滩沟群;火山岩;SHRIMP测年;地球化学;Sr-Nd-Pb同位素;构造环境;秦岭

斜峪关群和草滩沟群是北秦岭造山带重要的构造-地层单元之一,学界对二群形成时代和构造环境仍存较大争论。

斜峪关群是陕西区调队(1984)从宽坪群中解体 出来的一套浅变质火山-沉积岩系,宋子季和张维吉 (1987)正式创名于眉县斜峪关,时代上归为早古生 代,并将斜峪关群自下而上划分为文家山组和干岔 沟组,上下分别与元古宇宽坪群和上古生界甘峪组 不整合或断层接触。陕西地层表编写组(1983)提出 斜峪关群可与陕豫交界的二郎坪群对比,并将其更 名为二郎坪群。进一步调查研究表明,眉县一户县 地区的斜峪关群在岩石组合方面与陕豫交界地区的 二郎坪群存在很大差别。陕豫交界地区的二郎坪群 以拉斑玄武岩和钙碱性基性熔岩为主,含中酸性火 山岩;南阳盆地以东,二郎坪群以拉斑系列基性和酸 性火山岩为主,含相当数量的钠质火山岩,具类似于 双模式岩套的特征(张国伟等,2001)。而眉县一户 县地区的斜峪关群以中性火山岩为主,夹中酸性及 少量基性火山岩(宋子季等,1988;张维吉,1987)。 另外,二群相距甚远,不宜简单地同物异名,目前仍 以斜峪关群和二郎坪群分称。

草滩沟群分布于天水党川、两当张家庄、凤县草 凉驿至唐藏一带,是从秦岭群中解体出来的一套低 绿片岩相变质的火山-沉积岩系。20世纪60年代 末陕西区调队于张家庄发现珊瑚化石后命名为草滩 沟群,归为奥陶系。70年代初陕西地质八队又在红 花铺、杨家岭采获丰富的早奥陶世腕足类化石,并将 其自下而上划分为红花铺组、张家组和龙王庙组。 陕西区域地层表编写组(1983)正式建群于凤县唐藏 乡北部的草滩沟。

前人研究认为,区域上斜峪关群向西与草滩沟 群及天水地区的葫芦河群、向东与云架山群和二郎 坪群等在地层时代、形成环境上对比(宋子季等, 1988;陕西省地质矿产局,1989),构成北秦岭早古生 代海相火山岩北带,向西北与祁连基本连接(张二朋 等,1993)。草滩沟群、二郎坪群和云架山群中均已

注:本文为国家自然科学基金项目(编号 40472119)、国土资源部"百人计划"项目、中国地质调查局项目(编号 1212010511801)和国家 "973"计划项目(编号 2002CB412608)资助成果。

收稿日期:2006-10-12;改回日期:2007-02-29;责任编辑:周健。

作者简介: 闫全人, 男,1964年生,博士, 研究员, 主要从事造山带与盆地研究。通讯地址: 100037,北京西城区百万庄大街 26号, 中国 地质科学院地质研究所; 电话: 010-68997795。

发现古生物化石,地层时代确切。如,二郎坪群含有 寒武纪一奥陶纪放射虫和海绵骨针化石(张思纯等, 1983;李采一等,1990;裴放等,1995;王学仁,1995; 孙勇等,1996)。草滩沟群中的动物化石丰富,红花 铺组中产腕足类 Sinorthis sp., S. cf. typical Wang, Orthis callingramma, Orthis. cf. serica, Laptena sp., Mimella cf. formosa Wang, 三叶虫 Basilliella sp., Asaphidae, Illaenidae 和腹足类 Euomphalidae 等化石,时代为早奥陶世中期到中 奥陶世早期。张家庄组产珊瑚 Plasmoporella cf. granulosa, Heliolites aff. Wailunensis Liu et Chu, Brachyelasma? sp., Streptelasma? sp., Amsassia sp., Reuschia sp.;腹足类 Maclurites sp.,层孔虫 和竹节石等,顶部大理岩含海百合茎。珊瑚化石的 时代为晚奥陶世(杨子超等,1984)。龙王沟组中未 发现生物化石,但据其岩石组合及整合于张家庄组 之上的地层关系分析,时代被定为晚奥陶世晚期。

迄今尚未在斜峪关群中发现古生物化石证据。 曹宣铎等(1990)在涝峪与斜峪关群层位相当的大理 岩中采获床板珊瑚化石 Crassialveolites? sp.,时代 为泥盆纪;陕西地质八队(1980)在同一层位发现珊 瑚化石 Agetolitella sp.,Reuchia sp.,时代为中一 晚奧陶世。斜峪关群地层时代厘定依据同位素年代 学资料,如,铜峪斜峪关群大理岩中黄铁矿 Pb-Pb 年龄为 402 Ma(陕西地质八队,1980)、涝峪斜峪关 群全岩 Rb-Sr 等时线年龄为 365 Ma(宋子季等, 1988)和 207 Ma(张维吉,1987)。但张宗清等 (1994)根据眉县铜峪斜峪关群变火山岩 Sm-Nd 等 时线年龄(847±198 Ma)和眉县铜峪斜峪关群变质 火山岩 Rb-Sr 等时线年龄(103 Ma)等同位素年代 资料,提出斜峪关群形成于新元古代,而非古生代, 103 Ma代表一次新生代的变形变质事件。

但是,对斜峪关群向西与草滩沟群及天水地区 的葫芦河群、向东与云架山群和二郎坪群等在形成 环境上的系统、深入地比较研究迄今未见报道。另 外,对斜峪关群、草滩沟群以及二郎坪群火山岩的构 造成因学界争论仍然较大。宋志高等(1991)通过对 天水一宝鸡间的古生代火山岩系及其构造关系的研 究,提出草滩沟群火山岩石类型主要由玄武岩一安 山岩一英安岩一流纹岩组成钙碱系列,"呈双峰岩套 特征,显示了岛弧初期与裂谷末期阶段活动背景"。 孙民生等(1995)和王德耀(2002)依据1:50000 辛家 庄一红花铺幅区调资料及前人成果,对位于秦岭岩 群北南两侧的草滩沟群和丹凤岩群火山岩的岩石类 型、岩石化学及地球化学特征进行了对比,认为二者 均属亚碱性钙碱系列,前者为中一酸性岩组合,具弧 后盆地拉张裂谷活动背景特征;后者为中一基性岩 组合,显示了岛弧外侧一边缘海型的构造背景特征。 但是,多数学者认为斜峪关群和草滩沟群形成于加 里东一早华力西造山期,是扬子板块向华北板块俯 冲、碰撞的产物(李春昱等,1978,1984;任纪舜等, 1980,1990;贾承造等,1988;肖思云等,1988;许志琴 等,1988;张国伟等,1988;王润三等,1990)。

确定斜峪关群的地质时代,甄别斜峪关群和草 滩沟群的形成环境,对深入了解和认识北秦岭造山 带早古生代造山作用和构造演化具有重意义。在详 细野外地质调查基础上,通过地球化学、同位素地球 化学和 SHRIMP 锆石 U-Pb 年代学研究,本文精确 测定了斜峪关群火山岩的形成时代,系统分析了斜 峪关群和草滩沟群火山岩的构造成因。提出:斜峪 关群和草滩沟群火山岩形成于岛弧环境,为早古生 代早期北秦岭板块俯冲、增生造山作用的产物。

1 地质背景与样品

斜峪关群分布于北秦岭中段,西起眉县铜峪,向 东经涝峪、蓝田汤峪、草坪至商州被北西向草坪-丹 凤断裂所截,东西向断续延伸达 500 km。南、北两 侧分别与秦岭群、宽坪群和上古生界甘峪组呈不整 合或断层接触(图 1)。按岩石组合分为文家山组和 干岔沟组。文家山组以凝灰质砂岩为主,夹含碳板 岩、千枚岩,顶部为结晶灰岩。干岔沟组为一套中性 火山岩-沉积岩组合,下与文家山岩组为整合接触关 系。干岔沟组喷发一沉积韵律发育,韵律下部为火 山集块岩、角砾岩,向上凝灰岩渐增,并逐渐过渡为 沉凝灰岩、泥砂质岩或碳酸盐岩。

草滩沟群分布于天水党川一花石山一利桥、两 当县张家庄、太白县唐藏草滩沟一带(图1),向西延 伸为第四系覆盖,向东被太白岩体吞没。北与石炭 纪草凉驿组、南与秦岭群呈断层接触。按岩石组合 特征,自下而上划分红花铺组、张家庄组和龙王庙 组。

红花铺组出露于凤县红花铺杨家岭一带,四围 断层中,为一套碎屑岩,夹砂质灰岩和少量细碧岩、 中酸性火山岩。下部为等厚互层状灰一灰绿色粉砂 质板岩、粉砂岩,夹少量细碧岩、砂砾岩、灰岩薄层或 透镜体,产腕足类、腹足类及海百合茎化石;上部为 互层状灰绿一黄绿色板岩,粉砂质板岩,粉砂岩、石 英砂岩和灰岩,夹少量细碧岩、英安岩和流纹斑岩,



图 1 北秦岭造山带(部分)地质构造简图(据张二朋等,1993 简化)

Fig. 1 Sketch map showing geology and structure of the middle portion of the north Qinling orogenic belt (modified from Zhang et al. , 1993)

1—陶湾群;2—宽坪群;3—秦岭群;4—丹凤群;5—斜峪关群;6—草滩沟群;7—下古生界;8—超镁铁质岩块;9—断层;10—地层界线;11— 实测剖面和样品编号;Q—第四系; $o\eta_{3-4}$ —古生代石英斑岩; $\eta\gamma_{3-4}$ —古生代花岗斑岩; $\gamma \delta_{3}$ —印支期花岗闪长岩; $o\eta_{3}$ —印支期石英斑岩; $\eta\gamma_{3}^{1}$ —印支期花岗斑岩; γ_{3}^{1} —印支期花岗岩; F_{1} —周至—洛南—栾川断裂; F_{2} —商丹断裂; F_{3} —草坪—丹凤断裂

1—Taowan Gr; 2—Kuanping Gr; 3—Qinling Gr; 4—Danfeng Gr; 5—Xieyuguan Gr; 6—Caotangou Gr; 7—Lower Paleozoic; 8 ultramafic rock block; 9—fault; 10—boundary; 11—transection and sample; Q—Quatenary; $_{0\eta_{3}-4}$ —Paleozoic porphyric quartz granite; $_{\eta\gamma_{3}-4}$ —Paleozoic porphyric granite; $\gamma \gamma_{3}^{1}$ —Early Mesozoic granodiorite; $_{0\eta_{3}}^{1}$ —Early Mesozoic porphyric quartz granite; $_{\eta\gamma_{3}}^{1}$ —Early Mesozoic granite; $\gamma \gamma_{3}^{1}$ —Early Mesozoic granodiorite; $_{0\eta_{3}}^{1}$ —Early Mesozoic porphyric quartz granite; $\gamma \gamma_{3}^{1}$ —Early Mesozoic granite; F_{1} —Zhouzhi—Luonan—Luanchuan fault; F_{2} —Shangxian—Danfeng fault; F_{3} —Chaoping—Danfeng fault

产腕足类及三叶虫化石。

张家庄组分布于两当县张家庄一凤县龙王沟及 老厂一带。岩性以中基性、中酸性火山熔岩、火山碎 屑岩为主,夹少量板岩及灰岩薄层条带,产腕足类及 海百合茎化石。横向变化较大,向东至草滩沟一老 厂一带,熔岩增多,火山碎屑岩减少。如在老厂,张 家庄组下部以中基性熔岩(细碧岩)为主,上部为中 酸性熔岩(石英角斑岩)和火山碎屑岩,夹少量板岩。 在车道沟一沙坝一带,张家庄组几乎全为灰绿色中 酸性熔岩。在两当县张家庄松树梁一带,该组的结 晶灰岩夹层中产丰富珊瑚、腹足类、层孔虫及竹节石 等化石。

龙王沟组分布于凤县草凉驿龙王沟,以深灰色 含凝灰质粉砂岩、灰色凝灰质细砂岩为主,夹安山质 火山岩,沉积构造发育,鲍马层序清晰。下与张家庄 组整合接触,顶部因断层缺失。向西该组碎屑岩增 多,凝灰岩减少。

本研究对典型斜峪关群和草滩沟群地质剖面进 行了详细野外地质测量。调查表明,斜峪关群火山 岩主要由块状熔岩和角砾状熔岩组成,夹厚度小于 40 cm 凝灰岩层(图版 I)。块状熔岩具杏仁构造, 杏仁成分主要是长英质,另见大量黄铜矿(CuFeS₂) 或黄铜矿集合体,最大黄铜矿集合体大小约 4.0 cm。角砾状熔岩包括两类:一是以基性熔岩角砾为 主角砾状熔岩,基性角砾成分主要是具杏仁结构的 块状熔岩;二是以凝灰岩角砾为主的角砾状熔岩。 块状熔岩样品(QD04-12、QD04-13、QD04-16 和 QD04-17)沿该剖面采集(图 1)。显微图像显示,块 状基性熔岩具杏仁构造,杏仁体以长英质的为主,少 量为方解石。基质呈变余间隐结构,含少量蚀变辉 石斑晶(图版 II-1~6)。另外,我们沿周至县黑河公 路对斜峪关群进行了路线地质观测及样品采集 (QD04-8 和 QD04-9)。沿该路线出露的斜峪关群 主要由块状熔岩和富含火山质的碎屑岩组成。显微 图像显示,块状熔岩具变余斑状结构,变斑晶主要是 蚀变角闪石和长石,基质呈变余填间结构、鳞片状变 晶结构(图版 II-7、8)。

本研究对草滩沟群张家庄组层位的火山岩进行 了详细剖面测量与采样(D08-1、D08-2、D08-3、D10-1、D10-2、D10-3和D10-4)(图1)。细碧岩呈暗绿一 浅灰绿色,填间结构,块状或杏仁状构造,杏仁由方 解石、绿泥石、石英及绿帘石组成。斑晶为自形板条 状钠长石,具钠长双晶或卡氏双晶。基质主要由钠 长石、绿泥石、绿帘石、阳起石和方解石等组成,见少 量磁铁矿、榍石和白钛石等。安山玄武岩呈绿一灰 绿色,变余斑状结构,块状构造。基质具鳞片状变晶 结构,主要为绿泥石、纤闪石和绿帘石,含少量斜长 石和方解石。板状变斑晶以纤维状角闪石为主,为 原岩中暗色矿物蚀变产物,大小 0.5~3.0 mm。层 状安山岩是草滩沟群熔岩的主要类型,灰一灰绿色, 具变余斑状结构。变斑晶为斜长石,含少量暗色矿 物和石英。斜长石变斑晶呈半自形板状,具绢云化 和绿帘石化。基质呈交织结构,主要是淬火斜长石 微晶,粒径 0.01~0.05 mm,绿泥石化,含少量石 英。英安岩也是草滩沟群熔岩的主要岩石类型,浅 灰绿色,变余斑状结构,块状构造,变斑晶以斜长石

表 1 斜峪关群火山岩主量(%)和稀土元素含量(μg/g)

Table 1 Abundances of major elements (%) and concentrations of rare earth and trace elements ($\mu g/g$) of

volcanic roc	eks from	the X	ieyuguan	Group
--------------	----------	-------	----------	-------

来源	周至县陈	河,本文		眉县斜峭	送,本文			眉县铜峪煤沟,本文						眉县铜峪,张宗清等,1994				
岩性	玄武岩	安玄岩		玄正	式岩		玄武岩	流纹岩			玄武岩							
样品	Q D04-8	QD04-9	QD04-12	QD04-13	QD04-16	QD04-17	DZ2547-1	DZ10-2	D03-1	D03-2	D03-3	D03-4	Q 8644	Q 8647	Q 8648	Q 8649		
${\rm SiO}_2$	49.02	55.40	46.48	51.65	44.54	50.28	48.91	72.33	63.93	65.15	64.88	64.28						
${\rm TiO}_2$	1.16	0.77	0.82	0.74	0.41	0.40	1.75	0.36	0.80	0.50	0.53	0.55						
$\mathrm{Al}_2\mathrm{O}_3$	13.47	13.28	15.02	14.10	11.97	9.87	12.88	10.98	4.63	1.05	1.25	0.76						
Fe_2O_3	7.17	3.77	6.61	6.03	5.84	5.47	4.31	0.99	9.01	16.89	17.70	18.22						
FeO	5.87	3.09	5.41	4.93	4.78	4.47	9.30	3.18	4.38	0.17	0.18	0.17						
MnO	0.19	0.12	0.67	0.60	0.44	0.42	0.21	0.30	0.22	0.02	0.03	0.01						
MgO	7.07	7.76	7.51	7.68	4.45	4.60	6.48	3.23	4.20	0.44	0.89	0.61						
CaO	11.44	6.71	14.74	10.94	12.37	11.11	9.29	3.23	7.06	0.39	0.47	0.33						
Na_2O	2.28	3.62	0.32	0.82	0.43	0.23	2.87	3.43	0.26	0.10	0.11	0.12						
K_2O	0.09	2.53	0.04	0.09	1.54	0.98	0.41	0.32	0.35	5.99	5.57	9.31						
P_2O_5	0.10	0.44	0.17	0.15	0.11	0.11	0.18	0.07	2.11	7.95	5.77	3.82						
LOI	Z. 15	1.66	2.23	2.26	13.05	12.06	3.4Z	0.36	2.57	1.12	2.30	1.55						
I otal	100.00	99.15 E0.60	97.77	97.73	80.88	87.95	100.03	98.78	99.52	99.77	99.08	199.73	10 50	10 16		10 00		
La	4.20	111 14	10.99	10.90	22 06	9.90 20.51	0.00	43 30	41 48	62 01	40.04 62.72	42.15	10. 59	24 08		27 97		
Pr	1 60	12 37	3 05	2 80	22.30	20.01	3 40	43.30	5 41	7 86	8 54	11 00	23.33	24. 90		21.21		
Nd	7 78	37 35	12 45	11 78	11 87	11 07	1/ 90	18 60	22 92	30 31	36 03	11.05	14 86	15 02	24 12	14 09		
Sm	2 37	8 93	3 67	3 47	3 45	2.88	4 32	3 99	5 31	6 41	8 72	10 34	3 85	3 86	5 48	3 10		
Eu	0.83	2.61	1.00	1.17	1.31	0.95	1.66	0.72	1.56	1.71	2.10	2.34	1.22	1.04	1.56	0.83		
Gd	3.05	6.34	4.28	3.91	3.51	2,98	6.26	3.45	5.36	5.47	9.11	11.09	4.41	4.45	5.66	2.96		
Tb	0.57	0.73	0.71	0.66	0.55	0.51	1.14	0.64	0.82	0.91	1.59	1.97						
Dy	3.76	3.24	4.48	4.25	3.56	3.29	8.05	4.09	4.84	5.88	10.05	12.63	4.97	5.60	6.60	3.04		
Ho	0.80	0.58	0.93	0.93	0.75	0.70	1.73	0.87	1.05	1.31	2.28	2.75						
Er	2.35	1.66	2.80	2.67	2.28	2.10	5.20	2.81	2.88	4.01	6.26	7.37	3.24	3.59	4.64	1.87		
Tm	0.37	0.24	0.45	0.44	0.35	0.33	0.76	0.44	0.45	0.65	0.94	1.10						
Yb	2.34	1.61	2.89	2.85	2.41	2.31	4.69	2.66	2.95	4.41	6.28	7.17	2.93	3.52	4.73	1.75		
Lu	0.37	0.23	0.45	0.43	0.38	0.38	0.67	0.36	0.46	0.76	1.04	1.13	0.42	0.54	0.48	0.27		
Total	40.85	246.72	71.88	69.05	67.09	61.36	115.96	113.06	116.10	164.30	185.40	239.50						
$(La/Yb)_N$	1.31	26.54	2.73	2.76	3.27	3.09	1.28	7.12	5.01	5.15	3.29	4.22	2.59	2.07	0.00	5.66		
δEu	0.94	1.01	0.77	0.97	1.14	0.98	0.98	0.58	0.89	0.86	0.72	0.66	0.90	0.76	0.85	0.83		
Sc	17.48	41.55	30.48	27.90	12.50	15.95	54.00	18.09	23.54	22.24	6.40	15.59						
Со	21.40	48.76	28.05	26.82	6.58	7.12		1.52	1.35	1.09	7.07	11.32						
Ga	17.53	17.99	15.47	13.95	16.35	5.44		13.49	17.86	18.51	8.96	21.50						
Rb	68.33	3.33	0.68	3.71	38.20	23.85	13.00	60.52	76.58	105.60	48.37	5.92						
Sr	978.33	145.89	694.52	563.14	270.91	264.66	114.00	254.10	234.80	161.70	48.70	580.80						
Y	18.05	22.98	27.50	26.39	22.47	22.28	36.40	18.30	29.56	31.46	58.94	65.01						
Zr	89.08	63.56	70.90	63.53	66.34	64.06	103.00	187.30	213.50	211.70	84.00	111.70						
Nb	4.76	4.26	3.90	3.20	2.94	3.85	6.00	7.80	8.92	9.46	7.29	8.28						
ы	1900.25	10.92	24.08	07.97	470.78	1 00	141.00	509Z.50	10321.00	0014.00	301.90 2 25	34.30						
пі Та	0.24	1.04	2.04	1.70	1.84	1.88		0.69	0.80	0.00	4.30							
та Ть	0.24 12.21	0.10	2 28	1 06	0.17 2.72	0.10 2.71	2 00	0.00	11 50		10.32	15 34						
II	3 28	0.07	0.53	0.53	0.64	0.59	2.00	2 04	2 36	2 17	1 74	4 02						
Ph	0.00	0.07	0.00	0.00	0.04	0.03		13 67	16 30	14 38	4 21	13 37						
				1				10.01	10.00	1.00		10.01		1	L	L		

为主,次为石英。基质以鳞片状绢云母为主,含少量 绿泥石和残余斜长石微晶。石英角斑岩呈浅灰一浅 白色,具斑状结构,流纹、杏仁状构造。杏仁主要由 石英组成。斑晶为钠长石和石英,大小 0.5~1.5 mm。钠长石斑晶多为半自形一自形板状,具卡氏 双晶。石英斑晶多已熔蚀。基质由隐晶质长英矿物 集合体构成,具霏细结构。流纹岩呈浅灰一灰白色, 致密块状,斑状结构,斑晶主要是透长石,石英次之, 粒度 0.5~1.0 mm。基质为隐晶质,具有流纹构 造。

表 2 草滩沟群火山岩主量(%)和稀土元素含量(μg/g)

Table 2 Abundances of major elements (%), and concentrations of rare earth and trace elements ($\mu g/g$) of

volcanic rocks from the Caotangou Group

来源				孙民生等, 1995; 王德耀, 2002							
岩性	流纹岩	英安岩	玄武岩		流纟	文岩		安山	山岩	石英角	角斑岩
样号	D08-1	D08-2	D08-3	D10-1	D10-2	D10-3	D10-4	1004-2	I-5	I-24	I-4
SiO_2	83.04	57.07	43.01	66.56	63.19	71.48	72.25	57.86	54.07	71.35	77.53
${\rm TiO}_2$	0.32	0.49	1.38	0.69	0.63	0.45	0.44	0.84	0.32	0.48	0.21
$\mathrm{Al}_2\mathrm{O}_3$	0.24	10.50	10.85	3.09	1.91	1.29	2.25	15.04	10.35	12.87	10.91
$\mathrm{Fe}_2\mathrm{O}_3$	5.54	11.43	9.05	10.39	14.88	11.94	11.96	3.25	0.60	1.87	0.83
FeO	1.98	2.62	6.54	2.98	1.16	1.05	0.61	6.65	2.85	1.74	1.52
MnO	0.04	0.30	0.19	0.07	0.16	0.12	0.06	4.98	0.57	0.13	0.03
MgO	1.70	4.36	6.53	3.20	1.66	1.22	1.27	0.13	2.57	1.05	0.68
CaO	3.12	8.61	12.06	5.37	2.79	2.26	2.10	2.35	12.99	1.59	0.97
Na_2O	0.09	0.13	0.08	0.16	0.08	0.05	0.07	4.26	2.50	3.20	4.90
K_2O	1.32	0.25	0.22	2.86	4.09	2.16	3.19	0.42	2.22	3.29	2.52
P_2O_5	0.69	0.01	2.19	1.60	6.43	5.57	2.15	0.15	0.14	0.06	0.07
LOI	1.47	3.98	7.70	3.31	3.22	1.93	3.40	7.91	11.65	1.62	1.68
Total	99.55	99.75	99.80	100.28	100.20	99.52	99.75	103.84	100.83	99.25	101.84
La	20.44	49.05	8.98	49.93	45.38	36.68	39.23	19.50			
Ce	40.10	100.87	20.00	106.49	93.15	75.94	80.89	28.50			
Pr	4.36	10.66	2.78	12.74	11.79	9.75	10.42	5.60			
Nd	16.28	40.08	12.83	52.34	47.21	39.65	42.26	17.00			
Sm	3.29	7.35	3.49	12.12	9.58	8.59	8.82	4.50			
Eu	0.74	1.70	1.20	2.81	2.47	2.43	2.53	1.30			
Gd	3.04	7.95	3.95	11.40	9.65	8.65	9.08	5.00			
Tb	0.49	1.23	0.70	2.11	1.47	1.38	1.49	0.82			
Dy	2.62	6.60	4.47	13.07	8.70	8.11	8.33	4.00			
Ho	0.52	1.36	0.93	2.79	1.91	1.75	1.79	0.83			
Er	1.45	3.78	2.59	7.76	5.61	5.01	4.96	2.65			
Tm	0.23	0.55	0.39	1.21	0.85	0.78	0.80	0.60			
Yb	1.44	3.52	2.58	7.84	5.70	5.09	4.95	2.15			
Lu	0.20	0.54	0.39	1.22	0.93	0.80	0.82	0.20			
Σ REE	95.19	235.23	65.26	283.82	244.40	204.61	216.35	92.65			
$(La/Yb)_N$	10.15	10.00	2.50	4.57	5.72	5.17	5.69	6.51			
δEu	0.70	0.67	0.98	0.72	0.78	0.85	0.86	0.83			
Sc	38.05	14.68	11.94	9.60	9.73						
Co	30.27	2.78	1.98	1.53	1.58						
Ga	19.95	24.67	16.71	17.52	17.59						
Rb	3.97	71.53	38.33	75.67	77.89						
Sr	512.30	190.40	165.80	99.40	105.50						
Y	14.43	36.09	21.99	76.68	52.34	48.16	49.46				
Zr	78.80	356.40	309.90	244.80	249.80						
Nb	2.64	10.84	9.10	7.78	7.95						
Ba	108.10	1105.30	651.00	860.00	865.10						
Hf	2.31	9.05	7.68	6.25	6.24						
Та	0.13	0.65	0.54	0.42	0.44						
Th	1.99	11.08	9.54	7.51	7.22						
U	0.63	2.46	1.99	1.47	1.45						
Pb	6.70	19.98	24.28	13.47	10.21						

续	表	2
~~	2	_

来源	孙民生等,1998;王德耀,2002													
					石革鱼斑岩	4 4	·, µ©//£ ·	2002			细碧岩			
	I-54	I-55	I-65	I-66	I-25	29-Jan I-70 I-62			I-75	I-76	I-68			
SiO ₂	72.61	77.40	74.52	70.75	73.92	73.47	74.77	73.20	76.51	48.44	48.51	49.55		
Al_2O_3	0.36	0.23	0.07	0.36	0.03	0.27	0.07	0.25	0.01	1.56	1.80	1.62		
TiO_2	12.42	11.24	13.92	14.63	13.79	11.95	13.95	13.40	13.00	15.40	13.90	14.61		
$\mathrm{Fe}_2\mathrm{O}_3$	0.67	0.04	1.00	2.41	0.87	0.33	0.87	1.64	1.65	2.31	3.68	3.95		
FeO	2.22	1.86	0.35	1.16	0.66	3.39	0.31	0.92	0.14	6.83	10.26	7.78		
MnO	0.10	0.02	0.17	0.04	0.08	0.05	0.02	0.01	0.02	0.07	0.12	0.07		
MgO	1.79	1.42	0.21	0.79	0.19	2.77	0.23	1.78	0.68	8.18	7.08	6.23		
CaO	0.47	0.38	0.24	0.81	0.85	0.52	0.18	0.69	0.41	8.18	4.47	8.69		
Na_2O	4.22	5.26	5.51	3.84	4.70	4.62	3.46	2.95	2.81	2.60	3.46	3.40		
K_2O	2.13	0.50	3.31	3.10	3.57	1.34	3.98	2.30	2.63	0.70	0.27	0.40		
P_2O_5	0.75	0.05	0.04	0.07	0.05	0.07	0.04	0.05	0.05	0.23	0.27	0.23		
LOI	1.56	0.98	0.77	1.89	0.92	2.80	1.47	2.35	1.45	5.16	5.08	2.85		
Total	99.30	99.38	100.11	99.85	99.63	101.58	99.35	99.54	99.36	99.66	98.90	99.38		
La						32.00					8.20			
Ce						68.00					14.90			
Pr						8.90					4.20			
Nd						41.00					10.50			
Sm						8.00					3.10			
Eu						1.63					1.00			
Gd						7.90					6.40			
Tb						1.00					1.30			
Dy						7.00					3.80			
Но						1.20					0.83			
Er						3.80					1.60			
Tm						0.68					0.27			
Yb						3.30					1.98			
Lu						0.44					0.98			
ΣREE						184.85					59.06			
$(La/Yb)_N$						6.96					2.97			
δEu						0.62					0.67			

2 测试方法、结果与讨论

本文对采自斜峪关群的 12 件火山岩样品和采自 草滩沟群的 7 件火山岩样品进行了全岩主量、稀土和 微量元素分析,测试工作在北京大学地球与空间科学 学院的 ICP-MS 实验室完成。收集并重新处理前人 (孙民生等,1995;王德耀,2002)地球化学分析结果 20 件(表 1、2)。对 12 件火山岩样品进行了 Rb、Sr、Sm、 Nd 和 Pb 同位素分析,测试工作利用中国地质科学院 地质研究所同位素实验室的 MAT-261 固体同位素质 谱 计进行, Nd 同位素质量分馏用¹⁴⁶ Nd/¹⁴⁴ Nd = 0.7219,Sm/Nd 比值测定精度优于 0.1%, Sm 和 Nd 流程空白= 5×10^{-11} g; Sr 同位素质量分馏用⁸⁷ Sr/⁸⁶ Sr =8.37521, Rb/Sr 比值测定精度优于 0.1%, Rb 和 Sr 流程空白= $10^{-9} \sim 10^{-10}$ g。详细实验流程参见张宗 清等(1987)和叶笑江等(1990)描述。收集并重新处 理前人(张宗清等,1994)分析结果 7 件(表 3)。铅同 位素测试在中国科学院地质与地球物理研究所同位 素实验室利用 VG354 固体质谱仪进行,Pb 流程空白 小于 1×10^{-9} g,标样(NBS981)的²⁰⁴ Pb/²⁰⁶ Pb±1 σ 、 ²⁰⁷ Pb/²⁰⁶ Pb±1 σ 和²⁰⁸ Pb/²⁰⁶ Pb±1 σ 的测试值分别为 0.059003±0.000084、0.91439±0.00017 和2.16441 ±0.00097。详细实验流程见乔广生(1988),结果见 表 4。

锆石 U-Pb 测年利用北京离子探针中心的 SHRIMP-II采用标准测定程序进行,详细的分析流 程见刘敦一等(2003)和简平等(2003)的详细论述。 应用澳大利亚国家地质调查局标准锆石 TEM 进行 元素间的分馏校正,用澳大利亚国立大学地学院标 准锆石 SL13(572 Ma,U=238×10⁻⁶)标定样品的 U、Th及 Pb 含量。数据处理采用 Isoplot 软件。普 通 Pb 由实测²⁰⁴ Pb 校正。所有测点的误差均为 2σ, 所采用的²⁰⁶ Pb/²³⁸ U 加权平均年龄具 95%的置信 度。样品 QD04-72的 SHRIMP锆石 U-Pb测年结

表 3 斜峪关群和草滩沟群火山岩 Rb, Sr, Sm 和 Nd 同位素

Table 3 Isotopic analyses for Rb, Sr, Sm, and Nd of volcanic rocks from the Xieyuguan and Caotangou Group

			•	·									·	0	0		•	
地屋	十十五日	岩性	样品	Rb	Sr	$\frac{^{87}}{\text{Rb}}$	$\frac{^{87}}{\text{Sr}}$	20	Sm	Nd	$\frac{147}{5}$ Sm	143 Nd	20	Is-	Ind	ENU	tom	fs-/NJ
л <u>с</u> /Д	- C		тты	$(\mu g/g)$	$(\mu g/g)$	⁸⁶ Sr	⁸⁶ Sr	20	$(\mu g/g)$	$(\mu g/g)$	¹⁴⁴ Nd	¹⁴⁴ Nd	20	~ 51	~140	CING	* Divi	5 5m/ Nu
	陈	安玄岩	QD04-08	73.56	1057.10	0.2013	0.70649	11	7.33	44.55	0.0995	0.512256	14	0.705138	0.511948	5.42	1192	-0.49
	河		Q D04-09	0.69	149.90	0.0132	0.70354	10	2.68	8.11	0.1997	0.512944	14	0.703453	0.512327	12.81	2233	0.02
			Q D04-12	0.49	782.70	0.0018	0.707062	13	3.91	14.93	0.1582	0.512609	11	0.707050	0.512120	8.77	1483	-0.20
	斜		Q D04-13	1.40	613.50	0.0066	0.707003	11	3.47	13.24	0.1583	0.512590	14	0.706959	0.512101	8.40	1538	-0.20
	単关	安武岩 「 「 「 俗	Q D04-16	38.78	292.80	0.3832	0.707850	12	3.05	12.35	0.1493	0.512533	15	0.705273	0.512071	7.83	1458	-0.24
Al			QD04-17	23.52	285.50	0.2384	0.707582	9	2.69	10.74	0.1512	0.512529	13	0.705979	0.512062	7.63	1512	-0.23
料 人			Q 8641	4.95	496.93	0.0100	0.706520	4	4.49	18.00	0.1510	0.512510	18	0.706453	0.512043	7.27	1553	-0.23
			Q 8642	0.36	476.73	0.0010	0.706720	4	4.07	18.03	0.1364	0.512390	11	0.706713	0.511968	5.81	1496	-0.31
仲			Q 8643	0.72	738.61	0.0010	0.706350	15	4.63	20.52	0.1366	0.512436	12	0.706343	0.512014	6.70	1409	-0.31
	铜		Q 8644	0.96	740.61	0.0010	0.707370	10	4.32	16.68	0.1564	0.512540	11	0.707363	0.512056	7.53	1619	-0.20
	峪		Q 8646	15.14	926.08	0.0160	0.707240	2	1.97	7.83	0.1519	0.512508	28	0.707132	0.512038	7.18	1580	-0.23
			Q 8648	2.76	291.15	0.0090	0.708390	13	5.46	23.80	0.1386	0.512432	8	0.708329	0.512003	6.50	1455	-0.30
			Q 8649	5.05	322.55	0.0160	0.707550	8	3.09	14.06	0.1330	0.512394	14	0.707442	0.511983	6.09	1426	-0.32
		安玄岩	D03-1	11.51	405.49	0.0821	0.706885	10	5.31	22.92	0.1400	0.512601	12	0.706333	0.512168	10.97	1135	-0.29
		玄武岩	D08-3	3.97	512.28	0.0224	0.705440	10	3.49	12.83	0.1647	0.512678	11	0.705289	0.512171	10.19	1465	-0.16
草	草		D10-1	71.53	190.41	1.0873	0.711977	13	12.12	52.34	0.1399	0.512557	11	0.704696	0.512126	9.25	1225	-0.29
滩沟	滩	È де л. щ	D10-2	38.33	165.77	0.6691	0.710064	13	9.58	47.21	0.1227	0.512553	9	0.705583	0.512175	10.17	1000	-0.38
群	沟	又山石	D10-3	75.67	99.42	2.2042	0.718198	12	8.59	39.65	0.1311	0.512566	11	0.703438	0.512163	9.94	1077	-0.33
		D10-4	77.89	105.53	2.1376	0.717990	10	8.82	42.26	0.1262	0.512554	8	0.703676	0.512166	9.99	1037	-0.36	

注:Q8641~Q8649 样品据张宗清等(1994)数据资料重新校正,年龄值 t=472 Ma (QD04-13=472 Ma, SHRIMP); (¹⁴⁷ Sm/¹⁴⁴ Nd)_{CHUR}= 0.1967; (¹⁴³ Nd/¹⁴⁴ Nd)_{CHUR}=0.512638, (¹⁴⁷ Sm/¹⁴⁴ Nd)_{DM}=0.2137; (¹⁴³ Nd/¹⁴⁴ Nd)_{DM}=0.51315 (Peucat et al., 1988); λ_{Sm} =6.54×10⁻¹² (Lugmair et al., 1978); λ_{Rb} =1.42×10⁻¹¹; λ_5 =9.8485×10⁻¹⁰ (decay constant of ²³⁵U); λ_8 =1.55125×10⁻¹¹ (decay constant of ²³⁸U) (Steiger et al., 1977); 计算公式: $\varepsilon_{Nd}(t)$ =[(¹⁴³ Nd/¹⁴⁴ Nd)i/(¹⁴³ Nd/¹⁴⁴ Nd)_{CHUR}, τ^{-1}]×10⁴; (¹⁴³ Nd/¹⁴⁴ Nd)_{CHUR}, τ =0.512638–0.1967×(e^{tt} -1); (⁸⁷ Sr/⁸⁶ Sr)_i=(⁸⁷ Sr/⁸⁶ Sr)_{sample}, τ -(⁸⁷ Rb/⁸⁶ Sr)_{sample}, τ ×(e^{tt}-1); (¹⁴³ Nd/¹⁴⁴ Nd)_i=(¹⁴³ Nd/¹⁴⁴ Nd)_{sample}, τ -(¹⁴⁷ Sm/¹⁴⁴ Nd)_{sample}, τ <(e^{tt}-1); t_{DM} =1/ λ ×ln {[(¹⁴³ Nd/¹⁴⁴ Nd)_{sample}, τ -(¹⁴³ Nd/¹⁴⁴ Nd)_{DM}, τ]/[(¹⁴⁷ Sm/¹⁴⁴ Nd)_{sample}, τ -(¹⁴⁷ Sm/¹⁴⁴ Nd)_{sm/Nd}=(Sm/Nd)_S/(Sm/Nd)_{CHUR}, τ =1]=[(¹⁴⁷ Sm/¹⁴⁴ Nd)_S/0.1967]-1, S-#AB, CHUR-球粒陨石。

表 4 斜峪关群和草滩沟群火山岩 Pb 同位素 Table 4 Isotopic analyses for Pb of volcanic rocks from the Xieyuguan and Caotangou Group

地 层	地 点	岩 性	样品	$\frac{^{206}\mathrm{Pb}}{^{204}\mathrm{Pb}}$	$\frac{^{207}\mathrm{Pb}}{^{204}\mathrm{Pb}}$	$\frac{^{208}\mathrm{Pb}}{^{204}\mathrm{Pb}}$	$\frac{{}^{207}{\rm Pb}}{{}^{206}{\rm Pb}}$	$\frac{^{208}\mathrm{Pb}}{^{206}\mathrm{Pb}}$
斜峪关群	眉县铜峪煤沟	安山玄武岩	D03-1	17.8756	15.5328	37.8110	0.8689	2.1152
		玄武岩	D08-3	18.0785	15.5718	38.0558	0.8613	2.1050
	太白县唐藏草滩沟	安山岩	D10-1	18.0893	15.5936	38.1111	0.8620	2.1068
草滩沟群		安山岩	D10-2	18.0894	15.5907	38.0830	0.8619	2.1053
		安山岩	D10-3	18.1212	15.5562	37.8852	0.8585	2.0907
		安山岩	D10-4	18.0649	15.5389	37.7354	0.8602	2.0889

果见表 5。

2.1 主量元素

主量元素测试结果表明,斜峪关群和草滩沟群 火山岩均以亚碱性为主。其中,斜峪关群火山岩主 要是 TH 系列;草滩沟群的基性熔岩为 TH 系列, 而中一酸性熔岩则以 CA 系列为主(图 2)。SiO₂ 含 量变化大,包含了从基性到酸性各类岩石。但草滩 沟群火山岩多为中一酸性岩,中基性或基性岩较少 (图 2)。斜峪关群基性一中基性火山岩的 TiO₂ 含 量变化较大(0.40%~1.75%),多集中于 0.40%~ 0.82%,中酸性一酸性火山岩的 TiO₂含量为0.36% $\sim 0.80\%$.

2.2 稀土和微量元素

斜峪关群火山岩稀土元素总量间于 40.85~ 246.72 μ g/g。其中,基性熔岩相对较低,为 40.85 ~71.88 μ g/g,中一酸性熔岩的间于 113.06~ 246.72 μ g/g。基性熔岩的 LREE 轻度富集[(La/ Yb)_N=1.31~3.27],球粒陨石标准化稀土配分形 式呈右倾形(图 3a)。中一酸性熔岩的 LREE 显著 富集[(La/Yb)_N=4.22~26.54],稀土配分形式同 样呈右倾形(图 3b)。N-MORB 标准化的微量元素 蜩形图上,斜峪关群火山岩的大离子亲石元素

	14010	• 511111	ii unuijses	101 211	Section Branno		, orean	ie sumpi	0120	•••••			
	206 Ph	TI	Th		206 PL *	207 DI	+	207 DI	+	206 DI	+	年龄(Ma)
测点		()(10=6)		Th/U	10	$\frac{207 \text{ Pb}}{206 \text{ Pb}}$		$\frac{207 \text{ Pb}}{235 \text{ II}}$		$\frac{200 \text{ Pb}}{238 \text{ LT}}$		$^{206}\mathrm{Pb}$	±
	(%)	$(\times 10^{\circ})$	(×10 °)		(×10°)	10	(70)	0	(%)	0	(70)	²³⁸ U	(%)
QD04-13-1.1	0.36	178	130	0.75	34.2	0.0897	1.9	2.750	3.5	0.2223	2.9	1294	34
QD04-13-2.1	0.30	272	238	0.90	17.7	0.0627	2.8	0.652	4.0	0.0755	2.9	469	13
QD04-13-3.1	1.82	104	66	0.65	6.48	0.0624	9.0	0.615	9.6	0.0714	3.3	445	14
QD04-13-4.1	0.44	242	195	0.83	14.9	0.0630	2.9	0.621	4.4	0.0714	3.3	445	14
QD04-13-4.2	0.80	189	127	0.69	13.2	0.0570	3.7	0.633	4.7	0.0805	2.9	499	14
QD04-13-5.1	0.55	234	384	1.69	15.7	0.0566	3.3	0.604	4.4	0.0774	2.9	480	13
QD04-13-6.1	0.60	241	198	0.85	17.3	0.0844	3.4	0.968	4.6	0.0832	3.1	515	16
Q D04-13-7.1		209	176	0.87	13.4	0.0654	3.2	0.673	4.8	0.0746	3.6	464	16
QD04-13-7.2	0.15	250	217	0.90	16.4	0.0592	2.6	0.621	3.9	0.0760	2.9	472	13
Q D04-13-8.1	0.35	254	184	0.75	17.3	0.0580	4.6	0.630	5.5	0.0788	2.9	489	14
Q D04-13-9.1	0.00	146	107	0.76	9.04	0.0621	3.8	0.619	4.9	0.0723	3.1	450	14
QD04-13-10.1	0.26	560	361	0.67	37.1	0.0554	2.0	0.588	3.5	0.0770	2.8	478	13
QD04-13-11.1		235	394	1.73	15.4	0.0627	2.6	0.660	3.9	0.0764	2.9	475	13
Q D04-13-12.1	0.55	87	61	0.72	5.77	0.0662	9.7	0.698	10.0	0.0764	3.4	474	16
QD04-13-13.1	0.96	100	57	0.59	6.34	0.0587	14.0	0.593	14.0	0.0733	3.4	456	15

表 5 斜峪关群基性熔岩 SHRIMP 锆石测年结果 Table 5 SHRIMP analyses for zircon grains from the volcanic sample (QD04-13)

注:²⁰⁶Pb_c一普通铅含量(%);²⁰⁶Pb*一放射性铅含量(×10⁻⁶)。



图 2 斜峪关群和草滩沟群火山岩 A-F-M 图解(Irvine et al., 1971)和硅-碱图(Le Maitre et al., 1989) Fig. 2 The AFM (Irvine et al., 1971) and TAS (Le Maitre et al., 1989) diagrams for volcanic rocks from the Xieyuguan and Caotangou Group

(LILE,如 Sr、K、Rb、Ba 和 Th)明显富集,而相对 N-MORB 较低的高场强元素(如 Ta、Nb、Ce、P、Zr、 Hf、Sm、Ti、Y 和 Yb)丰度,特别是明显的 Ta、Nb 低 谷(图 3c、d),展示了典型的岛弧火山岩的特征。

草滩沟群基性火山岩(玄武岩和细碧角斑岩)稀 土元素总量为 59.06~65.26 μ g/g,中一酸性熔岩 的间于 92.65~283.82 μ g/g。基性熔岩的 LREE 中度富集[(La/Yb)_N=2.50~2.97],球粒陨石标准 化稀土配分形式呈右倾形(图 3e)。中一酸性熔岩 的 LREE 显著富集[(La/Yb)_N=4.57~10.15],稀 土配分形式同样呈右倾形(图 3f)。N-MORB 标准 化的微量元素蜘形图上,草滩沟群火山岩的大离子 亲石元素(LILE,如 Sr,K,Rb,Ba 和 Th)明显富集, 而相对 N-MORB 较低的高场强元素(如 Ta、Nb、Ce、P、Zr、Hf、Sm、Ti、Y 和 Yb)丰度,以及明显的Ta、Nb 低谷(图 3g、h),展示了典型的岛弧火山岩的特征。

斜峪关群和草滩沟群火山岩低 ôEu 值(0.62~ 1.14)暗示初始玄武质岩浆的分离结晶程度非常低、 初始岩浆中斜长石分异作用很弱。

地球化学构造环境判别图上,斜峪关群和草滩 沟群基性熔岩均投入 Hf/Th<3 的岛弧钙碱性玄武 岩区(图 4),表明这些基性熔岩形成于与板块俯冲 作用相关的岛弧环境,并具有显著的俯冲板片沉积 物加入。





(the values of chondrite and N-MORB used in normalzing the samples are after Sun et al. , 1989; Symbols are the same as those on the Fig. 2)

2.3 Sr, Nd 和 Pb 同位素

斜峪关群火山岩的初始 Sr 比值变化较大,为 0.703453~0.708329,可能是岩石后期构造蚀变造 成的。初始 Nd 比值相对较集中,为 0.511948~ 0.512327,多集中于 0.512003~0.512327 间。草滩 沟 群 火 山 岩 的 初 始 Sr 比 值 为 0.703438 ~ 0.706333,初 始 Nd 比 值 较 集 中 于 0.512126 ~ 0.512175。斜峪关群和草滩沟群火山岩的 ε_{Nd} 值均



图 4 基性火山岩 Hf/3-Th-Nb/16 构造环境判别图 (据 Wood,1980)

Fig. 4 Th-Hf/3-Ta discrimination diagram (Wood,

1980) showing tectonic setting of volcanic rocks from the Xieyuguan and Caotangou Groups

WPB一板内玄武岩; E-MORB一富集地幔洋中脊玄武岩; N-MORB一正常洋中脊玄武岩; IAT一岛弧拉斑玄武岩; CAB— 岛弧钙碱性玄武岩;箭头示从岛弧拉斑玄武岩向钙碱性玄武 岩;岩浆中的沉积物含量增加。图例同图 2;箭头显示初始岩浆 中沉积物增加的趋势

Symbols are the same as those on the Fig. 2. Arror showing an increasing of sediment input into primitive magma

为正值(+5.42~+12.81),表明斜峪关群和草滩沟 群火山岩主要来自富集地幔源区,在(⁸⁷ Sr/⁸⁶ Sr_i)-(¹⁴⁴ Nd/¹⁴³ Nd_i)判别图上,二群火山岩落入 EMI 和 EMII 区域(图 5a)。

斜峪关群和草滩沟群火山岩的²⁰⁸ Pb/²⁰⁴ Pb、 ²⁰⁷ Pb/²⁰⁴ Pb 和²⁰⁶ Pb/²⁰⁴ Pb 分别为 37.8110 ~ 38.1111、15.5328~15.5936 和 17.8756~18.1212。 在²⁰⁷ Pb/²⁰⁴ Pb-²⁰⁶ Pb/²⁰⁴ Pb 协和图上,斜峪关群和草 滩沟群火山岩均位于北半球参考线之上,落入 MORB 和下地壳(LCC)的过渡区域(图 5b)。在 ²⁰⁶ Pb/²⁰⁴ Pb-(⁸⁷ Sr,⁸⁶ Sr_i)判别图上,斜峪关群和草滩 沟群火山岩不成群,分布于大硅质地球(BSE)和初 始地幔(PREMA)附近(图 5c),可能是岩石后期蚀 变造成的。在²⁰⁶ Pb/²⁰⁴ Pb-(¹⁴⁴ Nd/¹⁴³ Nd_i)判别图上, 二群火山岩则集中分布于 EMI 和 EMII 区之间(图 5d),与图 5a 所示一致,暗示斜峪关群和草滩沟群火 山岩的岩浆源区为富集地幔源区。

Sr、Nd、Pb 同位素组成综合分析表明,斜峪关 群和草滩沟群火山岩的岩浆源区为混染的富集地幔 源区,表明斜峪关群和草滩沟群火山岩是俯冲板片 熔融和地壳混染的产物,进而说明斜峪关群和草滩 沟群火山岩是与俯冲作用相关的岩浆活动的产物, 形成于岛弧环境。

2.4 SHRIMP 锆石 U-Pb 年代

从斜峪关群熔岩样品(QD04-13)中选出的锆石 颗粒大小不一,最大粒度约 220 μm。锆石多呈柱状 自形晶,具典型的岩浆振荡环带结构,内含包体,极 个别颗粒内含锆石捕晶(图 6)。

本文对选自熔岩样品 QD04-13 的锆石共进行 了 15 个点的年代学测量(表 5)。其中,两个颗粒似 乎具锆石捕晶而呈核幔结构,但实际测年结果表明, 这些不同锆石晶域的 SHRIMP 年龄在误差范围内 大体一致(如测点 QD04-13-4.1 与 QD04-12-4.2、 QD04-13-7.1 与 QD04-13-7.2,见表 5)。15 个测点 中,一个测点(QD04-13-1.1)的年龄较大,为 1294± 34 Ma,可能是锆石捕晶的时代,可能代表混染地壳 的时代。其他 14 个测点给出一个非常谐和的 ²⁰⁶ Pb/²³⁸ U 加权平均年龄 472±11 Ma(图 7),表明 斜峪关群基性熔岩形成时代为早奥陶世。

本文 SHRIMP 测年结果明显大于前人获得的 铜峪斜峪关群大理岩中黄铁矿 Pb-Pb 年龄(402 Ma,陕西地质八队,1978),后者可能是代表了变形 变质时代。同时,本文的 SHRIMP 测年结果也明显 晚于眉县铜峪斜峪关群变质火山岩 Sm-Nd 等时线 年龄(847±98 Ma,张宗清等,1994)。后者以及斜 峪关群和草滩沟群火山岩的 tpm 年龄(100~2233 Ma,多集中于1200~1500 Ma,见表3),与本文获得 的捕晶锆石年龄(1294±34 Ma)大致相当,表明斜 峪关群火山岩的初始岩浆源区主要受元古宙地壳混 染。本文获得的斜峪关群火山岩的 SHRIMP 年龄 也大于涝峪斜峪关群全岩 Rb-Sr 等时线年龄(365 Ma 宋子季,1988:207 Ma,张维吉等,1987)、眉具铜 峪斜峪关群变质火山岩 Rb-Sr 等时线年龄(103 Ma,张宗清等,1994),显然,前人的这些测年结果代 表了晚古生代和中生代的构造变形/变质事件的时 代。

但是,本文对斜峪关群火山岩的 SHRIMP 测年 结果与前人在草滩沟群以及与斜峪关群相当层位中 发现的古生物化石时代(寒武纪一奥陶纪,陕西地质 八队,1980;杨子超等,1984;曹宣铎等,1990)非常一 致,表明斜峪关群和草滩沟群均形成于早古生代,岩 浆活动的峰期为奥陶纪。如前文所述,斜峪关群和 草滩沟群的岩石组合具有较大差异,我们认为二者 应是同期异相产物。

3 结论

结合前人研究成果,本文岩石学、地球化学、同



图 5 玄武岩 Sr-Nd-Pb 同位素判别图(a,c,d 据 Zindler et al., 1986;b 据 Allegre et al., 1988) Fig. 5 Diagrams of ¹⁴³ Nd/¹⁴⁴ Nd vs ⁸⁷ Sr/⁸⁶ Sr, ²⁰⁶ Pb/²⁰⁴ Pb vs ²⁰⁷ Pb/²⁰⁴ Pb, ⁸⁷ Sr/⁸⁶ Sr vs ²⁰⁶ Pb/²⁰⁴ Pb, and ¹⁴³ Nd/¹⁴⁴ Nd vs ²⁰⁶ Pb/²⁰⁴ Pb for basalt samples from the Xieyuguan and Caotangou Groups (a, c and d are after Zindler et al., 1986; b is after Allegre et al., 1988)

□--草滩沟群;●--斜峪关沟群;

□-Volcanic rock samples from the Caotangou Group; ●-Volcanic rock samples from the Xieyuguan Group



图 6 锆石阴极发光图像

Fig. 6 Cathodoluminescence images showing the external appearances and internal structures of the zircon grains from the sample QD04-07



图 7 SHRIMP 锆石 U-Pb 谐和曲线 Fig. 7 SHRIMP zircon U/Pb concordia plots for samples discussed in the text

位素地球化学以及 SHRIMP 年代学等的综合研究 表明,斜峪关群和草滩沟群为早古生代构造一岩石 单元,是同期异相产物,均形成于岛弧构造环境,是 早古生代早期北秦岭板块俯冲、增生造山作用的产 物,弧岩浆活动峰期为奥陶纪。这一结论与前人推 断(如,李春昱等,1984,1978;任纪舜等,1980,1990; 肖思云等,1988,张国伟等,1988;许志琴等,1988;贾 承造等,1988;王润三等,1990)一致。

致谢:感谢刘树文、杨之青、张玉海、陶华、王进 辉和唐索寒等在实验室工作中的帮助,感谢陕西区 调队陈家义、韩芳林和陈高朝等在野外地质调查过 程中的指导与协助。

参考文献

- 曹宣铎,张瑞林,张汉文. 1990. 秦巴地区泥盆纪地层及重要含矿 层位形成环境的研究.中国地质科学院西安地质矿产研究所所 刊,(27):1~124.
- 贾承造,施央申,郭令智.1988.东秦岭板块构造.南京:南京大学 出版社,1~130.
- 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.
- 李采一,马国建,陈瑞保. 1990. 对河南二郎坪群层序及时代的新 认识.中国区域地质,9(2):181~185.
- 李春昱,刘仰文,朱宝清,冯益民,吴汉泉. 1978. 秦岭及祁连山构 造发展史.见:国际交流地质学术论文集(1).北京:地质出版 社,174~187.
- 李春昱,王荃,刘雪亚,汤耀庆.1984.亚洲大地构造的演化.中国 地质科学院院报,(10):1~49.
- 刘敦一,简平,张旗,张福勤,石玉若,施光海,张履桥,陶华. 2003. 内蒙古图林凯蛇绿岩中埃达克浅色岩 SHRIMP U-Pb 测 年. 地质学报,77(3):317~327.

- 表放,张元国,刘长乐. 1995. 河南东秦岭北部晚古生代孢子化石 的发现及其意义. 中国区域地质,14(2):112~117.
- 乔广生. 1988. 同位素分馏分析标准—同位素质谱分析新进展. 中 国科学(A辑) 31(10): 1263~1268.
- 任纪舜,姜春发,张正坤,秦德余. 1980. 中国大地构造及其演化. 北京:科学出版社,1~124.
- 任纪舜,陈廷愚,牛宝贵,刘凤仁.1990.中国东部及邻区大陆岩石 圈的构造演化与成矿.北京:科学出版社,58~66.
- 陕西省地质矿产局. 1989. 陕西省区域地质志. 北京: 地质出版社, 1~698.
- 陕西地层表编写组.1983.西北地区区域地层表一陕西省分册.北 京:地质出版社,1~258.
- 宋志高,贾群子,张治洮,张莓.1991.北秦岭一北祁连(天水一宝鸡)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,(34):1~71.
- 宋子季,张维吉.1987.陕西眉县一蓝田间下古生界斜峪关群的建 立.陕西地质,5(1):12~34.
- 宋子季,张维吉,安三元.1988.北秦岭北部早古生代断陷带古海 相火山岩特征及其形成环境.中国地质科学院西安地质矿产研 究所所刊,(24):51~63.
- 孙民生,董恒笔. 1995. 再论草滩沟的层序划分及时代归属. 陕西 地质,13(2):22~30.
- 孙勇, 卢欣祥, 韩松, 张国伟. 1996. 东秦岭早古生代二郎坪蛇绿岩 片的组成和地球化学. 中国科学(D辑), 26(增刊): 49~55.
- 王德耀. 2002. 草滩沟群、丹凤岩群火山岩对比及其构造环境分析. 西北地质, 35(4): 59~66.
- 王润三,刘文荣,车自成,刘良.1990.二郎坪群蛇绿岩的产出环境.见:刘国惠,张寿广主编.秦岭一大巴山地质论文集.北京:北京科学技术出版社,154~166.
- 王学仁. 1995. 河南西峡湾潭地区二朗坪群微体化石研究. 西北大 学学报, 25(4): 353~358.
- 肖思云,张维吉,宋子季. 1988. 北秦岭变质地层,西安:西安交通 大学出版社,1~320.
- 许志琴, 卢一伦, 汤耀庆. 1988. 东秦岭复合山链的形成一变形、演 化及板块动力学. 北京:中国环境科学出版社, 1~193.
- 杨子超,刘剑,金勤海. 1984. 陕西省凤县红花铺、杨家岭火山岩系 中腕足类等动物化石的发现及其意义. 陕西地质,2(增刊):12 ~16.
- 叶笑江,张宗清. 1990. Nd 比值测定中的 Sm、Nd 分离 HDEHP 分 离法. 分析测试通报, (3): 6~9.
- 张二朋,牛道韫,霍有光,张兰芳,李桂益. 1993. 秦岭及邻区地 质一构造特征概论.北京:地质出版社,1~291.
- 张国伟,梅志超,李桃红. 1988. 秦岭造山带的形成及其演化. 西安:西北大学出版社,86~98.
- 张国伟,张本仁,袁学诚,肖庆辉. 2001. 秦岭造山带与大陆动力 学.北京:科学出版社,1~855.
- 张思纯, 唐尚文. 1983. 东秦岭北部早古生代放射虫硅质岩的发现 与板块构造. 陕西地质, (2):1~9.
- 张维吉.1987.北秦岭地质构造演化基本特征.见:西北大学地质 系成立四十五周年学术报告会论文集(下册).西安:西北大学 出版社,312~320.
- 张宗清, 叶笑江. 1987. 稀土元素的质谱同位素稀释分析和 ¹⁴³Nd/¹⁴⁴Nd比值的精确测定方法.中国地质科学院地质研究 所所刊, 17: 108~128.
- 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.
- Allegre C J, Lewin E, Dupre B. 1988. A coherent crust-mantle model for the uranium-thorium-lead isotopic system. Chem.

Geol., 70: 211~234.

- Irvine T N, Baragar W R A. 1971. A guide to the chemical classification of the common volcanic rocks. Can. J. Earth Sci., 8: 523~548.
- Le Maitre R W, Bateman P, Dudek A, Keller J, Lameyre Le Bas M J, Sabine P A, Schmid R, Sorensen H, Streckeisen A, Woolley A R, Zanettin B. 1989. A classification pf igneous rocks and glossary of terms. Blackwell, Oxford.
- Lugmair G W, Marti K. 1978. Lunar initial ¹⁴³Nd/¹⁴⁴ Nd: Differential evolution of the lunar crust and mantle. Earth Planet. Sci. Letters, 39: 3349~3357.
- Peucat J J, Vidal P, Bernard-Griffiths J. 1988. Sr, Nd, Pb isotopic systematics in the Archean low- to high-grade transition zone of southern India: syn-accretion vs. postaccretion granulites. J. Geol., 97: 537~550.

- 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. Earth Planet. Sci. Lett., $50: 11 \sim 30.$
- Steiger R H, Jager E. 1977. Subcommission on geochronology: convention of the use of decay constants in geo-and cosmochronology. Earth Planet. Sci. Letters, 36: 359~362.
- 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. Magamtism in Ocean Basins. Geol. Soc. London Spec. Pub., 42: 315~345.
- Zindler A, Hart S R. 1986. Chemical geodynamics. Am. Rev. Earth Planet. Sci., 14: 493~571.

Tectonic Setting and SHRIMP Age of Volcanic Rocks in the Xieyuguan and Caotangou Groups: Implications for the North Qinling Orogenic Belt

YAN Quanren^{1, 2)}, WANG Zongqi¹⁾, CHEN Junlu³⁾, YAN Zhen¹⁾,

WANG Tao¹⁾, LI Qiugeng¹⁾, JIANG Chunfa¹⁾, ZHANG Zongqing¹⁾

1) Institute of Geology, Chinese Academy of Geological Sciences, Beijing, 100037

2) Beijing SHRIMP Center, Chinese Academy of Geological Sciences, Beijing, 100037

3) Xian Institute of Geology and Mineral Resources, China Geological Survey, Xian, 710054

Abstract

Geochemical analyses in the present paper showed that volcanic rocks in the Xieyuguan and Caotangou groups are predominated by the subalkaline series, in which basaltic lavas are mainly tholeiitic series, while the intermediate-acid rocks in the Caitangou Group are characterized by calc-alkaline series. Basaltic lavas in the Xieyuguan and Caotangou groups are slightly enriched in LREE ($(La/Yb)_N = 1.31 \sim 3.27$), while the intermediate-acid lavas are significantly enriched in LREE ($(La/Yb)_N = 4.22 \sim 26.54$). Low Euvalues ($\delta Eu = 0.62 \sim 1.14$) of volcanic rocks in the two groups indicate a poor fractionation and very weak partition of plagioclase from a primitive basaltic magma. Typically, volcanic rocks from the two groups are characterized by selective enrichment of LILE, low abundances of HFSE relative to N-MORB, and pronounced troughs at Ta and Nb, which indicates that these volcanic rocks were formed in an arc setting. Isotopic analyses for volcanic rocks from the two groups show wide ranges of initial strotium (0.703438 \sim 0.708329), and initial neodymium (0.512003 \sim 0.512327). Positive ϵ_{Nd} values (+5.42 \sim +12.81) indicate that these volcanic rocks were derived from enriched mantle (EMI and/or EMII), with crustal contamination. SHRIMP U-Pb analyses for zircon grains from a basaltic sample yielded a mean age of 472 ± 11 Ma (n=14, MSWD=1.94), which clearly identifies an early Ordovician volcanic arc, or subductionaccretion orogeny in the early Paleozoic in the North Qinling organic belt. A xenocrystic core within a zircon grain with an age of 1294 ± 34 Ma, together with $t_{\rm DM}$ ages, indicates that the primitive magma was apparently contaminated by Proterozoic crust.

Key words: Xieyuguan Group; Caotangou Group; volcanics; SHRIMP; geochemistry; Sr-Nd-Pb isotopes; tectonic setting; Qinling

闫全人等:北秦岭斜峪关群和草滩沟群火山岩成因的地球化学和同位素约束、 SHRIMP年代及其意义



- 1. 块状熔岩。
- 3. 块状熔岩中的硬灰岩夹层(箭头)。
- 5. 角砾状火山岩;角砾分成主要是基性熔岩。
- 2. 块状熔岩内的含黄铜矿(CuFeSt)颗粒。
- 4. 块状熔岩中的杏仁体(浅绿色)。
- 角砾状熔岩;角砾成分主要是凝灰岩。地质镱长= 400mm;红色标直径=35mm。

图版I

闫全人等:北秦岭斜峪关群和草滩沟群火山岩成因的地球化学和同位素约束、 SHRIMP 年代及其意义



- 2. 杏仁状熔岩; 基质间题结构; 含少许辉石斑晶(样品
 - 8. 块状熔岩;
- 3. 块状熔岩; 间隐结构(样品 QD04-14)。

QD04-13).

- 4. 決状熔岩中的黄铜矿颗粒(黑色部分;样品 QD04-15)。

 5.6. 角砾状熔岩中的基性岩角砾;基质呈间隐结构(样品 QD04-16 和 QD04-17)。
- ?. 块状熔岩;变余斑状结; 斑晶为蚀变角闪石和长石(样 品 QD04-08)。
- 1~6. 眉县斜峪关。
- 7~8. 周至县黒河公路;正交偏光。