

doi:10.3969/j.issn.1007-3701.2017.04.002

## 东秦岭镇平地区花岗岩岩石地球化学特征及地质意义

赖亚<sup>1</sup>, 赵国春<sup>1\*</sup>, 李文兰<sup>2</sup>, 赖群生<sup>3</sup>, 樊中玲<sup>3</sup>, 易志强<sup>3</sup>, 文景<sup>3</sup>

LAI Ya<sup>1</sup>, ZHAO Guo-Chun<sup>1</sup>, LI Wen-Lan<sup>2</sup>, LAI Qun-Sheng<sup>3</sup>, FAN Zhong-Ling<sup>3</sup>, YI Zhi-Qiang<sup>3</sup>, WEN Jing<sup>3</sup>

(1. 中国地质大学(北京), 北京 100083; 2. 中国科学院大学地球科学学院, 北京 100049;

3. 河南省地质矿产勘查开发局第一地质勘查院, 郑州 450000)

(1. China University of Geosciences (Beijing), Beijing 100083, China;

2. College of Earth Science, University of Chinese Academy of Science, Beijing 100049, China;

3. No.1 geological exploration institute, Henan provincial bureau of geo-exploration and mineral development, Zhengzhou 450000, China)

**摘要:** 石门岩体和五垛山岩体位于北秦岭构造带的东段, 侵入于下古生界二郎坪群。通过 LA-ICP-MS 锆石 U-Pb 同位素定年, 获得石门岩体的年龄为  $428.3 \pm 2.1$  Ma, 五垛山岩体的年龄为  $414.5 \pm 2.3$  Ma。两个岩体岩性均为黑云母二长花岗岩。岩石地球化学研究表明, 石门岩体和五垛山岩体均显示出 I 型花岗岩类的地球化学属性, 两个岩体的稀土元素配分模式具有弱的 Eu 负异常, 岩石地球化学特征显示其源岩物质均以地壳为主, 并可能有幔源物质参与。根据岩体的地球化学特征和年代学特征, 结合区域地质构造分析, 认为这两个岩体的形成与早古生代扬子板块向华北板块之下的俯冲碰撞作用有关, 石门岩体形成于碰撞抬升阶段, 五垛山岩体形成于碰撞晚期阶段。

**关键词:** 花岗岩体; 锆石 U-Pb 定年; 构造意义; 东秦岭

中图分类号: P581; P597+3

文献标识码: A

文章编号: 1007-3701(2017)04-330-14

**Lai Y, Zhao G C, Li W L, Lai Q S, Fan Z L, Yi Z Q and Wen J. Lithogeochemical characteristics and geological significance of granitoids in Zhenping area, Eastern Qinling Mountains. *Geology and Mineral Resources of South China*, 2017, 33(4):330-343.**

**Abstract:** Shimen and Wuduoshan granitoid are located in Zhenping area, east segment of North Qinling orogenic belt, intruding into the Erlangping Group. The ages of the Shimen granitoid obtained by LA-ICP-MS zircon U-Pb dating is  $428.3 \pm 2.1$  Ma, the age of Wuduoshan granitoid is  $414.5 \pm 2.3$  Ma. The two granitoid are all biotite granite. Geochemical properties show that both Shimen and Wuduoshan granitoid belong to I type, and both of the ones have weak Eu negative anomaly. Lithogeochemical characteristics suggest that material sources of the two granitoid may be both from crust, possibly participated by small amounts of mantle material. Based on chronology characteristics and regional geological analyses, the authors consider that the granitoid of Shimen and Wuduoshan are related to the subduction of North China block to Yangtze block in early Paleozoic. The Shimen granitoid formed during the uplifting period of the collision, while the Wuduoshan granitoid formed during the late of the plate collision.

**Key words:** granitoid body; U-Pb zircon dating; tectonic significance; east Qinling belt

收稿日期: 2017-11-9; 修回日期: 2017-12-1

基金项目: 2008 年度河南省地质勘查基金(周转金)招标项目(豫国土资发[2009]93 号)镇平县幅、石门幅、安皋幅 1:5 万区域地质、区域矿产调查; 项目编号: ZB [2009]57-5.

第一作者: 赖亚(1991—), 男, 在读硕士研究生, 构造地质学方向, E-mail: 471437827@qq.com.

通讯作者: 赵国春(1963—), 男, 副教授, 岩浆岩和矿田构造方向, E-mail: gczhao@cugb.edu.cn.

秦岭造山带是华北板块和扬子板块长期汇聚形成的复合造山带,西接昆仑和祁连造山带,东连桐柏-大别造山带,是我国中央造山系的重要组成部分<sup>[1-8]</sup>。秦岭造山带至少经历了新元古代、古生代和中生代构造岩浆热事件和造山作用<sup>[9-10]</sup>;区内发育大量花岗岩,研究这些花岗岩的时空分布和地球化学属性对完整了解秦岭造山带的形成和演化有着重要帮助。古生代花岗岩在秦岭岩浆岩中占据了重要地位,且主要分布于北秦岭,南秦岭仅有零星出露。对于北秦岭的花岗岩,前人已做了详细大量的研究<sup>[9-12]</sup>,其中王涛等<sup>[9]</sup>、王晓霞等<sup>[10]</sup>将北秦岭古生代花岗岩的演化过程分为三个阶段,并对各个阶段花岗岩时空演变及对造山作用的响应做了较为详细的探讨。石门岩体和五垛山岩体是北秦岭东部早古生代的两个侵入体。《河南省地质矿产志》<sup>[13]</sup>报道黄龙庙-四棵树岩体(石门岩体)黑云母 K-Ar 年龄为 287 Ma,卢欣祥<sup>[14]</sup>获得四棵树岩体(石门岩体)黑云母 K-Ar 年龄为 287~335 Ma;1:5 万马山口幅区域地质调查<sup>[15]</sup>报道尖顶岩体、黄石洞岩体(五垛山岩体)黑云母 K-Ar 年龄为 312.5 Ma、332.4 Ma、

299.1 Ma,卢欣祥<sup>[16]</sup>获得五垛山岩体  $^{40}\text{Ar}-^{39}\text{Ar}$  年龄为 448 Ma、Rb-Sr 年龄为 480 Ma。以往获得的年龄值受当时测试技术限制年龄值差别较大,为此本文以石门岩体和五垛山岩体为研究对象,对其形成时代、岩浆来源和构造环境等方面进行了讨论。

## 1 地质背景

秦岭造山带北以三门峡-鲁山断裂,南以勉略-襄广断裂为界分别与华北板块和扬子板块相邻;其东部镇平地区以栾川-维摩寺断裂、商丹断裂、浙川断裂为界,自北向南可分为华北板块南缘、北秦岭、南秦岭、扬子板块北缘<sup>[17-18]</sup>(图 1);北秦岭以瓦穴子断裂、朱夏断裂为界,自北向南依次分布有宽坪岩群、二郎坪群、秦岭岩群<sup>[19]</sup>,石门岩体和五垛山岩体侵入于二郎坪群中。宽坪岩群为一套强烈变形、变质程度以高绿片岩相为主的中低级变质岩系,原岩主要为(中)基性火山岩、碎屑岩及碳酸盐岩,总体显示为一套类复理石建造<sup>[20-25]</sup>。二郎坪群是由两个大的沉积-火山喷发旋回组成,变质程度自

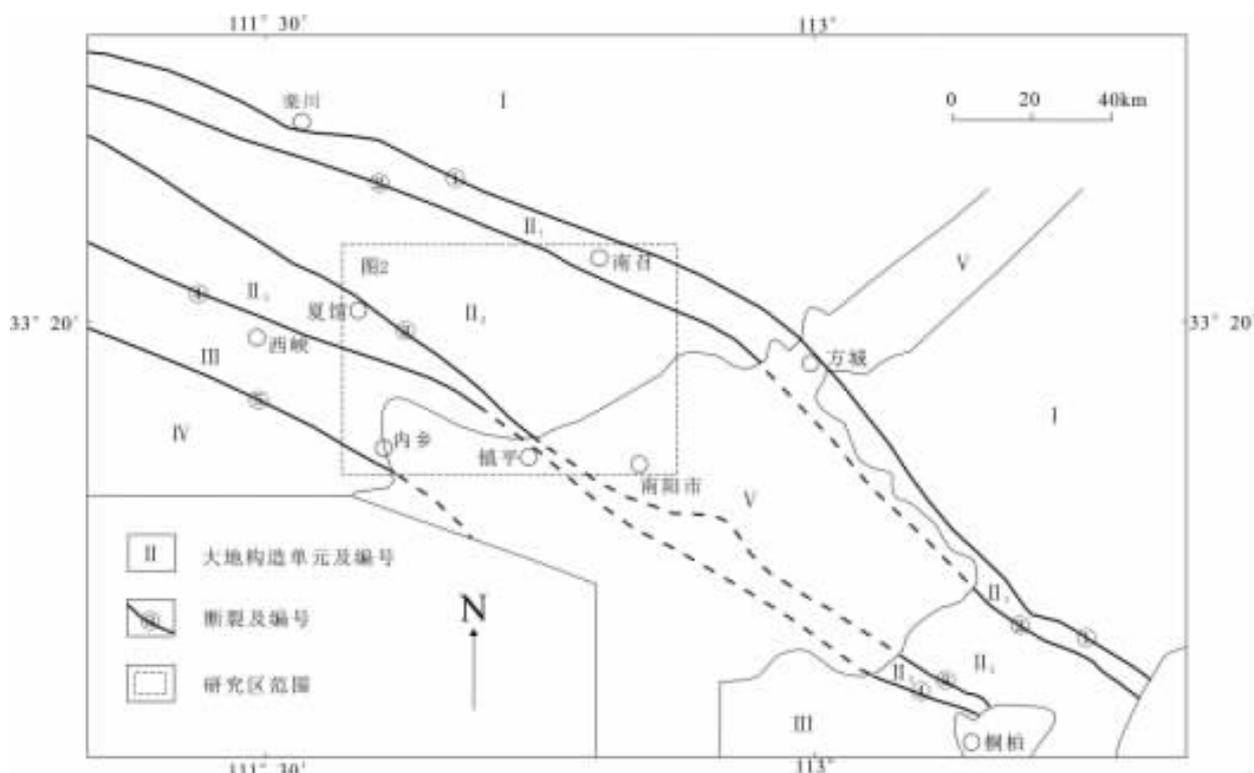


图1 东秦岭大地构造略图

Fig. 1 The tectonics map of east Qinling belt

I-华北板块南缘; II-北秦岭构造带; II<sub>1</sub>-宽坪岩群; II<sub>2</sub>-二郎坪群; II<sub>3</sub>-秦岭群; III-南秦岭构造带; IV-扬子板块北缘; V-新生代盆地; ①栾川-维摩寺断裂; ②瓦穴子-明港断裂; ③朱阳关-夏馆-大河断裂; ④商丹-松扒断裂; ⑤浙川断裂。

西向东由轻微变质至高绿片岩相,形成于大陆边缘弧后裂谷盆地环境<sup>[20,26-28]</sup>,形成时代为早古生代。早古生代早期,华北板块南缘发生弧后扩张,形成了陆缘裂谷型的二郎坪群弧后盆地<sup>[29]</sup>。晚寒武世-早奥陶世,可能存在着以秦岭岩群为核部的双向俯冲,即秦岭洋(商丹洋)沿商丹带向北俯冲、二郎坪群弧后盆地沿朱夏带向南俯冲<sup>[9-10]</sup>;受俯冲作用影响,弧后盆地向北迁移,在其北侧形成了晚古生代栉树园组的裂陷槽沉积,原二郎坪群弧后盆地闭合,俯冲型岩体相继侵位,秦岭岩群向北推覆到二郎坪群之上。秦岭岩群为一套中深变质的长英质(部分为富铝质)陆源碎屑岩-碳酸盐岩夹基性火山岩建造,构造变形强烈,变质程度可达高角闪岩相-麻粒岩相。

## 2 岩体地质及岩石学特征

### 2.1 石门岩体

该岩体分布于四棵树-石门-安皋一带(图

2);北侧侵入早古生代二郎坪群及板山坪岩体,东侧为南阳盆地;西侧被五垛山岩体侵入,二者具有清楚的分界线。石门岩体岩性主要为中细粒黑云母二长花岗岩,少部分为似斑状中粒黑云母二长花岗岩,岩石呈灰白色,中细粒-中粒花岗结构、似斑状结构,块状构造(图3a)。主要矿物组成为:斜长石(30%~40%),自形-半自形板状;钾长石(20%~35%),半自形-它形板状;石英(25%~30%),它形粒状,多呈集合体形状;片状黑云母(5%~10%);白云母1%±(图3b)。似斑状中粒黑云母二长花岗岩中斑晶为钾长石,呈自形-半自形板状,局部卡氏双晶发育,粒度一般为(1~1.5)×(1.5~2.5)cm<sup>2</sup>,少量可达1.5×(2~3)cm<sup>2</sup>,含量3%~20%。

### 2.2 五垛山岩体

该岩体分布于朱夏断裂北侧云磨垛-五垛山一带,南侧侵入推覆到二郎坪群之上的秦岭岩群,西侧和北侧侵入二郎坪群,东侧侵入石门岩体。五垛山岩体岩性主要为中粗粒黑云母二长花岗岩,少部分为中粒黑云母二长花岗岩、似斑状中粒黑

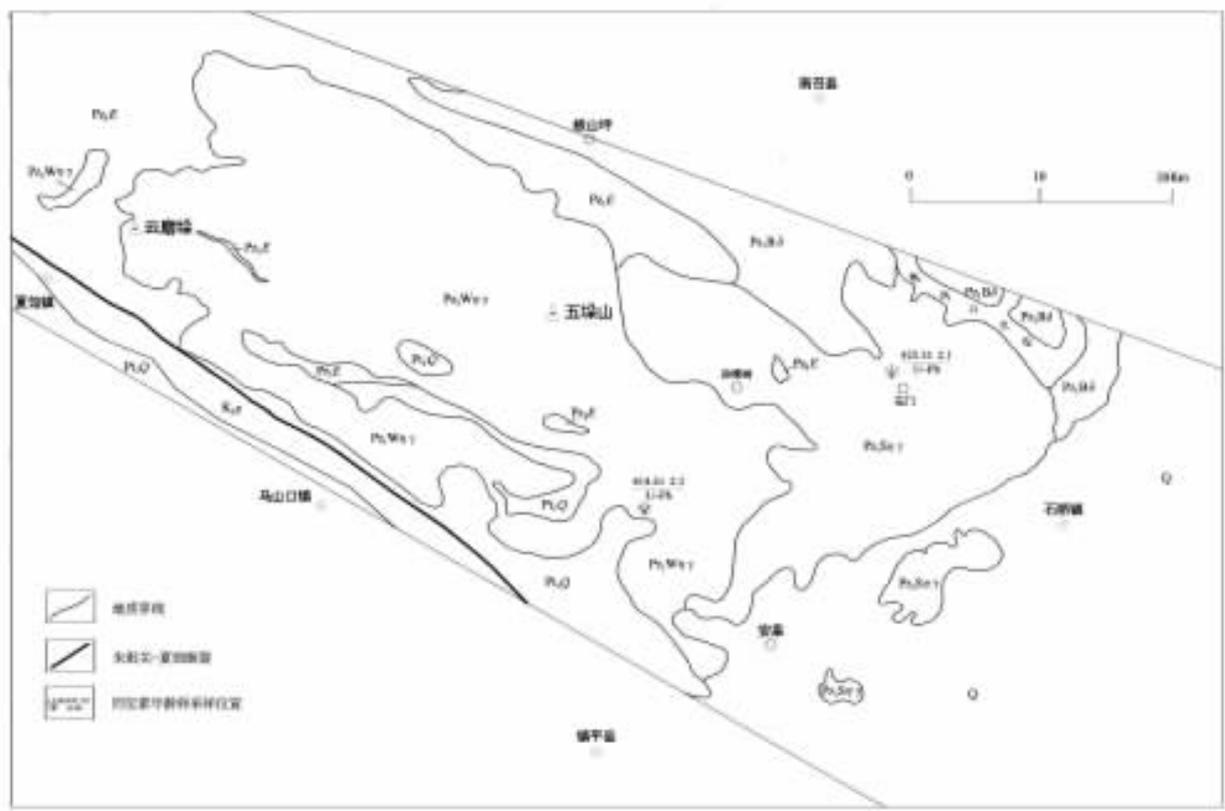


图2 石门岩体和五垛山岩体地质简图

Fig. 2 Schematic geological map of Shimen and Wuduoshan plutons

Q-第四系;K<sub>2g</sub>-白垩系高沟组;P<sub>z1E</sub>-下古生界二郎坪群;P<sub>t1Q</sub>-古元古界秦岭岩群;P<sub>z1W</sub> η γ-早古生代五垛山岩体;P<sub>z1S</sub> η γ-早古生代石门岩体;P<sub>z1B</sub> δ-早古生代板山坪岩体。

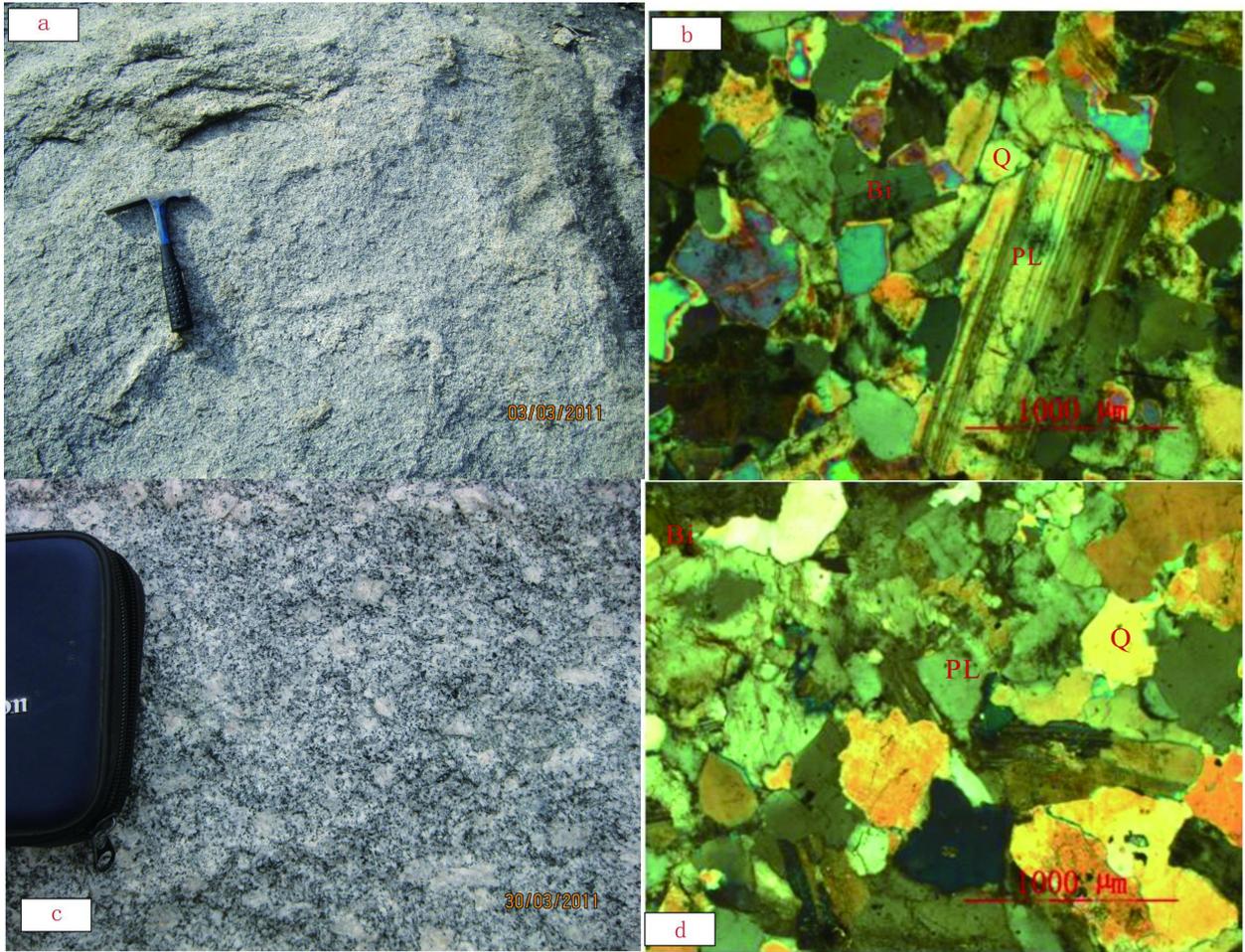


图3 石门岩体和五垛山岩体野外及镜下照片

Fig. 3 Field photographs and microphotographs of the Shimen and Wuduoshan granitoid

Q-石英;PL-斜长石;Bi-黑云母.

云母二长花岗岩,岩石呈灰白色,中粗粒-中粒花岗岩结构、似斑状结构,块状构造(图3c)。主要矿物组成为:斜长石(25%~40%),自形-半自形粒状;钾长石(20%~35%),半自形-它形粒状;石英(25%±),它形粒状;黑云母(3%~7%),片状(图3d)。似斑状中粒黑云母二长花岗岩中斑晶为钾长石,自形-半自形板状,局部卡氏双晶发育;粒度一般为(0.8~1.5)×(1.5~2.5)cm<sup>2</sup>,少量可达(1~2.5)×(4~5)cm<sup>2</sup>,含量10%~30%。

### 3 分析方法

#### 3.1 锆石 U-Pb 定年

石门岩体的样品(ZHS1-2)采集于该岩体的中北部,岩性为中细粒黑云母二长花岗岩,五垛山岩体的样品(ZHW1-2)采集于该岩体的东南部,岩性

为中粗粒黑云母二长花岗岩;样品重量约3kg。样品的锆石单矿物分选由河北省区域地质矿产调查研究所实验室完成。将锆石和标样一起粘在玻璃板上,用环氧树脂浇铸,制成样靶、抛光,并拍摄透射、反射光照片和阴极发光照片,对锆石颗粒的影像特征进行综合分析以初步判断其成因。

锆石 LA-ICP-MS 测试由天津地质矿产研究所完成,测试仪器为激光剥蚀电感耦合等离子质谱仪。实验选择的标样为 91500,<sup>206</sup>Pb/<sup>238</sup>U 年龄的加权平均值误差为 ±2σ。U/Pb 比值数据处理使用软件 LaDating@Zrn, 校正 Pb 同位素处理使用软件 ComPbcorr#3-18(Anderson et al<sup>[30]</sup>),校正后的数据使用美国 Berkeley 地质年代学中心 Ludwig<sup>[31]</sup>编制的 ISOPLOT 和 SQUID 程序计算年龄。

#### 3.2 岩石化学全分析

6 件样品的制样及分析由河南省(地矿局)岩

石矿物测试中心完成。主量元素和微量元素 Rb、Nb、Zr、Ba 采用 X 荧光光谱仪 3080E 测试,按 GB/T14506.28-1993 标准执行,烧失量采用 UV1902PC 紫外分光光度计测试,按 LY/T1253-1999 标准执行;分析的相对标准偏差小于 2%~8%。稀土元素和微量元素 Th、U、Ta、Pb、Hf、Sr 采用热电 XSERIES 2 电感耦合等离子体质谱仪测试,按 DZ/T0223-2001 标准执行;大多数元素检出限可达到  $10^{-8}$ ,少数元素为  $10^{-6}$ (Ba、Zr)和  $10^{-7}$ (Nb、Hf),相对标准偏差小于 10%。

## 4 结果

### 4.1 锆石 U-Pb 定年

两个样品的定年结果见表 1,谐和曲线及加权平均年龄见图 4,定年样品锆石特征分述如下:

(1)样品 ZHS1-2,锆石呈深粉色,部分锆石铁染而呈黄色,透明,金刚光泽。形态为长柱状、短柱状和粒状,粒径 0.03~0.32 mm;晶形为半自形双锥柱状及断柱状,个别为自形双锥柱状;部分锆石内可见黑色、红色固相、气液包体;长宽比 1.3~3.0,少数 3.0~4.9,个别可到 6.0。一些锆石显示核、幔、边结构,核部浑圆状,无明显结晶环带,显示残留核或继承核特征;幔部结晶环带发育的锆石显示岩浆结晶成因特点。位于核部的测点给出 1302 Ma 的不谐和  $^{207}\text{Pb}/^{206}\text{Pb}$  年龄,可解释为残留核或继承核年龄。几个较老的年龄数据(451~461 Ma)与全部年龄值的加权平均值相差较大,可解释为捕获锆石年

龄,不排除是混合年龄的可能,不参与年龄值的计算。Th/U 值为 0.13~0.47(表 1 中省略),获得的锆石  $^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$  加权平均年龄为  $428.3 \pm 2.1$  Ma。

(2)样品 ZHW1-2,锆石呈深粉色,透明,金刚光泽。形态为长柱状、短柱状和粒状,粒径 0.02~0.46 mm;晶形为半自形双锥柱状及断柱状,少数为自形双锥柱状,偶尔可见连晶;部分锆石内可见黑色固相包体和裂纹;长宽比 1.3~3,少数 3~4。一些锆石显示核、幔、边结构,核部浑圆状,无明显结晶环带,显示残留核或继承核特征;发育多层同心环带的锆石显示岩浆结晶成因特点。一些不谐和  $^{207}\text{Pb}/^{206}\text{Pb}$  年龄(598~653 Ma)可能是 Pb 丢失的结果。Th/U 值为 0.28~1.34(表 1 中省略),获得的锆石  $^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$  加权平均年龄为  $414.5 \pm 2.3$  Ma。

### 4.2 岩石地球化学特征

石门岩体和五垛山岩体样品主量、微量和稀土元素分析结果见表 2 及表 3;在 TAS 分类图解(图 5)中,样品均落入花岗岩区。

#### 4.2.1 石门岩体

$\text{SiO}_2$  含量为 72.72%~74.02%,全碱含量 7.83%~8.15%, $\text{K}_2\text{O}/\text{Na}_2\text{O}$  比值为 0.90~1.57, $\text{Al}_2\text{O}_3$  含量 14.31%~15.17%, $\text{MgO}$  含量 0.25%~0.45%, $\text{CaO}$  含量 1.20%~1.47%,具有高硅、碱,低镁的特征。 $\text{A}/\text{CNK}$  值为 1.09~1.13,CIPW 标准矿物计算中出现刚玉,在  $\text{A}/\text{NK}-\text{A}/\text{CNK}$  图解落入过铝质区域(图 6),属于过铝质岩石。里特曼指数  $\sigma(43)=1.92\sim 2.13$ ,在  $\text{SiO}_2-\text{K}_2\text{O}$  图解上落入高钾钙碱性系列区域(图 7)。

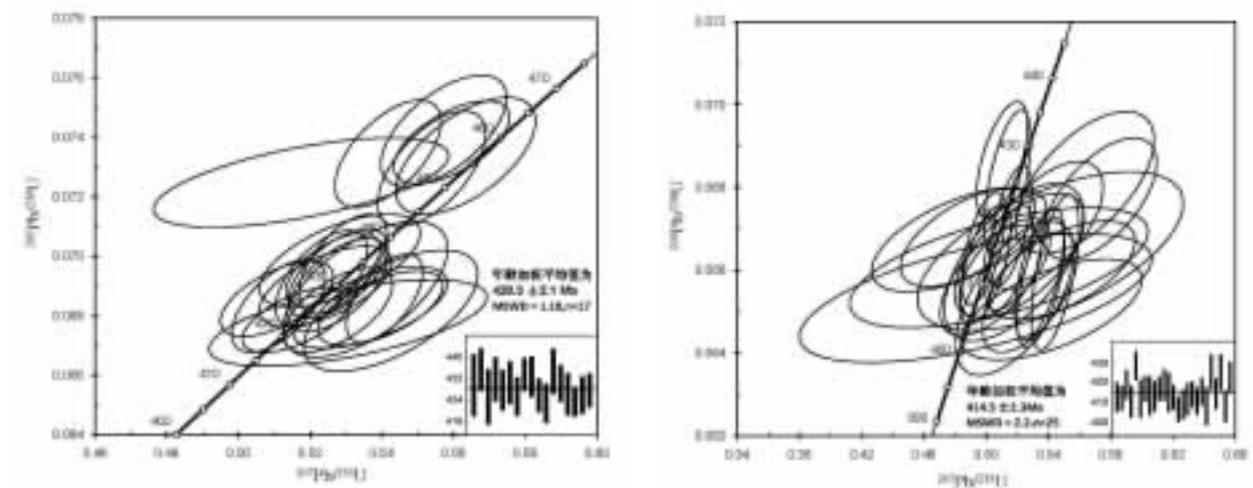


图4 石门岩体(左)、五垛山岩体(右)锆石  $^{207}\text{Pb}/^{235}\text{U}-^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$  谐和曲线及加权平均年龄

Fig. 4 U-Pb concordia and weighted average diagrams of the Shimen(left) and Wuduoshan(right) granitoid

表1 石门岩体和五垛山岩体锆石LA-ICP-MS定年结果  
Table 1 LA-ICP-MS zircon U-Pb data of the Shimen and Wuduo Shan granitoid

样品号	含量( $\times 10^{-6}$ )		同位素比值						年龄(Ma)					
	Pb	U	$^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$	1 $\sigma$	$^{207}\text{Pb}/^{235}\text{U}$	1 $\sigma$	$^{207}\text{Pb}/^{206}\text{Pb}$	1 $\sigma$	$^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$	1 $\sigma$	$^{207}\text{Pb}/^{206}\text{Pb}$	1 $\sigma$		
ZHS1.2														
1	39	550	0.0689	0.0009	0.5354	0.0094	0.0564	0.0009	429	6	435	8	467	33
2	108	473	0.2252	0.0027	2.6213	0.0554	0.0844	0.0006	1310	16	1307	28	1302	15
3	38	501	0.0742	0.0008	0.5573	0.0072	0.0545	0.0006	461	5	450	6	390	26
4	34	454	0.0734	0.0008	0.5634	0.0080	0.0557	0.0007	456	5	454	6	440	29
5	50	684	0.0698	0.0006	0.5283	0.0092	0.0549	0.0010	435	4	431	7	406	40
6	47	666	0.0738	0.0006	0.5595	0.0066	0.0550	0.0006	459	4	451	5	411	24
7	70	967	0.0729	0.0008	0.5539	0.0061	0.0551	0.0006	454	5	448	5	415	22
9	31	428	0.0682	0.0008	0.5425	0.0099	0.0577	0.0014	425	5	440	8	519	54
10	58	848	0.0692	0.0007	0.5232	0.0052	0.0548	0.0005	432	4	427	4	404	21
11	97	1422	0.0686	0.0006	0.5408	0.0043	0.0572	0.0004	428	4	439	4	499	17
12	75	1037	0.0690	0.0006	0.5276	0.0057	0.0554	0.0005	430	4	430	5	430	19
13	45	667	0.0682	0.0006	0.5277	0.0062	0.0561	0.0007	425	4	430	5	458	28
14	51	756	0.0695	0.0005	0.5264	0.0054	0.0549	0.0006	433	3	429	4	408	22
15	46	649	0.0694	0.0006	0.5278	0.0057	0.0551	0.0006	433	4	430	5	418	23
16	39	557	0.0683	0.0005	0.5396	0.0071	0.0573	0.0007	426	3	438	6	505	28
17	154	2225	0.0678	0.0006	0.5306	0.0158	0.0568	0.0021	423	4	432	13	484	82
18	13	186	0.0725	0.0006	0.5175	0.0168	0.0518	0.0016	451	4	424	14	276	73
19	82	1137	0.0734	0.0007	0.5417	0.0061	0.0535	0.0005	457	5	440	5	350	19
20	112	1677	0.0697	0.0007	0.5292	0.0050	0.0550	0.0004	435	4	431	4	414	16
21	33	470	0.0690	0.0006	0.5243	0.0076	0.0551	0.0008	430	3	428	6	417	31
22	68	1036	0.0683	0.0006	0.5112	0.0053	0.0543	0.0005	426	4	419	4	382	21
23	49	749	0.0679	0.0004	0.5160	0.0061	0.0552	0.0006	423	3	423	5	419	25
24	67	984	0.0683	0.0006	0.5368	0.0088	0.0570	0.0010	426	3	436	7	492	37
25	79	1170	0.0686	0.0005	0.5107	0.0064	0.0540	0.0006	427	3	419	5	372	25

续表 1

样品号	含量( $\times 10^{-6}$ )		同位素比值						年龄(Ma)					
	Pb	U	$^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$	$1\sigma$	$^{207}\text{Pb}/^{235}\text{U}$	$1\sigma$	$^{207}\text{Pb}/^{206}\text{Pb}$	$1\sigma$	$^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$	$1\sigma$	$^{207}\text{Pb}/^{235}\text{U}$	$1\sigma$	$^{207}\text{Pb}/^{206}\text{Pb}$	$1\sigma$
ZHW1-2														
1	3	39	0.0661	0.0006	0.5082	0.0392	0.0558	0.0042	412	4	417	32	444	166
2	5	66	0.0660	0.0005	0.5486	0.0192	0.0603	0.0021	412	3	444	16	614	75
3	86	1225	0.0671	0.0006	0.5157	0.0055	0.0558	0.0007	419	4	422	5	443	27
4	20	313	0.0657	0.0006	0.5351	0.0063	0.0591	0.0007	410	4	435	5	569	24
5	87	1282	0.0687	0.0006	0.5101	0.0067	0.0539	0.0007	428	4	419	6	366	29
6	37	519	0.0660	0.0008	0.5442	0.0063	0.0598	0.0008	412	5	441	5	598	28
7	6	78	0.0667	0.0005	0.4825	0.0230	0.0524	0.0025	416	3	400	19	305	109
8	6	75	0.0662	0.0008	0.5178	0.0183	0.0567	0.0020	413	5	424	15	481	78
9	18	210	0.0661	0.0006	0.4994	0.0066	0.0548	0.0007	413	4	411	5	403	29
10	6	77	0.0668	0.0005	0.4882	0.0177	0.0530	0.0019	417	3	404	15	330	82
11	8	104	0.0671	0.0006	0.5370	0.0155	0.0581	0.0017	419	4	436	13	532	64
12	4	47	0.0665	0.0008	0.5411	0.0349	0.0590	0.0037	415	5	439	28	569	137
13	83	1228	0.0661	0.0005	0.5119	0.0120	0.0562	0.0013	412	3	420	10	460	50
14	5	64	0.0651	0.0005	0.5420	0.0237	0.0604	0.0026	406	3	440	19	619	93
15	9	117	0.0655	0.0006	0.5280	0.0124	0.0585	0.0014	409	4	430	10	548	52
16	22	295	0.0659	0.0007	0.5342	0.0064	0.0588	0.0006	411	4	435	5	559	23
17	42	587	0.0663	0.0005	0.5147	0.0062	0.0563	0.0007	414	3	422	5	464	27
18	8	100	0.0658	0.0005	0.5030	0.0133	0.0555	0.0015	411	3	414	11	431	60
19	21	266	0.0665	0.0006	0.4982	0.0057	0.0543	0.0006	415	3	410	5	384	23
20	6	83	0.0653	0.0008	0.5183	0.0155	0.0575	0.0017	408	5	424	13	512	64
21	8	89	0.0681	0.0007	0.5633	0.0182	0.0600	0.0018	425	4	454	15	603	63
22	6	77	0.0664	0.0006	0.5213	0.0171	0.0570	0.0019	414	4	426	14	491	73
23	23	320	0.0681	0.0007	0.5136	0.0061	0.0547	0.0005	425	4	421	5	399	20
24	5	71	0.0653	0.0006	0.4931	0.0462	0.0547	0.0051	408	4	407	38	402	207
25	7	108	0.0677	0.0006	0.5732	0.0149	0.0614	0.0016	422	4	460	12	653	57

稀土元素总量为  $77.24 \times 10^{-6} \sim 191.70 \times 10^{-6}$ , 总量较低且变化较大; 轻重稀土元素比值 LREE/HREE 为 11.45 ~ 16.75,  $(La/Yb)_N$  为 19.47~35.35, 反映了较强的轻重稀土元素分馏, 轻稀土元素富集。稀土元素配分模式图为右倾型 (图 8), Dy-Lu 段曲线大致近水平, 反映了重稀土元素分异不明显; 重稀土元素亏损显著且大致呈平坦型分布, 可能说明了岩浆源区残留体可能聚集了较多的富集重稀土元素的矿物 (如石榴子石和角闪石)。 $\delta Eu$  为 0.47 ~ 0.68, 具明显的 Eu 负异常。该岩体富集大离子亲石元素, 在微量元素蛛网图中, 出现明显的 Nb、P、Ti 负异常 (图 9), 显示出火山弧花岗岩的特征。ZHS1-1、ZHS1-2 两样品具高 Sr 低 Y 的特点,  $Sr/Y > 45$  (50.4、64.0)。

#### 4.2.2 五垛山岩体

$SiO_2$  含量为 70.66% ~ 76.70%, 全碱含量为 8.16% ~ 8.47%,  $K_2O/Na_2O$  比值为 1.46 ~ 1.72,  $Al_2O_3$

含量为 12.53% ~ 14.34%,  $MgO$  含量为 0.14% ~ 0.56%,  $CaO$  含量 0.89% ~ 2.01%, 具有高硅、钾, 低镁的特征。 $A/CNK$  值为 1.01 ~ 1.05, CIPW 标准矿物计算中出现刚玉, 在  $A/NK-A/CNK$  图解中, 落入过铝质区域及边界 (图 6), 属于过铝质岩石。里特曼指数  $\sigma(43) = 2.10 \sim 2.30$ 。在  $SiO_2-K_2O$  图解中, 落入高钾钙碱性系列区域 (图 7)。

稀土元素总量为  $70.78 \times 10^{-6} \sim 353.10 \times 10^{-6}$ , 总量较高且变化大; 轻重稀土元素比值 LREE/HREE 为 24.76 ~ 28.12,  $(La/Yb)_N$  为 44.93 ~ 46.93, 反映了比石门岩体更强的轻重稀土元素分馏, 轻稀土元素更富集。稀土元素配分模式图为右倾型 (图 8), 与石门岩体相似。 $\delta Eu$  为 0.58 ~ 0.93, 具明显的 Eu 负异常至微弱负异常, 明显负异常可能是岩浆结晶分异期间斜长石结晶将 Eu 带出引起, 表明了岩浆分异演化的不均一。该岩体富集大离子亲石元素, 在微量元素蛛网图中, 亦出现明显的 Nb、P、Ti

表2 石门岩体和五垛山岩体主量元素分析结果 (%)

Table 2 Major elements analysis results (%) of samples from the Shimen and Wuduoshan plutons

岩体名称 岩性	石门岩体 中细粒黑云母二长花岗岩			五垛山岩体 中粒黑云母二长花岗岩		
	样品号	ZHS1-1	ZHS1-2	ZHS1-3	ZHW1-1	ZHW1-2
$SiO_2$	74.02	73.16	72.72	71.24	70.66	76.70
$Al_2O_3$	14.50	15.17	14.31	14.34	14.33	12.53
$Fe_2O_3$	0.59	0.80	0.95	1.29	1.09	0.19
FeO	0.13	0.13	0.13	0.90	1.03	0.39
TiO <sub>2</sub>	0.10	0.15	0.17	0.34	0.36	0.08
CaO	1.43	1.47	1.20	1.79	2.01	0.89
MgO	0.25	0.29	0.45	0.56	0.56	0.14
$K_2O$	3.66	3.76	4.88	4.77	4.80	5.33
$Na_2O$	4.08	4.09	3.11	3.27	3.21	3.09
$P_2O_5$	0.03	0.07	0.05	0.11	0.11	0.02
MnO	0.02	0.02	0.02	0.03	0.03	0.01
烧失量	0.63	0.96	1.55	0.40	0.64	0.22
总计	99.43	100.07	99.53	99.04	98.83	99.60
$\sigma(43)$	1.92	2.04	2.13	2.27	2.30	2.10
A/CNK	1.09	1.13	1.13	1.05	1.01	1.01
$K_2O+Na_2O$	7.83	7.92	8.15	8.15	8.16	8.47
$K_2O/Na_2O$	0.90	0.92	1.57	1.46	1.50	1.72

$\sigma$  . 里特曼指数;  $A/NK = Al_2O_3 / (Na_2O + K_2O + CaO)$ , 分子比

表3 石门岩体和五垛山岩体微量元素和稀土元素分析结果( $\times 10^{-6}$ )

Table 3 Trace elements and REE analysis results( $\times 10^{-6}$ )of samples from the Shimen and Wuduoshan plutons

岩体名称	石门岩体			五垛山岩体		
岩性	中细粒黑云母二长花岗岩			中粒黑云母二长花岗岩		
样品号	ZHS1-1	ZHS1-2	ZHS1-3	ZHW1-1	ZHW1-2	ZHW1-3
La	16.18	23.56	43.46	86.35	97.49	97.49
Ce	28.63	41.74	78.95	152.70	155.80	155.80
Pr	3.45	5.21	8.08	14.58	14.83	14.83
Nd	12.78	19.40	28.52	49.49	49.72	49.72
Sm	2.65	3.23	4.70	6.29	6.15	6.15
Eu	0.53	0.65	0.67	1.09	1.11	1.11
Gd	2.10	2.44	3.92	5.47	5.35	5.35
Tb	0.33	0.34	0.60	0.67	0.65	0.65
Dy	1.54	1.40	2.96	2.89	2.85	2.85
Ho	0.26	0.23	0.53	0.53	0.54	0.54
Er	0.65	0.59	1.41	1.45	1.61	1.61
Tm	0.09	0.08	0.21	0.19	0.24	0.24
Yb	0.56	0.45	1.27	1.16	1.46	1.46
Lu	0.08	0.07	0.19	0.18	0.22	0.22
Y	7.40	6.98	16.24	13.65	15.09	15.09
$\Sigma$ REE	77.24	106.34	191.70	336.69	353.10	353.10
LREE	64.22	93.70	164.38	310.50	325.10	325.10
HREE	5.61	5.60	11.09	12.54	12.92	12.92
LREE/HREE	11.45	16.75	14.82	24.76	25.16	25.16
(La/Yb) <sub>N</sub>	19.47	35.35	23.17	50.19	44.93	44.93
$\delta$ Eu	0.66	0.68	0.47	0.55	0.58	0.58
Rb	125.0	136.0	241.0	127.0	123.0	123.0
Ba	608	1194	845	2005	1973	1973
Th	9.91	11.47	34.47	25.55	28.56	28.56
U	1.81	2.19	2.35	1.23	3.07	3.07
Ta	0.44	0.41	1.31	0.65	0.90	0.90
Nb	8.42	6.39	15.35	11.92	13.22	13.22
Pb	35.7	32.2	39.9	22.5	23.4	23.4
Sr	373	447	208	433	454	454
Zr	149.04	250.20	314.73	108.90	150.75	150.75
Hf	5.00	7.95	8.83	2.92	3.99	3.99

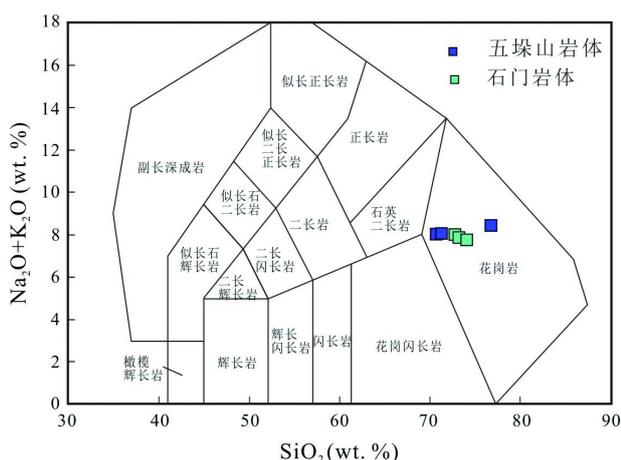


图5 石门岩体和五垛山岩体TAS分类图解

Fig. 5 TAS classification of the Shimen and Wuduoshan granitoid

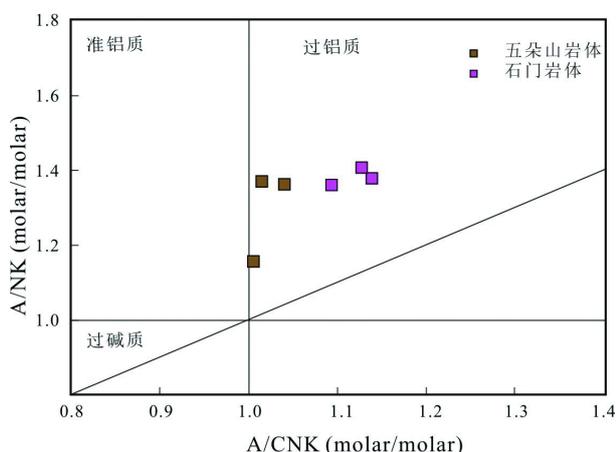


图6 石门岩体、五垛山岩体A/NK-A/CNK判别图解

Fig. 6 A/NK-A/CNK plot of the Shimen and Wuduoshan granitoid

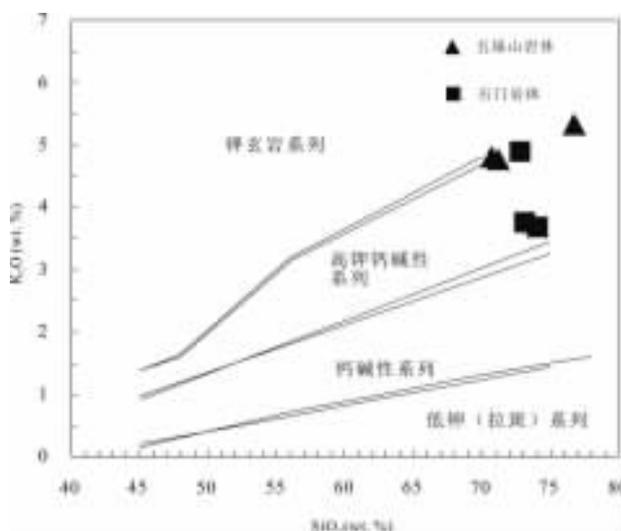


图7 石门岩体和五垛山岩体SiO<sub>2</sub>-K<sub>2</sub>O图解

Fig. 7 SiO<sub>2</sub>-K<sub>2</sub>O plot of the Shimen and Wuduoshan granitoid

负异常(图9)。

## 5 岩体侵位时代、成因及构造环境

### 5.1 岩体侵位时代

镇平地区石门岩体和五垛山岩体两个样品中挑选出的锆石具有晶形完好、晶棱清晰、长宽比较大、幔部结晶环带发育的特征,从而保证了测试结果的可靠性。根据 LA-ICP-MS 锆石 U-Pb 测年结果,可以将镇平地区花岗岩侵入时代分为中志留世( $428.3 \pm 2.1$  Ma, 石门岩体)和早泥盆世( $414.5 \pm 2.3$  Ma, 五垛山岩体)两个阶段。

#### 5.1.1 第一阶段 $428.3 \pm 2.1$ Ma(石门岩体)

石门岩体岩性主要为中细粒黑云母二长花岗岩,侵入二郎坪群及板山坪岩体。岩石化学具高硅、钠,低镁的特征,属过铝质、钙碱性系列岩石。通常将花岗岩类的  $A/CNK=1.1$  值和  $Fe_2O_3/FeO$  比值(0.4)作为区分 I 型花岗岩和 S 型花岗岩的标志;I 型花岗岩  $A/CNK$  小于 1.1,  $Fe_2O_3/FeO$  比值大于 0.4, S 型花岗岩则相反。研究发现,晚奥陶世-中志留世的花岗岩是秦岭古生代花岗岩的主体,遍布整个北秦岭,且以 I 型花岗岩为主。石门花岗岩体  $A/CNK$  的值为 1.09-1.13, 而  $Fe_2O_3/FeO$  比值为 4.5-7.3, 在 A-C-F 图解中样品落入 I 型花岗岩区(图 10)。

#### 5.1.2 第二阶段 $414.5 \pm 2.3$ Ma(五垛山岩体)

五垛山岩体岩性主要为中粗粒黑云母二长花岗岩,侵入秦岭岩群、二郎坪群和石门岩体。岩石化学具高硅、钾,低镁的特征,属过铝质、钙碱性系列岩石。 $A/CNK$  值为 1.01-1.05,  $Fe_2O_3/FeO$  比值为 0.4-1.4, 在 A-C-F 图解中样品落入 I 型花岗岩区(图 10)。

### 5.2 岩石成因

#### 5.2.1 石门岩体

石门岩体为 I 型花岗岩, 岩石地球化学特征与北秦岭晚奥陶世-中志留世 I 型花岗岩相似, 在微量元素蛛网图中,轻稀土和大离子亲石元素的曲线形态相似,出现 Nb、P、Ti 负异常。晚奥陶世-中志留世是秦岭古生代花岗岩侵位的主要时代,在该时期形成大量有幔源物质加入下地壳深熔为主的 I 型花岗岩<sup>[9-10]</sup>。同时,石门岩体还具有高 Sr 低 Y 的特点。一般认为,具有高 Sr 低 Y 特征的中酸性侵入岩其源区深度可能超过 40 km<sup>[32-33]</sup>。

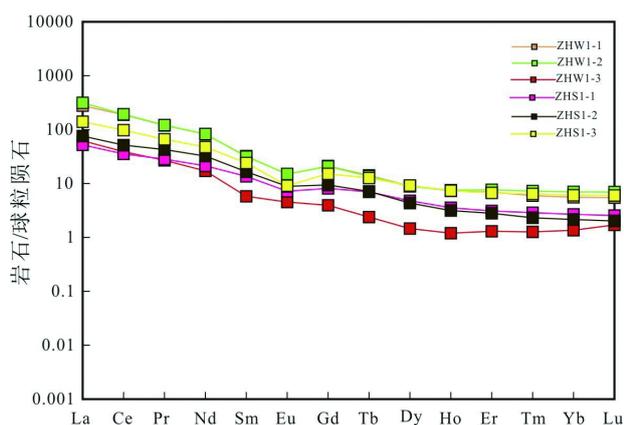


图8 石门岩体和五垛山岩体稀土元素配分模式图

Fig. 8 REE pattern diagrams of the Shimen and Wuduoshan granitoids

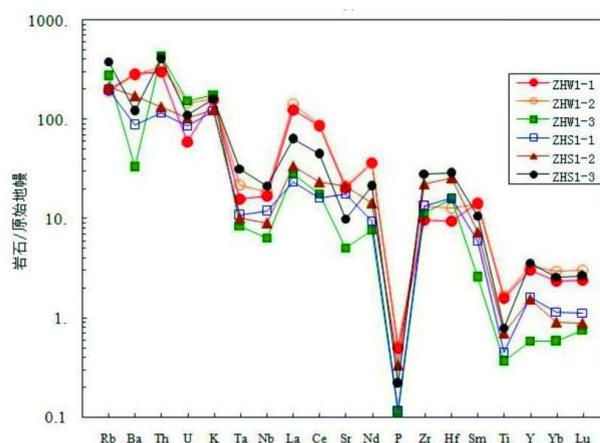


图9 石门岩体和五垛山岩体微量元素蛛网图

Fig. 9 PM-normalized trace element spidergrams of the Shimen and Wuduoshan granitoids

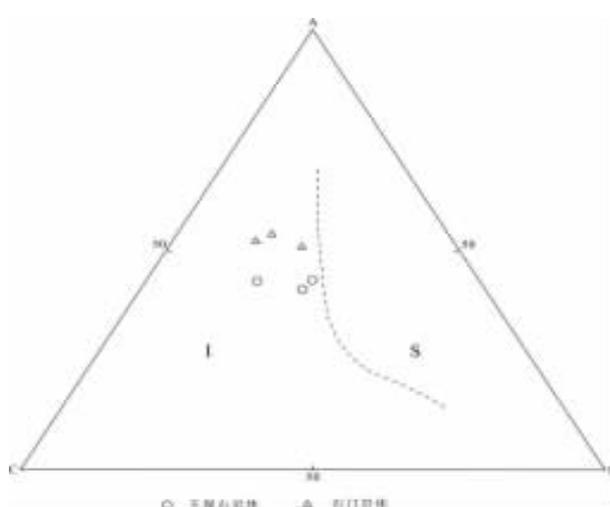


图10 石门岩体和五垛山岩体A-C-F判别图解

Fig. 10 A-C-F plot of the Shimen and Wuduoshan granitoids

综上,石门岩体为 I 型花岗岩,其成因可能以下地壳深熔为主,并有幔源物质加入。

### 5.2.2 五垛山岩体

岩石地球化学特征表明,五垛山岩体的微量元素及稀土元素与石门岩体相似,均表现为富集大离子亲石元素, Ta、Nb、P、Ti 负异常, 显示出火山弧花岗岩特征。稀土元素 Eu 负异常明显至不明显,配分曲线为右倾型; 比石门岩体更强的轻重稀土元素分馏,轻稀土元素更富集。与石门岩体相比,五垛山岩体的高 Sr 低 Y 特征不明显,暗示源区深度相对较浅。

综上,五垛山岩体为 I 型花岗岩,其成因同石

门岩体,可能以下地壳深熔为主,并有幔源物质加入,形成深度较石门岩体浅。

### 5.3 花岗岩形成的构造环境

Maniar<sup>[34]</sup> 等按照构造环境将花岗岩划分为 7 类,其中与造山作用有关的花岗岩有岛弧型(I-AG)、大陆弧型(CAG)、大陆碰撞型(CCG)和造山期后型(POG)四类。本文样品在 CaO-(TFeO+MgO)图解和 MgO-TFeO 图解(Maniar, 1989)<sup>[34]</sup>中的投点均落入 IAG+CAG+CCG 区域(图 11 a-b);在 Yb-Ta 和 (Yb+Ta)-Rb 构造环境判别图解(图 11 c-d,据 Pearce<sup>[35]</sup>)中,分别落入 syn-COLG 与 VAG 边界附近、VAG 区域。据此推测,石门岩体和五垛山岩体均为岛弧型系列。

镇平地区位于北秦岭构造带东段,经历了复杂的地质演化历史,前人对秦岭构造带做了大量的工作,对其地质演化提出了众多认识,特别是对古秦岭洋的俯冲时限和俯冲方向存在不同认识。近年,王涛等<sup>[9]</sup>、王晓霞等<sup>[10]</sup>综合考虑秦岭洋沿商丹构造带、二郎坪弧后盆地沿朱夏构造带俯冲、碰撞的格局,认为在早古生代可能存在着以秦岭岩群为核部的双向俯冲,即秦岭洋(商丹洋)沿商丹带向北俯冲、二郎坪弧后盆地沿朱夏带向南俯冲,并将北秦岭古生代的造山过程分为三个阶段:第一阶段(505 ~ 470 Ma),以板块俯冲为主;第二阶段(450 ~ 422 Ma),为块体的聚合碰撞过程;第三阶段(415 ~ 400 Ma),为全面聚合碰撞的晚期。

晚奥陶世 - 中志留世的花岗岩在北秦岭构造

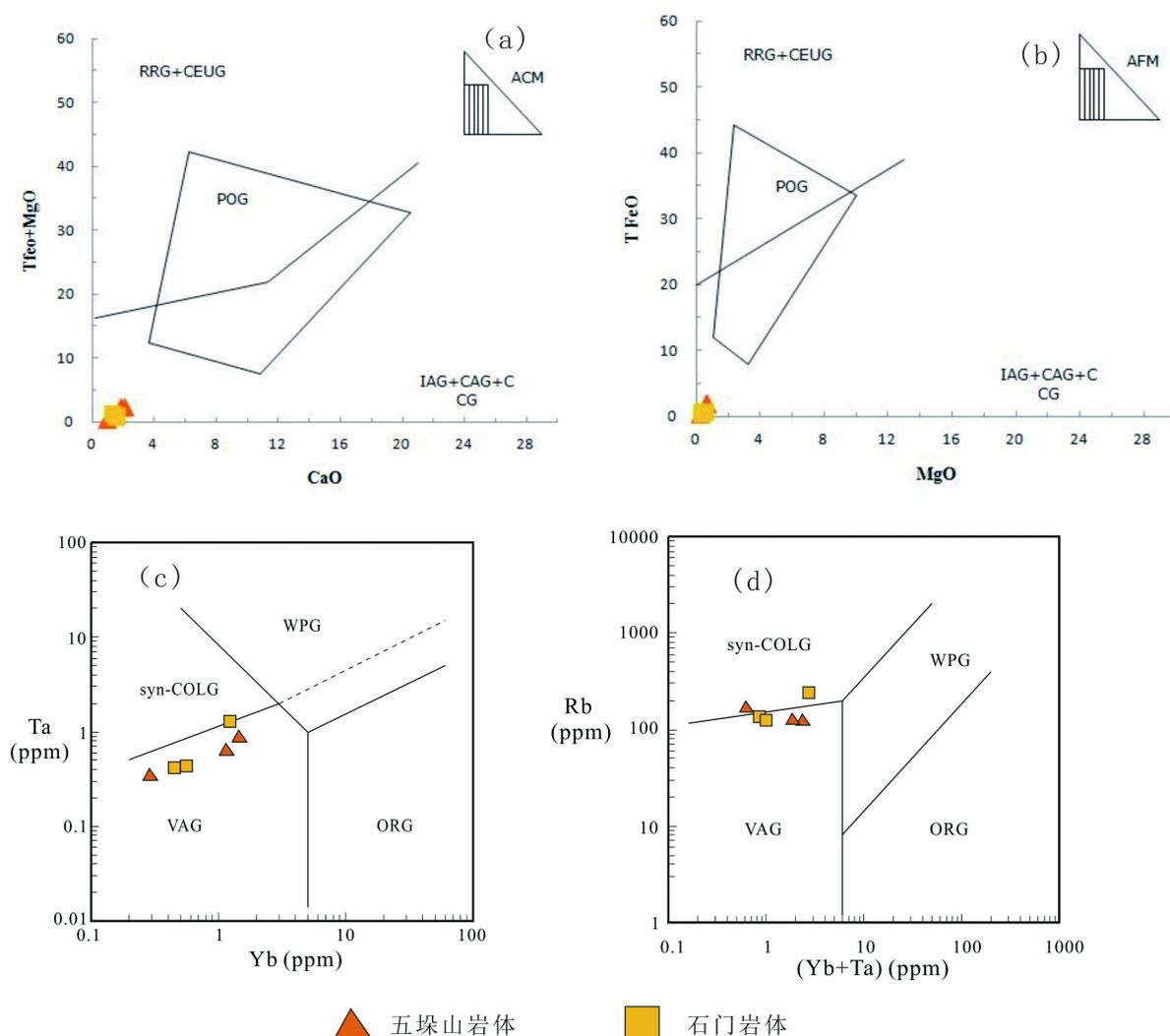


图11 石门岩体和五垛山岩体构造环境判别图

Fig. 11 Tectonic environmental plots the Shimen and Wuduoshan granitoids

WPG-板内花岗岩;ORG-洋脊花岗岩;VAG-岛弧花岗岩;syn-COLG-碰撞花岗岩;RRG-与裂谷有关的花岗岩类;CEUG-陆内造陆运动抬升花岗岩类;IAG-岛弧花岗岩;CAG-大陆弧花岗岩;CCG-大陆碰撞花岗岩;POG-造山后花岗岩。

带大量发育,根据区域构造研究,该时期已经发生块体碰撞,致使秦岭岩群向西挤出抬升,花岗岩侵位中心向东迁移<sup>[9,10,36]</sup>。石门岩体位于北秦岭构造带东部,锆石 U-Pb 年龄为  $428.3 \pm 2.1$  Ma,属中志留世。碰撞作用致使地壳加厚,在其后的块体抬升过程中,有幔源物质加入的下地壳熔融形成岩浆并上侵,形成 I 型花岗岩的石门岩体。

早泥盆世(415-400 Ma)的花岗岩活动较弱,形成于碰撞晚期阶段。五垛山岩体锆石 U-Pb 年龄为  $414.5 \pm 2.3$  Ma,根据花岗岩强烈分异、富钾的特征推断,岩体是在非挤压伸展环境下陆壳物质熔融岩浆较强分异演化的结果,其形成指示构造活动已明

显减弱。

## 6 结论

(1)石门岩体和五垛山岩体岩性均为黑云母二长花岗岩,地球化学特征为高硅、低镁,富集轻稀土元素和大离子亲石元素,亏损重稀土元素,显示为 I 型钙碱性花岗岩类。物质来源均以壳源为主,并有幔源物质加入。

(2)LA-ICP-MS 锆石 U-Pb 定年结果:石门岩体为  $428.3 \pm 2.1$  Ma,形成于中志留世阶段,五垛山岩体为  $414.5 \pm 2.3$  Ma,为早泥盆世阶段。

(3) 石门岩体和五垛山岩体均为岛弧型花岗岩,它们的形成与扬子板块和华北板块在早古生代俯冲碰撞作用有关。石门岩体形成于碰撞抬升阶段,五垛山岩体形成于碰撞晚期阶段。

### 参考文献

- [1] Mattauer M, Matte P, Malavieille J, Tapponnier P, Maluski H, Xu Z Q, Lu Y L, Tang Y Q. Tectonics of Qinling Belt: Build-up and evolution of Eastern Asia[J]. Nature, 1985, 317 (6037):496-500.
- [2] A. Kröner, Zhang G W, Sun Y. Granulites in the Tongbai Area, Qinling Belt, China: Geochemistry, petrology, single zircon geochronology, and implications for the tectonic evolution of eastern Asia[J]. Tectonics, 1993, 12(1):245-255.
- [3] Meng Q R, Zhang G W. Timing of collision of the North and South China blocks: Controversy and reconciliation[J]. Geology, 1999, 27(2):123-126.
- [4] 张国伟,袁学诚,张本仁,肖庆辉.秦岭造山带与大陆动力学[M].北京:科学出版社,2001:1-806.
- [5] 张国伟,孟庆任,于在平,孙勇,周鼎武,郭安林.秦岭造山带的造山过程及其动力学特征[J].中国科学(D辑:地球科学),1996,26(3):193-200.
- [6] Meng Q R, Zhang G W. Geologic framework and tectonic evolution of the Qinling orogen, central China[J]. Tectonophysics, 2000, 323(3/4):183-196.
- [7] Dong Y P, Liu X M, Neubauer F, Zhang G W, Tao N, Zhang Y G, Zhang X N, Li W. Timing of Paleozoic amalgamation between the North China and South China Blocks: Evidence from detrital zircon U-Pb ages[J]. Tectonophysics, 2013, 586 (2):173-191.
- [8] 杨经绥,许志琴,马昌前,吴才来,张建新,王宗起,王国灿,张宏飞,董云鹏,赖绍聪.复合造山作用和中国中央造山带的科学问题[J].中国地质,2010,37(1):1-11.
- [9] 王涛,王晓霞,田伟,张成立,李伍平,李舫.北秦岭古生代花岗岩组合、岩浆时空演变及其对造山作用的启示[J].中国科学(D辑:地球科学),2009,39(7):949-971.
- [10] 王晓霞,王涛,张成立.秦岭造山带花岗质岩浆作用与造山带演化[J].中国科学:地球科学,2015,45(8):1109-1125.
- [11] 胡健民,崔建堂,孟庆任,赵长纓.秦岭柞水岩体锆石 U-Pb年龄及其地质意义[J].地质论评,2004,50(3):323-329.
- [12] 张宏飞,骆庭川,张本仁.北秦岭漂池岩体的源区特征及其形成的构造环境[J].地质论评,1996,42(3):209-214.
- [13] 楚新春,王亨治,申学广.河南省地质矿产志[M].郑州:中国展望出版社,1992:1-1369.
- [14] 卢欣祥.龙王崮A型花岗岩地质矿化特征[J].岩石学报,1989,5(1):69-79.
- [15] 张兴辽,宋峰,朱广彬,等.1:5万赤眉镇幅(I-49-104-B)马山口幅(I-49-105-A)区域地质调查报告[R].郑州:河南省地质矿产厅第四地质调查队,1990:1-264.
- [16] 卢欣祥,尉向东,肖庆辉,张宗清,李惠民,王卫.秦岭环斑花岗岩的年代学研究及其意义[J].高校地质学报,1999, (4):372-377.
- [17] 燕长海,刘国印,彭翼.豫西南地区铅锌银成矿规律[M].北京:地质出版社,2009:1-369.
- [18] Dong YP, Zhang GW, Hauzenberger C, Neubauer F, Yang Z, Liu XM. Palaeozoic tectonics and evolutionary history of the Qinling orogen: Evidence from geochemistry and geochronology of ophiolite and related volcanic rocks [J]. Lithos, 2011, 122:39-56.
- [19] 汤清龙,赵志强,吉恒召,杨涛,牛磊.东秦岭二郎坪群地质特征及成矿规律[J].华南地质与矿产,2010,26(4):45-54.
- [20] 许志琴,卢一伦,汤耀庆,等.东秦岭复合山链的形成-变形、演化及板块动力学 [M].北京:中国环境出版社,1988:1-193.
- [21] 刘国惠,张寿广,游振东,等.秦岭造山带主要变质岩群及变质演化[M].北京:地质出版社,1993:1-190.
- [22] 张国伟,孟庆任,赖绍聪.秦岭造山带的结构构造[J].中国科学(B辑),1995;25(9):994-1003.
- [23] 陈瑞保,崔霄峰,杨俊峰.宽坪岩群斜长角闪岩Sm-Nd同位素年龄[J].河南地质,1999,17(4):278-282.
- [24] 李荣社.陕西宽坪岩群变基性熔岩锆石U-Pb年龄 [J].陕西地质,2002,(1):72-78.
- [25] 董云鹏,张国伟,赵霞,姚安平.北秦岭元古代构造格架与演化[J].大地构造与成矿学,2003,27(2):115-124.
- [26] 张国伟,梅志超,李桃红.秦岭造山带的南部古被动大陆边缘,秦岭造山带的形成及演化[M].西安:西北大学出版社,1988:86-98.
- [27] 张本仁,欧阳建平,韩吟文,匡少平.北秦岭古聚会带壳幔再循环[J].地球科学,1996,21(5):15-21.
- [28] 李亚林,张国伟,王根宝,高凤泉.北秦岭小寨变质沉积岩系的地质特征及其构造意义 [J].沉积学报,1999,17(4):99-103.
- [29] 王世炎,刘振宏,武太安,等.1:25万内乡县幅区域地质调查报告[R].河南省地质调查院,2002:1-492.
- [30] Andersen T. Correction of common lead in U-Pb analyses that do not report <sup>204</sup>Pb [J]. Chemical Geology, 2002, 192 (1-2):

- 59-79.
- [31] Ludwig K R. ISOPLOT 3.0: A geochronological toolkit for Microsoft Excel. Berkeley geochronology center special publication, 2003.
- [32] Winther K T, Newton R C. Experimental melting of hydrous low-K tholeiite: Evidence on the origin of Archean cratons [J]. Bulletin of the Geological Society of Denmark, 1991, 39 (5):2932-2945.
- [33] 张旗, 王焰, 李承东, 金惟俊, 贾秀勤. 花岗岩的Sr-Yb分类及其地质意义[J]. 岩石学报, 2006, 2(9):2249-2269.
- [34] Maniar P D, Piccoli P M. Tectonic discrimination of granitoids [J]. Geological Society of America Bulletin, 1989, 101 (5):635-643.
- [35] Pearce J A, Harris N B W, Tindle A G. Trace Element Discrimination Diagrams for the Tectonic Interpretation of Granitic Rocks [J]. Journal of Petrology, 1984, 25 (4): 956-983.
- [36] Wang T, Pei X Z, Wang X X, Hu N G, Li W P, Zhang G W. Orogen-Parallel Westward Oblique Uplift of the Qinling Basement Complex in the Core of the Qinling Orogen (China): An Example of Oblique Extrusion of Deep-Seated Metamorphic Rocks in a Collisional Orogen [J]. Journal of Geology, 2005, 113(2):181-200.