

doi: 10.12029/gc20200415

柯昌辉, 王晓霞, 聂政融, 杨阳, 吕星球, 王顺安, 李金宝. 2020. 西秦岭中川岩体年代学、元素地球化学、Nd-Hf 同位素组成及其与金成矿的关系[J]. 中国地质, 47(4): 1127-1154.

Ke Changhui, Wang Xiaoxia, Nie Zhengrong, Yang Yang, Lü Xingqiu, Wang Shun'an, Li Jinbao. 2020. Age, geochemistry, Nd-Hf isotopes and relationship between granite and gold mineralization of Zhongchuan granitoid pluton in West Qinling[J]. Geology in China, 47(4): 1127-1154(in Chinese with English abstract).

## 西秦岭中川岩体年代学、元素地球化学、Nd-Hf 同位素组成及其与金成矿的关系

柯昌辉<sup>1</sup>, 王晓霞<sup>1</sup>, 聂政融<sup>2</sup>, 杨阳<sup>3</sup>, 吕星球<sup>4</sup>, 王顺安<sup>5</sup>, 李金宝<sup>6</sup>

(1. 中国地质科学院矿产资源研究所, 自然资源部成矿作用与资源评价重点实验室, 北京 100037; 2. 河南新路桥集团高速公路管理有限公司, 河南 郑州 450000; 3. 长安大学杂志社, 陕西 西安 710064; 4. 湖南省有色地质勘查局二一四队, 湖南 株洲 412007; 5. 中交第四航务工程勘察设计院有限公司, 广东 广州 510230; 6. 长安大学地球科学与资源学院, 陕西 西安 710054)

**摘要:** 中川岩体位于秦岭造山带西段, 岩体呈同心环状产出, 由外向内岩性依次为似斑状黑云二长花岗岩→含斑黑云二长花岗岩→中细粒黑云二长花岗岩, 岩体边部发育岩浆暗色包体, 向内逐渐减少。LA-ICPMS 锆石 U-Pb 定年结果显示, 似斑状黑云二长花岗岩、含斑角闪黑云石英闪长岩(岩浆暗色包体)、细粒黑云二长花岗岩、岩浆暗色包体(无斑)和细粒花岗岩脉的年龄分别为:  $(221 \pm 1)$  Ma (MSDW=0.26)、 $(220 \pm 1)$  Ma (MSDW=0.11)、 $(217 \pm 1)$  Ma (MSDW=0.11)、 $(216 \pm 1)$  Ma (MSDW=0.26)、 $(207 \pm 1)$  Ma (MSDW=0.29), 表明岩体从边部到中心年龄逐渐变新。寄主岩石与暗色包体的里特曼指数和 A/CNK 值分别为 2.20~3.85、0.99~1.15 和 2.24~9.22、0.75~1.08, 两者分别为准铝质-弱过铝质、高钾钙碱系列和钾玄岩-高钾钙碱系列; 稀土元素和微量元素均显示出富集 LREE、Rb、Ba、K 等大离子亲石元素, 亏损 HREE、Zr、Hf、Ta、Nb、P、Ti 等高场强元素的特征, 具有弱的负铕异常 ( $\delta\text{Eu}=0.29 \sim 0.91$ ), 无 Ce 异常, 寄主岩显示出 I 型花岗岩的特征, 并且中心部位的细粒黑云二长花岗岩具高分异 I 型花岗岩的一些特征。在哈克图解上暗色包体和寄主岩石的主要氧化物具有良好的线性关系; 在同位素组成上, 寄主岩石与暗色包体的  $\varepsilon_{\text{Nd}}(t)$  分别变化于  $-7.31 \sim -8.73$  和  $-5.32 \sim -5.69$ ,  $T_{\text{DM2}}$  分别变化于 1.59~1.71 Ga 和 1.43~1.46 Ga,  $\varepsilon_{\text{Hf}}(t)$  值分别为  $-7.02 \sim -0.31$  和  $-3.0 \sim 0$ ,  $T_{\text{DM2}}$  为 1.27~1.70 Ga 和 1.2~1.5 Ga, 显示寄主花岗岩和岩浆暗色包体分别来源于不同源区, 寄主岩石主要是古老地壳物质部分熔融的结果, 岩浆暗色包体可能是来自岩石圈地幔, 但与寄主花岗岩岩浆已发生了一定程度的混合作用。岩体外围金矿床形成略晚于岩体, 与花岗质脉岩年龄相近, 空间上与岩体密切相关, 结合前人成矿物质来源的研究, 认为成矿物质与成岩物质具有相似性。表明该岩体与其周围的金矿具有成因联系, 岩浆作用不仅提供了热能, 也有物质贡献。

**关键词:** 中川岩体; 锆石 U-Pb 定年; Nd-Hf 同位素; 花岗岩; 地质调查工程; 西秦岭

中图分类号: P597.3; P588.12<sup>1</sup> 文献标志码: A 文章编号: 1000-3657(2020)04-1127-28

## Age, geochemistry, Nd-Hf isotopes and relationship between granite and gold mineralization of Zhongchuan granitoid pluton in West Qinling

收稿日期: 2018-08-06; 改回日期: 2018-12-26

基金项目: 国家重点研发计划项目(2017YFC0601403), 国家自然科学基金项目(41502075, 41572052)和中央级公益性科研院所基本科研业务费专项资金(KK1406)联合资助。

作者简介: 柯昌辉, 男, 1987 年生, 助理研究员, 矿物学、岩石学、矿床学专业; E-mail: kechanghuicags@126.com。

通讯作者: 王晓霞, 女, 1960 年生, 博士生导师, 研究员, 矿物学、岩石学、矿床学专业; E-mail: xiaoxiawang@hotmail.com。

KE Changhui<sup>1</sup>, WANG Xiaoxia<sup>1</sup>, NIE Zhengrong<sup>2</sup>, YANG Yang<sup>3</sup>, LÜ Xingqiu<sup>4</sup>,  
WANG Shun'an<sup>5</sup>, LI Jinbao<sup>6</sup>

(1. MNR Key Laboratory of Metallogeny and Mineral Assessment, Institute of Mineral Resources, CAGS, Beijing 100037, China; 2. Henan new Road & Bridge Group Motorway Management Co., Ltd., Zhengzhou 450000, Henan, China; 3. Magazines Company, Chang'an University, Xi'an 710054, Shaanxi, China; 4. No. 214 Geological Party, Hunan Geological & Mining Organization for Non-Ferrous Metals, Zhuzhou 412007, Hunan, China; 5. CCCC-FHDI Engineering Co., Ltd., Guangzhou 510230, Guangdong, China; 6. School of Geoscience and Resources, Chang'an University, Xi'an 710054, Shanxi, China)

**Abstract:** The Zhongchuan granitoid pluton is located in the east of the Western Qinling. Zircon LA-ICPMS dating for the porphyritic monzogranite from the Zhongchuan pluton yielded an age of  $(221 \pm 1)\text{Ma}$  ( $\text{MSWD}=0.26$ ), the age of fine-grained monzogranite is  $(217 \pm 1)\text{Ma}$  ( $\text{MSWD}=0.107$ ), that of magmatic enclave include phenocryst is  $(220 \pm 1)\text{Ma}$  ( $\text{MSWD}=0.107$ ), that of magmatic enclave is  $(216 \pm 1)\text{Ma}$  ( $\text{MSWD}=0.26$ ) and that of fine-grained granite vein is  $207 \pm 1\text{Ma}$  ( $\text{MSDW}=0.29$ ). Magmatic enclave and rock mass have the same age, and the age of granite vein is the youngest, indicating that the ages gradually become younger from the edge to the center. The rock mass and magmatic enclave are respectively of meta-aluminous or weakly peraluminous, high-K calc-alkaline and high-K calc-alkaline or shoshonite series with the Litman index ( $\sigma$ ) being 2.20–3.85, 2.24–9.22 and A/CNK being 0.99–1.15, 0.75–1.08. Their REE and trace elements are enriched in large ion lithophile elements (LREE, Rb, Ba, K) and depleted in high-field strength elements (HREE, Zr, Hf, Ta, Nb, P, Ti), with slightly negative to positive anomalies of Eu ( $\delta\text{Eu}=0.29-0.91$ ) and no anomalies of Ce. These characteristics suggest that the granitoids have I type granite features, and the fine-grained monzogranite is located in the center with some highly fractionated I type granite features. The main oxides of rock mass and MME have a good linear relationship in Harker diagram. Nd isotopic compositions of the rock mass and MME are mainly characterized by  $\varepsilon_{\text{Nd}}(t)$  values of  $-7.31--8.73$  and  $-5.32--5.69$ , and  $T_{\text{DM2}}$  of 1.59–1.71 Ga and 1.43–1.46 Ga. Zircon Hf isotopic compositions of the rock mass and MME are mainly characterized by  $\varepsilon_{\text{Hf}}(t)$  values of  $-7.02--0.31$  and  $-3.0-0$ ,  $T_{\text{DM2}}$  of 1.27–1.70 Ga and 1.2–1.5 Ga. These characteristics suggest that the rock mass was derived from partial melting of ancient crustal material and magmatic enclave was derived from the lithospheric mantle, with some mixture. The formation of gold deposits was closely related to Zhongchuan granitoid pluton in time and space, and the age of the gold deposit are slightly later than that of Zhongchuan granitoid pluton and close to that of granite vein. Mineralization data indicate that ore-forming material and lithogenous material were similar to each other. These data indicate that magmatism not only provided a thermal source for the mineralization but also offered ore-forming material.

**Key words:** Zhongchuan pluton; zircon U-Pb age; Nd-Hf isotope; granite; geological survey engineering; West Qinling

**About the first author:** KE Changhui, male, born in 1987, assistant professor, engages in the study of geological prospecting and ore deposits; E-mail: kechanghuicags@126.com.

**About the corresponding author:** WANG Xiaoxia, female, born in 1960, supervisor of doctor candidate, senior researcher, engages in the study of geological prospecting and ore deposits; E-mail: xiaoxiawang@hotmail.com.

**Fund support:** Supported by National Key R&D Plan (No. 2017YFC0601403), National Natural Science Foundation of China (No.41502075, No.41572052) and the Basic R & D Special Fund for Scientific Research Institutes(No.KK1406).

## 1 引 言

中川岩体为西秦岭地区著名的“五朵金花”岩体之一,其外围分布有李坝、马泉、金山等金矿,它们均分布于中川岩体外接触带1~3 km范围内。前人对中川岩体成岩时代、岩石成因类型及其与成矿作用的关系进行了研究,但仍存在一些问题。就年

龄而言,测试方法有K-Ar、Rb-Sr法<sup>①</sup>和LA-ICPMS锆石U-Pb(徐学义等,2014)及锆石SHRIMP(Zeng et al.,2014),但不系统,部分岩性仍缺乏年龄资料;其次对岩石成因类型还有不同认识。为此,本研究在前人的工作基础上,通过野外地质调查,对中川岩体的所有岩性、暗色包体及花岗岩脉进行了系统的LA-ICPMS锆石U-Pb精确定

年、元素地球化学和Nd-Hf同位素地球化学研究,以期精细查明中川环状花岗侵入体各岩性时代及分布、岩石成因类型、物质来源及岩浆演化过程,并结合前人资料,探讨岩体与金矿的关系,为系统总结“五朵金花”岩体群的成因演化及其与金矿的成矿作用提供岩石学方面的依据。

## 2 区域地质概况

位于中国腹心地带的西秦岭造山带(图1)是中

央造山带的重要组成部分,其大致是指青海南山北缘断裂—土门关断裂以南,宝成铁路以西,玛沁—略阳断裂以北,柴达木地块以东的广阔地域,早古生代至早中生代造山作用将其分为北、中、南三带,之间分别以商丹和礼县—山阳深大断裂为界。

西秦岭造山带自新元古代(大约800 Ma)以来,大致经历了Rodinia超级大陆裂解、秦祁昆大洋形成、俯冲碰撞造山、板内伸展和陆内叠覆造山多个构造演化历程,是一个“碰撞-陆内复合型”造山带

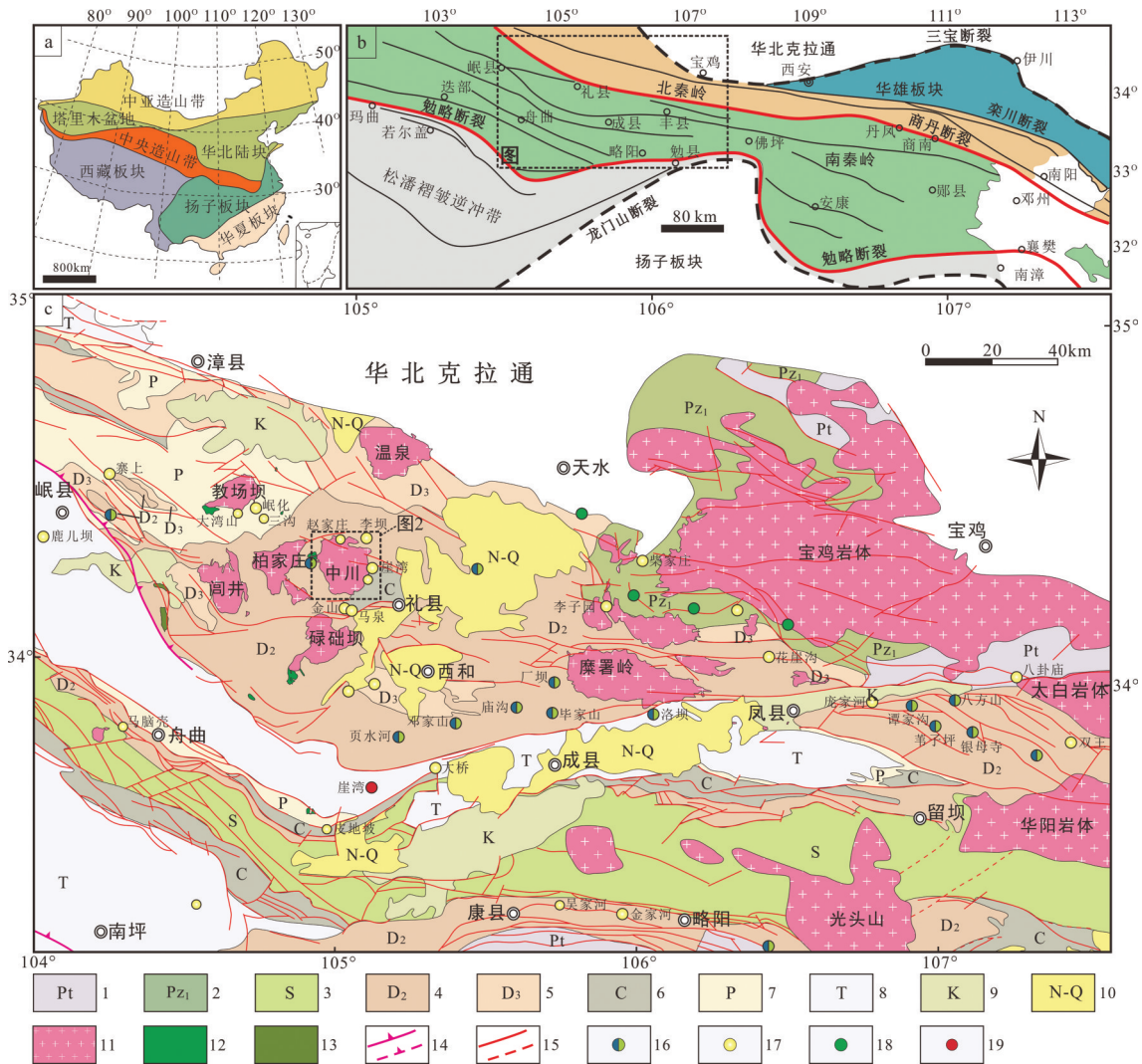


图1 西秦岭造山带花岗岩分布(底图据毛景文等,2012改编)

1—元古宇;2—下古生界;3—志留系;4—中泥盆统;5—上泥盆统;6—石炭系;7—二叠系;8—三叠系;9—白垩系;10—古近—新近系、第四系;11—花岗岩;12—闪长岩、辉长岩;13—安山玢岩、英安岩、石英斑岩;14—实测或推测逆冲断层;15—实测或推测断层;16—Pb-Zn矿床;17—Au矿床;18—Cu矿床;19—Sb矿床

Fig.1 Distribution of the granitoids in West Qinling (modified from Mao Jingwen et al.,2012)

1—Proterozoic; 2—Lower Paleozoic; 3—Silurian; 4—Middle Devonian; 5—Upper Devonian; 6—Carboniferous; 7—Permian; 8—Triassic; 9—Cretaceous; 10—Paleogene, Neogene and Quaternary; 11—Granite; 12—Diorite and gabbro; 13—Andesitic porphyrite, dacite and quartz porphyry; 14—Measured or speculated thrust fault; 15—Measured or speculated fault; 16—Pb-Zn deposit; 17—Au deposit; 18—Cu deposit; 19—Sb deposit

(冯益民等,2003)。该地区出露的侵入岩主要为二长花岗岩、花岗闪长岩和闪长岩,以印支期为主,年龄在245~205 Ma(张成立等,2008;Wang et al.,2013;曾令森等,2017),其中还包括少量的晚华力西期花岗质侵入岩,与整个秦岭造山带发育大量的中生代侵入岩相吻合,花岗岩体出露面积从不足1 km<sup>2</sup>到500 km<sup>2</sup>以上不等,主要分布于夏河—合作—临潭—岷县—宕昌断裂北侧。西秦岭区内出露的主要地层由基底和盖层两部分组成,其中基底岩石为前寒武纪地层,如新太古界和元古宇(冯益民等,2003;曾令森等,2017)。盖层为显生宙沉积地层,从奥陶系至新近系均有记录,且以泥盆系、石炭系、二叠系和三叠系为主(冯益民等,2003),此外,白垩系、古近系和第四系在本区也有分布。西秦岭地区矿产资源丰富,尤其是金矿、铅锌矿广泛分布,金矿沿北西向脆韧性剪切构造带分布,而铅锌矿集中出现在西成(西和一成县)和凤太(凤县—太白)两大沉积盆地内,这些矿产形成于碰撞造山或后碰撞环境,并以前者为主(毛景文等,2012)。

### 3 岩体地质及岩相学

中川岩体位于西秦岭造山带礼岷金矿带东部,岩体呈椭圆状,出露面积约210 km<sup>2</sup>,侵位于礼县—罗坝—锁龙口断裂和礼县—洮坪断裂两大断裂之间(图2)。岩体北部侵入于泥盆系灰岩、细砂岩及粉砂岩或粉砂质泥岩中,西部侵入于泥盆系碳酸盐岩—陆源碎屑岩中,南部侵入于石炭系砂岩、灰岩及千枚状板岩中。中川岩体为复式岩体,主体部分发育3期侵入作用,不同期次呈同心环状产出,由外向内依次为似斑状黑云二长花岗岩→含斑黑云二长花岗岩→中细粒黑云二长花岗岩,岩浆暗色包体在岩体的边部发育,向内逐渐减少,中心不发育。岩体内部发育后期侵入的细粒花岗岩脉。岩体外围1~3 km范围内已发现李坝、马泉、金山、崖湾等多处金矿床(点)(图2),矿化主要受构造破碎带控制。

似斑状黑云二长花岗岩(图3a)呈灰白色,块状构造,似斑状结构,局部可见被晚期细粒花岗岩脉穿切(图3e),斑晶主要为钾长石,肉红色,粒度普遍在1 cm×2 cm,大的可达2 cm×3 cm,占矿物总量的15%~20%,局部可见斑晶聚集的现象。基质呈花岗岩结构(图3h),主要矿物有石英(20%~30%),呈他

形粒状,粒径1~3 mm,可见波状消光;钾长石(15%~20%),半自形—他形粒状;斜长石(25%~30%),以更长石为主,少量中长石,发育聚片双晶和环带结构;黑云母(5%~8%),半自形片状,多色性、吸收性明显,可见次生绿泥石化;角闪石(约3%)呈半自形柱状,粒径为(1~3) mm×2 mm,局部表面发生弱的绿泥石化。副矿物有锆石、榍石、磁铁矿等。

含斑黑云二长花岗岩(图3c)呈浅灰色,块状构造,中粒含斑结构,斑晶主要为钾长石,呈肉红色,含量<5%。主要矿物成分为钾长石(35%~40%),半自形—他形粒状;斜长石(30%~35%),半自形—他形,聚片双晶发育;石英(25%~30%),他形粒状;黑云母(3%~8%),半自形,弱绿泥石化;角闪石(约2%),副矿物为磷灰石、锆石、榍石等。

细粒黑云二长花岗岩(图3d)呈灰白色或肉红色,块状构造,细粒花岗结构(图3j)。主要矿物成分为钾长石(35%~40%)、斜长石(25%~30%)、石英(25%~30%)、黑云母(约5%),含有少量的白云母,副矿物有磷灰石、锆石、榍石等。

岩浆暗色包体主要分布于岩体边部似斑状黑云二长花岗岩中(图3b),形态大多数呈浑圆状、椭圆状、长条状、不规则状,包体与寄主岩石大都界线截然,有的呈渐变过渡关系。包体成分主要为粒度较细、结晶较早的角闪石、黑云母等暗色矿物组成,边部铁镁质矿物含量比中心部位高,表现出较明显的因温度变化而引起成分变化的Soret(索列特效)扩散现象。包体呈深灰色、灰黑色,微细粒结构,包体边部矿物粒度更细,小于1 mm,部分包体中包裹有钾长石斑晶,斑晶粒度0.5 cm×1 cm~1 cm×1.5 cm不等。显微镜下可见包体中发育针状磷灰石(图3f)。包体岩石类型主要为细粒石英闪长岩,半自形粒状结构(图3i,k),块状构造,主要组成矿物有黑云母(15%~20%,弱绿泥石化)、角闪石(15%~20%)、石英(5%~10%)、斜长石(35%~45%)、钾长石(5%),副矿物有榍石、磷灰石、锆石等,岩性为角闪黑云石英闪长岩。

## 4 样品采集和测试方法

### 4.1 样品采集

对中川岩体的不同岩性进行了系统采样,其中选取5件样品做为定年样品,其岩性分别为似斑状

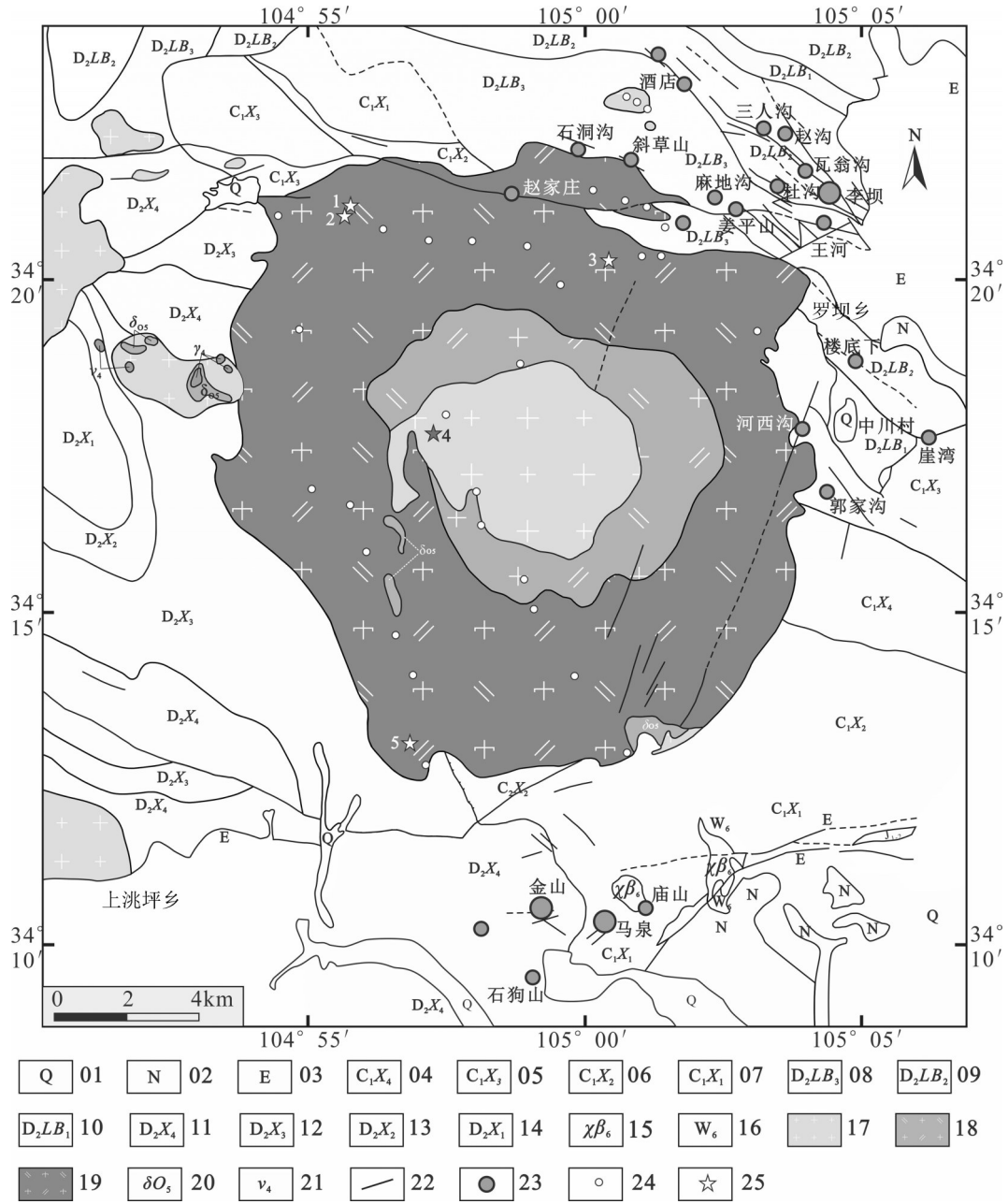


图2 西秦岭中川花岗岩体地质简图

1—第四系;2—新近系黏土砂砾层;3—古近系砂砾岩夹泥岩;4—下石炭统炭质千枚状板岩;5—下石炭统含砾石英砂岩;6—下石炭统千枚状板岩;7—下石炭统含炭千枚状板岩;8—中泥盆统千枚岩夹粉砂岩;9—中泥盆统变石英砂岩夹千枚岩;10—中泥盆统斑点千枚岩;11—中泥盆统结晶灰岩夹石英砂岩;12—中泥盆统石英黑云母片岩;13—中泥盆统大理岩;14—中泥盆统变石英砂岩;15—喜山期碱玄岩;16—喜山期玻基辉橄岩;17—中细粒黑云二长花岗岩;18—含斑黑云二长花岗岩;19—似斑状黑云二长花岗岩;20—细粒黑云母石英闪长岩;21—辉长岩;22—断层;23—金矿床(点);24—地球化学采样点;25—同位素采样点及编号(1—ZC02/1B;2—ZC04/2B;3—ZC15/3B;4—ZC11/1B;5—ZC24/1B)

Fig. 2 Geological sketch map of the Zhongchuan granitoid pluton in West Qinling

1—Quaternary (Q); 2—Clayey-sand gravel beds (N); 3—Sand gravel with mudstone (E); 4—Carbonaceous phyllite slate (C<sub>1</sub>); 5—Gravel quartz sandstone (C<sub>1</sub>); 6—Phyllite slate (C<sub>1</sub>); 7—Carbonaceous phyllite slate (C<sub>1</sub>); 8—Phyllite with siltstone (D<sub>2</sub>); 9—Metamorphic quartz sandstone with phyllite (D<sub>2</sub>); 10—Spotted phyllite (D<sub>2</sub>); 11—Crystalline limestone with quartz sandstone (D<sub>2</sub>); 12— Quartz biotite schist (D<sub>2</sub>); 13—Marble (D<sub>2</sub>); 14— Quartz sandstone (D<sub>2</sub>); 15— Himalayan stage alkali basalt; 16— Himalayan stage glassy pyroxenite; 17— Interior fine biotite monzonite granite; 18— Porphyritic-bearing biotite monzonite granite; 19— Porphyritic biotite monzonite; 20— Fine-grained biotite quartz diorite; 21—Gabbros; 22—Fault; 23—Gold deposit; 24—The location of the geochemical samples; 25—The location and serial numbers of the Isotope samples (1—ZC02/1B; 2—ZC04/2B; 3—ZC15/3B; 4—ZC11/1B; 5—ZC24/1B)



图3 西秦岭中川花岗岩体的岩相学特征

a—似斑状黑云二长花岗岩中的斑晶具弱定向；b—似斑状黑云二长花岗岩中发育的岩浆暗色包体，包含钾长石斑晶，边部可见深色细粒边结构；c—含斑黑云二长花岗岩露头，发育少量的钾长石巨晶；d—细粒黑云二长花岗岩露头；e—细粒花岗岩脉穿切似斑状黑云二长花岗岩；f—岩浆暗色包体中的针状磷灰石(-)；g—岩浆暗色包体中斜长石环带结构特征(+)；h—似斑状黑云二长花岗岩基质的花岗结构(+)；i—岩浆暗色包体的半自形粒状结构(+)；j—细粒黑云二长花岗岩的等粒结构(+)；k—岩浆暗色包体的半自形粒状结构(+)，偶可见斜长石斑晶；l—细粒花岗岩脉的花岗岩结构及微斜长石格子双晶(+)；Kfs—钾长石；Pl—斜长石；Mc—微斜长石；Qtz—石英；Bt—黑云母；Hbl—角闪石；Mu—白云母；Ap—磷灰石

Fig.3 Petrography of the Zhongchuan granitoid pluton in West Qinling

a—Outcrops of the porphyritic biotite monzonite; b—The mafic enclaves in the porphyritic biotite monzonite; c—Outcrops of the porphyritic-bearing biotite monzonite; d—Outcrops of fine-grained biotite monzonite; e—The porphyritic biotite monzonite cut by later fine-grained granite veins; f—The mafic enclaves containing acicular apatite; g—The mafic enclaves with regular zonal structure (+); h—The matrix of the porphyritic biotite monzonite showing granitic texture (+); i—The hypidiomorphic granular texture in the mafic enclaves; j—Equigranular texture of the fine-grained biotite monzonite (+); k—The same as Fig. i (+); l—Granitic texture and clear grid twin in microcline (+) Kfs—K feldspar; Pl—Plagioclase; Mc—Microcline; Qtz—Quartz; Bt—Biotite; Hbl—Amphibole; Mu—Muscovite; Ap—Apatite

黑云母二长花岗岩(ZC02/1B)、细粒黑云二长花岗岩(ZC11/1B)、含斑晶岩浆暗色包体(ZC04/2B)、岩浆暗色包体(ZC15/3B)、细粒花岗岩脉(ZC24/1B)。用于地球化学全岩分析的样品26件，分别采自中川岩体不同位置的不同岩性(图2)。

#### 4.2 测试方法

锆石分选、阴极发光图像和锆石的U-Pb同位素组成分析分别在中国地质科学院廊坊物化探研究所、北京离子探针中心和西北大学大陆动力学国家重点实验室完成，测试结果通过Glitter软件处理，

获得的数据采用 Andersen (2002) 的方法进行同位素比值的校正, 并采用 Isoplot3.23v 进行最终的年龄计算和图表的绘制, 分析点的同位素比值和同位素年龄的误差 (标准偏差) 为  $1\sigma$ ,  $^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$  加权平均年龄按 95% 的置信度给出, 详细分析过程参见文献 Yuan et al. (2004)。

主量、微量和稀土元素测试分析在加拿大温哥华 Acme 分析实验室进行, 除了  $\text{Fe}_2\text{O}_3$  之外, 分别由电感耦合等离子光谱分析 (ICP-AES) 和电感耦合等离子质谱仪 (ICP-MS) 完成。主量元素测试先把粉末样品在石墨坩锅中与助熔剂  $\text{LiBO}_2/\text{Li}_2\text{B}_4\text{O}_7$  混合, 放在马弗炉中熔化后用硝酸稀释溶解, 然后选取 0.2 g 进行 ICP-MS 分析, 烧失量在  $1000^\circ\text{C}$  时测定。微量元素分析包括两部分, 稀土元素和难溶元素的测定选取粉末样品在石墨坩锅中与助熔剂  $\text{LiBO}_2/\text{Li}_2\text{B}_4\text{O}_7$  混合, 放在马弗炉中熔化用硝酸稀释溶解后, 再进行 ICP-MS 分析; 另外单独选取 0.5 g 经王水溶解的进行 ICP-MS 分析贵金属的含量。

Sm-Nd 元素含量以及同位素比值测定均在南京大学现代分析中心由英国制造的 VG354 多接收质谱计上完成。实验对美国 La Jolla Nd 同位素标准样中  $^{143}\text{Nd}/^{144}\text{Nd}$  的测定值为  $0.511863 \pm 6(2\sigma, n=8)$ , 标准化值采用  $^{146}\text{Nd}/^{144}\text{Nd}=0.7219$  校正。Nd 的全流程本底为  $6 \times 10^{-11}\text{g}$ , 计算  $\varepsilon_{\text{Nd}}(t)$  过程中,  $(^{143}\text{Nd}/^{144}\text{Nd})_{\text{CHUR}}=0.512638$ ,  $(^{147}\text{Sm}/^{144}\text{Nd})_{\text{CHUR}}=0.1967$ 。样品  $^{147}\text{Sm}/^{144}\text{Nd}$  和  $^{143}\text{Nd}/^{144}\text{Nd}$  比值误差分别为 0.2% 和 0.005%, 详细分析参见文献王银喜等 (2007)。

Lu-Hf 同位素分析测试是在中国地质科学院矿产资源研究所自然资源部成矿作用与资源评价重点实验室 Neptune 多接受电感耦合等离子体质谱仪 (MC-ICPMS) 和 NewwaveUP213 紫外激光剥蚀系统 (LA-MC-ICP-MS) 上进行, 相关仪器运行条件及详细分析流程见侯可军等 (2007)。

## 5 分析结果

### 5.1 LA-ICPMS 锆石 U-Pb 定年

所选锆石大部分形态完整, 呈半自形至自形晶, 无色透明, 少数在制备过程中由于碎样粒度较小而破碎, 分析点位置多在锆石的边部。锆石以柱状晶体为主, 粒径一般长  $100 \sim 300 \mu\text{m}$ , 宽  $50 \sim 100 \mu\text{m}$ , 玻璃光泽, 振荡环带发育 (图 4), 锆石 U、Th 含

量分别为  $276 \times 10^{-6} \sim 17587 \times 10^{-6}$  和  $85 \times 10^{-6} \sim 23272 \times 10^{-6}$ , Th/U 比值为  $0.1 \sim 1.32$ , 均大于 0.1, 表明 U 含量较高 (表 1)。以上特征均表明该 5 件样品的锆石具典型的岩浆锆石特征。U 含量较高也与该岩体发育铀矿点可能有直接联系。

5 件年龄样选择韵律环带明显的岩浆锆石进行了定年分析, 结果见表 1。LA-ICPMS 锆石 U-Pb 分析结果显示, 似斑状黑云二长花岗岩 (样品号 ZC02/1B) 共获得 21 个有效数据点, 在谐和图上组成密集的一簇, 构成集中的锆石群,  $^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$  年龄变化于  $(218 \pm 3)\text{Ma} \sim (224 \pm 3)\text{Ma}$ ,  $^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$  加权平均年龄为  $(221 \pm 1)\text{Ma}$  (MSDW=0.26); 细粒黑云二长花岗岩 (样品号 ZC11/1B) 共获得 17 个有效数据点, 其沿水平方向不同程度地偏离谐和线, 这主要与锆石中  $^{207}\text{Pb}$  丰度较低难以测准或普通铅的丢失有关,  $^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$  年龄变化于  $(215 \pm 3)\text{Ma} \sim (219 \pm 3)\text{Ma}$ ,  $^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$  加权平均年龄为  $(217 \pm 1)\text{Ma}$  (MSDW=0.11); 含斑晶岩浆暗色包体 (样品号 ZC04/2B) 共获得 25 个有效数据点, 在谐和图上同样组成密集的一簇,  $^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$  年龄变化于  $(215 \pm 5)\text{Ma} \sim (222 \pm 3)\text{Ma}$ ,  $^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$  加权平均年龄为  $(220 \pm 1)\text{Ma}$  (MSDW=0.11); 岩浆暗色包体 (样品号 ZC15/3B) 共获得 20 个有效数据点, 在谐和图上组成密集的一簇,  $^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$  年龄变化于  $(213 \pm 3)\text{Ma} \sim (219 \pm 3)\text{Ma}$ ,  $^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$  加权平均年龄为  $(216 \pm 1)\text{Ma}$  (MSDW=0.26); 细粒花岗岩脉 (样品号 ZC24/1B) 共获得 19 个有效数据点, 数据点沿水平方向不同程度地偏离谐和线,  $^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$  年龄变化于  $(204 \pm 3)\text{Ma} \sim (210 \pm 3)\text{Ma}$ ,  $^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$  加权平均年龄为  $(207 \pm 1)\text{Ma}$  (MSDW=0.29)。各样品测点位于锆石韵律环带上, 因此其年龄应视为锆石结晶年龄, 可以代表上述不同岩性的结晶年龄 (图 5)。

由此可见, 中川岩体中不同岩性的侵入顺序为 (从早到晚) 似斑状黑云二长花岗岩 → 含斑黑云二长花岗岩 → 细粒黑云二长花岗岩, 边部岩浆暗色包体的形成时间与寄主岩石同期。总之, 中川岩体形成时代为  $(207 \pm 1)\text{Ma} \sim (221 \pm 1)\text{Ma}$ , 从边部到中心时代逐渐变新, 为印支中晚期。

### 5.2 岩石地球化学

中川岩体不同岩性的地球化学分析结果见表 2。中川岩体似斑状黑云二长花岗岩、含斑黑云二

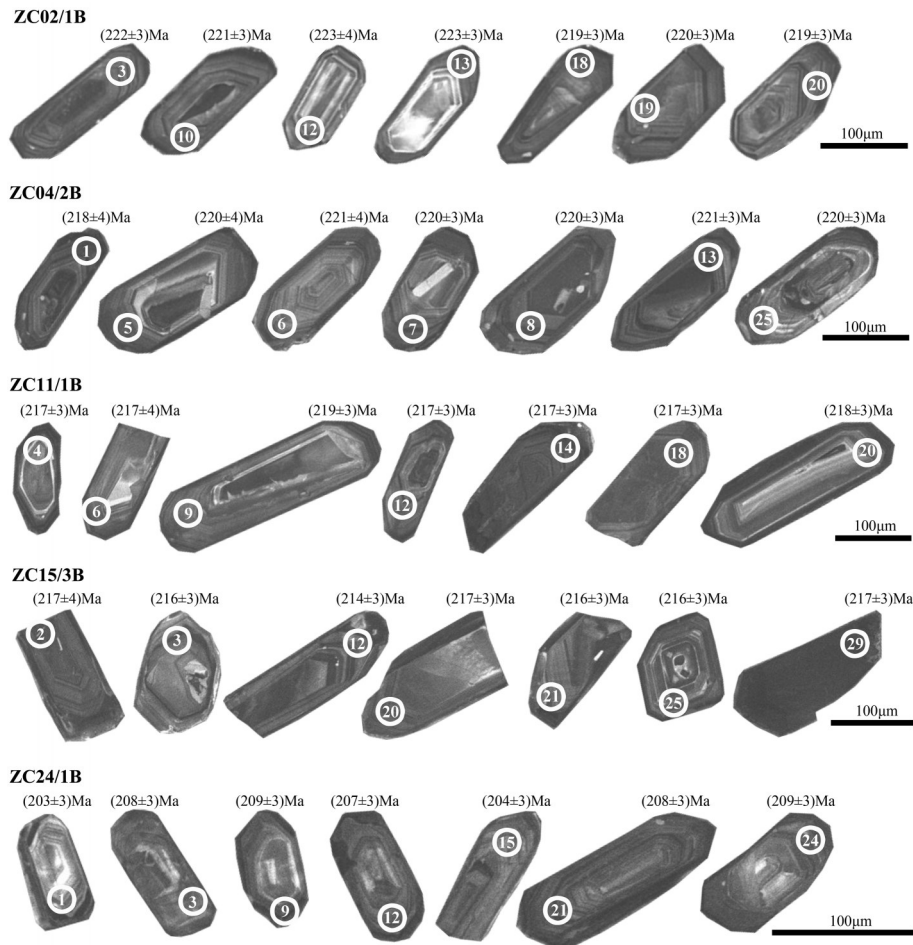


图4 西秦岭中川花岗岩体锆石阴极发光图像

Fig.4 Zircon CL images of the Zhongchuan granitoid pluton in West Qinling

长花岗岩、细粒黑云二长花岗岩的  $\text{SiO}_2$  含量为 65.56% ~ 71.71%,  $\text{Al}_2\text{O}_3$  含量为 14.67% ~ 15.92%,  $\text{TiO}_2$  含量变化于 0.25% ~ 0.50%,  $\text{K}_2\text{O}$ 、 $\text{Na}_2\text{O}$  含量分别为 3.70% ~ 6.80% 和 3.13% ~ 3.90%,  $\text{Fe}_2\text{O}_3^{\text{T}}$  含量变化于 1.58% ~ 4.15%,  $\text{MgO}$  变化于 0.43% ~ 1.46%,  $\text{K}_2\text{O}/\text{Na}_2\text{O}$  比值为 0.95 ~ 2.17 (表 2), 里特曼指数介于 2.20 ~ 3.85 (仅有一个值大于 3.3), 属钙碱性系列。在  $\text{SiO}_2$ - $\text{K}_2\text{O}$  图解 (图 6a) 中为高钾钙碱系列,  $A/\text{CNK} = 0.99 \sim 1.15$ , 只有中心部分细粒黑云二长花岗岩 2 个样品的值大于 1.1, 介于 1.14 ~ 1.15, 为准铝质-弱过铝质花岗岩 (图 6b)。总体上具有高硅、高铝和富碱的特点。值得注意的是, 中心部位细粒黑云二长花岗岩与其他岩性有明显的差别,  $A/\text{CNK}$  大于 1.1, 铁镁含量较低, 并且显微镜下出现极少量的白云母。中川岩体从似斑状黑云二长花岗岩到含

斑黑云二长花岗岩再到细粒黑云二长花岗岩, 各期次岩石随着  $\text{SiO}_2$  含量的增加,  $\text{TiO}_2$ 、 $\text{MgO}$ 、 $\text{CaO}$ 、 $\text{P}_2\text{O}_5$  和  $(\text{FeO}+\text{Fe}_2\text{O}_3)$  具有逐渐降低的趋势,  $\text{K}_2\text{O}$ 、 $\text{Na}_2\text{O}$ 、 $\text{Al}_2\text{O}_3$  与  $\text{SiO}_2$  线性相关性并不明显 (图 8)。

岩浆暗色包体的  $\text{SiO}_2$  含量较低, 为 54.98% ~ 63.25%,  $\text{Al}_2\text{O}_3$  含量为 15.81% ~ 17.69%,  $\text{TiO}_2$  含量变化于 0.70% ~ 1.18%,  $\text{K}_2\text{O}$ 、 $\text{Na}_2\text{O}$  含量分别为 2.49% ~ 8.22% 和 2.29% ~ 4.25%,  $\text{Fe}_2\text{O}_3^{\text{T}}$  含量变化于 5.17% ~ 8.44%,  $\text{MgO}$  为 1.84% ~ 3.41%,  $\text{K}_2\text{O}/\text{Na}_2\text{O}$  比值为 0.59 ~ 3.59 (表 2), 里特曼指数介于 2.24 ~ 9.22 (大部分介于 3.3~9), 属碱性系列。在  $\text{SiO}_2$ - $\text{K}_2\text{O}$  图解 (图 6a) 中为钾玄岩-高钾钙碱系列,  $A/\text{CNK} = 0.75 \sim 1.08$ , 为准铝质岩 (图 6b)。

在  $\text{MgO}$  与主要氧化物和元素比值相关图上 (图 7), 寄主岩石和岩浆暗色包体表现出不同的演化趋



表1 西秦岭中川花岗岩体LA-ICPMS 锆石U-Pb年龄测定结果  
Table 1 LA-ICPMS zircon U-Pb data of the Zhongchuan granitoid pluton in West Qinling

点号	Pb/10 <sup>-6</sup>	Th/10 <sup>-6</sup>	U/10 <sup>-6</sup>	Th/U	同位素比值			表面年龄/Ma		
					<sup>207</sup> Pb/ <sup>206</sup> Pb	<sup>207</sup> Pb/ <sup>235</sup> U	<sup>206</sup> Pb/ <sup>238</sup> U	<sup>207</sup> Pb/ <sup>206</sup> Pb	<sup>207</sup> Pb/ <sup>235</sup> U	<sup>206</sup> Pb/ <sup>238</sup> U
似斑状黑云母二长花岗岩 ZC-02/1B										
1	50	187	1240	0.15	0.0484±0.0016	0.2342±0.0051	0.0351±0.0006	118±78	214±4	222±3
2	68	256	1722	0.15	0.0515±0.0017	0.2495±0.0049	0.0352±0.0006	262±73	226±4	223±3
3	62	200	1575	0.13	0.0505±0.0017	0.2443±0.0049	0.0351±0.0006	218±74	222±4	222±3
4	62	375	1543	0.24	0.0499±0.0016	0.2389±0.0048	0.0347±0.0006	190±74	218±4	220±3
5	68	287	1716	0.17	0.0500±0.0016	0.2398±0.0048	0.0348±0.0006	193±74	218±4	221±3
6	65	260	1639	0.16	0.0506±0.0017	0.2431±0.0048	0.0348±0.0006	224±74	221±4	221±3
7	65	454	1485	0.31	0.0534±0.0018	0.2596±0.0058	0.0353±0.0006	344±76	234±5	224±4
8	54	256	1340	0.19	0.0502±0.0018	0.2433±0.0059	0.0352±0.0006	202±80	221±5	223±4
9	49	167	1253	0.13	0.0493±0.0016	0.2382±0.0050	0.0351±0.0006	161±76	217±4	222±3
10	41	149	1021	0.15	0.0528±0.0018	0.2543±0.0055	0.0349±0.0006	322±75	230±4	221±3
12	49	288	1122	0.26	0.0507±0.0018	0.2466±0.0057	0.0353±0.0006	228±79	224±5	223±4
13	59	327	1437	0.23	0.0499±0.0016	0.2421±0.0049	0.0352±0.0006	191±75	220±4	223±3
14	76	254	1837	0.14	0.0492±0.0016	0.2390±0.0050	0.0353±0.0006	155±76	218±4	223±3
15	71	279	1729	0.16	0.0521±0.0017	0.2538±0.0051	0.0353±0.0006	290±73	230±4	224±3
16	61	218	1569	0.14	0.0516±0.0017	0.2459±0.0048	0.0346±0.0005	266±73	223±4	219±3
18	69	281	1766	0.16	0.0530±0.0017	0.2532±0.0049	0.0346±0.0005	330±72	229±4	219±3
19	51	197	1289	0.15	0.0479±0.0016	0.2292±0.0048	0.0347±0.0006	92±78	210±4	220±3
20	64	290	1662	0.17	0.0498±0.0016	0.2370±0.0048	0.0345±0.0005	186±75	216±4	219±3
22	80	379	2040	0.19	0.0502±0.0016	0.2382±0.0045	0.0344±0.0005	202±73	217±4	218±3
24	65	226	1597	0.14	0.0496±0.0016	0.2407±0.0048	0.0352±0.0006	177±74	219±4	223±3
25	69	257	1740	0.15	0.0490±0.0016	0.2362±0.0045	0.0349±0.0005	149±74	215±4	221±3
细粒黑云二长花岗岩 ZC-11/1B										
4	35	89	899	0.1	0.0512±0.0018	0.2417±0.0057	0.0342±0.0005	250±80	220±5	217±3
6	23	85	520	0.16	0.0547±0.0022	0.2578±0.0076	0.0342±0.0006	399±87	233±6	217±4
9	53	232	1303	0.18	0.0540±0.0019	0.2568±0.0060	0.0345±0.0006	371±78	232±5	219±3
12	65	222	1667	0.13	0.0536±0.0018	0.2525±0.0051	0.0342±0.0005	356±74	229±4	217±3
14	64	255	1548	0.16	0.0591±0.0020	0.2792±0.0057	0.0343±0.0005	569±72	250±5	217±3
16	67	260	1616	0.16	0.0576±0.0020	0.2731±0.0057	0.0344±0.0005	512±73	245±5	218±3
17	51	148	1257	0.12	0.0507±0.0018	0.2413±0.0057	0.0345±0.0006	227±81	220±5	219±3
18	39	162	933	0.17	0.0591±0.0021	0.2787±0.0062	0.0342±0.0005	571±74	250±5	217±3
20	43	245	1021	0.24	0.0551±0.0019	0.2618±0.0058	0.0345±0.0005	416±76	236±5	218±3
22	60	190	1434	0.13	0.0519±0.0018	0.2464±0.0054	0.0345±0.0005	281±77	224±4	218±3
26	55	218	1349	0.16	0.0541±0.0018	0.2541±0.0052	0.0341±0.0005	374±74	230±4	216±3
27	77	314	1840	0.17	0.0558±0.0018	0.2611±0.0049	0.0340±0.0005	443±71	236±4	215±3
28	38	119	340	0.35	0.0522±0.0034	0.2446±0.0141	0.0340±0.0007	294±141	222±12	215±4
29	53	141	818	0.17	0.0562±0.0023	0.2651±0.0079	0.0342±0.0005	458±87	239±6	217±3
30	58	314	1400	0.22	0.0512±0.0017	0.2412±0.0048	0.0342±0.0005	248±75	219±4	217±3
31	52	403	1141	0.35	0.0567±0.0022	0.2666±0.0071	0.0341±0.0005	479±82	240±6	216±3
32	12	101	276	0.36	0.0503±0.0023	0.2373±0.0084	0.0342±0.0006	210±100	216±7	217±3

续表 1

点号	Pb/ $10^{-6}$	Th/ $10^{-6}$	U/ $10^{-6}$	Th/U	同位素比值			表面年龄 / Ma		
					$^{207}\text{Pb}/^{206}\text{Pb}$	$^{207}\text{Pb}/^{235}\text{U}$	$^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$	$^{207}\text{Pb}/^{206}\text{Pb}$	$^{207}\text{Pb}/^{235}\text{U}$	$^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$
细粒花岗岩脉 ZC-24/1B										
1	40	323	985	0.33	0.0599±0.0021	0.2707±0.0061	0.0327±0.0005	601±74	243±5	208±3
2	57	211	1614	0.13	0.0604±0.0035	0.2717±0.0138	0.0326±0.0006	618±121	244±11	207±4
3	66	223	1725	0.13	0.0531±0.0018	0.2402±0.0050	0.0328±0.0005	332±75	219±4	208±3
4	23	300	529	0.57	0.0558±0.0022	0.2517±0.0069	0.0327±0.0005	443±83	228±6	208±3
6	91	532	2192	0.24	0.0537±0.0019	0.2407±0.0053	0.0325±0.0005	358±76	219±4	206±3
7	112	376	2994	0.13	0.0578±0.0019	0.2563±0.0047	0.0322±0.0005	523±69	232±4	204±3
8	52	434	1288	0.34	0.0626±0.0021	0.2777±0.0057	0.0322±0.0005	696±70	249±5	204±3
9	57	311	1384	0.22	0.0553±0.0019	0.2512±0.0053	0.0330±0.0005	423±73	228±4	209±3
12	84	364	2164	0.17	0.0544±0.0018	0.2449±0.0046	0.0327±0.0005	387±71	223±4	207±3
14	88	386	2383	0.16	0.0529±0.0019	0.2380±0.0060	0.0327±0.0005	322±82	217±5	207±3
15	57	308	1535	0.2	0.0614±0.0023	0.2725±0.0072	0.0322±0.0005	653±79	245±6	204±3
17	80	311	1652	0.19	0.0502±0.0022	0.2250±0.0080	0.0325±0.0006	203±101	206±7	206±3
18	96	478	2717	0.18	0.0569±0.0022	0.2542±0.0069	0.0324±0.0005	486±83	230±6	206±3
19	52	325	1151	0.28	0.0532±0.0020	0.2400±0.0060	0.0327±0.0005	337±81	218±5	208±3
21	82	288	2046	0.14	0.0506±0.0017	0.2283±0.0048	0.0327±0.0005	223±77	209±4	208±3
22	39	198	960	0.21	0.0520±0.0020	0.2360±0.0065	0.0329±0.0005	284±85	215±5	209±3
23	57	326	1463	0.22	0.0604±0.0022	0.2695±0.0069	0.0324±0.0005	617±78	242±6	205±3
24	53	358	1295	0.28	0.0511±0.0018	0.2323±0.0057	0.0330±0.0005	245±81	212±5	209±3
25	45	244	1097	0.22	0.0514±0.0018	0.2342±0.0051	0.0330±0.0005	260±77	214±4	210±3
含斑晶岩浆暗色包体 ZC-04/2B										
1	74	385	2115	0.18	0.0514±0.0021	0.2435±0.0077	0.0344±0.0006	258±92	221±6	218±4
2	59	219	1423	0.15	0.0602±0.0020	0.2885±0.0058	0.0347±0.0006	611±70	257±5	220±3
3	74	280	1843	0.15	0.0507±0.0017	0.2426±0.0047	0.0347±0.0005	226±73	221±4	220±3
4	60	207	1566	0.13	0.0494±0.0017	0.2353±0.0049	0.0346±0.0005	165±76	215±4	219±3
5	42	220	1042	0.21	0.0523±0.0021	0.2497±0.0072	0.0347±0.0006	296±87	226±6	220±4
6	33	197	902	0.22	0.0510±0.0031	0.2450±0.0132	0.0348±0.0007	243±134	223±11	221±4
7	43	214	1018	0.21	0.0495±0.0018	0.2372±0.0057	0.0348±0.0006	170±81	216±5	220±3
8	61	268	1514	0.18	0.0493±0.0016	0.2365±0.0047	0.0348±0.0005	164±75	216±4	220±3
9	62	308	1569	0.2	0.0504±0.0017	0.2404±0.0050	0.0346±0.0005	214±75	219±4	219±3
10	63	206	1593	0.13	0.0504±0.0017	0.2420±0.0048	0.0348±0.0005	214±74	220±4	221±3
11	47	169	1237	0.14	0.0504±0.0018	0.2390±0.0055	0.0344±0.0006	213±79	218±5	218±3
12	51	171	1279	0.13	0.0503±0.0017	0.2398±0.0049	0.0346±0.0005	207±75	218±4	219±3
13	84	351	2291	0.15	0.0540±0.0018	0.2590±0.0054	0.0348±0.0006	370±73	234±4	221±3
14	56	335	1387	0.24	0.0541±0.0018	0.2586±0.0055	0.0347±0.0006	373±74	234±4	220±3
15	39	185	933	0.2	0.0502±0.0018	0.2418±0.0056	0.0350±0.0006	202±79	220±5	222±3
16	51	167	1279	0.13	0.0500±0.0017	0.2406±0.0050	0.0349±0.0006	195±75	219±4	221±3
17	44	222	1146	0.19	0.0488±0.0021	0.2325±0.0079	0.0346±0.0006	138±98	212±6	219±4
18	64	398	1592	0.25	0.0497±0.0016	0.2385±0.0047	0.0348±0.0005	181±74	217±4	221±3
19	46	188	1172	0.16	0.0486±0.0029	0.2323±0.0123	0.0346±0.0007	131±135	212±10	220±4
20	69	303	1789	0.17	0.0491±0.0024	0.2349±0.0093	0.0347±0.0006	152±108	214±8	220±4
21	59	194	1425	0.14	0.0491±0.0016	0.2355±0.0049	0.0348±0.0005	152±76	215±4	220±3
22	55	217	1466	0.15	0.0495±0.0023	0.2361±0.0088	0.0346±0.0006	172±103	215±7	219±4
23	64	239	1611	0.15	0.0490±0.0016	0.2335±0.0045	0.0346±0.0005	146±74	213±4	219±3
24	45	157	1316	0.12	0.0489±0.0036	0.2284±0.0155	0.0339±0.0007	142±164	209±13	215±5
25	55	525	1341	0.39	0.0521±0.0021	0.2489±0.0074	0.0346±0.0006	291±88	226±6	220±4

续表1

点号	Pb/10 <sup>-6</sup>	Th/10 <sup>-6</sup>	U/10 <sup>-6</sup>	Th/U	同位素比值			表面年龄/Ma		
					<sup>207</sup> Pb/ <sup>206</sup> Pb	<sup>207</sup> Pb/ <sup>235</sup> U	<sup>206</sup> Pb/ <sup>238</sup> U	<sup>207</sup> Pb/ <sup>206</sup> Pb	<sup>207</sup> Pb/ <sup>235</sup> U	<sup>206</sup> Pb/ <sup>238</sup> U
岩浆暗色包体 ZC-15/3B										
1	56	252	1522	0.17	0.0521±0.0022	0.2449±0.0076	0.0341±0.0006	289±92	222±6	216±4
2	61	297	1448	0.21	0.0657±0.0026	0.3111±0.0090	0.0343±0.0006	798±81	275±7	217±4
3	36	192	965	0.2	0.0511±0.0019	0.2404±0.0064	0.0341±0.0006	245±85	219±5	216±3
4	54	240	1402	0.17	0.0540±0.0019	0.2550±0.0060	0.0342±0.0006	370±78	231±5	217±3
9	71	534	1850	0.29	0.0498±0.0040	0.2316±0.0171	0.0338±0.0008	183±176	212±14	214±5
12	86	351	2198	0.16	0.0547±0.0018	0.2549±0.0049	0.0338±0.0005	400±71	231±4	214±3
13	73	257	1658	0.15	0.0656±0.0024	0.3128±0.0080	0.0346±0.0006	794±76	276±6	219±3
14	74	318	1634	0.19	0.0518±0.0018	0.2400±0.0056	0.0336±0.0005	276±78	218±4	213±3
16	60	188	1378	0.14	0.0527±0.0018	0.2464±0.0052	0.0339±0.0005	316±75	224±4	215±3
17	73	214	1566	0.14	0.0664±0.0023	0.3194±0.0073	0.0349±0.0005	818±71	281±6	221±3
18	46	162	1084	0.15	0.0533±0.0018	0.2510±0.0053	0.0342±0.0005	342±75	227±4	217±3
19	59	182	1466	0.12	0.0527±0.0019	0.2491±0.0057	0.0343±0.0005	314±78	226±5	218±3
20	45	197	990	0.2	0.0539±0.0020	0.2542±0.0066	0.0342±0.0005	367±82	230±5	217±3
21	74	278	1771	0.16	0.0519±0.0017	0.2438±0.0046	0.0341±0.0005	281±72	222±4	216±3
24	38	130	748	0.17	0.0612±0.0026	0.2878±0.0094	0.0341±0.0006	645±89	257±7	216±4
25	48	314	1022	0.31	0.0660±0.0021	0.3093±0.0058	0.0340±0.0005	807±66	274±5	216±3
27	815	21641	16404	1.32	0.0496±0.0015	0.2337±0.0035	0.0342±0.0005	174±69	213±3	217±3
29	445	7124	9862	0.72	0.0492±0.0015	0.2319±0.0034	0.0342±0.0005	157±69	212±3	217±3
30	67	860	1526	0.56	0.0534±0.0021	0.2512±0.0069	0.0341±0.0005	346±85	228±6	216±3
31	893	23272	17587	1.32	0.0503±0.0015	0.2353±0.0035	0.0340±0.0005	207±69	215±3	215±3

势; 寄主岩石的成分相对集中, 随着MgO含量的降低, SiO<sub>2</sub>、K<sub>2</sub>O含量和Rb/Sr比值升高, CaO、TiO<sub>2</sub>含量降低, Na<sub>2</sub>O、Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>和(La/Yb)<sub>N</sub>则没有明显的变化趋势; 岩浆暗色包体的成分表现出很大的变化范围, 随着MgO含量的降低, 其SiO<sub>2</sub>含量升高, K<sub>2</sub>O、CaO、TiO<sub>2</sub>含量和Rb/Sr比值降低; 可以看出岩浆暗色包体和寄主岩石在SiO<sub>2</sub>含量和Rb/Sr比值上表现出相反的演化趋势。在Harker图解中(图7, 图8)可以观察到大部分氧化物有明显的线性关系, 只有K<sub>2</sub>O、Na<sub>2</sub>O和SiO<sub>2</sub>之间不具有明显的协变关系。

似斑状黑云二长花岗岩的稀土元素总量较高, 为112.7×10<sup>-6</sup>~243×10<sup>-6</sup>, LREE/HREE值为9.83~20.93, 平均值为13.37, (La/Yb)<sub>N</sub>值变化为11.99~37.57, 平均值为19.65, 稀土元素球粒陨石标准化配分模式图(图9a)上, 所有样品配分型式基本一致, 表现为轻稀土元素富集的右倾特征, 各样品均具有弱的负铕异常, δEu=0.58~0.91。微量元素中具有较高的K、Pb含量, Rb/Sr比值为0.38~0.92, 平均值为0.62, Th/U比值较低, 为2.49~5.09。微量元素原始地幔标准化蛛网图(图9b)表现为富集K、Rb、Ba、

LREE等大离子亲石元素, 相对亏损HREE、Ta、Nb、P、Ti等高场强元素的特征。

含斑黑云二长花岗岩的稀土元素总量偏低, 为122.3×10<sup>-6</sup>~150.3×10<sup>-6</sup>, 轻、重稀土分馏较似斑状黑云二长花岗岩明显, LREE/HREE值为11.25~19.82, 平均值为15.03, (La/Yb)<sub>N</sub>值变化于13.27~35.2, 平均值为24.64, 稀土元素球粒陨石标准化配分模式图(图9a)与似斑状黑云二长花岗岩一致, 呈右倾斜型, 具负铕异常, δEu=0.53~0.64, 铈异常不明显。微量元素中K、Rb含量较高, 并且K、Pb含量较似斑状黑云二长花岗岩高, 除此以外, 可观察到P、Mn、Co、Ti等元素含量较似斑状黑云二长花岗岩明显降低(表2)。不相容元素Rb/Sr比值为0.80~1.37, Th/U比值为2.74~6.29, 平均4.30, 虽比似斑状黑云二长花岗岩高, 但总体仍较低。与似斑状黑云二长花岗岩微量元素原始地幔标准化蛛网图(图9b)对比, 相对亏损Sr、P、Eu等元素。

细粒黑云二长花岗岩的稀土总量为134.9×10<sup>-6</sup>~153.7×10<sup>-6</sup>, 轻、重稀土分馏与似斑状黑云二长花岗岩、含斑黑云二长花岗岩相比更为明显, LREE/

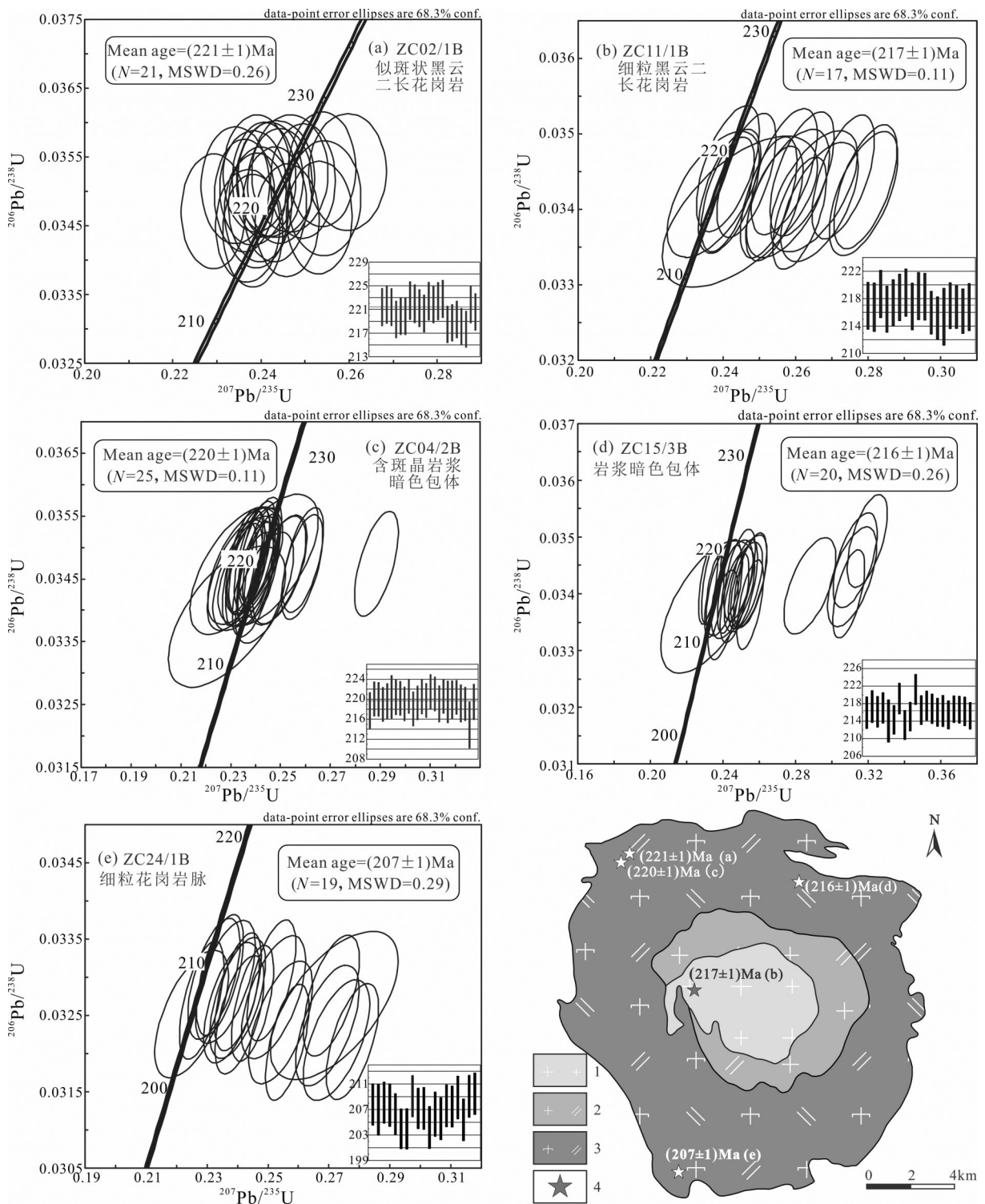


图5 西秦岭中川花岗岩体锆石U-Pb年龄谐和图

1—黑云母二长花岗岩;2—含斑黑云母二长花岗岩;3—似斑状黑云母二长花岗岩;4—同位素采样位置及年龄

Fig.5 Zircon U-Pb concordia diagram for the Zhongchuan granitoid pluton in West Qinling

1-Biotite monzonite; 2-Porphyritoid biotite monzonite; 3-Porphyritic biotite monzonite; 4-The age and location of the samples

表2 西秦岭中川花岗岩的主量(%)、微量和稀土元素( $10^{-6}$ )分析结果  
Table 2 Major elements (%), trace elements and REE ( $10^{-6}$ ) of the Zhongchuan granitoid plutons in West Qinling

岩体 样品号	中川花岗岩体-主体岩性(ZC)												中川花岗岩体-岩浆暗色包体(ZC)													
	13/2B	26/1B	26/3B	01/1B	05/1B	08/1B	10/1B	14/1B	17/1B	22/1B	28/1B	33/1B	11/1B	11/2B	12/1B	37/1B	36/1B	38/1B	04/2B	04/5B	08/2B	04/1B	05/2B	10/2B	16/2B	29/2B
岩性	2	2	2	1	1	1	1	1	1	1	1	1	3	3	3	4	4	4	5	5	5	6	6	6	6	6
SiO <sub>2</sub>	71.41	71.71	70.01	67.61	68.18	65.56	68.40	68.60	67.16	70.46	70.83	68.93	70.48	71.17	71.60	66.67	66.90	67.18	63.19	56.40	57.76	54.98	55.50	56.02	62.65	63.25
TiO <sub>2</sub>	0.25	0.33	0.33	0.49	0.47	0.61	0.46	0.27	0.50	0.37	0.33	0.39	0.29	0.37	0.27	0.47	0.44	0.45	0.71	0.84	0.93	0.87	1.18	0.82	0.70	1.03
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	14.67	14.81	15.11	15.29	15.36	15.73	15.09	15.53	15.64	14.85	14.88	15.12	15.27	15.12	14.99	15.89	15.82	15.92	15.81	16.78	17.21	15.94	17.69	15.87	16.36	16.24
Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub> <sup>T</sup>	1.71	1.96	2.18	3.23	3.13	4.15	3.16	1.90	3.40	2.57	2.09	2.61	1.92	1.90	1.58	3.27	3.15	3.19	5.18	6.87	7.17	7.97	8.44	7.31	5.17	6.11
MnO	0.04	0.04	0.04	0.06	0.06	0.08	0.06	0.04	0.07	0.06	0.05	0.05	0.03	0.03	0.03	0.04	0.06	0.06	0.11	0.18	0.17	0.24	0.17	0.24	0.12	0.16
MgO	0.48	0.48	0.69	1.14	1.11	1.34	1.00	0.60	1.05	0.79	0.68	0.85	0.45	0.51	0.43	1.46	1.34	1.32	1.84	2.68	2.58	3.17	3.08	3.41	1.84	1.93
CaO	1.27	1.14	1.50	2.58	2.50	2.48	2.46	1.67	2.59	2.15	1.45	1.90	1.22	1.16	0.79	2.75	2.82	2.81	3.50	4.41	3.94	4.71	4.54	4.98	3.65	2.92
Na <sub>2</sub> O	3.74	3.82	3.63	3.42	3.50	3.42	3.51	3.13	3.49	3.62	3.90	3.28	3.72	3.65	3.48	3.77	3.90	3.90	3.28	2.82	3.99	2.29	4.17	2.85	3.52	4.25
K <sub>2</sub> O	5.10	4.87	5.52	4.70	4.46	5.07	4.60	6.80	4.89	4.16	4.84	5.56	5.39	4.78	5.46	3.82	3.82	3.70	4.68	7.23	4.52	8.22	3.02	6.86	4.52	2.49
P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	0.13	0.15	0.14	0.20	0.19	0.22	0.19	0.11	0.19	0.14	0.13	0.16	0.14	0.17	0.13	0.15	0.15	0.16	0.29	0.38	0.48	0.45	0.46	0.39	0.27	0.25
LOI	1.00	0.50	0.60	1.00	0.80	1.10	0.80	1.10	0.70	0.60	0.70	0.90	0.90	1.00	1.10	1.40	1.30	1.00	1.20	1.10	1.00	0.90	1.50	1.00	0.90	1.20
总量	99.82	99.83	99.77	99.72	99.78	99.73	99.77	99.74	99.71	99.80	99.82	99.77	99.80	99.83	99.82	99.72	99.72	99.72	99.76	99.73	99.77	99.73	99.76	99.78	99.74	99.84
Na <sub>2</sub> O+K <sub>2</sub> O	8.84	8.69	9.15	8.12	7.96	8.49	8.11	9.93	8.38	7.78	8.74	8.84	9.11	8.43	8.94	7.59	7.72	7.60	7.96	10.05	8.51	10.51	7.19	9.71	8.04	6.74
K <sub>2</sub> O/Na <sub>2</sub> O	1.36	1.27	1.52	1.37	1.27	1.48	1.31	2.17	1.40	1.15	1.24	1.70	1.45	1.31	1.57	1.01	0.98	0.95	1.43	2.56	1.13	3.59	0.72	2.41	1.28	0.59
里特曼指数	2.75	2.63	3.10	2.68	2.52	3.20	2.59	3.85	2.91	2.20	2.74	3.01	3.02	2.52	2.79	2.43	2.49	2.39	3.14	7.54	4.91	9.22	4.14	7.24	3.29	2.24
A/CNK	1.05	1.09	1.03	0.99	1.01	1.01	0.99	1.00	0.99	1.03	1.04	1.02	1.08	1.14	1.15	1.03	1.01	1.02	0.94	0.82	0.92	0.75	0.96	0.75	0.94	1.08
A/NK	1.26	1.28	1.26	1.43	1.45	1.41	1.40	1.24	1.42	1.42	1.28	1.32	1.28	1.35	1.29	1.54	1.50	1.53	1.51	1.34	1.50	1.26	1.75	1.31	1.53	1.68
P	568	655	611	873	830	961	830	480	830	611	568	699	611	742	568	655	699	699	1266	1659	2096	1965	2008	1703	1179	1092
K	42319	40411	45804	39000	37009	42070	38170	56426	40577	34519	40162	46136	44726	39664	45306	316983	169830702	38834	59994	37506	68209	25060	56923	37506	20662	
Sc	3.00	3.00	4.00	5.00	5.00	6.00	5.00	3.00	6.00	5.00	4.00	4.00	3.00	2.00	2.00	6.00	5.00	5.00	11.00	17.00	16.00	21.00	18.00	14.00	11.00	9.00
Ti	1500	1980	1980	2940	2820	3660	2760	1620	3000	2220	1980	2340	1740	2220	1620	2820	2640	2700	4260	5040	5580	5220	7080	4920	4200	6180
V	16.00	16.00	27.00	36.00	34.00	45.00	40.00	23.00	36.00	26.00	27.00	31.00	16.00	18.00	14.00	50.00	47.00	45.00	80.00	112.00	87.00	133.00	114.00	124.00	74.00	74.00
Cr	<10	<10	<10	13.68	<10	13.68	<10	<10	<10	<10	<10	<10	<10	<10	<10	20.53	20.53	20.53	20.53	13.68	20.53	<10	20.53	54.74	<10	<10
Mn	310	310	465	465	465	620	465	310	542	465	387	387	232	232	232	310	465	465	852	1394	1317	1859	1317	1859	930	1239
Co	1.90	2.60	3.70	4.30	5.30	5.80	5.00	3.20	5.00	4.20	3.70	3.40	2.30	2.90	1.60	6.30	5.40	6.20	9.30	14.30	13.40	14.10	12.70	14.40	8.30	10.70
Ni	1.90	1.40	3.60	3.00	2.80	3.90	3.00	1.80	2.90	2.40	3.50	2.50	1.80	1.10	1.30	8.10	7.40	7.60	3.60	6.50	6.00	2.00	6.10	6.20	3.00	3.90
Cu	1.30	0.90	4.10	4.10	3.60	3.90	2.90	2.20	4.70	1.90	3.10	2.70	1.10	1.10	0.90	3.30	1.70	3.20	13.10	23.50	52.80	18.50	16.90	69.90	16.00	6.40
Zn	46.00	51.00	46.00	58.00	52.00	77.00	58.00	38.00	65.00	49.00	44.00	48.00	53.00	54.00	49.00	31.00	46.00	49.00	83.00	97.00	115.00	95.00	134.00	91.00	75.00	120.00
Ga	21.60	23.30	20.70	17.00	19.50	21.50	19.40	17.70	19.50	19.80	22.40	17.10	23.00	27.00	22.30	18.70	16.90	19.30	20.80	21.50	24.30	21.20	26.90	19.10	21.40	24.00



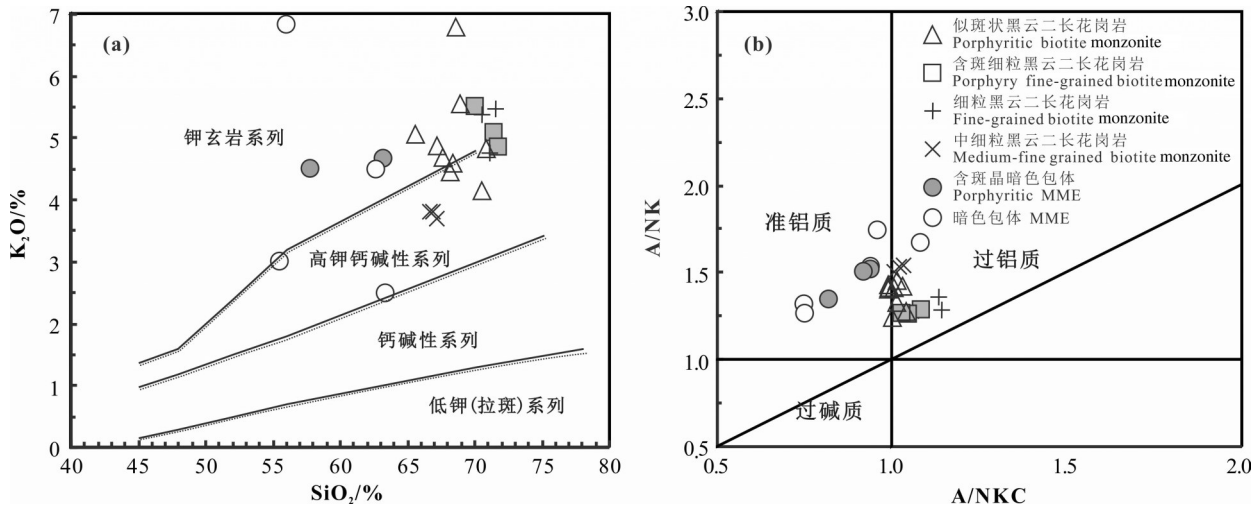


图6 西秦岭中川花岗岩体 SiO<sub>2</sub>-K<sub>2</sub>O 图解(a)和 A/CNK-A/NK 图解(b)  
Fig.6 SiO<sub>2</sub>-K<sub>2</sub>O(a) and A/CNK-A/NK(b) diagrams for the Zhongchuan granitoid plutons in West Qinling

HREE 值为 19.81 ~ 20.95, 平均值为 20.44, (La/Yb)<sub>N</sub> 比值变化为 35.43 ~ 47.16, 平均值为 41.76, 稀土元素球粒陨石标准化配分模式图(图 9a)与上述两种岩性一致, 呈右倾斜型, 显示负铕异常, δEu = 0.53 ~ 0.66, Ce 异常不明显。微量元素中 K、Rb 含量较高, 并且 Rb 含量较上述两种岩性都高, 为 266.1 × 10<sup>-6</sup> ~ 290.1 × 10<sup>-6</sup>, Rb/Sr 比值高于上述两种岩性, 为 1.21 ~ 1.67, Th/U 比值也较高, 为 4.21 ~ 7.27, 平均 5.61。微量元素原始地幔标准化蛛网图(图 9b)呈右倾特征, 具有明显的 Ba、Ta、Nb、P、Ti 负异常, K、Pb 正异常。

岩浆暗色包体的稀土总量与寄主岩石相比偏高, 为 121.9 × 10<sup>-6</sup> ~ 236 × 10<sup>-6</sup>, 轻、重稀土分馏没有寄主岩石明显, LREE/HREE 值为 6.53 ~ 15.34, 平均值为 8.54, (La/Yb)<sub>N</sub> 比值变化于 8.90 ~ 28.12, 平均值为 12.67, 稀土元素球粒陨石标准化配分模式图(图 9a)与寄主岩石一致, 呈右倾斜型, 显示负 Eu 异常, δEu = 0.29 ~ 0.57, Ce 异常不明显。微量元素中 K、Rb 含量较高, 并且 Rb 含量较寄主岩石都高, 为 201.5 × 10<sup>-6</sup> ~ 404.1 × 10<sup>-6</sup>, 平均值为 306 × 10<sup>-6</sup>, Rb/Sr 为 0.49 ~ 2.26, 平均值为 1.16, Th/U 比值较寄主岩石偏低, 为 1.54 ~ 4.52, 平均 3.19。微量元素原始地幔标准化蛛网图(图 9b)呈右倾特征, 具有明显的 Ba、Ta、Nb、Ti 负异常, K、Pb 正异常。

总的来说, 寄主岩石随着岩性由老变新, 矿物组成种类变化不大, 主要表现为结构和暗色矿物的含量变化, 即由似斑状向含斑、细粒结构演化, 暗色

矿物也逐渐减少, 晚期开始出现少量的白云母, 不含角闪石。在岩石化学上, 由老到新(由外到内), SiO<sub>2</sub> 含量增大, FeO、MgO、CaO 含量减少, K<sub>2</sub>O、Na<sub>2</sub>O 含量变化不明显, 总体是升高的, 铝饱和指数在中心部位更高一点(大于 1.1), 总体上晚期较早期表现出更高分异作用。微量元素变化不明显, 但 Co、V 等元素则是逐渐降低的趋势。稀土元素 REE、δEu 虽有起伏, 总体上也是由高向低变化的, 均表现出正向演化的特点。

### 5.3 Sm-Nd 同位素组成

不同岩性的 Sm-Nd 同位素组成分析结果见表 3。

Sm-Nd 同位素的测试样品与本次所测年龄样基本一一对应, 分别按本次所测的年龄计算。寄主岩石的 <sup>143</sup>Nd/<sup>144</sup>Nd 比值为 0.512061 ~ 0.512128, Sm/Nd 比值为 0.167 ~ 0.176, ε<sub>Nd</sub>(t) 变化于 -7.31 ~ -8.73, Nd 同位素亏损地幔模式年龄(t<sub>DM2</sub>)变化于 1.59 ~ 1.71 Ga。其中, 似斑状黑云二长花岗岩和含斑黑云二长花岗岩的 ε<sub>Nd</sub>(t) 和 T<sub>DM2</sub> 基本一致, 分别为 -8.40、-8.73 和 1.68 Ga、1.71 Ga, 细粒黑云二长花岗岩的 ε<sub>Nd</sub>(t)、t<sub>DM2</sub> 的值分别为 -7.31、1.59 Ga。可见, 岩体从外到内(由老到新)基本上表现为 ε<sub>Nd</sub>(t) 值逐渐增大、二阶段模式年龄变小的趋势。岩浆暗色包体 <sup>143</sup>Nd/<sup>144</sup>Nd 比值为 0.512225 ~ 0.512239, Sm/Nd 比值为 0.180 ~ 0.183, ε<sub>Nd</sub>(t) 变化于 -5.32 ~ -5.69, Nd 同位素亏损地幔模式年龄(T<sub>DM2</sub>)变化于 1.43 ~ 1.46 Ga。寄主岩石和岩浆暗色包体相比, 寄主岩石具有更低的 ε<sub>Nd</sub>(t) 值以

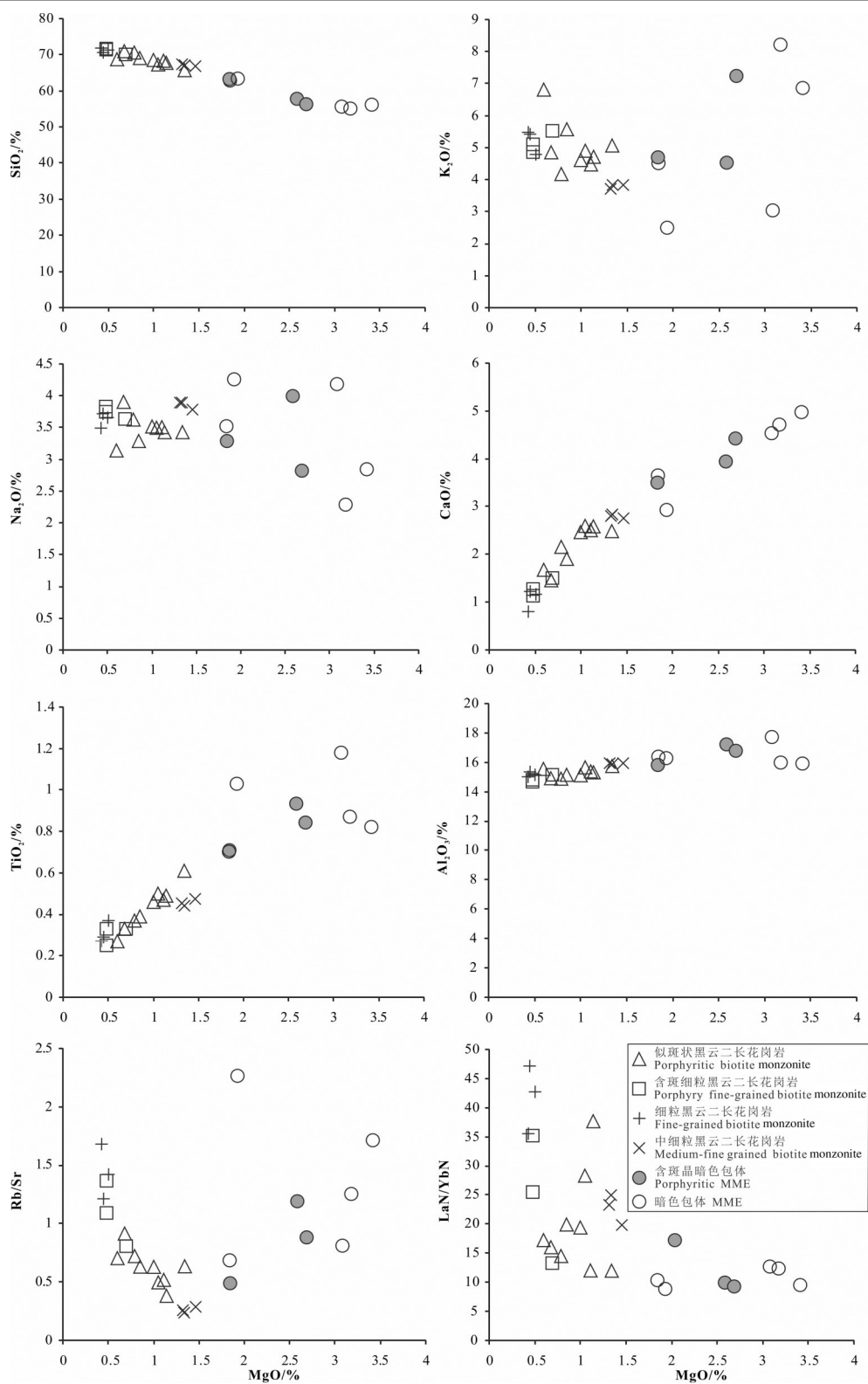


图7 西秦岭中川岩体MgO与主要氧化物和元素比值相关图

Fig.7 Variations of major elements with MgO for the Zhongchuan granitoid plutons in West Qinling



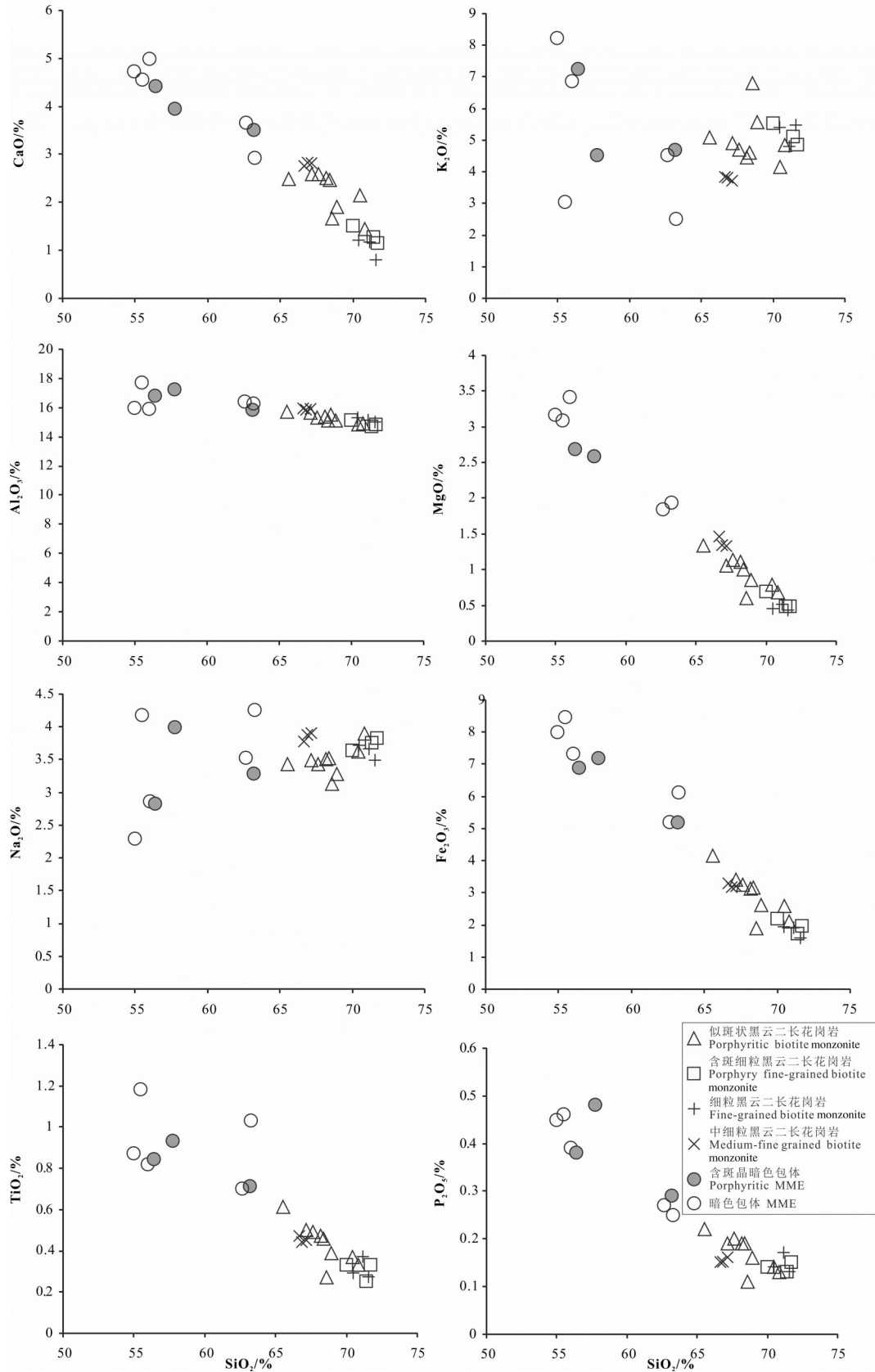


图8 西秦岭中川岩体SiO<sub>2</sub>与主要氧化物和元素比值相关图

Fig.8 Variations of major elements with SiO<sub>2</sub> for the Zhongchuan granitoid plutons in West Qinling

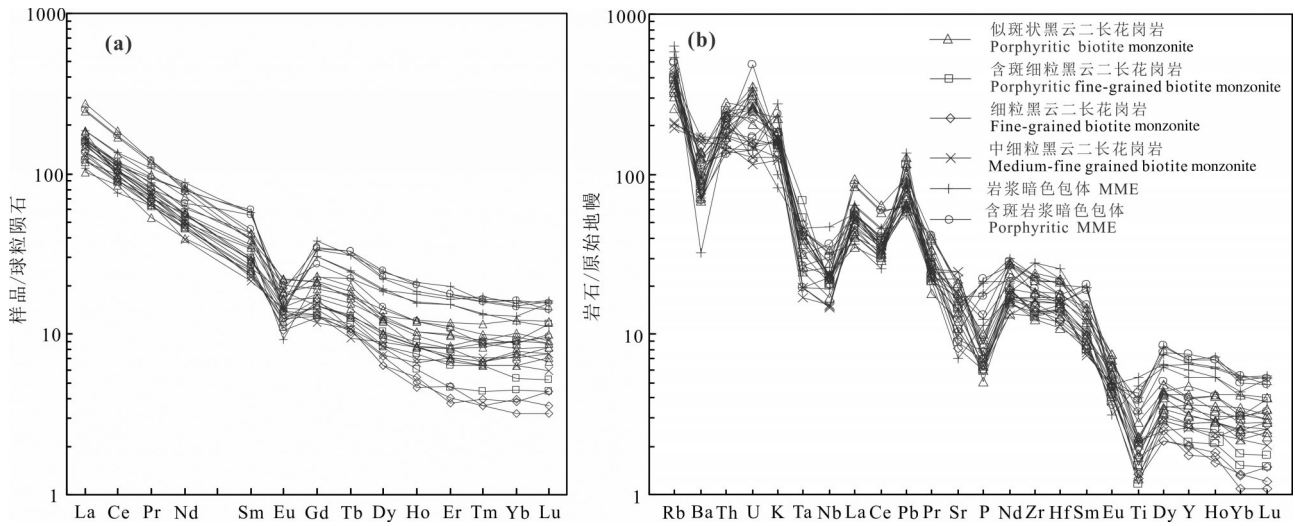


图9 西秦岭中川花岗岩体稀土元素球粒陨石标准化图解(a)和微量元素原始地幔标准化蛛网图(b)  
Fig.9 Chondrite-normalized REE patterns (a) and primitive mantle normalized trace element spider diagrams (b) of the Zhongchuan granitoid plutons in West Qinling

表3 西秦岭中川岩体Sm-Nd同位素组成  
Table 3 Sm-Nd isotope compositions of Zhongchuan pluton in West Qinling

样品号	岩性	Sm/10 <sup>-6</sup>	Nd/10 <sup>-6</sup>	<sup>147</sup> Sm/ <sup>144</sup> Nd	<sup>143</sup> Nd/ <sup>144</sup> Nd	2σ	ε <sub>Nd</sub> (t)	t <sub>DM2</sub>
ZC02/1B	似斑状黑云二长花岗岩	4.128	24.08	0.1036	0.512073	0.000008	-8.40	1.68
ZC13/2B	含斑黑云二长花岗岩	3.937	22.36	0.1069	0.512061	0.000009	-8.73	1.71
ZC11/1B	细粒黑云二长花岗岩	4.514	27.05	0.1014	0.512128	0.000006	-7.31	1.59
ZC04/2B	含斑岩浆暗色包体	7.112	39.53	0.1088	0.512239	0.000008	-5.32	1.43
ZC15/3B	岩浆暗色包体	6.932	37.94	0.1106	0.512225	0.000009	-5.69	1.46

及更高的 $T_{DM2}$ 值。

### 5.4 Hf同位素组成

对中川岩体似斑状黑云二长花岗岩(样品ZC02/1B)、细粒黑云二长花岗岩(样品ZC11/1B)、含斑晶岩浆暗色包体(样品ZC04/2B)、岩浆暗色包体(ZC15/3B)以及细粒花岗岩脉(ZC24/1B)中的锆石进行U-Pb定年后又进行了Hf同位素组成测定,结果见表4。大部分锆石的<sup>176</sup>Lu/<sup>177</sup>Hf值均小于0.002(除ZC04-2B-18,ZC11-1B-12、15,ZC15-3B-08、17、18、19,ZC24-1B-01、02、03、06、09),显示锆石在形成以后具有较低的放射性成因Hf的积累,因此,所测定的<sup>176</sup>Lu/<sup>177</sup>Hf比值能较好地反映其形成过程中Hf同位素的组成特征(吴福元等,2007a,b)。

似斑状黑云二长花岗岩样品ZC02/1B中所测的<sup>176</sup>Hf/<sup>177</sup>Hf比值为0.282512~0.282675,由该岩性的形成年龄计算得到的Hf同位素初始比值

(<sup>176</sup>Hf/<sup>177</sup>Hf)<sub>i</sub>为0.282507~0.282668,ε<sub>Hf</sub>(t)变化于-4.53~-0.42,两阶段模式年龄 $t_{DM2}=1.28\sim 1.54$  Ga,其中ZC02/1B的04点ε<sub>Hf</sub>(t)=1.2,对应两阶段模式年龄为1.18 Ga。由两阶段Hf模式年龄( $t_{DM2}$ )和ε<sub>Hf</sub>(t)直方图(图10a,b)可以看出,ε<sub>Hf</sub>(t)主体在-4.0~-1.0, $t_{DM2}$ 主体在1.3~1.5 Ga。

对含斑晶岩浆暗色包体样品ZC04/2B进行了20个点的分析,测得<sup>176</sup>Hf/<sup>177</sup>Hf比值为0.282470~0.282706,由该岩性的形成年龄计算得到的Hf同位素初始比值(<sup>176</sup>Hf/<sup>177</sup>Hf)<sub>i</sub>为0.282465~0.282693,ε<sub>Hf</sub>(t)变化于-6.01~-0.07,两阶段模式年龄 $t_{DM2}=1.26\sim 1.64$  Ga,其中ZC04/2B的15、18点ε<sub>Hf</sub>(t)值分别为正值0.23、2.05,对应两阶段模式年龄分别为1.24 Ga、1.12Ga。由两阶段Hf模式年龄( $t_{DM2}$ )和ε<sub>Hf</sub>(t)直方图(图10a,b)可以看出,ε<sub>Hf</sub>(t)主体在-3.0~0.0范围内, $t_{DM2}$ 主体在1.2~1.5 Ga范围内。

对细粒黑云二长花岗岩样品ZC11/1B进行了

表4 西秦岭中川花岗岩体锆石 Hf同位素分析结果

Table 4 Hf isotopic data of zircon from the Zhongchuan granitoid pluton in West Qinling

样号	$^{176}\text{Yb}/^{177}\text{Hf}$	$^{176}\text{Lu}/^{177}\text{Hf}$	$^{176}\text{Hf}/^{177}\text{Hf}$	$(^{176}\text{Hf}/^{177}\text{Hf})_i$	$\epsilon_{\text{Hf}}(0)$	$\epsilon_{\text{Hf}}(t)$	$t_{\text{DM1}}/\text{Ga}$	$t_{\text{DM2}}/\text{Ga}$	$f_{\text{LuHf}}$
似斑状黑云母二长花岗岩 ZC02/1B									
ZC02-1B-01	0.039802±0.000200	0.000984±0.000005	0.282627±0.000022	0.28262	-5.1	-0.4	0.89	1.28	-0.97
ZC02-1B-02	0.044501±0.000160	0.001102±0.000004	0.28254±0.000022	0.28254	-8.2	-3.5	1.01	1.48	-0.97
ZC02-1B-03	0.045149±0.000294	0.001121±0.000009	0.282557±0.000022	0.28255	-7.6	-2.9	0.99	1.44	-0.97
ZC02-1B-04	0.064605±0.000902	0.001585±0.000021	0.282675±0.000025	0.28267	-3.4	1.2	0.83	1.18	-0.95
ZC02-1B-05	0.049768±0.000221	0.001216±0.000006	0.282539±0.000025	0.28253	-8.2	-3.6	1.01	1.48	-0.96
ZC02-1B-06	0.042402±0.001063	0.001069±0.000023	0.282576±0.000021	0.28257	-6.9	-2.2	0.96	1.40	-0.97
ZC02-1B-07	0.052189±0.000374	0.001260±0.000009	0.282541±0.00002	0.28254	-8.2	-3.5	1.01	1.48	-0.96
ZC02-1B-08	0.042134±0.000408	0.001043±0.000010	0.282608±0.000028	0.2826	-5.8	-1.1	0.91	1.33	-0.97
ZC02-1B-09	0.040282±0.000038	0.000980±0.000001	0.28256±0.000021	0.28256	-7.5	-2.8	0.98	1.43	-0.97
ZC02-1B-10	0.040820±0.000533	0.000994±0.000011	0.282558±0.000023	0.28255	-7.6	-2.8	0.98	1.44	-0.97
ZC02-1B-11	0.071757±0.002600	0.001675±0.000058	0.28261±0.000022	0.2826	-5.7	-1.1	0.93	1.33	-0.95
ZC02-1B-12	0.049315±0.001063	0.001228±0.000030	0.282572±0.000025	0.28257	-7.1	-2.4	0.97	1.41	-0.96
ZC02-1B-13	0.040709±0.000161	0.000986±0.000003	0.282562±0.000024	0.28256	-7.4	-2.7	0.98	1.43	-0.97
ZC02-1B-14	0.054244±0.000734	0.001338±0.000022	0.282609±0.000028	0.2826	-5.8	-1.1	0.92	1.33	-0.96
ZC02-1B-15	0.043214±0.000390	0.001048±0.000008	0.282594±0.000026	0.28259	-6.3	-1.6	0.93	1.36	-0.97
ZC02-1B-16	0.062109±0.001586	0.001548±0.000049	0.282533±0.000026	0.28253	-8.4	-3.8	1.03	1.50	-0.95
ZC02-1B-17	0.036640±0.000405	0.000892±0.000009	0.282565±0.000024	0.28256	-7.3	-2.6	0.97	1.42	-0.97
ZC02-1B-18	0.039651±0.000537	0.000960±0.000012	0.282598±0.000026	0.28259	-6.2	-1.4	0.93	1.35	-0.97
ZC02-1B-19	0.049203±0.000156	0.001200±0.000002	0.282512±0.000022	0.28251	-9.2	-4.5	1.05	1.54	-0.96
ZC02-1B-20	0.041648±0.000060	0.001001±0.000001	0.282584±0.000022	0.28258	-6.7	-2.0	0.95	1.38	-0.97
ZC04-2B-20	0.040631±0.000202	0.000991±0.000004	0.28247±0.000021	0.28247	-10.7	-6.0	1.11	1.64	-0.97
细粒黑云母二长花岗岩 ZC11/1B									
ZC11-1B-01	0.043454±0.001433	0.001092±0.000033	0.282561±0.000026	0.28256	-7.4	-2.8	0.98	1.43	-0.97
ZC11-1B-02	0.047732±0.002039	0.001142±0.000049	0.282521±0.000029	0.28252	-8.9	-4.3	1.04	1.52	-0.97
ZC11-1B-03	0.039698±0.000210	0.001012±0.000005	0.282566±0.000023	0.28256	-7.3	-2.7	0.97	1.42	-0.97
ZC11-1B-04	0.041834±0.000546	0.001089±0.000018	0.282596±0.000028	0.28259	-6.2	-1.6	0.93	1.35	-0.97
ZC11-1B-05	0.029519±0.000670	0.000752±0.000015	0.282586±0.000023	0.28258	-6.6	-1.9	0.94	1.37	-0.98
ZC11-1B-06	0.042399±0.000299	0.001055±0.000006	0.282553±0.000026	0.28255	-7.7	-3.1	0.99	1.45	-0.97
ZC11-1B-07	0.035421±0.000247	0.000888±0.000005	0.282595±0.000024	0.28259	-6.3	-1.6	0.93	1.36	-0.97
ZC11-1B-08	0.040289±0.000364	0.000992±0.000008	0.28258±0.000027	0.28258	-6.8	-2.2	0.95	1.39	-0.97
ZC11-1B-09	0.049268±0.000248	0.001164±0.000007	0.282618±0.000024	0.28261	-5.4	-0.8	0.90	1.31	-0.96
ZC11-1B-10	0.036527±0.000055	0.000892±0.000002	0.282654±0.000023	0.28265	-4.2	0.5	0.85	1.22	-0.97
ZC11-1B-11	0.045967±0.000347	0.001156±0.000011	0.282538±0.000029	0.28253	-8.3	-3.7	1.01	1.49	-0.97
ZC11-1B-12	0.083037±0.001626	0.002159±0.000036	0.282549±0.000027	0.28254	-7.9	-3.4	1.03	1.47	-0.93
ZC11-1B-13	0.012742±0.000252	0.000266±0.000007	0.28263±0.000029	0.28263	-5.0	-0.3	0.87	1.27	-0.99
ZC11-1B-14	0.047464±0.001111	0.001153±0.000024	0.282444±0.000021	0.28244	-11.6	-7.0	1.15	1.7	-0.97
ZC11-1B-15	0.095877±0.001725	0.002296±0.000042	0.282562±0.000026	0.28255	-7.4	-3.0	1.01	1.44	-0.93
ZC11-1B-16	0.054819±0.000788	0.001289±0.000015	0.282594±0.000027	0.28259	-6.3	-1.7	0.94	1.36	-0.96
ZC11-1B-17	0.020060±0.000404	0.000453±0.000007	0.282586±0.000029	0.28258	-6.6	-1.9	0.93	1.37	-0.99
细粒花岗岩脉 ZC24/1B									
ZC24-1B-01	0.111235±0.000605	0.002722±0.000009	0.282433±0.000028	0.28242	-12.0	-7.8	1.21	1.74	-0.92
ZC24-1B-02	0.120594±0.004677	0.002929±0.000120	0.282447±0.000028	0.28244	-11.5	-7.4	1.2	1.71	-0.91
ZC24-1B-03	0.161494±0.005494	0.003941±0.000136	0.282569±0.000025	0.28255	-7.2	-3.2	1.05	1.45	-0.88
ZC24-1B-04	0.074164±0.001448	0.001739±0.000026	0.282606±0.000022	0.2826	-5.9	-1.6	0.93	1.34	-0.95
ZC24-1B-05	0.048050±0.000635	0.001159±0.000014	0.282494±0.000022	0.28249	-9.8	-5.4	1.08	1.59	-0.97
ZC24-1B-06	0.100503±0.001550	0.002451±0.000036	0.282634±0.000030	0.28262	-4.9	-0.7	0.91	1.29	-0.93

续表4

样号	$^{176}\text{Yb}/^{177}\text{Hf}$	$^{176}\text{Lu}/^{177}\text{Hf}$	$^{176}\text{Hf}/^{177}\text{Hf}$	( $^{176}\text{Hf}/^{177}\text{Hf}$ )	$\varepsilon_{\text{Hf}}(0)$	$\varepsilon_{\text{Hf}}(t)$	$t_{\text{DM1}}/\text{Ga}$	$t_{\text{DM2}}/\text{Ga}$	$f_{\text{LuHf}}$
ZC24-1B-07	0.048527±0.000887	0.001152±0.000026	0.282601±0.000024	0.2826	-6.0	-1.6	0.93	1.35	-0.97
ZC24-1B-08	0.060209±0.000367	0.001416±0.000019	0.282534±0.000020	0.28253	-8.4	-4.1	1.03	1.5	-0.96
ZC24-1B-09	0.126026±0.002730	0.003065±0.000074	0.282545±0.000029	0.28253	-8.0	-3.9	1.06	1.49	-0.91
ZC24-1B-10	0.076931±0.001575	0.001775±0.000034	0.282601±0.000022	0.28259	-6.0	-1.7	0.94	1.36	-0.95
ZC24-1B-11	0.036862±0.000165	0.000884±0.000004	0.282549±0.000020	0.28255	-7.9	-3.5	0.99	1.47	-0.97
ZC24-1B-12	0.071304±0.004484	0.001677±0.000114	0.282497±0.000020	0.28249	-9.7	-5.4	1.09	1.59	-0.95
ZC24-1B-13	0.067336±0.000889	0.001619±0.000024	0.282572±0.000025	0.28257	-7.1	-2.8	0.98	1.42	-0.95
ZC24-1B-14	0.067716±0.001044	0.001595±0.000035	0.282543±0.000025	0.28254	-8.1	-3.8	1.02	1.48	-0.95
ZC24-1B-15	0.056571±0.000511	0.001320±0.000012	0.282595±0.000020	0.28259	-6.3	-1.9	0.94	1.37	-0.96
含斑晶岩浆暗色包体ZC04/2B									
ZC04-2B-01	0.077423±0.000933	0.001881±0.000023	0.282614±0.000028	0.28261	-5.6	-1.0	0.93	1.32	-0.94
ZC04-2B-02	0.045410±0.000275	0.001111±0.000007	0.282571±0.000022	0.28257	-7.1	-2.5	0.97	1.41	-0.97
ZC04-2B-03	0.038125±0.000164	0.000964±0.000004	0.282553±0.000022	0.28255	-7.8	-3.1	0.99	1.45	-0.97
ZC04-2B-04	0.040653±0.000080	0.001004±0.000002	0.282518±0.000026	0.28251	-9.0	-4.3	1.04	1.53	-0.97
ZC04-2B-05	0.044294±0.000464	0.001087±0.000012	0.282638±0.000023	0.28263	-4.7	-0.1	0.87	1.26	-0.97
ZC04-2B-06	0.058501±0.000719	0.001438±0.000021	0.28256±0.0000220	0.28255	-7.5	-2.9	0.99	1.44	-0.96
ZC04-2B-07	0.054624±0.000213	0.001359±0.000003	0.282625±0.000020	0.28262	-5.2	-0.6	0.9	1.29	-0.96
ZC04-2B-08	0.039796±0.000182	0.000982±0.000005	0.282575±0.000019	0.28257	-7.0	-2.3	0.96	1.4	-0.97
ZC04-2B-09	0.038991±0.000229	0.000964±0.000004	0.282622±0.000022	0.28262	-5.3	-0.6	0.89	1.29	-0.97
ZC04-2B-10	0.034464±0.000241	0.000841±0.000005	0.282574±0.000019	0.28257	-7.0	-2.3	0.96	1.4	-0.97
ZC04-2B-11	0.035403±0.000587	0.000900±0.000015	0.282627±0.000022	0.28262	-5.1	-0.4	0.88	1.28	-0.97
ZC04-2B-12	0.034567±0.000965	0.000918±0.000020	0.282617±0.000021	0.28261	-5.5	-0.8	0.9	1.31	-0.97
ZC04-2B-13	0.039030±0.000317	0.000934±0.000008	0.282500±0.000024	0.2825	-9.6	-4.9	1.06	1.57	-0.97
ZC04-2B-14	0.044654±0.000162	0.001093±0.000004	0.282604±0.000023	0.2826	-5.9	-1.3	0.92	1.34	-0.97
ZC04-2B-15	0.042168±0.000334	0.001059±0.000006	0.282646±0.000024	0.28264	-4.4	0.2	0.86	1.24	-0.97
ZC04-2B-16	0.049146±0.000418	0.001193±0.000010	0.282561±0.000020	0.28256	-7.5	-2.8	0.98	1.43	-0.96
ZC04-2B-17	0.041195±0.000347	0.001005±0.000010	0.282601±0.000024	0.2826	-6.1	-1.4	0.92	1.34	-0.97
ZC04-2B-18	0.131505±0.003991	0.003118±0.000095	0.282706±0.000026	0.28269	-2.3	2.1	0.82	1.12	-0.91
ZC04-2B-19	0.063007±0.000731	0.001527±0.000019	0.282563±0.000024	0.28256	-7.4	-2.8	0.99	1.43	-0.95
岩浆暗色包体ZC15/3B									
ZC15-3B-01	0.071113±0.001309	0.001696±0.000028	0.282658±0.000027	0.28265	-4.0	0.5	0.86	1.22	-0.95
ZC15-3B-02	0.044507±0.000812	0.001080±0.000019	0.282536±0.000023	0.28253	-8.3	-3.8	1.02	1.49	-0.97
ZC15-3B-03	0.024573±0.000486	0.000668±0.000014	0.282552±0.000022	0.28255	-7.8	-3.1	0.98	1.45	-0.98
ZC15-3B-04	0.032726±0.000427	0.000834±0.000014	0.282601±0.000026	0.2826	-6.0	-1.4	0.92	1.34	-0.97
ZC15-3B-05	0.047532±0.000818	0.001177±0.000021	0.282609±0.000024	0.2826	-5.8	-1.2	0.91	1.33	-0.96
ZC15-3B-06	0.049416±0.000426	0.001224±0.000011	0.282569±0.000021	0.28256	-7.2	-2.6	0.97	1.42	-0.96
ZC15-3B-07	0.058197±0.000984	0.001397±0.000022	0.282595±0.000026	0.28259	-6.3	-1.7	0.94	1.36	-0.96
ZC15-3B-08	0.113519±0.001742	0.002623±0.000043	0.282586±0.000027	0.28258	-6.6	-2.2	0.99	1.39	-0.92
ZC15-3B-09	0.044260±0.000268	0.001129±0.000012	0.282518±0.000028	0.28251	-9.0	-4.4	1.04	1.53	-0.97
ZC15-3B-10	0.038369±0.000243	0.000945±0.000005	0.282566±0.000024	0.28256	-7.3	-2.7	0.97	1.42	-0.97
ZC15-3B-11	0.030657±0.000199	0.000801±0.000007	0.282327±0.000024	0.28232	-15.7	-11.1	1.3	1.96	-0.98
ZC15-3B-12	0.031686±0.000241	0.000768±0.000004	0.282526±0.000022	0.28252	-8.7	-4.1	1.02	1.51	-0.98
ZC15-3B-13	0.055330±0.001035	0.001339±0.000023	0.282525±0.000026	0.28252	-8.7	-4.2	1.04	1.52	-0.96
ZC15-3B-14	0.057996±0.000542	0.001365±0.000011	0.28258±0.0000230	0.28257	-6.8	-2.2	0.96	1.39	-0.96
ZC15-3B-15	0.046581±0.001580	0.001131±0.000032	0.282575±0.000027	0.28257	-7.0	-2.4	0.96	1.4	-0.97
ZC15-3B-16	0.084013±0.000660	0.001944±0.000011	0.282617±0.000022	0.28261	-5.5	-1.0	0.92	1.32	-0.94
ZC15-3B-17	0.190871±0.000940	0.004104±0.000024	0.282637±0.000027	0.28262	-4.8	-0.6	0.95	1.29	-0.88
ZC15-3B-18	0.179455±0.001914	0.004081±0.000037	0.282663±0.000028	0.28265	-3.9	0.3	0.91	1.23	-0.88
ZC15-3B-19	0.437490±0.007258	0.008829±0.000143	0.282500±0.000043	0.28246	-9.6	-6.1	1.34	1.64	-0.73

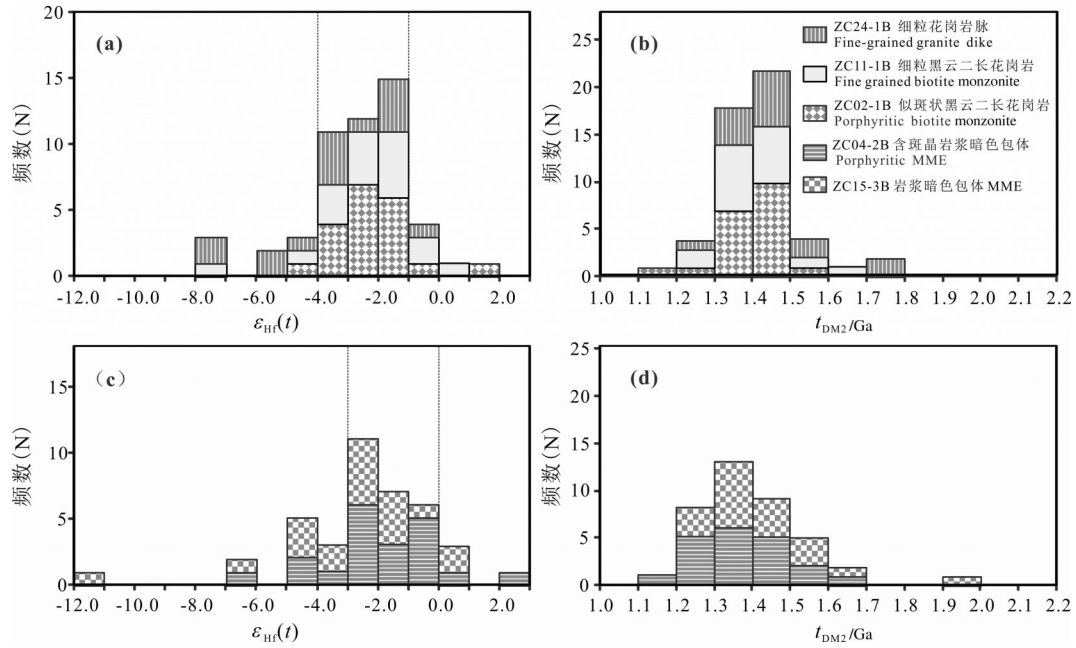


图10 西秦岭中川花岗岩体锆石地壳模式年龄  $\epsilon_{Hf}(t)$  和  $t_{DM2}$  直方图

a—中川花岗岩体寄主岩石锆石  $\epsilon_{Hf}(t)$  直方图; b—中川花岗岩体寄主岩石地壳模式年龄  $t_{DM2}$  直方图  
 c—中川花岗岩体岩浆暗色包体锆石  $\epsilon_{Hf}(t)$  直方图; d—中川花岗岩体岩浆暗色包体地壳模式年龄  $t_{DM2}$  直方图

Fig.10 Zircon  $t_{DM2}$  and Hf isotopic compositions of granites from Zhongchuan granitoid pluton in West Qinling  
 a – Probabilities of  $\epsilon_{Hf}(t)$  for the host rocks; b – Probabilities of  $t_{DM2}$  for the host rocks; c – Probabilities of  $\epsilon_{Hf}(t)$  for mafic enclaves;  
 d – Probabilities of  $t_{DM2}$  for mafic enclaves

表5 西秦岭中川岩体年龄一览

Table 5 Ages of Zhongchuan granitoid plutons in West Qinling

岩性	年龄/Ma	测试方法	资料来源
似斑状黑云二长花岗岩	232.9±14	全岩 Rb-Sr 等时线法	●
细粒黑云二长花岗岩	199	K-Ar 法	●
似斑状黑云二长花岗岩	264.4±1.3	LA-ICPMS 锆石 U-Pb	徐学义等, 2014
似斑状黑云二长花岗岩	219.5±2.1	锆石 SHRIMP U-Pb	Zeng et al., 2014
细粒黑云二长花岗岩	217.1±1.7	锆石 SHRIMP U-Pb	Zeng et al., 2014
细粒花岗岩脉	217.2±2.2	锆石 SHRIMP U-Pb	Zeng et al., 2014
似斑状黑云二长花岗岩	221±1	LA-ICPMS 锆石 U-Pb	本文
细粒黑云二长花岗岩	217±1	LA-ICPMS 锆石 U-Pb	本文
含斑晶岩浆暗色包体	220±1	LA-ICPMS 锆石 U-Pb	本文
岩浆暗色包体	216±1	LA-ICPMS 锆石 U-Pb	本文
细粒花岗岩脉	207±1	LA-ICPMS 锆石 U-Pb	本文

17点的分析,测得  $^{176}\text{Hf}/^{177}\text{Hf}$  比值为 0.282444 ~ 0.282654, 由该岩性的形成年龄计算得到的 Hf 同位素初始比值 ( $^{176}\text{Hf}/^{177}\text{Hf}$ )<sub>i</sub> 为 0.282439 ~ 0.282650,  $\epsilon_{Hf}(t)$  变化为 -7.02 ~ -0.31, 两阶段模式年龄  $t_{DM2}$  = 1.27 ~ 1.70 Ga, 其中 ZC11/1B 的 10 点  $\epsilon_{Hf}(t)$  = 0.45, 对应两阶段模式年龄为 1.22 Ga。由两阶段 Hf 模式年龄 ( $t_{DM2}$ ) 和  $\epsilon_{Hf}(t)$  直方图 (图 10a、b) 可以看出,  $\epsilon_{Hf}(t)$

主体在 -4.0 ~ -1.0 范围内,  $t_{DM2}$  主体在 1.3 ~ 1.5 Ga 范围内。

对岩浆暗色包体样品 ZC15/3B 进行了 19 点的分析,测得  $^{176}\text{Hf}/^{177}\text{Hf}$  比值为 0.282327 ~ 0.282663, 由该岩性的形成年龄计算得到的 Hf 同位素初始比值 ( $^{176}\text{Hf}/^{177}\text{Hf}$ )<sub>i</sub> 为 0.282324 ~ 0.282652,  $\epsilon_{Hf}(t)$  变化于 -11.11 ~ -0.63, 两阶段模式年龄  $t_{DM2}$  = 1.30 ~ 1.96 Ga,

其中 ZC15/3B 的 01、18 点  $\varepsilon_{\text{Hf}}(t)$  值分别为正值 0.49、0.30, 对应两阶段模式年龄分别为 1.22 Ga、1.23 Ga。由两阶段 Hf 模式年龄 ( $t_{\text{DM2}}$ ) 和  $\varepsilon_{\text{Hf}}(t)$  直方图(图 10a、b)可以看出,  $\varepsilon_{\text{Hf}}(t)$  主体在  $-3.0 \sim -1.0$  范围内,  $t_{\text{DM2}}$  主体在 1.3 ~ 1.5 Ga 范围内。

对细粒花岗岩脉样品 ZC24/1B 进行了 15 点的分析, 测得  $^{176}\text{Hf}/^{177}\text{Hf}$  比值为 0.282433 ~ 0.282634, 由该岩性的形成年龄计算得到的 Hf 同位素初始比值 ( $^{176}\text{Hf}/^{177}\text{Hf}$ )<sub>i</sub> 为 0.282422 ~ 0.282624,  $\varepsilon_{\text{Hf}}(t)$  变化于  $-7.83 \sim -0.67$ , 两阶段模式年龄  $t_{\text{DM2}}=1.29 \sim 1.74$  Ga。由两阶段 Hf 模式年龄 ( $t_{\text{DM2}}$ ) 和  $\varepsilon_{\text{Hf}}(t)$  直方图(图 10a、b)可以看出,  $\varepsilon_{\text{Hf}}(t)$  主体在  $-4.0 \sim -1.0$  范围内,  $t_{\text{DM2}}$  主体在 1.3 ~ 1.5 Ga 范围内。

## 6 讨 论

### 6.1 岩体形成时代及岩浆在时间上的演化

前人对中川岩体不同岩性的年龄测定结果差异较大(表 5), 似斑状黑云二长花岗岩和细粒黑云二长花岗岩的年龄范围分别为  $(264.4 \pm 1.3)$  Ma ~  $(219.5 \pm 2.1)$  Ma<sup>①</sup>(Zeng et al., 2014; 徐学义等, 2014) 和  $(217.1 \pm 1.7)$  Ma ~ 199 Ma<sup>②</sup>(Zeng et al., 2014), 其中部分年龄结果(如  $(264.4 \pm 1.3)$  Ma, 徐学义等, 2014)还显示其最早时限可到二叠纪末。总之这些年龄数据不够系统, 测试方法也不同, 部分岩性还缺乏年龄资料。本次对不同岩性系统的采样和定年, 获得的中川岩体中似斑状黑云二长花岗岩的年龄为  $(221 \pm 1)$  Ma, 细粒黑云二长花岗岩为  $(217 \pm 1)$  Ma, 表明岩体中岩石从边部向中心有变新的趋势。2 个岩浆暗色包体的年龄分别为  $(220 \pm 1)$  Ma、 $(216 \pm 1)$  Ma, 与寄主岩石的年龄在误差范围内一致。后期细粒花岗岩脉年龄为  $(207 \pm 1)$  Ma, 形成最晚, 这些年龄结果与野外地质观察是一致的, 表明寄主岩石与暗色包体均形成于晚三叠世。测年结果和岩相学特征显示, 岩浆在时间上的结晶演化过程从早到晚为似斑状黑云二长花岗岩 → 含斑黑云二长花岗岩 → 细粒黑云二长花岗岩。同时, 暗色岩浆包体的年龄与花岗质岩石的年龄一致, 表明二者是几乎同时形成。

### 6.2 岩石成因类型

中川岩体中不同岩石类型在矿物组成上基本为钾长石+斜长石+石英+黑云母±角闪石, 无碱性暗色矿物(碱性角闪石等)。在地球化学上, (1)碱含

量虽然较高, 但  $\text{FeO}^*/\text{MgO}$  比值较低(2.14 ~ 4.27), 有别于 A 型花岗岩显著富铁的特征( $\text{FeO}^*/\text{MgO} > 10$ , Whalen et al., 1987); (2)  $10000\text{Ga}/\text{Al}$  比值大部分明显低于 Whalen et al. (1987) 建议的 A 型花岗岩的下限值(2.60), 并且  $\text{Zr}+\text{Nd}+\text{Ce}+\text{Y}$  也明显低于 A 型花岗岩的下限值( $350 \times 10^{-6}$ )。在  $\text{SiO}_2/\text{Ce}$ (图 11c)判别图解以及  $(\text{Zr}+\text{Nd}+\text{Ce}+\text{Y})-\text{FeO}^*/\text{MgO}$ 、 $(\text{Zr}+\text{Nd}+\text{Ce}+\text{Y})-(\text{K}_2\text{O}+\text{Na}_2\text{O})/\text{CaO}$  图解上(图 11a、b), 中川岩体投影在非 A 型花岗岩区域。这些特征表明中川岩体中花岗岩不属于 A 型花岗岩。

中川岩体中不同类型花岗岩的暗色矿物以黑云母为主, 可见少量角闪石, 不含石榴子石、堇青石等富铝矿物, 岩石的 A/CNK 比值大多小于或近似于 1.1, 与 S 型花岗岩的过铝特征不一致。P<sub>2</sub>O<sub>5</sub> 含量与 SiO<sub>2</sub> 含量呈反比关系, 同样有别于 S 型花岗岩, 符合 I 型花岗岩的特征(Chappell, 1999)。岩石的稀土元素球粒陨石标准化配分模式图表现出轻稀土相对富集的右倾特征, 具有弱的负铕异常( $\delta\text{Eu}=0.53 \sim 0.91$ ), 无 Ce 异常。由此可见, 中川岩体中的花岗质岩石应为 I 型花岗岩。但值得注意的是, 岩体中心晚期的细粒黑云二长花岗岩表现出与其他岩性稍有差别的特征, 如不含角闪石, 有极少量的白云母出现, 更高的 SiO<sub>2</sub> 含量, Rb/Sr 比值大于 0.9,  $(\text{Zr}+\text{Nd}+\text{Ce}+\text{Y})-\text{FeO}^*/\text{MgO}$ 、 $(\text{Zr}+\text{Nd}+\text{Ce}+\text{Y})-(\text{K}_2\text{O}+\text{Na}_2\text{O})/\text{CaO}$  图解上投影在高分异 I 花岗岩区域。

综上, 该岩体的主体岩石为 I 型花岗岩, 中心部位的细粒黑云二长花岗岩具高分异 I 型花岗岩的一些特征。

### 6.3 成岩物质来源

中川岩体各寄主岩石均属准铝质-弱过铝质和高钾钙碱性/钾玄岩系列, 原始地幔标准化微量元素蛛网图显示, 该岩体相对富集大离子亲石元素(K、Rb、Ba、Sr 等), 而亏损高场强元素(HREE、P、Nb、Ta 等), 稀土元素球粒陨石标准化分配曲线表现为轻稀土富集的右倾型, 轻、重稀土分异明显, 这些特征表明该花岗岩体的物源以壳源物质为主。

岩浆暗色包体属准铝质和高钾钙碱性/钾玄岩系列, 与寄主岩石具有相似的元素地球化学特征, 而且岩浆暗色包体具有较低的  $(\text{La}/\text{Yb})_N$  比值, 这似乎表明岩浆暗色包体是花岗质岩浆源区的难熔残留物(秦江峰, 2010)。但是在 MgO 与主要氧化物和

元素的Harker图解上(图7),寄主岩石和岩浆暗色包体表现出明显不同的演化趋势,并且岩浆暗色包体的铝饱和指数(A/CNK=0.75~1.08)明显低于寄主岩石(0.99~1.15),表明寄主岩石与包体应该来自不同端元岩浆。研究表明,岩浆体系中镁铁质矿物的成核速率明显高于石英和长石等长英质矿物,这就导致花岗质岩浆源区难熔残留物中角闪石、黑云母等镁铁质矿物的比例一般都会高于50%(Donaire et al., 2005),而该岩体中的岩浆暗色包体明显不具有这些特征,并且一些包体中包含有钾长石巨晶,说明钾长石斑晶结晶较早,两种岩浆的流动性很好,从而钾长石斑晶被包裹在暗色包体中。因此,岩浆暗色包体不可能是花岗质岩浆的难熔残留物。

对于岩浆岩,锆石的Hf同位素组成可以为示踪岩浆源区和具体的岩浆过程提供确定性的证据(Griffin et al., 2004; 吴福元等, 2007a, 2007b),是目前探讨地壳演化和示踪岩石源区的重要工具。中川花岗岩体寄主岩石的<sup>176</sup>Hf/<sup>177</sup>Hf比值较低,ε<sub>Hf</sub>(t)主要为负值(-7.83~-0.31),并集中于-4~-1,锆石ZC02/1B-04点、ZC11/1B-10点的<sup>176</sup>Hf/<sup>177</sup>Hf比值较高,ε<sub>Hf</sub>(t)值分别为1.18、0.45,表明该岩体寄主岩石主要由地壳物质部分熔融形成。岩浆暗色包体的ε<sub>Hf</sub>(t)也主要为负值(-11.11~-0.07),集中于-3~0,锆石ZC04/2B-15、18点,ZC15/3B-01、18点的<sup>176</sup>Hf/<sup>177</sup>Hf比值较高,ε<sub>Hf</sub>(t)值分别为0.23、2.05、0.49、0.30。总体上岩浆暗色包体的ε<sub>Hf</sub>(t)值比寄主岩石稍高。寄主岩石和岩浆暗色包体的锆石Hf同位素组成变化范围很大,前人研究表明(Zheng et al., 2006; 2007; Yang et al., 2007),这可能是由于岩石的源区物质组成不均一或是岩浆的物质来源不是单一的。关于锆石ε<sub>Hf</sub>(t)值部分为正值,有学者认为这种现象可能是有部分亏损地幔物质的加入(汪相等, 2003; 吴福元等, 2007a; 2007b; 侯可军等, 2007),但也有不同的观点,例如秦江峰(2010)对西秦岭糜署岭花岗岩体中寄主岩石和岩浆暗色包体均含有正ε<sub>Hf</sub>(t)值的解释是,这不能表明它们的源区有亏损地幔物质的加入,因为三叠纪亏损地幔的ε<sub>Hf</sub>(t)值远高于糜署岭岩体的值,当然也远高于中川岩体,同时中川岩体岩浆暗色包体的ε<sub>Hf</sub>(t)值比寄主岩石稍高,ε<sub>Hf</sub>(t)值并没有太高的正值,因而岩浆暗色包体所表示的很可能是新生的岩石圈地幔在三

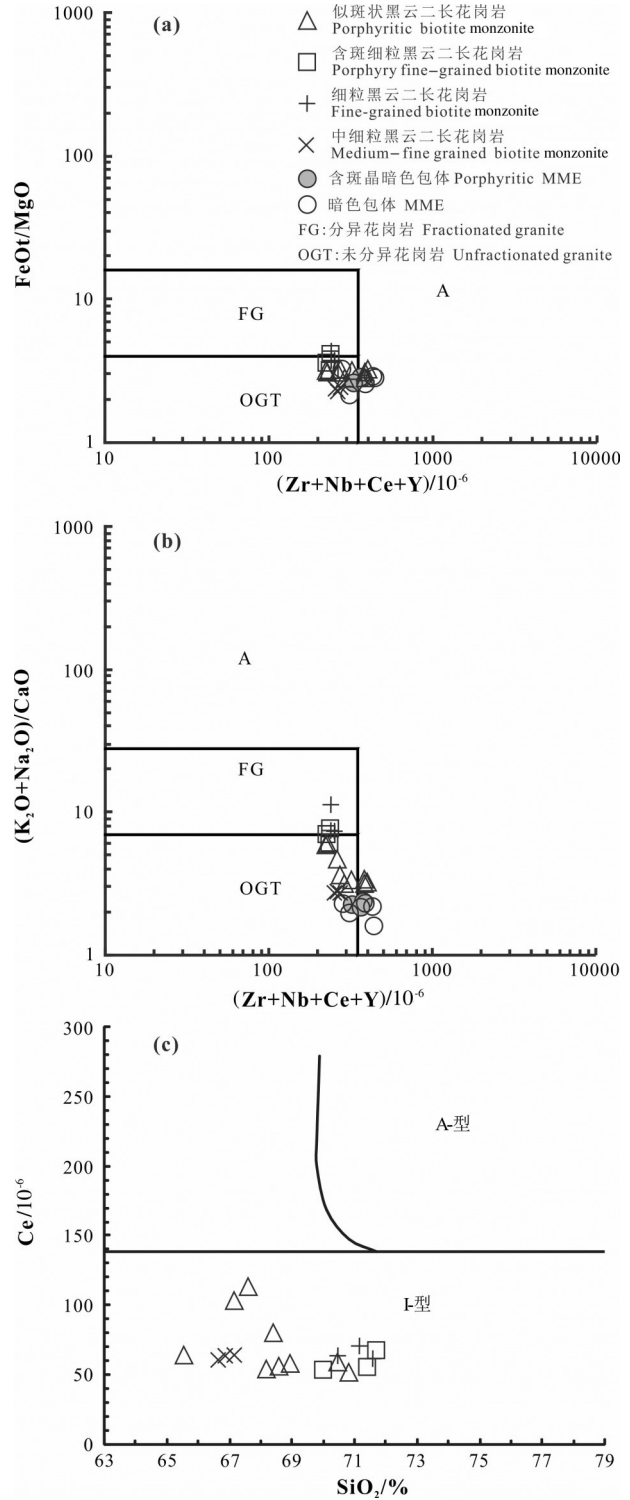


图 11 西秦岭中川花岗岩体(Zr+Nd+Ce+Y) - FeO/MgO(a)、(Zr+Nd+Ce+Y) - (K<sub>2</sub>O+Na<sub>2</sub>O)/CaO(b)和SiO<sub>2</sub> - Ce(c)图  
Fig.11 (Zr+Nd+Ce+Y) - FeO/MgO (a), (Zr+Nd+Ce+Y) - (K<sub>2</sub>O + Na<sub>2</sub>O)/CaO (b) and SiO<sub>2</sub> - Ce (c) diagrams of the Zhongchuan granitoid pluton in West Qinling

叠纪的重熔作用。在  $t-\epsilon_{\text{Hf}}(t)$  图解(图 12a, b)。中川花岗岩样品投点大部分落在了球粒陨石和下地壳演化曲线之间,这也显示中川花岗岩的源区物质是以古老的壳源物质为主,并有部分岩石圈地幔物质的加入。全岩 Nd 同位素组成也是示踪其物源特征的重要手段之一。中川花岗岩体岩石的 Nd 同位素组成显示,寄主岩石的  $\epsilon_{\text{Nd}}(t)$  值变化为  $-7.31 \sim -8.73$ , 亏损地幔模式年龄( $t_{\text{DM2}}$ )为  $1.59 \sim 1.71\text{Ga}$ , 岩浆暗色包体的  $\epsilon_{\text{Nd}}(t)$  值变化为  $-5.32 \sim -5.69$ , 亏损地幔模式年龄( $t_{\text{DM2}}$ )为  $1.43 \sim 1.46\text{Ga}$ 。在  $t-\epsilon_{\text{Nd}}(t)$  图解中(图 12c), 寄主岩石和暗色包体投影点均分布于古元古代—中元古代地壳范围内,且包体的  $\epsilon_{\text{Nd}}(t)$  值高于寄主岩石。二阶段模式年龄明显大于中川岩体的岩浆侵位年龄,说明岩浆物质可能来自前寒武纪的存留地壳物质,但目前的研究表明,在西秦岭并无前寒武纪基底岩块出露。在相邻的南秦岭构造单元中,有较多的前寒武纪基底岩块出露,根据张宗清等(2002)对南秦岭变质岩群的同位素年代学研究,这些前寒武纪基底岩系没有一个适合作为西秦岭花岗岩类的岩浆源区,西秦岭和南秦岭具有不同的地壳基底组成,并且西秦岭地壳基底具有扬子块体的构造属性(张宏飞等,2005)。寄主岩石较岩浆暗色包体有较低的 Sm/Nd 比值,这种现象很可能表明岩浆暗色包体是来自地幔的岩浆和寄主花岗岩浆发生岩浆混合作用的产物,而寄主岩石为古老地壳熔融产物,即岩石的源区有地幔物质的参与。并且经研究表明,如果是两种不同来源的岩浆发生充分的岩浆混合作用,在 Harker 图解上应该可以看到很好的线性演化趋势,中川岩体的寄主岩石与岩浆暗色包体正表现出这种趋势(图 8)。同时寄主岩石由老到新总体上出现 Sm、Nd 含量逐渐升高及 Sm/Nd 比值逐渐下降的趋势,反映了岩浆分异演化特征。

综上,中川花岗岩体的地球化学以及 Lu-Hf、Sm-Nd 同位素组成特征反映中川花岗岩的岩浆来自古老地壳物质的部分熔融,并有部分岩石圈地幔物质的加入,岩浆暗色包体为新生岩石圈地幔的岩浆和寄主花岗岩浆发生岩浆混合作用的产物。

#### 6.4 岩浆混合作用

花岗岩中的暗色微粒包体一般被认为是镁铁质岩浆和花岗质岩浆发生岩浆混合作用的重要证

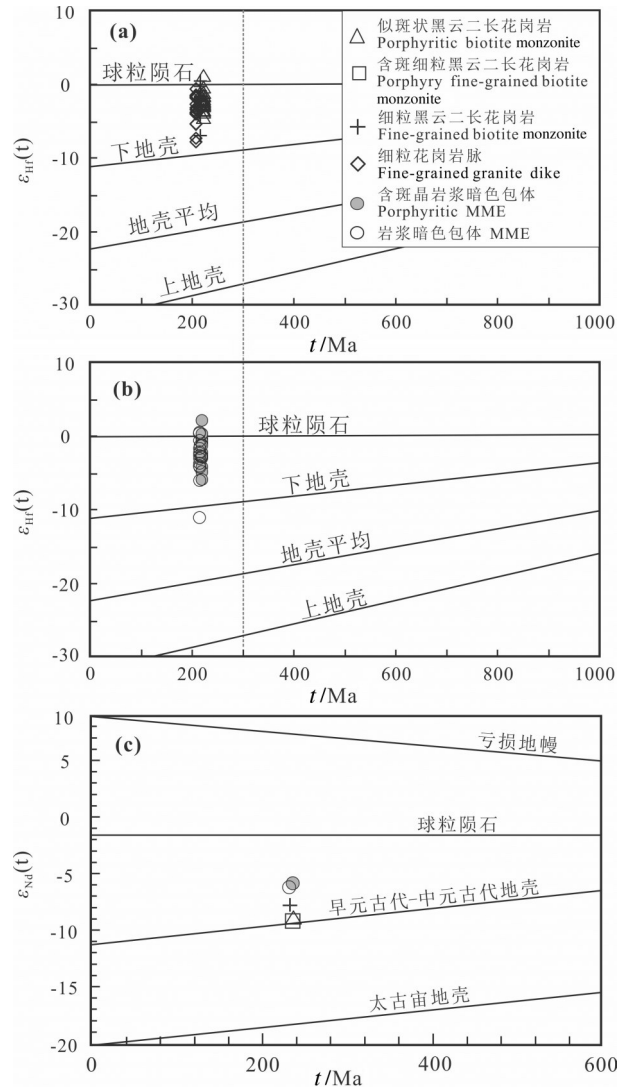


图 12 西秦岭中川花岗岩体的  $t-\epsilon_{\text{Hf}}(t)$  图解(a, b) 和  $t-\epsilon_{\text{Nd}}(t)$  图解(c)

Fig. 12 Diagram of  $t-\epsilon_{\text{Hf}}(t)$  (a, b) and  $t-\epsilon_{\text{Nd}}(t)$  (c) for the Zhongchuan granitoid pluton in West Qinling

据之一(Barbarin and Didier, 1992; Perugini and Poli, 2000; 吴福元等, 2007a; 2007b; 肖庆辉等, 2007, 2009)。在中川岩体中,包体岩石类型主要为细粒石英闪长岩,主要分布于岩体边部似斑状黑云二长花岗岩中,包体与寄主岩石大都界线截然,有的呈渐变过渡关系。包体边部发育淬冷边,边部铁镁质矿物含量比中心部位高,表现出较明显的因温度变化而引起成分变化的 Soret(索列特效应)扩散现象。暗色微粒包体具有椭圆形的外形,内部及其边界含钾长石斑晶,这代表了岩浆混合过程中酸性岩



浆早期结晶的长石呈固态运移到基性岩浆(包体)中及边缘的结果(Vernon, 1991)。暗色包体中还发育针状磷灰石,实验资料说明长柱状-针状磷灰石为岩浆快速冷却的产物(Wyllie et al., 1962),通常被认为是岩浆混合过程中基性岩浆注入到温度较低酸性岩浆房中导致基性岩浆温度迅速下降的结果(Hibbard, 1991)。

岩浆暗色包体比寄主二长花岗岩具有较高的 $K_2O$ 含量和Rb/Sr比值,这明显不符合结晶分异的演化趋势,表明岩浆暗色包体不可能是寄主岩石的源区残留物。寄主岩石和暗色包体主要氧化物在Harker图解(图7)上显示出良好的线性关系,只有 $K_2O$ 、 $Na_2O$ 和 $SiO_2$ 之间不具有明显的协变关系,这指示岩浆并不是单一的源区背景下经部分熔融或结晶分异作用形成的(Rollison, 1993),而更可能是两种演化程度不同的岩浆经不同程度的混合形成的;岩浆暗色包体的铝饱和指数( $A/CNK=0.75 \sim 1.08$ )低于寄主花岗岩( $0.99 \sim 1.15$ ),这种演化趋势表明两端元岩浆的混合作用(Barbarin and Didier, 1992; Wiebe et al., 1997; Perugini et al., 2000)。同时,寄主岩石中 $Al_2O_3$ 、 $CaO$ 、 $MgO$ 和 $TFe_2O_3$ 与 $SiO_2$ 的线性关系表明了长石类矿物(钾长石和斜长石)和铁镁质矿物(黑云母)的分离结晶作用,而 $TiO_2$ 和 $P_2O_5$ 与 $SiO_2$ 对应的反比关系则说明了副矿物中磷灰石、榍石和金红石的分异,这也与微量元素蛛网图的P和Ti的明显负异常相对应。

在Hf同位素组成上,寄主岩石的 $\varepsilon_{Hf}(t)$ 值变化范围较大,为 $-7.83 \sim 1.18$ ,绝大多数为负值,仅有2个正值(1.18和0.45),岩浆暗色包体的 $\varepsilon_{Hf}(t)$ 值变化范围为 $-11.11 \sim 2.05$ ,多数在 $-3 \sim 0$ ,同时含钾长石斑晶的岩浆暗色包体比不含斑晶的变化范围大。在Sm-Nd同位素组成上,寄主岩石和暗色包体的变化范围均比较小,暗色包体的 $\varepsilon_{Nd}(t)$ 值稍高于寄主岩石。总体上寄主岩石与暗色包体具有相似的全岩Nd和锆石Hf同位素组成,这种同位素组成的均一性可以解释为岩浆混合的程度较强。并且这些同位素特征均表明寄主岩石和暗色岩浆包体均具有岩浆混合作用,同时,不同特征的包体与寄主岩石的岩浆的混合程度不同。

寄主岩石的形成年龄为从边部到中心是逐渐变新的趋势,铝饱和指数也逐渐增高,元素地球化

学上表现出正向演化的特点,岩浆暗色包体的形成年龄与寄主岩石的年龄在误差范围内一致,并且贯穿于寄主岩石整个的侵位时间,但包体仅在岩体的边部可见。由此,根据包体的分布以及岩体岩石地球化学的变化规律,显示中川岩体岩浆演化特征从边部到中心岩浆混合程度呈增强的趋势。

### 6.5 岩体与金成矿关系

中川岩体外接触带1~3 km范围发育多个金矿床(点),如李坝、马泉、金山等大、中型金矿,据前人研究,这些金矿床的成矿年龄主要集中于印支晚期至燕山早期(161~210 Ma),稍晚于中川岩体成岩年龄(207~221 Ma),考虑到成岩和成矿年龄测试方法的不同,两者基本是吻合的,成矿时代与华北克拉通及其邻区大规模160~200 Ma成矿期吻合(毛景文等, 2003),成矿空间受中川岩体和礼县—罗坝、礼县—洮坪两大区域深大断裂的共同控制,次级断裂及剪切带控制了矿床的产出。在野外观察显示,矿区内有石英闪长岩岩脉、次为细晶岩岩脉、花岗斑岩岩脉等,脉岩在矿区成群成带产出,另外,可见煌斑岩岩脉,它们与金矿体密切伴(共)生,成为矿体的上下盘围岩。这些岩脉与中川岩体的形成时间一致(另文发表)。由此可见,金矿与岩浆作用在时间和空间上密切相关,因此,岩浆作用为成矿提供了热能。另外,冯建忠等(2003)对矿区内岩石的斑点构造及其与中川岩体距离的关系、不同矿物组合的斑点指示的不同找矿标志进行了详细研究,也认为中川岩体为矿床的形成提供了热源,与本文得出相同的结论。

关于研究区金的物质来源,前人研究认为,岩体仅为金矿提供热源,或者说提供的成矿物质有限,主要是通过断裂构造促进地层介质、成矿物质的活化成矿(陈源等, 1994; 宋忠宝等, 1997; 冯建忠等, 2003; 韩要权, 2004; 殷勇等, 2006)。中川岩体的地球化学和Sm-Nd、Hf同位素组成特征表明中川岩体的岩浆来自古老地壳,前人研究表明,岩体外围金矿的赋矿层为泥盆纪地层,与成矿有关的岩体不含金,金源主要来自下部地层,部分来自含矿围岩,因此,矿源层为底部的下古生界(韩要权, 2004);张作衡等(2004)对中川岩体外围李坝、金山和马泉等大中型金矿床主要成矿阶段石英中的流体包裹体进行了系统研究,并结合同位素资料、区

域地质背景和成岩成矿特点,认为成矿流体主要来源于岩浆,混入有不同程度的变质水和大气降水,并且有深部来源物质参与成矿;此外,殷勇(2011)在解释西秦岭地区脉岩与金矿化关系一文中得出结论:西秦岭地区金成矿物质来源与岩浆岩、脉岩具同源性和继承性演化的特点。综上,中川岩体与外围金矿的时空关系密切,且成岩物质与金成矿物质来源可能具有同源性。

## 7 结 论

(1)中川花岗岩体呈同心环状产出,从边缘向内出露的岩性分别为似斑状黑云二长花岗岩、含斑黑云二长花岗岩以及细粒黑云二长花岗岩。LA-ICPMS 锆石 U-Pb 定年结果显示,似斑状黑云二长花岗岩、含斑岩浆暗色包体、细粒黑云二长花岗岩、岩浆暗色包体(无斑)和细粒花岗岩脉的年龄分别为:( $221 \pm 1$ ) Ma (MSDW=0.26), ( $220 \pm 1$ ) Ma (MSDW=0.11), ( $217 \pm 1$ ) Ma (MSDW=0.11), ( $216 \pm 1$ ) Ma (MSDW=0.26) 和 ( $207 \pm 1$ ) Ma (MSDW=0.29), 从边部到中心时代逐渐变新,暗色包体和寄主岩石的形成年龄基本一致,岩脉的形成时间最晚。

(2)中川岩体中花岗质岩石为I型花岗岩,中心部位的细粒黑云二长花岗岩具有高分异I型花岗岩的某些特征。岩浆暗色包体的分布规律、寄主岩石和岩浆暗色包体的元素地球化学以及 Lu-Hf、Sm-Nd 的变化规律显示,其岩浆演化特征为从边部到中心岩浆混合和分异程度增强的趋势;寄主岩石的岩浆主要来自古老地壳物质的部分熔融,并有部分岩石圈地幔物质的加入,岩浆暗色包体是来自新生岩石圈地幔的岩浆和寄主花岗岩浆发生岩浆混合作用的产物。

(3)中川岩体与外围金矿的时空关系密切,岩体为金成矿提供热源,通过断裂构造促进地层介质、成矿物质的活化成矿,且成岩物质与金成矿物质来源可能具有同源性。

### 注释

①段永民. 1992. 上洮坪幅 1-48-66-B 1/5 万区域地质图说明书[R]. 甘肃地矿局第一地质队.

②付开成,陈林,李均州,师彦明,曾宪辉. 2004. 甘肃省礼岷金矿带东部区域地质图[R]. 甘肃亚特矿业有限公司.

### Reference

Andersen T. 2002. Correction of common lead in U-Pb analyses that

- donot report  $^{204}\text{Pb}$ [J]. *Chemical Geology*, 192(1/2): 59-79.
- Barbarin B, Didier J. 1992. Genesis and evolution of mafic microgranular enclaves through various types of interaction between coexisting felsic and mafic magmas *Transactions of the Royal Society of Edinburgh*[J]. *Earth Sciences*, 83:145-153.
- Chappell B. 1999. Aluminium saturation in I- and S-type granites and the characterization of fractionated haplogranites[J]. *Lithos*, 46(3): 535-551.
- Chen Yanjing, Zhang Jing, Zhang Fuxin, Pirajno F, Li Chao. 2004. Carlin and carlin-like gold deposits in western Qinling Mountains and their metallogenic time, tectonic setting and model[J]. *Geological Review*, 50(2):134-152 (in Chinese with English abstract).
- Chen Yuan. 1994. Mineral source of the Li Ba gold deposit in West Qinling[J]. *Northwestern Geology*, (2):5-9 (in Chinese).
- Donaire T, Pascual E, Pin C, Duthou JL. 2005. Microgranular enclaves as evidence of rapid cooling in granitoid rocks: The case of the Los Pedroches granodiorite, Iberian Massif, Spain[J]. *Contributions to Mineralogy and Petrology*, 149(3): 247-265.
- Feng Jianzhong, Wang Dongbo, Wang Xueming, Shao Shicai, Lin Guofang, Shi Jianjun. 2003. Geology and metallogenesis of Liba large-size gold deposit in Lixian, Gansu Province [J]. *Mineral Deposits*, 22(3):257-263 (in Chinese with English abstract).
- Feng Yimin, Cao Xuanyi, Zhang Erpeng, Hu Yunxu, Pan Xiaoping, Yang Junlu. 2003. Tectonic evolution framework and nature of the West Qinling orogenic belt[J]. *Northwestern Geology*, 36(1):1-10 (in Chinese with English abstract).
- Griffin W L, Belousova E A, Shee S R, Pearson N J, O'Reilly S Y. 2004. Archean crustal evolution in the northern Yilgarn Craton:U-Pb and Hf-isotope evidence from detrital zircons[J]. *Precambrian Research*, 131(3): 231-282.
- Han Yaoquan. 2004. Mineralization Model and Prospecting Proposal of Gold Deposits in East Qingling [D]. Changsha: Central South University (in Chinese).
- Hibbard MJ. 1991. Textural anatomy of twelve magma-mixed granitoid systems[C]//Didier J and Barbarin B (eds.). *Enclaves and Granite Petrology*. Developments in Petrology. Elsevier, Amsterdam, 431-444.
- Hou Kejun, Li Yanhe, Zou Tianren, Qu Xiaoming, Shi Yuruo, Xie Guiqing. 2007. Laser ablation-MC-ICP-MS technique for Hf isotope microanalysis of zircon and its geological applications [J]. *Acta Petrologica Sinica*, 23(10):2595-2604 (in Chinese with English abstract).
- Li Hongwei, Lou Feng, Xu Guanjun, Chen Zhen, Chen Xiaoyue. 2011. Mineralization relevant to repeated crustal melting: An example from the ZCGB, Gansu Province[J]. *Earth Science Frontiers*, 18(1): 126-132 (in Chinese with English abstract).
- Mao Jingwen, Zhou Zhenhua, Feng Chengyou, Wang Yitian, Zhang Changqing, Peng Huijuan, Yu Miao. 2012. A preliminary study of the Triassic large-scale mineralization in China and its geodynamic setting[J]. *Geology in China*, 39(6): 1437-1471 (in Chinese with English abstract).

- Mao Jingwen, Zhang Zuoheng, Yu Jinjie, Wang Yitian, Niu Baogui. 2003. Geodynamic settings of Mesozoic large-scale mineralization in North China and adjacent areas—Implication from the highly precise and accurate ages of metal deposits [J]. *Chinese Science: Earth Science*, 33(4):289–299(in Chinese with English abstract).
- Nie Zhengrong. 2015. Age, Geochemistry, Magma Mixing of Zhongchuan Granitoid Pluton in the Western Qinling[D]. Beijing: China University of Geosciences (Beijing) (in Chinese with English abstract).
- Perugini Diego, Poli Giampiero. 2000. Chaotic dynamics and fractals in magmatic interaction processes: A different approach to the interpretation of mafic microgranular enclaves[J]. *Earth and Planetary Science Letters*, 177 (1/2):93–103.
- Qin Jiangfeng. 2010. Petrogenesis and Geodynamic Implications of the Late-triassic Granitoids from the Qinling Orogenic Belt[D]. Xi'an: Northwest University(in Chinese with English abstract).
- Rollinson H. 1993. Using Geochemical Data: Evaluation, Presentation, Interpretation[M]. Longman Group UK Ltd. Oxford, 352.
- Song Zhongbao, Feng Yimin, He Shiping. 1997. Characteristics of tectono-magmatism of Zhongchuan granite and its ore-forming process[J]. *Journal of Xi'an College Geology*, (4):48–52 (in Chinese with English abstract).
- Vernon RH. 1991. Interpretation of microstructures of microgranitoid enclaves[C]//Didier J, Barbarin B (eds.). *Enclaves and Granite Petrology. Developments in Petrology*. Amsterdam:Elsevier, 277–291.
- Wang Xiang, Griffin W L, Wang Zhicheng, Zhou Xinmin, Wang Chuansheng. 2003. Hf isotope composition of zircons and implication for the petrogenesis of Yajiangqiao granite, Hunan Province, China[J]. *Chinese Science Bulletin* 48(4):379–382 (in Chinese).
- Wang Xiaoxia, Wang Tao, Zhang Chengli. 2013. Neoproterozoic, Paleozoic, and Mesozoic granitoid magmatism in the Qinling Orogen, China: Constraints on orogenic process[J]. *Journal of Asian Earth Sciences*, 72: 129–151.
- Wang Yinxi, Gu Lianxing, Zhang Zunzhong, Wu Changzhi, Li Huimin, Yang Jiedong. 2007. Sr–Nd–Pb isotope geochemistry of Rhyolite of the Late Carboniferous Dashitou group in eastern Tianshan[J]. *Acta Petrologica Sinica*, 23(7):1749–1755(in Chinese with English abstract).
- Wen Zhiliang. 2008. A new recognition of magma mixing process about jiaochangba rock body, Western Qinling [J]. *J. Mineral Petrol.*, 28(3):29–36(in Chinese with English abstract).
- Whalen J B, Currie K L, Chappell B W. 1987. A-type granites: Geochemical characteristics, discrimination and petrogenesis[J]. *Contributions to Mineralogy and Petrology*, 95(4): 407–419.
- Wiebe RA, Smith D, Sturm M, King E M, Seckler M S. 1997. Enclaves in the Cadillac Mountain Granite (Coastal Maine) samples of hybrid magma from the base of the chamber[J]. *Journal of Petrology*, 38:393–423.
- Wu Fuyuan, Li Xianhua, Zheng Yongfei, Gao Shan. 2007a. Lu–Hf isotopic systematics and their applications in petrology [J]. *Acta Petrologica Sinica*, 23(2):185–220(in Chinese with English abstract).
- Wu Fuyuan, Li Xianhua, Yang Jinhui, Zheng Yongfei. 2007b. Discussions on the petrogenesis of granites [J]. *Acta Petrologica Sinica*, 2007, 23(6):1217–1238(in Chinese with English abstract).
- Wyllie P J, Cox K G, Biggar G M. 1962. The habit of apatite in synthetic systems and igneous rocks[J]. *Journal of Petrology*, 3(2): 238–243.
- Xiao Qinghui, Deng Jinfu, Qiu Ruizhao, Liu Yong, Feng Yanfang. 2009. A preliminary study of the relationship between granitoids and the growth of continental crust: a case study of the formation of key orogen granitoids in China[J]. *Geology in China*, 36(3): 594–622(in Chinese with English abstract).
- Xiao Qinghui, Qiu Ruizhao, Xing Zuoyun, Zhang Yu, Wu Guangying, Tong Jinsong. 2007. Major frontiers on studies of granite formation[J]. *Geological Review*, 53(s1):17–27 (in Chinese with English abstract).
- Xu Xueyi, Chen Juanlu, Gao Ting, Li Ping, Li Ting. 2014. Granitoid magmatism and tectonic evolution in northern edge of the Western Qinling terrane, NW China[J]. *Acta Petrologica Sinica*, 30(2): 371–389 (in Chinese with English abstract).
- Yang Jinhui, Wu Fuyuan, Wilde Simon A, Xie Liewen, Yang Yueheng, Liu Xiaoming. 2007. Tracing magma mixing in granite genesis:in situ U–Pb dating and Hf–isotopes analysis of zircons[J]. *Contributions to Mineralogy and Petrology*, 153(2):177–190.
- Yang Yang, Wang Xiaoxia, Ke Changhui, Wang Shuna, Li Jinba, Nie Zhengrong, Lü Xingqi. 2015. Zircon U–Pb ages, petrogenesis of the Luchuba pluton in West Qinling, and its geological significance [J]. *Acta Geologica Sinica*, 89(10):1735–1761 (in Chinese with English abstract).
- Yin Yong, Zhao Yanqing. 2006. Relationship between granite and goldmineralization in the gold enrichment[J]. *Gansu Geology*, 15 (1):36–41(in Chinese with English abstract).
- Yin Yong. 2006. Relation of Dike rock and gold mineralization in West Qinling Region [J]. *Gansu Geology*, 20(1):28–37(in Chinese with English abstract).
- Yuan Honglin, Gao Shan, Liu Xiaoming, Li Huiming, Detlef Günther, Wu Fuyuan. 2004. Accurate U–Pb age and trace element determinations of zircon by laser ablation–inductively coupled plasma–mass spectrometry[J]. *Geostandards and Geoanalytical Research*, 28(3): 353–370.
- Zeng Lingsen, Gao Rui, Gao Li'e, Wang Haiyan, He Rizheng, Jin Sheng, Hou Hesheng, Xue Aimin, Xiong Xiaosong, Li Wenhui, Ye Gaofeng. 2017. Geochemical dataset of magmatic Rocks along the deep seismic reflection profile of a typical basin–range junction belt in Western China: the Western Qinling–Linxia Basin[J]. *Geology in China*, 44(Supp.1): 56–63(in Chinese with English abstract).
- Zeng Qingtao, Campbell M, Hart C J R, Jourdan F, Muhling J, Bagas L. 2012. Structural and geochronological studies on the Liba gold field of the West Qinling orogen belt, central China[J]. *Mineralium*

- Deposita, 47:799–819.
- Zeng Qingtao, T. Campbell Mccuaig, Eric Tohver, Leon Bagas, Lu Y J. 2014. Episodic Triassic magmatism in the western South Qinling Orogen, central China, and its implications[J]. *Geological Journal*, 49.10. 1002/gj. 2571.
- Zhang Chengli, Wang Tao, Wang Xiaoxia. 2008. Origin and tectonic setting of the Early Mesozoic granitoids in Qinling Orogenic Belt [J]. *Geological Journal of China Universities*, 14(3): 304–316 (in Chinese with English abstract).
- Zhang Hongfei, Jin Lanlan, Zhang Li, Nigel Harri, Zhou Lian, Hu Shenghong, Zhang Benren. 2005. Geochemical and Pb–Sr–Nd isotopic compositions of granitoids from western Qinling belt: Constraints on basement nature and tectonic affinity [J]. *Chinese Science: Earth Science*, 35(10):914–926 (in Chinese).
- Zhang Zongqing, Zhang Guowei, Tang Suohan. 2002. Isotopic Chronology of Metamorphic Strata in South Qinling [M]. Beijing: Geological Publishing House (in Chinese).
- Zhang Zuoheng, Mao Jingwen, Wang Yong. 2004. Characteristics of fluid inclusions in the gold deposits within Zhongchuan area, western Qinling and their geological significance [J]. *Acta Petrologica et Mineralogica*, 23(2):147–157 (in Chinese with English abstract).
- Zheng Yongfei, Zhao Zifu, Wu Yuanbao, Zhang Shaobing, Liu Xiaoming, Wu Fuyuan. 2006. Zircon U–Pb age, Hf and O isotope constraints on protolith origin of ultrahigh–pressure eclogite and gneiss in the Dabie orogen[J]. *Chemical Geology*, 231(1/2):135–158.
- Zheng Yongfei, Zhang Shaobing, Zhao Zifu, Wu Yuanbao, Li Xianhua, Li Zhengxiang, Wu Fuyuan. 2007. Contrasting zircon Hf and O isotopes in the two episodes of Neoproterozoic granitoids in South China: Implications for growth and reworking of continental crust[J]. *Lithos*, 96(1/2):127–150.
- 附中文参考文献**
- 陈衍景, 张静, 张复新, Pirajno F., 李超. 2004. 西秦岭地区卡林–类卡林型金矿床及其成矿时间、构造背景和模式[J]. *地质论评*, 50(2): 134–152.
- 陈源. 1994. 西秦岭李坝金矿床成矿物质来源探讨[J]. *西北地质*, (2): 5–9.
- 冯建忠, 汪东波, 王学明, 邵世才, 林国芳, 史建军. 2003. 甘肃礼县李坝大型金矿床成矿地质特征及成因[J]. *矿床地质*, 22(3):257–263.
- 冯益民, 曹宣铎, 张二朋, 胡云绪, 潘晓萍, 杨军录. 2003. 西秦岭造山带的演化、构造格局和性质[J]. *西北地质*, 36(1):1–10.
- 韩要权. 2004. 西秦岭东部金矿成矿模式和找矿方向 [D]. 长沙:中南大学.
- 侯可军, 李延河, 邹天人, 曲晓明, 石玉若, 谢桂青. 2007. LA–MC–ICP–MS 锆石 Hf 同位素的分析方法及地质应用[J]. *岩石学报*, 23(10):2595–2604.
- 李宏卫, 娄峰, 许冠军, 陈震, 陈小月. 2011. 多次重熔的成矿作用:对甘肃中川岩体成岩成矿过程的再认识[J]. *地学前缘*, 18(1):126–132.
- 毛景文, 张作衡, 余金杰, 王义天, 牛宝贵. 2003. 华北及邻区中生代大规模成矿的地球动力学背景:从金属矿床年龄精测得到启示[J]. *中国科学:地球科学*, 33(4):289–299.
- 毛景文, 周振华, 丰成友, 王义天, 张长青, 彭惠娟, 于森. 2012. 初论中国三叠纪大规模成矿作用及其动力学背景[J]. *中国地质*, 39(6):1437–1471.
- 聂政融. 2015. 西秦岭中川花岗岩体年代学、地球化学、岩浆混合成因[D]. 北京:中国地质大学(北京).
- 秦江锋. 2010. 秦岭造山带晚三叠世花岗岩类成因机制及深部动力学背景[D]. 西北大学.
- 宋忠宝, 冯益民, 何世平. 1997. 中川花岗岩构造岩浆活动特征与成矿作用[J]. *西安地质学院学报*, (4):48–52.
- 汪相, Griffin W L, 王志成, 周新民, 汪传胜. 2003. 湖南丫江桥花岗岩中锆石的 Hf 同位素地球化学[J]. *科学通报*, 48(4):379–382.
- 王银喜, 顾连兴, 张遵忠, 吴昌志, 李惠民, 杨杰东. 2007. 东天山晚石炭世大石头群流纹岩 Sr–Nd–Pb 同位素地球化学研究[J]. *岩石学报*, 23(7):1749–1755.
- 温志亮. 2008. 西秦岭教场坝岩体岩浆混合成因的新认识[J]. *矿物岩石*, 28(3):29–36.
- 吴福元, 李献华, 郑永飞, 高山. 2007a. Lu–Hf 同位素体系及其岩石学应用[J]. *岩石学报*, 23(2):185–220.
- 吴福元, 李献华, 杨进辉, 郑永飞. 2007b. 花岗岩成因研究的若干问题[J]. *岩石学报*, 23(6):1217–1238.
- 肖庆辉, 邓晋福, 邱瑞照, 刘勇, 冯艳芳. 2009. 花岗岩类与大陆地壳生长初探——以中国典型造山带花岗岩类岩石的形成为例[J]. *中国地质*, 36(3):594–622.
- 肖庆辉, 邱瑞照, 邢作云, 张昱, 伍光英, 童劲松. 2007. 花岗岩成因研究前沿的认识[J]. *地质论评*, 53(s1):17–27.
- 徐学义, 陈隽璐, 高婷, 李平, 李婷. 2014. 西秦岭北缘花岗质岩浆作用及构造演化[J]. *岩石学报*, 30(2): 371–389.
- 杨阳, 王晓霞, 柯昌辉, 王顺安, 李金宝, 聂政融, 吕星球. 2015. 西秦岭碌碛坝岩体的锆石 U–Pb 年龄、成因及其地质意义[J]. *地质学报*, 89(10):1735–1761.
- 殷勇, 赵彦庆. 2006. 甘肃西秦岭金矿富集区花岗岩与金成矿作用的关系[J]. *甘肃地质*, 15(1):36–41.
- 殷勇. 2011. 西秦岭地区脉岩与金矿化的关系[J]. *甘肃地质*, 20(1): 28–37.
- 曾令森, 高锐, 高利娥, 王海燕, 贺日政, 金胜, 侯贺晟, 薛爱民, 熊小松, 李文辉, 叶高峰. 2017. 中国西部典型盆地结合带:西秦岭–临夏盆地深地震反射剖面沿线岩浆岩岩石地球化学测试数据集[J]. *中国地质*, 44(增刊1): 56–63.
- 张成立, 王涛, 王晓霞. 2008. 秦岭造山带早中生代花岗岩成因及其构造环境[J]. *高校地质学报*, 14(3):304–316.
- 张宏飞, 靳兰兰, 张利, Nigel Harri, 周炼, 胡圣虹, 张本仁. 2005. 西秦岭花岗岩类地球化学和 Pb–Sr–Nd 同位素组成对基底性质及其构造属性的限制[J]. *中国科学:地球科学*, 35(10):914–926.
- 张宗清, 张国伟, 唐索寒. 2002. 南秦岭变质地层同位素年代学[M]. 北京:地质出版社.
- 张作衡, 毛景文, 王勇. 2004. 西秦岭中川地区金矿床流体包裹体特征及地质意义[J]. *岩石矿物学杂志*, 23(2):147–157.