

秦岭东江口和柞水花岗岩的矿物成分特征 及其形成的温压条件

刘春花, 吴才来, 雷敏, 秦海鹏, 李名则

(大陆构造与动力学国家重点实验室, 中国地质科学院地质研究所, 北京 100037)

摘要: 对南秦岭东江口和柞水岩体的似斑状花岗岩类进行了偏光显微镜观察和电子探针(EPMA)扫描电镜(SEM)矿物分析,在此基础上对岩体形成的温压条件进行了讨论。结果表明,这两种岩石的主要造岩矿物为石英、斜长石(更-奥长石)、钾长石、镁角闪石和镁质黑云母,副矿物为锆石、榍石、磁铁矿和磷灰石等。岩浆成分的变化可能是矿物环带结构和环斑结构形成的原因之一。东江口和柞水花岗岩类锆石结晶时岩浆温度为 759~784℃,平均 771℃;稀土元素在岩浆中饱和时岩浆的温度为 741~800℃,平均 773℃;斜长石结晶时岩浆温度 624~641℃,平均 632℃;角闪石结晶时岩浆温度 610~668℃,平均 632℃。岩体侵位深度约 5.8 km,压力约 1.77×10^8 Pa,具有壳幔混源的特点。

关键词: 花岗岩类;岩石学;矿物学; p - T 条件;秦岭;东江口;柞水

中图分类号: P588.12⁺1; P574.2

文献标识码: A

文章编号: 1000-6524(2013)03-0341-14

Mineral composition and temperature-pressure conditions of Dongjiangkou and Zhashui granites in the Qinling Mountains

LIU Chun-hua, WU Cai-lai, LEI Min, QIN Hai-peng and LI Ming-ze

(State Key Laboratory for Continental Tectonics and Dynamics, Institute of Geology, Chinese Academy of Geological Sciences, Beijing 100037, China)

Abstract: Dongjiangkou and Zhashui granites are located in southern Shangdan fault of the south Qinling Mountains. Samples were collected from porphyroid granites. The systematic mineralogical characteristics of Dongjiangkou and Zhashui rocks and the rocks-forming p - T estimates were investigated by means of petrological observation, electron microprobe analysis and scanned electron microscope (SEM). The results demonstrate that porphyroid granodiorite and porphyroid granite are composed of quartz, plagioclase (oligoclase), K-feldspar, magnesiohornblende and magnesian biotite, whereas the accessory minerals include zircons, sphene, magnetite and apatite. It can be inferred that the variations of magma composition account for the zoned structure and rapakivi texture in minerals. Zircon in Dongjiang and Zhashui granitoids crystallized when the magma temperature varied in the range of 759~784℃ (771℃ on average). The rare earth elements were saturated in magma when its temperature reached 741~800℃ (773℃ on average). Plagioclase crystallization when the magma temperature varied from 624℃ to 641℃ (632℃ on average), whereas hornblende crystallized when the magma temperature was in the range of 610~668℃ (632℃ on average). The probable emplacement depth of the

收稿日期: 2012-10-14; 修订日期: 2013-04-15

基金项目: 中国地质调查局项目(1212011120160, 1212010611803, 1212010711816); 国家专项(SinoProbe-05-05); 国家自然科学基金创新群体资助项目(40921001)

作者简介: 刘春花(1985-), 博士研究生, 矿物学、岩石学、矿床学专业, E-mail: chunhua91052@126.com; 通讯作者: 吴才来(1960-), 博士, 研究员, 博士生导师, 从事岩石学研究, E-mail: wucailai@ccsd.cn

rocks was ~ 5.8 km, with the corresponding pressure being about 1.77×10^8 Pa.

Key words: granitoids; petrology; mineralogy; p - T conditions; Qinling; Dongjiangkou; Zhashui

自北向南,以洛南-栾川断裂、商(南)-丹(凤)断裂和勉(县)-略(阳)断裂为界将秦岭造山带及其邻区分为华北区或华北南缘区、北秦岭区、南秦岭区(也称秦岭微板块)和扬子北缘区(图 1a)。秦岭地区中生代花岗岩十分发育(图 1b),岩浆作用机制及动力学背景涉及到壳幔相互作用、岩石圈拆沉、造山带构造属性等重大问题,一直倍受地质界关注(张国伟等,2001;路凤香等,2003;卢欣祥等,1996,2003,2008;王晓霞等,2002,2003,2005,2011;张宏飞等,2005;张宗清等,2006;秦江锋等,2007;张成立等,2008,2009;周滨等,2008;杨恺等,2009;弓虎军等,2009a,2009b;雷敏,2010)。东江口和柞水岩体紧临商丹断裂南侧发育(图 1c),属于南秦岭的东江口岩体群(弓虎军等,2009a,2009b)。前人从岩石学、地球化学、同位素地球化学和年代学等方面对东江口和柞水岩体及其包体进行了研究,然而其矿物化学及岩浆形成的温压条件尚未见报道。鉴于此,本文对其矿物成分特征、温压条件和侵位深度进行了较为细致的研究。

1 地质背景

三叠纪由于古特提斯洋闭合以及华北板块和扬子板块发生完全碰撞,导致在秦岭造山带、松潘-甘孜褶皱带内及西昆仑造山带内形成大量的三叠纪花岗岩,这些花岗岩主要分布于由勉略构造带、商丹构造带、龙门山造山带、甘孜-理塘构造带以及昌宁-孟连缝合带围限成的一个巨大的三角形构造区(秦江锋,2010)。秦岭三叠纪花岗岩位于这个巨大三角形构造带的东段,和勉略洋的构造发育及最终闭合等构造过程密切相关(张国伟等,2003)。秦岭造山带三叠纪花岗岩从东向西依次分布着沙河湾、曹坪、柞水、东江口、胭脂坝、五龙、西坝、留坝、张家坝、姜家坪、新院及迷坝岩体等,它们的锆石 LA-ICP-MS U-Pb 年龄分别为 212、224、225(弓虎军等,2009b)、223(弓虎军等,2009a)、200(骆金诚等,2010)、225(王娟等,2008)、201、218、219、206、214 及 220~211 Ma(张宗清等,2006)。秦江锋(2010)将秦岭造山带晚三叠世花岗岩的形成时间划分为 3 个阶段:235~

225、220~205 和 200 Ma 左右。东江口和柞水岩体是秦岭两个较大的三叠纪花岗岩体,属于第一阶段形成的花岗岩。

东江口岩体出露于陕西省周至县江口、柞水县营盘一带,出露面积约 550 km^2 ,岩体近东西向展布。岩体侵位于泥盆纪刘岭组方柱石角岩、钙质板岩、黑云母角岩、变质砂岩、云母石英片岩中,接触面多向北陡倾,与围岩产状基本一致。商丹断裂将岩体东北部与太古宇秦岭群和古生代片麻状花岗岩隔开(图 1c)。

柞水岩体出露于陕西省柞水县东北、曹坪岩体西南一带,位于东江口岩体东侧,向东距离沙河湾岩体约 50 km ,岩体长轴方向近北东向延伸,出露面积约 265 km^2 。岩体主体侵位于泥盆纪刘岭组方柱石角岩、钙质板岩、黑云母角岩、变质砂岩、云母石英片岩和石炭纪二峪河组砂岩、钙质粉砂岩、板岩、石灰岩中,岩体北部侵位到丹凤群中。柞水岩体与围岩呈明显的侵入接触关系,接触变质带宽 $200 \sim 300 \text{ m}$ (图 1b、1c)。

2 岩石学特征

东江口和柞水岩体均为典型的大型复式岩体(崔建堂等,1999)。东江口岩体从外向内主要包括小川街、营盘街、药王堂、沙洛帐和梅庄 5 个岩相学单元,从东向西,表现出由早到晚的同心环状分布特征。小川街单元断续分布在岩体边缘,面积较小,其他 4 个单元面积较大。柞水岩体由外向内主要包括老安寺、西川街和洞耳沟 3 个岩相学单元。本文采样点位于东江口岩体的营盘街单元和柞水岩体的西川街单元。

东江口岩体样品为花岗闪长岩。样品 09CL285(N $33^{\circ}45.995'$, E $109^{\circ}02.835'$, H 952 m) (图 2a)取自四道河一号隧道北口高速边,呈浅肉红色-灰白色,具中粒结构-中粗粒似斑状结构。样品 12CL216(N $33^{\circ}47.646'$, E $109^{\circ}01.843'$, H 967 m) (图 2b)取自营盘收费站的“营盘镇项目区标牌”处,距营盘镇 2 km 处。斑晶为斜长石、钾长石, $1 \text{ cm} \times 1.5 \text{ cm}$ 左右,含量约 5%,基质为中粒-中细粒钾长石、斜长石、石英、

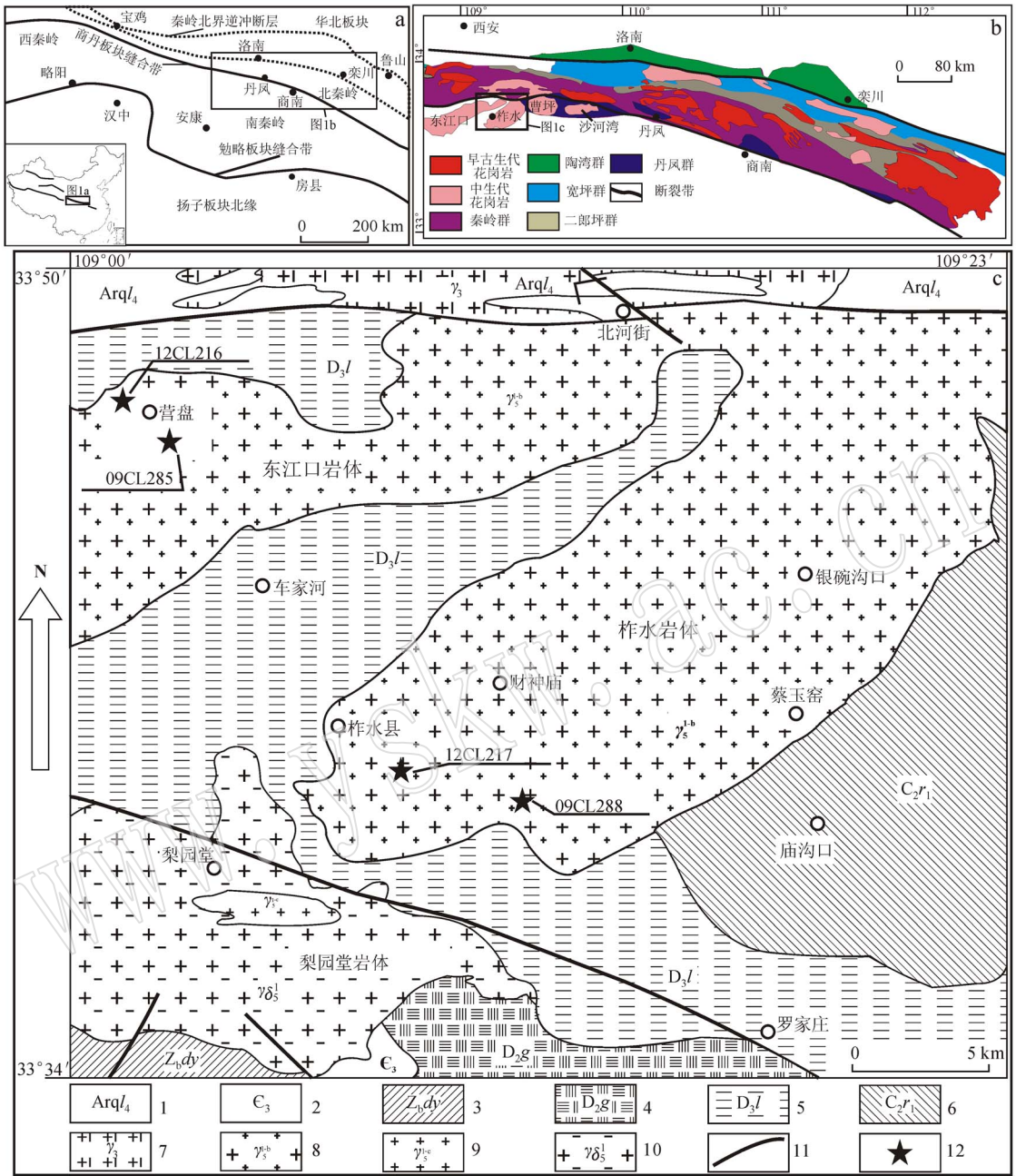


图 1 秦岭造山带及其邻区大地构造略图(a, 据周文戈等, 1999)、北秦岭花岗岩分布图(b, 据雷敏, 2010)和东江口、柞水一带区域地质简图(c, 据 1:20 万商县幅地质图^①)

Fig. 1 Sketch geological map showing the main tectonic units of Qinling orogenic belt (a, after Zhou Wenge *et al.*, 1999), map of distribution of granitoids in the northern margin of Qinling orogenic belt (b, after Lei min, 2010) and regional geological map of Dongjiangkou and Zhashui (c, after 1:200 000 Geological Map of Shangxian County^①)

- 1—秦岭群顶部, 黑云母角闪片麻岩、角闪片麻岩、炭质大理岩; 2—硅质灰岩、白云质灰岩; 3—灯影组, 硅质灰岩; 4—古道岭组, 灰岩、千枚岩、砂岩、砾岩; 5—刘岭组, 方柱石角岩、钙质板岩、黑云母角岩、变质砂岩、云母石英片岩; 6—二峪河组下部, 砂岩、钙质粉砂岩、板岩、石灰岩; 7—片麻状花岗岩、黑云母花岗岩; 8—花岗岩、二长花岗岩、花岗岩闪长岩、英云闪长岩; 9—细粒花岗岩; 10—花岗闪长岩、石英闪长岩、石英二长岩; 11—断裂; 12—采样点
- 1—top of Qinling Group: biotite hornblende gneiss, hornblende gneiss, carbonaceous marble; 2—siliceous limestone, dolomitic limestone; 3—Dengying Formation: siliceous limestone; 4—Gudaoling Formation: limestone, phyllite, sandstone, gravel stone; 5—Liuling Formation: scapolite hornstone, calc-slate, biotite hornstone, metasandstone, mica quartz schist; 6—lower Eryuhe Formation: sandstone, calc-siltstone, slate, limestone; 7—gneissic granite, biotite granite; 8—granite, monzonitic granite, granodiorite, tonalite; 9—fine-grained granite; 10—granodiorite, quartz diorite, quartz monzonite; 11—fault; 12—sample location

① 地质部陕西省地质局秦岭区域地质测量大队八分队, 1966. 1:20 万商县幅地质图.

黑云母等。主要矿物组成为石英(25%~30%)斜长石(30%~45%)钾长石(25%~30%)黑云母和少量的角闪石及白云母(5%~10%)。副矿物有磷灰石、锆石、榍石和磁铁矿等。岩体中偶见大小不一的椭圆形微粒花岗质包体(图2a)。

柞水岩体样品为花岗岩。样品09CL288(N 33°38.704' E 109°08.255', H 757 m)(图2c、2d)取自柞水县下梁镇。样品12CL217(N 33°39.905' E 109°07.055', H 787 m)(图2e、2f)取自柞水收费站东南200 m处。灰白色-肉红色,中粗粒似斑状结构。斑晶主要为钾长石,1 cm×2 cm~0.5 cm×1 cm,也含少量的斜长石斑晶,含量约10%~15%,比东江口岩体中斑晶含量高;基质中细粒-中粒,主要矿物斜长石、石英、黑云母等,少量角闪石。岩体中偶见钾长石岩脉,脉宽1 cm×1.5 cm;同时偶见椭圆形细粒黑云母花岗岩包体(图2f)20 cm×40 cm~2 cm×4 cm不等。岩石的主要矿物组成为斜长石(35%~45%)石英(25%~30%)钾长石(25%~30%)黑云母和少量的角闪石及白云母(5%左右)。副矿物为磷灰石、锆石、榍石和磁铁矿等。

3 分析方法

3.1 电子探针分析

电子探针分析在中国地质科学院矿产资源研究所矿物学与微束分析实验室电子探针室完成,仪器型号JXA-8230,电压15 kV,电流20 nA,束斑直径5 μm,标样为天然或合成的矿物和氧化物,主要氧化物的分析误差约为1%。

3.2 扫描电镜分析

扫描电镜分析在中国地质科学院地质研究所大陆动力学扫描电镜-能谱-岩石组构分析实验室完成,仪器型号日本电子公司JEOL JSM-5610LV,加速电压20 kV,焦距20~21 mm,束斑29~30 μm。

4 分析结果

4.1 钾长石

东江口和柞水岩体花岗岩类的钾长石呈半自形-自形柱状、板状,环带结构,格子双晶和卡式双晶发育,有正长石、微斜长石和条纹长石(图2、图3)。钾长石有环带明显和环带不明显两期。选择环带明显的3粒钾长石(表1的1~2号点、3~5号点和6~

10号点)分别进行了探针测试,发现从核部到边部,几乎都不含An,第1粒Ab为6.67和2.68,Or为92.98和97.32;第2粒Ab为8.09、6.63和3.74,Or为91.84、92.97和96.26;第3粒Ab为16.44、12.66、10.60、8.06和5.00,Or为83.56、87.10、89.15、91.86和95.00(图4a)。从核部到边部,Ab(Na₂O)含量降低,Or(K₂O)含量升高,成分变化较大。矿物具有从核部到边部生长的规律,钾长石在结晶生长过程中,岩浆浓度的变化对其当时生长位置的矿物成分具有明显影响,钾长石核部钾低钠高,边部钠低钾高,表明核部生长时,岩浆钾低钠高,边部生长时,岩浆钠低钾高,钾长石的成分环带记录着其生长过程中岩浆成分的变化情况。

4.2 斜长石

斜长石呈半自形-自形柱状、板状,环带和聚片双晶发育,矿物表面有轻微的蚀变(图2、图3)。斜长石也有环带明显和环带不明显两期。环带较明显的斜长石(表2的1~3号点)的探针测试结果显示,从核部到边部,An为25.55、19.03和16.96,Ab为73.57、80.24和82.21,Or为0.88、0.73和0.83;环带较明显的斜长石(表2的8~10号点)的探针测试结果显示,从核部到边部,An为24.46、22.33和15.81,Ab为74.47、76.27和83.16,Or为1.07、1.40和1.03(图4b);环带不明显的斜长石(表2的4~7号点)的探针测试结果显示,从核部到边部,An为22.65、19.06、21.16和21.10,Ab为76.73、79.73、77.89和77.80,Or为0.61、1.21、0.95和1.10。测试结果表明,东江口和柞水花岗岩类的斜长石为更(奥)长石,环带不明显的斜长石An变化相对稳定,表明这类斜长石形成时岩浆的成分变化不大,环带明显的斜长石从核部到边部,An(CaO)含量递减,Al(Na₂O)含量递增,成分变化较大,表明这类斜长石形成时岩浆的成分变化大。斜长石核部钠低钙高,边部钙低钠高,表明核部生长时,岩浆钠低钙高,边部生长时,岩浆钙低钠高,斜长石的成分环带记录着其生长过程中岩浆成分的变化情况。

4.3 普通角闪石

普通角闪石自形-半自形粒状,多色性较弱,浅黄-黄色,部分颗粒可见近56°两组解理(图2、图3)。用阴离子法以氧离子数23为基准计算出角闪石的阳离子系数(表3), $(Ca + Na)_B = 1.76 \sim 1.89$, $Na_B = 0.00 \sim 0.08$, $Si = 7.01 \sim 7.36$, $Ca_B = 1.76 \sim 1.84$, $(Na + K)_A = 0.34 \sim 0.54$, 平均0.42, $Ca_A =$

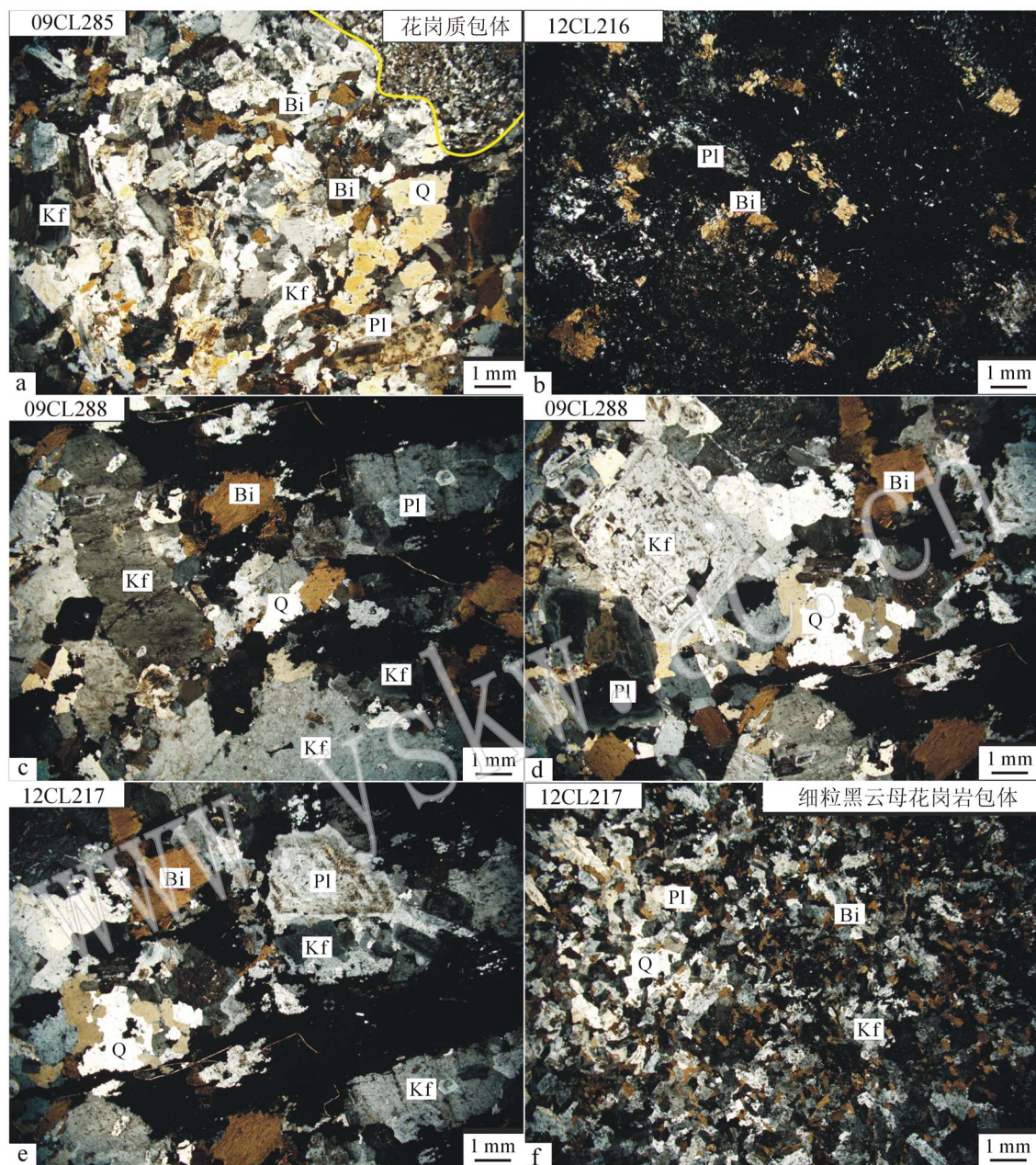


图 2 东江口和柞水花岗岩类正交偏光显微镜照片

Fig. 2 Photomicrographs of granitoids from Dongjiangkou and Zhashui (crossed nicols)

a—花岗闪长岩中斜长石聚片双晶和环带结构发育，钾长石的格子双晶和环带结构发育，含少量的条纹长石，偶见花岗质包体，东江口岩体；
 b—花岗闪长岩部分样品的长石蚀变严重，东江口岩体；c、d、e—花岗岩中钾长石和斜长石环带结构发育，微斜长石的格子双晶发育，含少量的条纹长石，黑云母的多色性明显，柞水岩体；f—花岗岩中细粒黑云母花岗岩包体，柞水岩体；Q—石英；Pl—斜长石；Kf—钾长石；Bi—黑云母

a—plagioclase rich in polysynthetic twinning and zonal structure, K-feldspar rich in crossed twinning and zonal structure, rock containing a small amount of perthite and granitic inclusions, Dongjiangkou body; b—plagioclase altered intensely in some samples, Dongjiangkou body; c, d, e—K-feldspar and plagioclase rich in zonal structure, microcline rich in crossed twinning and containing a small amount of perthite, significant pleochroism of biotite, Zhashui body; f—fine-grained biotite granite inclusion, Zhashui body; Q—quartz; Pl—plagioclase; Kf—K-feldspar; Bi—biotite

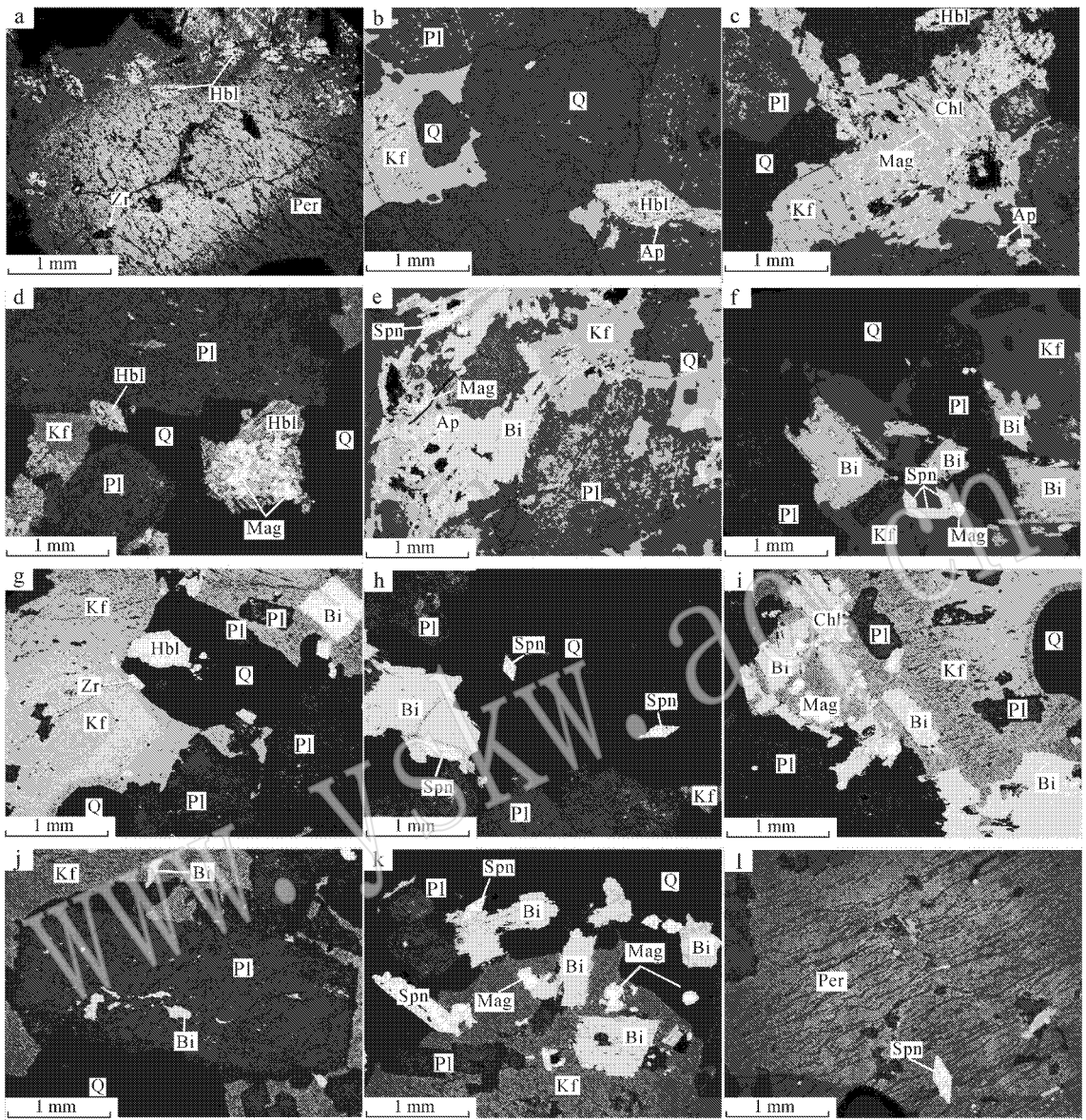


图 3 东江口和柞水花岗岩类扫描电镜照片

Fig. 3 Scanning electron photomicrograph of granitoids from Dongjiangkou and Zhashui

a—花岗闪长岩中角闪石呈自形,正条纹长石发育,钾长石的环带结构发育,东江口岩体;b—花岗闪长岩中角闪石呈自形,副矿物磷灰石,东江口岩体;c—花岗闪长岩中黑云母蚀变为绿泥石,东江口岩体;d—花岗闪长岩中角闪石呈自形-半自形,角闪石中的副矿物磁铁矿,东江口岩体;e—花岗闪长岩中斜长石有轻微蚀变,副矿物磁铁矿、榍石和磷灰石,东江口岩体;f—花岗闪长岩中黑云母呈片状,东江口岩体;g—花岗岩中含少量的角闪石,副矿物锆石,柞水岩体;h—花岗岩中榍石呈信封状,柞水岩体;i—花岗岩中少量的黑云母蚀变为绿泥石,副矿物磁铁矿,柞水岩体;j—花岗岩中斜长石的环带发育,柞水岩体;k—花岗岩中黑云母呈片状,副矿物磁铁矿和榍石,柞水岩体;l—花岗岩中正条纹长石和榍石,柞水岩体;Q—石英;Pl—斜长石;Kf—钾长石;Bi—黑云母;Hbl—角闪石;Per—条纹长石;Mag—磁铁矿;Zr—锆石;Ap—磷灰石;Spn—榍石;Chl—绿泥石

a—euhedral hornblende in granodiorite, granodiorite rich in perthite, K-feldspar rich in zonal structure, Dongjiangkou body; b—euhedral hornblende and accessory mineral apatite, Dongjiangkou body; c—biotite altered into chlorite, Dongjiangkou body; d—euhedral-subhedral hornblende and accessory mineral magnetite in hornblende, Dongjiangkou body; e—slightly altered plagioclase and accessory minerals magnetite, sphene and apatite, Dongjiangkou body; f—sheet biotite, Dongjiangkou body; g—granite containing a small amount of hornblende and accessory mineral zircon, Zhashui body; h—envelope-shaped sphene, Zhashui body; i—a small amount of biotite altered into chlorite and accessory mineral magnetite, Zhashui body; j—plagioclase rich in zonal structure, Zhashui body; k—sheet biotite and accessory minerals magnetite and sphene, Zhashui body; l—perthite and sphene, Zhashui body; Q—quartz; Pl—plagioclase; Kf—K-feldspar; Bi—biotite; Hbl—hornblende; Per—perthite; Mag—magnetite; Zr—zircon; Ap—apatite; Spn—sphene; Chl—chlorite

表 1 钾长石的化学成分
Table 1 Chemical compositions of K-feldspar

$w_B/\%$

样号位置	1 核	2 边	3 核	4 幔	5 边	6 核	7 幔	8 幔	9 幔	10 边
SiO ₂	64.60	64.29	65.71	65.18	65.51	65.70	65.48	64.51	64.77	64.50
TiO ₂	0.00	0.01	0.00	0.02	0.05	0.00	0.01	0.06	0.00	0.10
Al ₂ O ₃	18.55	18.26	18.23	18.43	18.33	18.53	18.45	18.38	18.51	18.29
FeO	0.00	0.04	0.03	0.05	0.00	0.02	0.04	0.08	0.00	0.06
MnO	0.00	0.00	0.00	0.00	0.02	0.00	0.00	0.01	0.00	0.00
MgO	0.00	0.00	0.00	0.01	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
CaO	0.07	0.00	0.01	0.08	0.00	0.00	0.05	0.05	0.02	0.00
Na ₂ O	0.76	0.30	0.92	0.75	0.42	1.82	1.41	1.20	0.91	0.57
K ₂ O	16.01	16.61	15.84	16.01	16.43	14.08	14.78	15.29	15.84	16.41
An	0.35	0.00	0.07	0.40	0.00	0.00	0.24	0.25	0.08	0.00
Ab	6.67	2.68	8.09	6.63	3.74	16.44	12.66	10.60	8.06	5.00
Or	92.98	97.32	91.84	92.97	96.26	83.56	87.10	89.15	91.86	95.00

据路远发(2004)GeoKit 软件计算。

表 2 斜长石的化学成分
Table 2 Chemical compositions of plagioclase

$w_B/\%$

样号位置	1 核	2 幔	3 边	4 核	5 幔	6 幔	7 边	8 核	9 幔	10 边
SiO ₂	61.74	63.38	64.01	63.57	64.78	62.84	63.72	62.62	63.81	64.99
TiO ₂	0.07	0.00	0.00	0.10	0.00	0.06	0.08	0.00	0.00	0.03
Al ₂ O ₃	23.56	22.54	22.50	23.15	22.60	22.95	23.04	23.19	22.67	21.81
FeO	0.14	0.11	0.00	0.07	0.12	0.08	0.06	0.13	0.18	0.11
MnO	0.00	0.02	0.00	0.01	0.02	0.00	0.01	0.00	0.02	0.02
MgO	0.00	0.00	0.01	0.00	0.02	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
CaO	5.52	4.10	3.54	4.91	4.15	4.64	4.57	5.28	4.79	3.40
Na ₂ O	8.79	9.56	9.49	9.20	9.60	9.45	9.32	8.89	9.04	9.88
K ₂ O	0.16	0.13	0.15	0.11	0.22	0.18	0.20	0.19	0.25	0.19
An	25.55	19.03	16.96	22.65	19.06	21.16	21.10	24.46	22.33	15.81
Ab	73.57	80.24	82.21	76.73	79.73	77.89	77.80	74.47	76.27	83.16
Or	0.88	0.73	0.83	0.61	1.21	0.95	1.10	1.07	1.40	1.03
T/K	914	898	902	908	903	906	906	909	912	897
t/°C	641	625	629	635	629	633	633	636	639	624

据路远发(2004)GeoKit 软件计算。

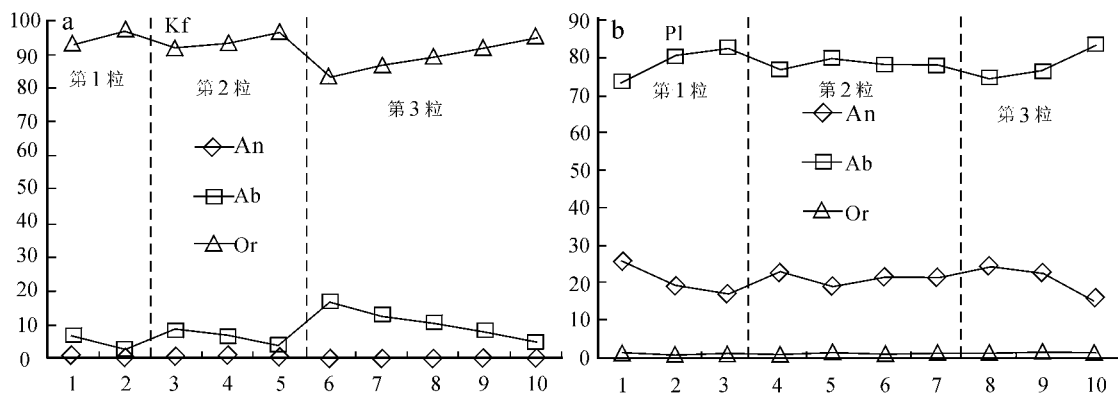


图 4 钾长石和斜长石的化学成分变化图

Fig. 4 Chemical composition change of K-feldspar and plagioclase

表 3 角闪石的化学成分
Table 3 Chemical compositions of hornblende

 $w_B/\%$

样号	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
SiO ₂	47.70	50.22	49.54	49.84	50.70	50.65	49.98	48.75	49.45	51.44
TiO ₂	0.83	0.56	0.05	0.57	0.83	0.69	0.54	0.77	0.14	0.67
Al ₂ O ₃	6.92	5.20	6.00	5.09	5.81	5.39	5.90	6.81	6.38	5.14
FeO	13.92	11.90	13.21	12.73	12.17	12.57	12.53	12.43	13.70	11.97
MnO	0.39	0.41	0.36	0.36	0.38	0.38	0.38	0.37	0.36	0.38
MgO	14.36	15.55	14.78	16.05	15.53	15.40	15.36	14.52	14.36	15.75
CaO	11.57	11.77	11.79	11.72	11.57	11.85	11.66	11.67	11.63	11.67
Na ₂ O	1.42	1.02	1.15	1.12	1.34	1.03	1.30	1.46	1.33	1.21
K ₂ O	0.70	0.47	0.60	0.46	0.48	0.46	0.51	0.66	0.62	0.46
Si _T	7.01	7.32	7.24	7.24	7.26	7.30	7.23	7.12	7.21	7.36
Al _T	0.99	0.68	0.76	0.76	0.74	0.70	0.77	0.88	0.79	0.64
Al _C	0.21	0.21	0.28	0.11	0.24	0.21	0.24	0.30	0.31	0.23
Fe _C ²⁺	0.43	0.64	0.55	0.54	0.61	0.64	0.56	0.53	0.53	0.66
Ti _C	0.09	0.06	0.01	0.06	0.09	0.07	0.06	0.08	0.02	0.07
Mg _C	3.15	3.38	3.22	3.48	3.32	3.31	3.31	3.16	3.12	3.36
Fe _C ²⁺	1.12	0.71	0.95	0.81	0.74	0.76	0.83	0.93	1.02	0.69
Fe _B ²⁺	0.16	0.10	0.12	0.19	0.11	0.11	0.12	0.06	0.12	0.09
Mn _B	0.05	0.05	0.05	0.04	0.05	0.05	0.05	0.05	0.04	0.05
Ca _B	1.79	1.84	1.83	1.76	1.78	1.83	1.81	1.83	1.82	1.79
Na _B		0.01			0.07	0.02	0.02	0.06	0.02	0.08
Ca _A	0.03	0.00	0.01	0.06	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
Na _A	0.41	0.28	0.33	0.32	0.30	0.27	0.34	0.35	0.35	0.26
K _A	0.13	0.09	0.11	0.09	0.09	0.09	0.09	0.12	0.11	0.08
Σ	15.57	15.36	15.45	15.46	15.39	15.36	15.44	15.47	15.47	15.34
$p/10^8\text{Pa}$	2.70	1.24	1.91	1.14	1.66	1.34	1.78	2.57	2.21	1.12
H/km	8.90	4.08	6.31	3.75	5.48	4.43	5.88	8.49	7.29	3.68
T/K	941	892	901	912	900	895	906	919	904	883
$t/^\circ\text{C}$	668	619	627	639	626	622	632	646	631	610

下标表示离子在晶体中所占位置,据路远发(2004) XGeoKit 软件计算。

0.00~0.06, $\text{Mg}/(\text{Mg} + \text{Fe}^{2+}) = 0.74 \sim 0.83$ 。据 Leake 等(1997)的角闪石分类方案,镁角闪石的化学成分分类界限为: $(\text{Ca} + \text{Na})_B \geq 1.34$, $\text{Na}_B < 0.67$, $(\text{Na} + \text{K})_A < 0.5$, $\text{Si} = 6.5 \sim 7.5$, $\text{Mg}/(\text{Mg} + \text{Fe}^{2+}) \geq 0.5$, 所以东江口和柞水花岗岩类的角闪石为普通角闪石中的镁角闪石亚类(图 5)。

4.4 黑云母

黑云母自形-半自形片状,多色性较强,褐色-褐红色,一组平直解理发育,部分黑云母蚀变成绿泥石(图 2、图 3)。用阴离子法以氧原子数为 11 计算出的黑云母阳离子数见表 4。在黑云母分类图解(图 6)中落入镁质黑云母区。

4.5 副矿物

电子探针化学成分结果显示(表 5),东江口和柞水花岗岩类的副矿物包括绿泥石、楣石、磷灰石、锆石和磁铁矿(图 3)。绿泥石是黑云母的蚀变产物。

楣石呈扁平的楔形(信封状),横断面为菱形。磷灰

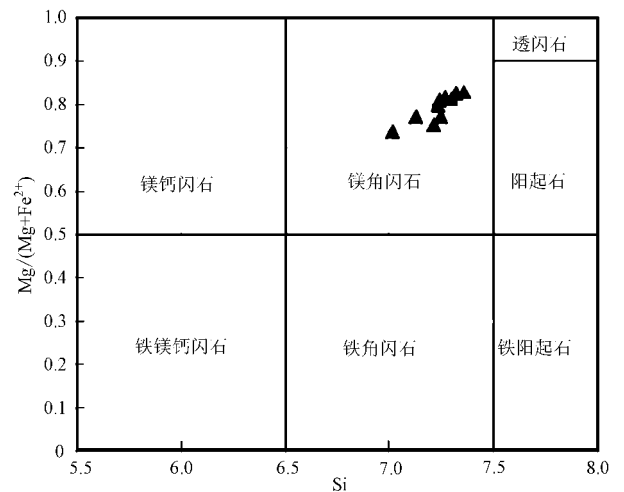


图 5 角闪石分类图解(据 Leake 等, 1997)

Fig. 5 The classification of hornblende

(after Leake *et al.*, 1997)

表 4 黑云母的化学成分
Table 4 Chemical compositions of biotite

$w_B/\%$

样号	1	2	3	4	5	6	7	8	9
SiO ₂	38.70	39.58	38.62	37.55	38.26	38.20	38.05	38.43	37.94
TiO ₂	2.20	2.50	2.69	2.50	2.71	2.54	0.57	3.49	3.14
Al ₂ O ₃	15.10	14.46	14.10	14.27	14.40	14.09	14.10	14.24	13.87
FeO	15.37	15.87	17.52	17.96	16.94	17.90	17.90	17.36	18.50
MnO	0.24	0.28	0.57	0.62	0.53	0.60	0.69	0.53	0.63
MgO	14.46	13.83	13.09	13.09	12.99	13.21	12.51	12.96	12.54
CaO	0.01	0.01	0.08	0.02	0.02	0.03	0.00	0.06	0.00
Na ₂ O	0.06	0.10	0.08	0.10	0.11	0.09	0.10	0.06	0.02
K ₂ O	9.93	9.75	9.65	9.70	10.02	9.67	9.57	9.72	9.66
Si	2.87	2.92	2.89	2.84	2.87	2.87	2.94	2.86	2.86
Al ^{IV}	1.13	1.08	1.11	1.16	1.13	1.13	1.06	1.14	1.14
Al ^{VI}	0.19	0.18	0.13	0.11	0.15	0.11	0.23	0.11	0.09
Ti	0.12	0.14	0.15	0.14	0.15	0.14	0.03	0.20	0.18
Fe ³⁺	0.18	0.23	0.19	0.14	0.17	0.16	0.14	0.21	0.19
Fe ²⁺	0.78	0.75	0.90	0.99	0.89	0.96	1.02	0.87	0.98
Mn	0.02	0.02	0.04	0.04	0.03	0.04	0.05	0.03	0.04
Mg	1.60	1.52	1.46	1.48	1.45	1.48	1.44	1.44	1.41
Ca	0.00	0.00	0.01	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
Na	0.01	0.01	0.01	0.01	0.02	0.01	0.01	0.01	0.00
K	0.94	.92	0.92	0.94	0.96	0.93	0.94	0.92	0.93
Al ^{VI} + Fe ³⁺ + Ti	0.49	0.55	0.47	0.40	0.47	0.42	0.40	0.51	0.45
Fe ²⁺ + Mn	0.79	0.77	0.94	1.03	0.92	1.00	1.06	0.90	1.02
Fe ³⁺ / (Fe ²⁺ + Fe ³⁺)	0.19	0.23	0.18	0.13	0.16	0.15	0.12	0.20	0.16
Mg [#]	0.63	0.61	0.57	0.57	0.58	0.57	0.55	0.57	0.55

据路远发(2004)GeoKit 软件计算。

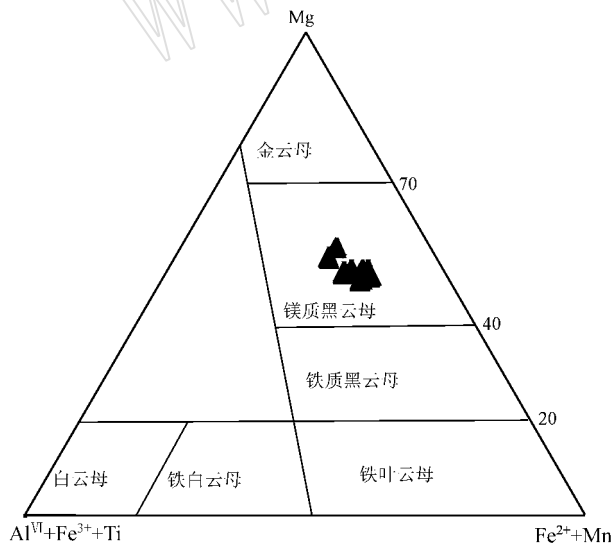


图 6 黑云母成分分类图(底图据 Foster, 1960)

Fig. 6 The classification of biotite (after Foster, 1960)

石呈带锥面的六方柱状。锆石呈四方双锥状、柱状、板状。磁铁矿为他形粒块状集合体。

5 讨论

5.1 温压计

5.1.1 锆元素在岩浆中的饱和浓度温度计

锆石是花岗质岩浆体系中较早结晶的副矿物，锆石饱和温度可近似代表花岗质岩石近液相线的温度，可用于估算初始岩浆温度。对不同成分岩石部分熔融产生的熔体进行的锆溶解度实验结果表明，锆石的饱和程度取决于岩浆温度和岩浆成分 (Watson and Harrison, 1983; Montel, 1993; Miller *et al.*, 2003)。Miller 等(2003)认为如果已知某一岩浆的主要成分及锆的含量，可据公式： $T_{Zr} = 12900 / [2.95 + 0.85 M + \ln(496000/Zr_{melt})]$ 来计算锆饱和温度， T 为开氏温度(K)， M 是 $(Na + K + 2Ca) / (Al \times Si)$ 阳离子含量比值， Zr_{melt} 是全岩分析中锆元素的含量。计算时，岩浆的主要成分近似用全岩分析数据代替，锆元素含量见表 6，估算出东江口和柞水花岗岩类锆石结晶时岩浆温度为 759~784℃，平均 771℃(表 6)。

表 5 副矿物的化学成分

 $w_B/\%$

Table 5 Chemical compositions of accessory minerals

矿物	SiO ₂	TiO ₂	Al ₂ O ₃	FeO	MnO	MgO	CaO	Na ₂ O	K ₂ O	P ₂ O ₅	ZrO ₂	Total
Mag-1	0.05	0.00	0.01	93.56	0.03	0.00	0.00	0.00	0.00	0.01	0.00	93.66
Mag-2	0.04	0.00	0.00	93.72	0.03	0.03	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	93.82
Mag-3	0.02	0.08	0.00	94.03	0.04	0.02	0.00	0.00	0.00	0.02	0.00	94.21
Chl-1	28.24	0.05	18.42	18.83	0.45	20.39	0.11	0.03	0.02	0.00	0.01	86.54
Zr-1	33.15	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.03	0.02	0.00	0.03	65.43	98.66
Spn-1	30.81	36.04	1.02	1.57	0.05	0.00	28.03	0.01	0.00	0.05	0.04	97.63
Spn-2	31.34	35.37	1.61	1.65	0.05	0.02	28.11	0.01	0.00	0.03	0.02	98.20
Spn-3	30.49	36.47	1.38	1.96	0.07	0.00	27.80	0.02	0.00	0.02	0.01	98.22
Spn-4	29.70	35.82	1.33	1.61	0.13	0.02	26.12	0.00	0.00	0.02	0.07	94.82
Spn-5	30.41	34.31	1.32	1.91	0.10	0.00	27.51	0.01	0.00	0.04	0.00	95.61
Spn-6	29.36	35.47	1.50	1.79	0.12	0.00	26.02	0.00	0.01	0.09	0.11	94.47
Spn-7	29.97	35.74	1.34	1.67	0.15	0.02	26.68	0.00	0.00	0.07	0.03	95.66
Spn-8	30.73	35.88	1.23	1.50	0.06	0.01	27.24	0.00	0.00	0.08	0.00	96.72
Ap-1	0.32	0.00	0.00	0.05	0.01	0.00	55.72	0.04	0.03	41.03	0.13	97.32
Ap-2	0.27	0.04	0.00	0.16	0.03	0.01	55.08	0.03	0.00	40.43	0.02	96.06
Ap-3	0.55	0.12	0.14	0.65	0.08	0.16	55.19	0.00	0.00	40.45	0.15	97.49
Ap-4	0.17	0.00	0.00	0.10	0.12	0.01	54.77	0.05	0.00	39.58	0.11	94.90

Mag—磁铁矿；Chl—绿泥石；Zr—锆石；Spn—榍石；Ap—磷灰石。

表 6 东江口和柞水花岗岩类的主量元素($w_B/\%$)微量元素($w_B/10^{-6}$)分析结果Table 6 Major elements($w_B/\%$) and trace elements($w_B/10^{-6}$) analysis of granitoids from Dongjiangkou and Zhashui

样号	12CL216	09CL285	12CL217	09CL288	样号	12CL216	09CL285	12CL217	09CL288
SiO ₂	67.63	67.06	70.16	71.45	Nd	32.11	24.68	26.56	23.30
TiO ₂	0.47	0.42	0.43	0.35	Sm	4.94	3.96	4.59	3.60
Al ₂ O ₃	14.57	14.97	14.88	14.97	Eu	1.05	1.03	1.05	0.83
Fe ₂ O ₃	1.46	1.15	1.11	1.00	Gd	4.24	3.29	3.91	3.06
FeO	1.82	1.92	1.37	1.07	Tb	0.58	0.49	0.62	0.46
MnO	0.06	0.05	0.05	0.04	Dy	3.37	2.67	3.60	2.43
MgO	2.15	2.62	0.97	0.88	Ho	0.64	0.48	0.68	0.44
CaO	2.95	3.36	2.32	2.15	Er	1.74	1.43	1.78	1.27
Na ₂ O	3.51	3.74	4.06	3.86	Tm	0.30	0.24	0.31	0.20
K ₂ O	3.74	3.38	3.63	4.06	Yb	1.76	1.59	1.77	1.37
P ₂ O ₅	0.13	0.17	0.14	0.12	Lu	0.28	0.22	0.29	0.19
LOI	1.30	0.91	0.73	0.02	Y	17.14	13.95	18.14	13.04
La	45.83	28.39	29.93	31.58	Zr	157	149	171	150
Ce	87.85	56.48	62.43	59.84	t_{Zr}	767	759	784	775
Pr	9.54	6.67	7.48	6.68	t_{REE}	774	741	775	800

5.1.2 稀土元素在岩浆中的饱和浓度温度计

Monte(1993)通过实验得出 LREE 在岩浆中饱和浓度温度计： $\ln(REE_t) = 9.5 + 2.34 D + 0.3879 \sqrt{H_2O} - 13318/T$ 其中 $REE_t = \sum [REE_i (\times 10^{-6}) / 1(g/mol)]$, REE_t 从 La 到 Gd; T 为开氏温度(K); H_2O 为质量分数, 计算时以全岩分析数据的 LOI(烧失量)为准; D 是 $(Na + K + Li + 2Ca) / [Al(Al + Si)]$ 阳离子含量比值。此温度计适用于贫 Ca、Fe、Mg 的花岗岩(刘春花等, 2012)。全岩分析和微量元素数据见表 6, 利用上式估算的东江口和柞水花岗岩类稀

土元素在岩浆中饱和时岩浆温度为 741~800°C, 平均 773°C(表 6)。

5.1.3 角闪石压力计

角闪石压力计主要依据角闪石中 Al 的含量来计算压力(Johnson *et al.*, 1989; Thomas *et al.*, 1990; Schmidt, 1992), 在较大的温度(400~1150°C)压力(0.1~2.3 GPa)范围内都适用, 被广泛地应用于火成岩。采用 Schmidt(1992)的角闪石压力计 $p = (-3.01 + 4.76 Al_{tot}) \times 10^8 Pa$ (误差为 $\pm 0.6 GPa$) 其中 $Al_{tot} = Al_T + Al_C$, 计算出压力为 1.12

$\sim 2.70 \times 10^8$ Pa (表 3), 平均 1.77×10^8 Pa。如果按 33 km/GPa 估算, 东江口和柞水花岗岩类的岩浆侵位深度约 5.8 km。

5.1.4 角闪石-斜长石温压计

Blundy 和 Holland (1990) 提出一个角闪石-斜长石温压计, 主要用于含石英的中酸性火成岩, 且岩石中斜长石 $An \leq 92$, 角闪石的 $Si \leq 7.8$, 校正后的温度计 (误差为 ± 311 K) 为: $T = (0.677 p - 48.98) / (-0.0429 - 0.0083144 \ln \{ [(Si - 4)(8 - Si)] X_{Ab}^{Pl} \})$ 式中, Si 是角闪石中硅原子数, X_{Ab}^{Pl} 是斜长石中的钠长石百分比, 压力 p 的单位为 0.1 GPa。以 Schmid (1992) 的角闪石压力计计算的 $p = 1.77 \times 10^8$ Pa 和角闪石中 S (表 3) 的平均值 7.23 为定值, 将表 2 中斜长石的 X_{Ab}^{Pl} 带入此公式, 计算结果 $T = 897 \sim 914$ K, $t = 624 \sim 641^\circ\text{C}$ (表 2), 平均 632°C , 代表斜长石结晶时的岩浆温度。如果以斜长石的 X_{Ab}^{Pl} (表 2) 的平均值 0.78 为定值, 将表 3 中角闪石 Si 值和压力 p 值带入此公式, 计算结果 $T = 883 \sim 941$ K, $t = 610 \sim 668^\circ\text{C}$, 平均 632°C (表 3), 代表角闪石结晶时的岩浆温度。

5.2 黑云母和角闪石的岩石成因指示意义

Whalen 与 Chappell (1988) 提出以黑云母 Al^V 的含量来划分 S 型与 I 型花岗岩, 认为 S 型花岗岩中黑云母具有较高的 Al^V (0.353~0.561), 而 I 型花岗岩中黑云母则具有较低的 Al^V (0.144~0.224)。徐克勤等 (1982) 依据岩石中黑云母的氧化系数 $Fe^{3+} / (Fe^{2+} + Fe^{3+})$ 和 $Mg^\#$ 划分 I 型与 S 型花岗岩, I 型花岗岩中黑云母具有较高的氧化系数 (0.252~0.121) 及较高的 $Mg^\#$ (0.384~0.626), 而 S 型花岗岩则较低。东江口和柞水花岗岩类黑云母 Al^V 含量为 0.09~0.23, 平均 0.14, 黑云母氧化系数为 0.12~0.23, $Mg^\#$ 为 0.55~0.63, 表明东江口和柞水花岗岩类属于 I 型花岗岩, 与弓虎军等 (2009a, 2009b) 的观点一致。

丁孝石 (1988) 认为典型幔源黑云母中 $MgO > 15\%$, 壳源黑云母中 $MgO < 6\%$, 本文 MgO 的含量为 12.51%~14.46%, 平均 13.19%, 具有壳幔过渡特点, 且在黑云母 $MgO - FeO / (FeO + MgO)$ 图解中 (图 7) 黑云母投点在壳幔混源区。在角闪石 $Al_2O_3 - TiO_2$ 图解中 (图 8), 角闪石落在壳幔混源区。这些都表明东江口和柞水花岗岩类具有壳幔混源的特点, 同时岩体中的基性包体和锆石 Lu-Hf 同位素特征 (弓虎军等, 2009a, 2009b) 也证明了这一点。

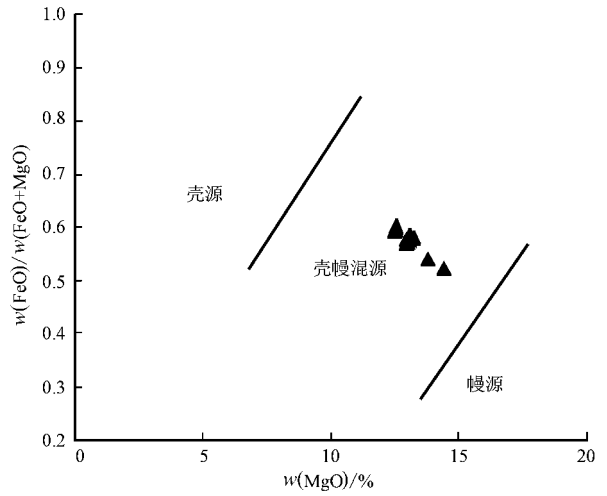


图 7 黑云母 $FeO / (FeO + MgO) - MgO$ 图解 (底图据周作侠, 1986)

Fig. 7 $FeO / (FeO + MgO) - MgO$ diagram of biotite (after Zhou Zuoxia, 1986)

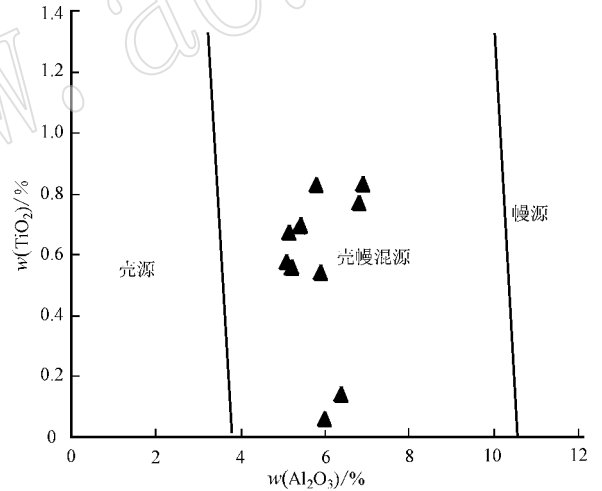


图 8 角闪石 $TiO_2 - Al_2O_3$ 图解 (底图据姜常义等, 1984)

Fig. 8 $TiO_2 - Al_2O_3$ diagram of hornblende (after Jiang Changyi et al., 1984)

6 结论

(1) 东江口和柞水花岗岩类主要造岩矿物为石英、斜长石 [更(奥)长石], 钾长石 (核部到幔边, Ab 降低, Or 升高), 镁角闪石和镁质黑云母, 副矿物为锆石、榍石、磁铁矿等。

(2) 东江口和柞水花岗岩类锆石结晶时岩浆温度为 $759 \sim 784^\circ\text{C}$, 平均 771°C , 稀土元素在岩浆中饱和时岩浆的温度为 $741 \sim 800^\circ\text{C}$, 平均 773°C , 斜长石结晶时岩浆温度 $624 \sim 641^\circ\text{C}$, 平均 632°C , 角闪石结晶时岩浆温度 $610 \sim 668^\circ\text{C}$, 平均 632°C 。岩浆侵位

深度约 5.8 km, 压力约 1.77×10^8 Pa, 具有壳幔混源的特点。

致谢 中国地质科学院地质研究所大陆动力学扫描电镜-能谱-岩石组构分析实验室陈方远老师和中国地质科学院矿产资源研究所矿物学与微束分析实验室陈振宇老师在实验过程中给予了大量的指导和帮助, 匿名审稿人在论文修改过程中给予了宝贵的修改意见, 在此一并表示衷心的感谢!

References

- Blundy J D and Holland T J B. 1990. Calcic amphibole equilibria and a new amphibole-plagioclase geothermometer [J]. *Contribution to Mineralogy and Petrology*, 104 : 208 ~ 224.
- Cui Jiantang, Zhao Changying and Wang Juchuan. 1999. The rock-lineage units classification and evolution of Dongjiangkou and Zhashui rockbodies in southern Qinling [J]. *Geology of Shaanxi*, 17 (2): 7 ~ 15 (in Chinese with English abstract).
- Ding Xiaoshi. 1988. Various types of biotite granite characteristics and its geological significance, central and southern Tibet [J]. *Pub Institute of Geology, Chinese Academy of Geologica*, 1 : 33 ~ 50 (in Chinese with English abstract).
- Foster M D. 1960. Interpretation of composition of trioctahedral micas [J]. *United States Geological Survey Professional Paper*, 354-B : 11 ~ 49.
- Gong Hujun, Zhu Laimin, Sun Boya, *et al.* 2009a. Zircon U-Pb ages and Hf isotopic composition of the Dongjiangkou granitic pluton and its mafic enclaves in the south Qinling terrain [J]. *Acta Petrologica Sinica*, 25 (11): 3 029 ~ 3 042 (in Chinese with English abstract).
- Gong Hujun, Zhu Laimin, Sun Boya, *et al.* 2009b. Zircon U-Pb ages and Hf isotope characteristics and their geological significance of the Shahewan, Caoping and Zhashui granitic plutons in the South Qinling oroger [J]. *Acta Petrologica Sinica*, 25 (2): 248 ~ 264 (in Chinese with English abstract).
- Jiang Changyi and An Sanyuan. 1984. On chemical characteristics of calcic amphiboles from igneous rocks and their petrogenesis significance [J]. *Journal of Mineralogy and Petrology*, 3 : 1 ~ 9 (in Chinese with English abstract).
- Johnson M C and Rutherford M J. 1989. Experimental calibration of the aluminum-in-hornblende geobarometer with application to Long Valley Caldera (California) volcanic rocks [J]. *Geology*, 17 : 837 ~ 841.
- Leake B E, Wooley A R, Arps C E S, *et al.* 1997. Nomenclature of amphiboles : Report of the subcommittee on amphiboles of the international mineralogical association, commission on new minerals and mineral names [J]. *Canadian Mineralogist*, 35 : 219 ~ 246.
- Lei Min. 2010. Petrogenesis of Granites and Their Relation to Tectonic Evolution of Orogen in the East Part of Qinling Orogenic Belt [D]. Chinese Academy of Geological Sciences (in Chinese with English abstract).
- Liu Chunhua, Yin Jingwu, Wu Cailai, *et al.* 2012. Mineralogy and temperature of magma generation for A-type granitoids in Boziguoer, Baicheng County, Xinjiang [J]. *Acta Petrologica et Mineralogica*, 31 (4): 589 ~ 602 (in Chinese with English abstract).
- Lu Fengxiang, Wang Chunyang, Hu Baoqun, *et al.* 2003. Structure of the lower crust and detachment and subduction of the lithosphere of the South Qinling [J]. *Geology in China*, 30 (2): 113 ~ 118 (in Chinese with English abstract).
- Lu Xinxiang, Dong You, Chang Qiuling, *et al.* 1996. Qinling Indosinian Oligoclase-rapakivi granite and its dynamic significance from Shahewar [J]. *Science in China (Series D)*, 26 (3): 244 ~ 248 (in Chinese with English abstract).
- Lu Xinxiang, Li Mingli, Wang Wei, *et al.* 2008. Indosinian movement and metallogenesis in Qinling orogenic belt [J]. *Mineral Deposits*, 27 (6), 762 ~ 773 (in Chinese with English abstract).
- Lu Xinxiang, Wang Xiaoxia, Xiao Qinghui, *et al.* 2003. A reply to " A query on the So-called rapakivi granite in the Qinling orogen [J]. *Geological Review*, 49 (2): 146 ~ 154 (in Chinese with English abstract).
- Lu Yuanfa. 2004. GeoKit-A geochemical toolkit for Microsoft Excel [J]. *Geochimica*, 33 (5): 459 ~ 464 (in Chinese with English abstract).
- Luo Jincheng, Lai Shaocong, Qin Jiangfeng, *et al.* 2010. Geochemistry and geological significance of Late Triassic Yanzhiba Pluton from the southern Qinling orogenic belt [J]. *Geological Review*, 56 (6): 792 ~ 800 (in Chinese with English abstract).
- Miller C F, McDowell S M and Mapes R W. 2003. Hot and cold granites? Implications of zircon saturation temperatures and preservation of inheritance [J]. *Geology*, 31 : 529 ~ 532.
- Montel J M. 1993. A model for monazite/melt equilibrium and the application to the generation of granitic magmas [J]. *Chemical Geology*, 110 : 127 ~ 146.
- Qin Jiangfeng. 2010. Petrogenesis and Geodynamic Implications of the Late-Triassic Granitoids from the Qinling Orogenic Belt [D]. Northwest University (in Chinese with English abstract).
- Qin Jiangfeng, Lai Shaocong and Li Yongfei. 2007. Genesis of the Indosinian Guangtoushan adakitic biotite plagiogranite in the Mianxian-Lueyang (Mianlue) suture, South Qinling, China, and its tectonic implication [J]. *Geological Bulletin of China*, 26 (4): 466 ~ 471 (in Chinese with English abstract).
- Schmidt M W. 1992. Amphibole Composition in tonalite as a function of pressure: an Experimental calibration of the Al-in-Hornblende barometer [J]. *Contribution to Mineralogy and Petrology*, 110 : 304

- ~310.
- Thomas W M and Ernst W G. 1990. The aluminium content of hornblende in calc-alkaline granitic rocks: A mineralogical barometer calibrated experimentally to 12 kbar[A]. Spencer R J and Chou I M. Fluid-Mineral Interactions: A Tribute to HP Eugster[C], 2: 59~63.
- Wang Juan, Jin Qiang, Lai Shaocong, *et al.* 2008. Research of geochemistry and petrogenesis of the Wulong granites in the fuping region south Qinling mountain[J]. Journal of Mineralogy and Petrology, 28(1): 79~87 in Chinese with English abstract).
- Wang Xiaoxia and Lu Xinxiang. 2003. Mineralogical characteristics of Shahewan rapakivi textured granite in north Qinling and their petrological significance[J]. Acta Mineralogica Sinica, 23(1): 57~66 in Chinese with English abstract).
- Wang Xiaoxia, Wang Tao, Ilmari Happala, *et al.* 2005. Genesis of mafic enclaves from rapakivi textured granites in the Qinling and its petrological significance: Evidence of elements and Nd, Sr isotopes [J]. Acta Petrologica Sinica, 21(3): 935~946 in Chinese with English abstract).
- Wang Xiaoxia, Wang Tao and Lu Xinxiang. 2002. Characteristics of rapakivi texture in mesozoic Shahewan granite of North Qinling mountains and some related problems[J]. Acta geoscientia sinica, 23(1): 30~36 in Chinese with English abstract).
- Wang Xiaoxia, Wang Tao, Qi Qiuju, *et al.* 2011. Temporal-spatial variations, origin and their tectonic significance of the Late Mesozoic granites in the Qinling, Central China[J]. Acta Petrologica Sinica, 27(6): 1573~1593 in Chinese with English abstract).
- Watson E B and Harrison T M. 1983. Zircon saturation revisited: Temperature and composition effects in a variety of crustal magma types [J]. Earth and Planetary Science Letters, 64: 295~304.
- Whalen J B and Chappell B W. 1988. Opaque mineralogy and mafic mineral chemistry of I- and S-type granites of Lachlan fold belt, south-east Australia[J]. American Mineralogist, 73(3): 281~296.
- Xu Keqin, Sun Nai, Wang Dezi, *et al.* 1982. Characteristics of two different granite rock in South China[J]. Rocks, Minerals and Testing, 1(2): 1~12 in Chinese with English abstract).
- Yang Kai, Liu Shuwen, Li Qiugen, *et al.* 2009. LA-ICP-MS Zircon U-Pb Geochronology and Geological Significance of Zhashui Granitoids and Dongjiangkou Granitoids from Qinling, Central China[J]. Acta Scientiarum Naturalium Universitatis Pekinensis, 1: 36~42 (in Chinese with English abstract).
- Zhang Chengli, Wang Tao and 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 Chengli, Wang Xiaoxia, Wang Tao, *et al.* 2009. Origin of Shahewan granite intrusion in Eastern Qinling: Evidences from zircon U-Pb dating and Hf isotopes[J]. Journal of Northwest University (Natural Science Edition), 39(3): 453~463 in Chinese with English abstract).
- Zhang Guowei, Dong Yunpeng, Lai Shaocong, *et al.* 2003. Mianlue tectonic zone and Mianlue suture zone in southern edge of Qinling-Dabie orogenic belt[J]. Science in China(Series D), 33(12): 1121~1133 in Chinese with English abstract).
- Zhang Guowei, Zhang Benren, Yuan Xuecheng, *et al.* 2001. Qinling Orogenic Belt and Crustal Danimai[M]. Beijing: Science Press (in Chinese).
- Zhang Hongfei, Jin Lanlan, Zhang Li, *et al.* 2005. Basement and structural character constraints from geochemical and Pb-Sr-Nd isotope composition[J]. Science in china(Series D), 35(10): 914~926 in Chinese with English abstract).
- Zhang Zongqing, Zhang Guowei, Liu Duniy, *et al.* 2006. Isotopic Geochronology and Geochemistry of Ophiolites, Granites and Clastic Sedimentary Rocks in the Qinling Orogenic Belt[M]. Beijing: Geological Publishing House (in Chinese).
- Zhou Bin, Wang Fangyue, Sun Yong, *et al.* 2008. Geochemistry and tectonic affinity of Shahewan orogenic rapakivi from Qinling[J]. Acta Petrologica Sinica, 24(6): 1261~1272 in Chinese with English abstract).
- Zhou Wenge, Song Mianxin, Zhang Benren, *et al.* 1999. Chemical characteristics of syn-and post-collisional plutons in Qinling orogen [J]. Geology Geochemistry, 27(1): 27~32 in Chinese with English abstract).
- Zhou Zuoxia. 1986. The origin of intrusive mass in fengshandong, Hubei province[J]. Acta Petrologica Sinica, 2(1): 59~70 in Chinese with English abstract).

附中文参考文献

- 崔建堂, 赵长纆, 王炬川. 1999. 南秦岭东江口、柞水岩体岩石谱系单位划分及演化[J]. 陕西地质, 17(2): 7~15.
- 丁孝石. 1988. 西藏中南部各类花岗岩中黑云母标型特征及其地质意义[J]. 中国地质科学院矿床地质研究所所刊, 1: 33~50.
- 弓虎军, 朱赖民, 孙博亚, 等. 2009a. 南秦岭地体东江口花岗岩及其基性包体的锆石 U-Pb 年龄和 Hf 同位素组成[J]. 岩石学报, 25(11): 3029~3042.
- 弓虎军, 朱赖民, 孙博亚, 等. 2009b. 南秦岭沙河湾、曹坪和柞水岩体锆石 U-Pb 年龄、Hf 同位素特征及其地质意义[J]. 岩石学报, 25(2): 248~264.
- 姜常义, 安三元. 1984. 论火成岩中钙质角闪石的化学组成特征及其岩石学意义[J]. 矿物岩石, 3: 1~9.
- 雷敏. 2010. 秦岭造山带东部花岗岩成因及其与造山带构造演化关系[D]. 中国地质科学院.

- 刘春花,尹京武,吴才来,等. 2012. 新疆拜城县波孜果尔 A 型花岗岩类矿物学特征及岩浆形成的温度条件[J]. 岩石矿物学杂志, 31(4): 589~602.
- 卢欣祥,董 有,常秋玲,等. 1996. 秦岭印支期沙河湾奥长环斑花岗岩及其动力学意义[J]. 中国科学(D 辑), 26(3): 244~248.
- 卢欣祥,李明立,王 卫,等. 2008. 秦岭造山带的印支运动及印支期成矿作用[J]. 矿床地质, 27(6): 762~773.
- 卢欣祥,王晓霞,肖庆辉,等. 2003. 答“对秦岭奥长环斑花岗岩质疑”[J]. 地质论评, 49(2): 146~154.
- 路凤香,王春阳,胡宝群,等. 2003. 南秦岭下地壳组成及岩石圈的拆离俯冲作用[J]. 中国地质, 30(2): 113~118.
- 路远发. 2004. GeoKit: 一个用 VBA 构建的地球化学工具软件包[J]. 地球化学, 33(5): 459~464.
- 骆金诚,赖绍聪,秦江锋,等. 2010. 南秦岭晚三叠世胭脂坝岩体的地球化学特征及地质意义[J]. 地质论评, 56(6): 792~800.
- 秦江锋,赖绍聪,李永飞. 2007. 南秦岭勉县-略阳缝合带印支期光头山埃达克质花岗岩的成因及其地质意义[J]. 地质通报, 26(4): 466~471.
- 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.
- 王 娟,金 强,赖绍聪,等. 2008. 南秦岭佛坪地区五龙花岗质岩体的地球化学特征及成因研究[J]. 矿物岩石, 28(1): 79~87.
- 王晓霞,卢欣祥. 2003. 北秦岭沙河湾环斑结构花岗岩的矿物学特征及其岩石学意义[J]. 矿物学报, 23(1): 57~66.
- 王晓霞,王 涛,Ilmari Hapala,等. 2005. 秦岭环斑结构花岗岩中暗色包体的岩浆混合成因及岩石学意义——元素和 Nd、Sr 同位素地球化学证据[J]. 岩石学报, 21(3): 935~946.
- 王晓霞,王 涛,卢欣祥. 2002. 北秦岭中生代沙河湾岩体环斑结构特征及有关问题的讨论[J]. 地球学报, 23(1): 30~36.
- 王晓霞,王 涛,齐秋菊,等. 2011. 秦岭晚中生代花岗岩时空分布、成因演变及其构造意义[J]. 岩石学报, 27(6): 1573~1593.
- 徐克勤,孙 翥,王德滋,等. 1982. 华南两类不同成因花岗岩岩石学特征[J]. 岩石矿物及测试, 1(2): 1~12.
- 杨 恺,刘树文,李秋根,等. 2009. 秦岭柞水岩体和东江口岩体的锆石 U-Pb 年代学及其意义[J]. 北京大学学报(自然科学版), 1: 36~42.
- 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.
- 张成立,王晓霞,王 涛,等. 2009. 东秦岭沙河湾岩体成因—来自锆石 U-Pb 定年及其 Hf 同位素的证据[J]. 西北大学学报(自然科学版), 39(3): 453~465.
- 张国伟,董云鹏,赖绍聪等. 2003. 秦岭-大别造山带南缘略构造带与勉略缝合带[J]. 中国科学(D 辑: 地球科学), 33(12): 1121~1135.
- 张国伟,张本仁,袁学城,等. 2001. 秦岭造山带与大陆动力学[M]. 北京: 科学出版社.
- 张宏飞,靳兰兰,张 利,等. 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(D 辑), 35(10): 914~926.
- 张宗清,张国伟,刘敦一,等. 2006. 秦岭造山带蛇绿岩、花岗岩和碎屑沉积岩同位素年代学和地球化学[M]. 北京: 地质出版社.
- 周 滨,汪方跃,孙 勇,等. 2008. 秦岭沙河湾造山带型环斑花岗岩地球化学及构造属性讨论[J]. 岩石学报, 24(6): 1261~1272.
- 周文戈,宋绵新,张本仁,等. 1999. 秦岭造山带碰撞后侵入岩地球化学特征[J]. 地质地球科学, 27(1): 27~32.
- 周作侠. 1986. 湖北丰山洞岩体成因探讨[J]. 岩石学报, 2(1): 59~70.