

西秦岭西段曲如沟花岗闪长岩年代学、地球化学特征及构造意义研究

杨拴海¹, 李瑞保^{1,2}, 王伟峰¹, 魏立勇¹, 李飞¹, 刘满年¹, 赵长存¹, 董俊超¹

(1. 中国人民武装警察黄金部队第五支队, 陕西 西安 710100; 2. 长安大学地球科学与资源学院, 陕西 西安 710054)

摘要: 曲如沟花岗闪长岩位于西秦岭造山带西段, 侵位于中下三叠统隆务河组, 主要岩性为灰白色细粒块状花岗闪长岩。岩石地球化学特征显示岩体具有高硅(66.08%~72.22%)、富钠(4.61%~5.01%)、准铝(A/CNK 为 1.04~1.11)高钾钙碱性 I 型花岗岩特征。岩体稀土总量为 $99.41 \times 10^{-6} \sim 154.85 \times 10^{-6}$, $LREE = 87.33 \times 10^{-6} \sim 143.67 \times 10^{-6}$, $HREE = 11.08 \times 10^{-6} \sim 12.65 \times 10^{-6}$, $LREE/HREE$ 值为 7.23~12.85, 具弱负 Eu 异常, 在球粒陨石标准化稀土元素配分曲线图解上表现出轻稀土富集、重稀土显著亏损的特征。在原始地幔标准化微量元素蛛网图左端大离子亲石元素(Cs、Rb、Ba、Th)明显富集, 曲线右端高场强元素(Nb、Ta、P)明显亏损, 具有弧或碰撞型花岗岩微量元素特征。研究岩石成因表明岩石源区为下地壳变基性岩石, 为岩石圈拆沉、幔源基性岩浆底侵导致下地壳变基性岩石部分熔融形成的产物, 并发生了一定程度的壳幔岩浆混合作用。该岩体 LA-ICP-MS 锆石 U-Pb 年龄为 (224.1 ± 2.4) Ma (MSWD=2.4), 形成于晚三叠世。结合区域资料, 认为西秦岭造山带西段于印支晚期(224 Ma)古特提斯洋已经关闭, 进入到后碰撞构造演化阶段。

关键词: 西秦岭; 花岗闪长岩; 后碰撞; 锆石 U-Pb 年龄; 地球化学

中图分类号: P588.124; P597.3 **文献标志码:** A **文章编号:** 1009-6248(2015)02-0057-16

Geochronology, Geochemical Characteristics and Tectonic Significance of Qurugou Granodiorite in Western Section of West Qinling Orogen

YANG Shuanhai¹, LI Ruibao^{1,2}, WANG Weifeng¹, WEI Liyong¹, LI Fei¹,
LIU Mannian¹, ZHAO Changcun¹, DONG Junchao¹

(1. No. 5 Gold Geological Party of Chinese People's Armed Police Force, Xi'an 710100, Shaanxi, China;

2. School of Earth Science and Resources, Chang'an University, Xi'an 710054, Shaanxi, China)

Abstract: Qurugou granodiorite is located in the western part of the western Qinling orogenic belt, and intrudes into the Lower Triassic Longwuhe formation. Field investigation demonstrates that the intrusion is mainly composed of off-white fine-grained massive granodiorite. Geochemical

收稿日期: 2014-05-11; 修回日期: 2015-03-31

基金项目: 中国地质调查局地质矿产调查基金项目(1212011220660), 中央高校基本科研业务费专项资金项目(CHD2011TD020, 2013G1271091, 2013G1271092)

作者简介: 杨拴海(1965-), 男, 陕西省白水人, 教授级高工, 学士, 从事固体矿产勘查工作。E-mail: 664522878@qq.com

data shows that the granodiorites are high-K calc-alkaline series, characterized by high content of SiO_2 (66.08%—72.22%), K-rich (4.61%—5.01%) and quasi-aluminous ratio ($A/\text{CNK} = 1.04$ —1.11). The content of REE, LREE, HREE and the ratio of LREE/HREE are respectively within the range of 99.41×10^{-6} — 154.85×10^{-6} , 87.33×10^{-6} — 143.67×10^{-6} , 11.08×10^{-6} — 12.65×10^{-6} , and 7.23—12.85. The chondrite-normalized REE pattern shows right-dipped incline and weak negative Eu anomaly. The Qurugou granodiorites are obviously rich in LILE including Cs, Rb, Ba, Th, etc., and depleted in HSE such as Nb, Ta, P, similar to magmatic arc or collision-type granite, belonging to high-K calc-alkaline I-type granites. The petrogenesis research shows that the source is the lower crust metabasalt, and the intrusion is the product of crust-mantle magma mingling, owing to the lithosphere delamination. According to the geochemistry and the trace element discrimination for tectonic interpretation, the granodiorites are considered to be the post-collision type. LA-ICP-MS zircon U-Pb dating reveals that the crystallization age of Qurugou granodiorites is $224.1 \pm 2.4 \text{ Ma}$ ($\text{MSWD} = 2.4$), which indicates that the granodiorites formed in Late Triassic. Combining with regional geological data, it is considered that the Paleotethys in the western part of the western Qinling area closed in late Indosinian (224Ma), and entered into the post-collision tectonic evolution stage.

Keywords: west Qinling; granodiorite; post-collision; zircon U-Pb age; geochemistry

花岗质岩石的形成和侵位过程是大陆造山带形成演化中极为重要的问题,与板块构造和地球动力学有着密切的关系,长期以来一直被用来研究地球深部物质组成、大陆地壳生长及壳幔相互作用等科学问题(王涛,2000;肖庆辉等,2007;Bonin,2007;Chappell,2012)。西秦岭造山带位于青藏高原北缘和中央造山系西段,是中央造山系的重要组成部分。西秦岭造山带出露较多的花岗质岩石和面积分布的中下三叠统隆务河组重力流沉积及蛇绿岩,记录着西秦岭地区与原特提斯洋和古特提斯洋密切相关的洋壳俯冲、陆-陆(弧)碰撞和后碰撞等构造事件,也是长期以来地质学家们研究的重点与焦点(王秉璋等,2000;王毅志等,2001;张国伟等,2001;裴先治等,2005;陈岳龙等,2008,2009;许志琴等,2013)。学者对西秦岭造山带东段多个岩体(张宏飞等,2005;李佐臣等,2013)研究,表明秦岭造山带于印支晚期进入由同碰撞向后碰撞转化的构造阶段,为下地壳拆沉、陆壳断离幔源岩浆底侵导致下地壳部分熔融的产物。西秦岭造山带西段共和盆地周缘出露多个规模大小不等的印支期花岗岩体。例如,黑马河岩体、大河坝岩体、江西沟岩体、温泉岩体、同仁岩体、塔洞岩体、曲如沟岩体等。这些岩体因其产于东

昆仑与西秦岭及北祁连等多个造山带的交接转换关键部位,成为记录多个块体地壳深部性质、印支期多金属成矿事件及印支期地球动力学信息的重要载体。

前人对黑马河岩体和温泉岩体进行了详细的年代学与地球化学研究。张宏飞等(2006)报道共和盆地北缘黑马河花岗闪长岩体锆石 U-Pb 年龄为 235 Ma,形成于俯冲陆壳断离的地球动力学背景,温泉花岗闪长岩体锆石 U-Pb 年龄为 218 Ma,形成于中央造山系在地壳加厚作用后岩石圈拆沉的地球动力学背景。笔者拟对侵入于中下三叠统隆务河群的曲如沟花岗闪长岩体开展详细的地质学、锆石 U-Pb 同位素年代学和岩石地球化学研究,以期揭示其岩石成因及构造属性,对恢复重建西秦岭造山带西段印支期构造格架及地球动力学过程均具有重要的理论意义。

1 区域地质背景及岩体地质特征

1.1 区域地质背景

研究区地理位置处于青海省海南州兴海—同德一带(图 1a,图 1b),构造位置位于中央造山系西段

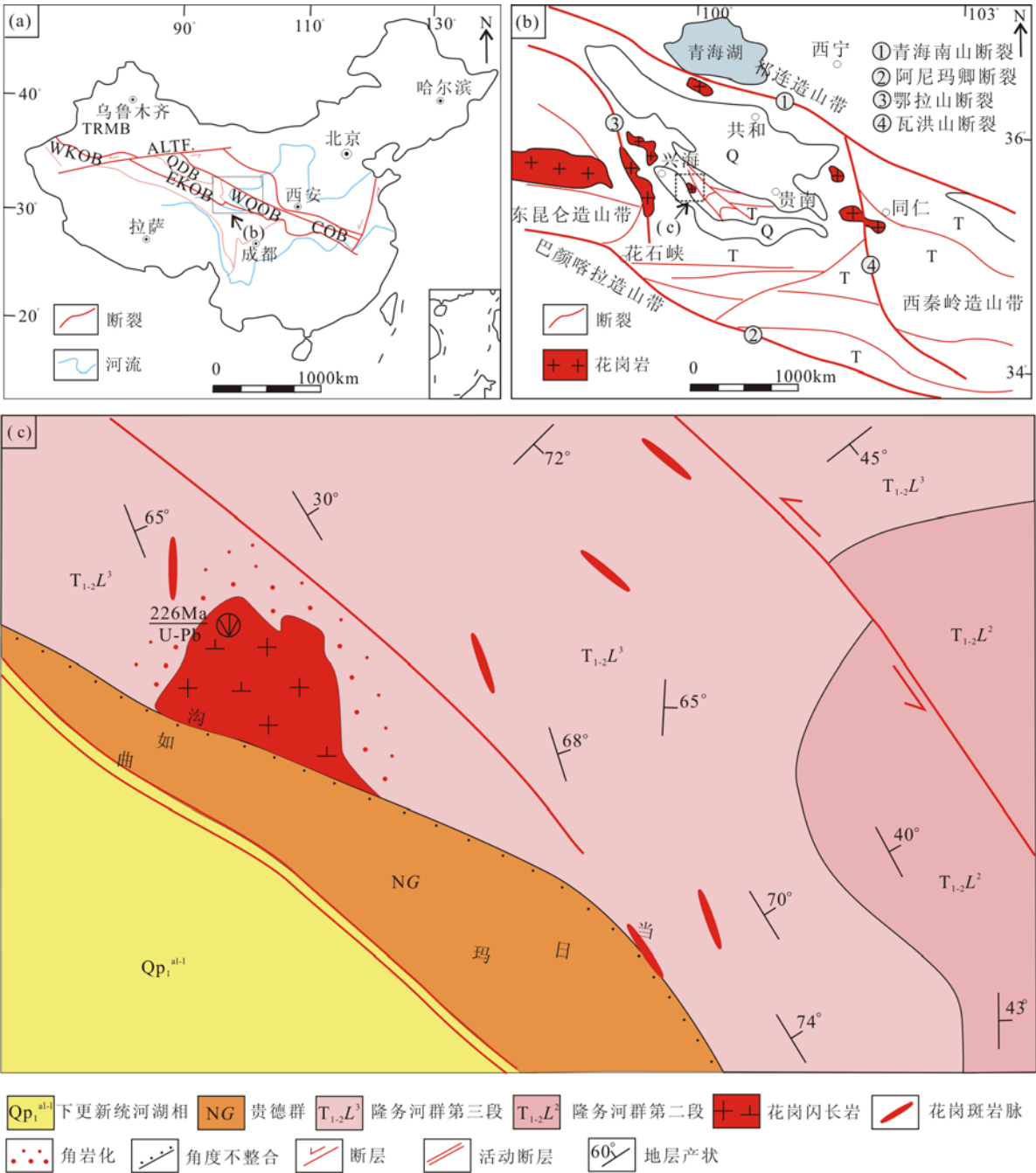


图 1 中央造山系构造格架简图(a);西秦岭—东昆仑构造简图(b);曲如沟花岗闪长岩体地质简图(c)

Fig. 1 The tectonic framework of central orogenic belt(a); The tectonic background of West Qinling-East Kunlun area(b); The simplified geological map of Qurugou granodiorite(c)

的西秦岭、东昆仑及祁连造山带构造交接转换的结点区域(张国伟等,2004)(图 1a,图 1b),具有独特的物质组成与复杂的造山带结构,成为解决东昆仑与西秦岭中生代洋陆转换不可多得的研究区域。西秦岭西段以青海南山断裂为界与祁连造山带相隔,南以阿尼玛卿蛇绿混杂岩带为界与巴颜喀拉造山带相

邻,西侧过鄂拉山走滑断裂则归属于东昆仑造山带和柴达木地块(图 1b)。研究区现今主导构造面貌主要形成于中国大陆印支主拼合期,并叠加燕山期与鄂拉山构造相关的北西向构造,新生代则受青藏高原隆升向东逃逸的叠加改造终成今日之格局。区域上主要出露元古宙结晶基底、二叠系甘家组、中下

三叠统隆务河组和侏罗系羊曲组以及新生代新近系贵德群。其中,隆务河组是西秦岭造山带出露面积最大的地层(图 1b),主要为一套发育于大陆斜坡半深海重力流沉积,利用其中砂岩碎屑锆石 U-Pb 年龄限制隆务河群沉积时代的下限为 248 Ma^①。西秦岭造山带西段还出露有多个呈面状分布的花岗岩体。例如,大河坝岩体、黑马河岩体、温泉岩体、同仁岩体及笔者新发现的曲如沟岩体。笔者重点对兴海县曲如沟花岗闪长岩体进行研究(图 1c),以恢复西秦岭造山带印支期构造格架及地球动力学过程。

1.2 岩体地质特征

曲如沟花岗闪长岩体位于兴海县黄河东侧曲如沟一带(图 1c),主体侵位于中下三叠统隆务河组第三岩性段中,南侧被新近系贵德群紫红色砂砾岩层角度不整合覆盖。岩体平面呈不规则状,出露面积约 1 km²,主体岩性为灰白色中细粒块状花岗闪长岩。因受岩体影响围岩发生了明显的热接触变质作用,泥质板岩发生明显的角岩化现象。围岩中见较多的同期次花岗脉体贯入。

此外,岩体中还见有围岩泥质板岩俘虏体(图 2b)和岩浆混合作用形成的暗色辉长闪长质微粒包体(图 2c、图 2d)。泥质板岩俘虏体长轴大小约 10~20 cm,大者约 40 cm。辉长闪长质包体大小约 5~15 cm,部分包体与寄主岩花岗闪长岩接触界线截然(图 2c),部分包体与寄主岩接触界线呈渐变状(图 2d),反映了岩浆混合作用发生时基性端元与酸性端元不同的热学状态。

曲如沟花岗闪长岩体手标本新鲜面呈灰-灰白色,具中细粒花岗结构(图 2e),块状构造,主要矿物组成为斜长石(45%~55%)、石英(20%~25%)、钾长石(5%~10%)、角闪石(5%±)、黑云母(5%±)及极少量磷灰石、锆石、磁铁矿等副矿物。其中,斜长石呈板条状,大小约 2~3 mm,具不明显的环带构造(图 2f),核部弱绢云母化(图 2d)、绿帘石化;钾长石呈板状、粒状,自形程度不及斜长石,大小约 1~3 mm。石英呈他形粒状分布于较自形的斜长石颗粒之间(图 2d),黑云母呈鳞片状。岩石蚀变主要表现为长石的高岭土化及绢云母化。

2 测试方法

样品分别进行主量元素和微量元素分析。样品磨碎至 200 目后,在西北大学大陆动力学国家重点实验室进行主量和微量元素分析测试。主量元素使用 X-射线荧光光谱仪(XRF-2100)法测试,精度优于 2%~3%。微量元素及稀土元素利用酸溶法制备样品,使用美国 PE 公司的 ELAN6100DRC 型 ICP-MS 测定,分析精度优于 10%。

锆石 U-Pb 同位素测试在西北大学大陆动力学国家重点实验室的 LA-ICP-MS 仪器上用标准测定程序进行。分析仪器为 Elan6100DRC 型四级杆质谱仪和 Geolas200M 型激光剥蚀系统,激光器为 193nmARF 准分子激光器。激光剥蚀斑束直径为 30 μm,激光剥蚀深度为 20~40 μm。

锆石年龄计算采用国际校准锆石 91500 作为外标,元素含量采用美国国家标准物质局人工合成硅酸盐玻璃 NIST610 作为外标,²⁹Si 作为内标元素进行校正。

样品的同位素比值和元素含量采用 GLITTER(4.0 版本,Macquarie University)程序处理,并采用 Anderson(2002)软件对测试数据进行普通铅校正,年龄计算及谐和图绘制采用 Isoplot(2.49 版)(Ludwig, 2003)软件完成。详细的实验原理和测试流程及仪器参见相关文献(Yuan et al., 2004)。

3 地球化学特征

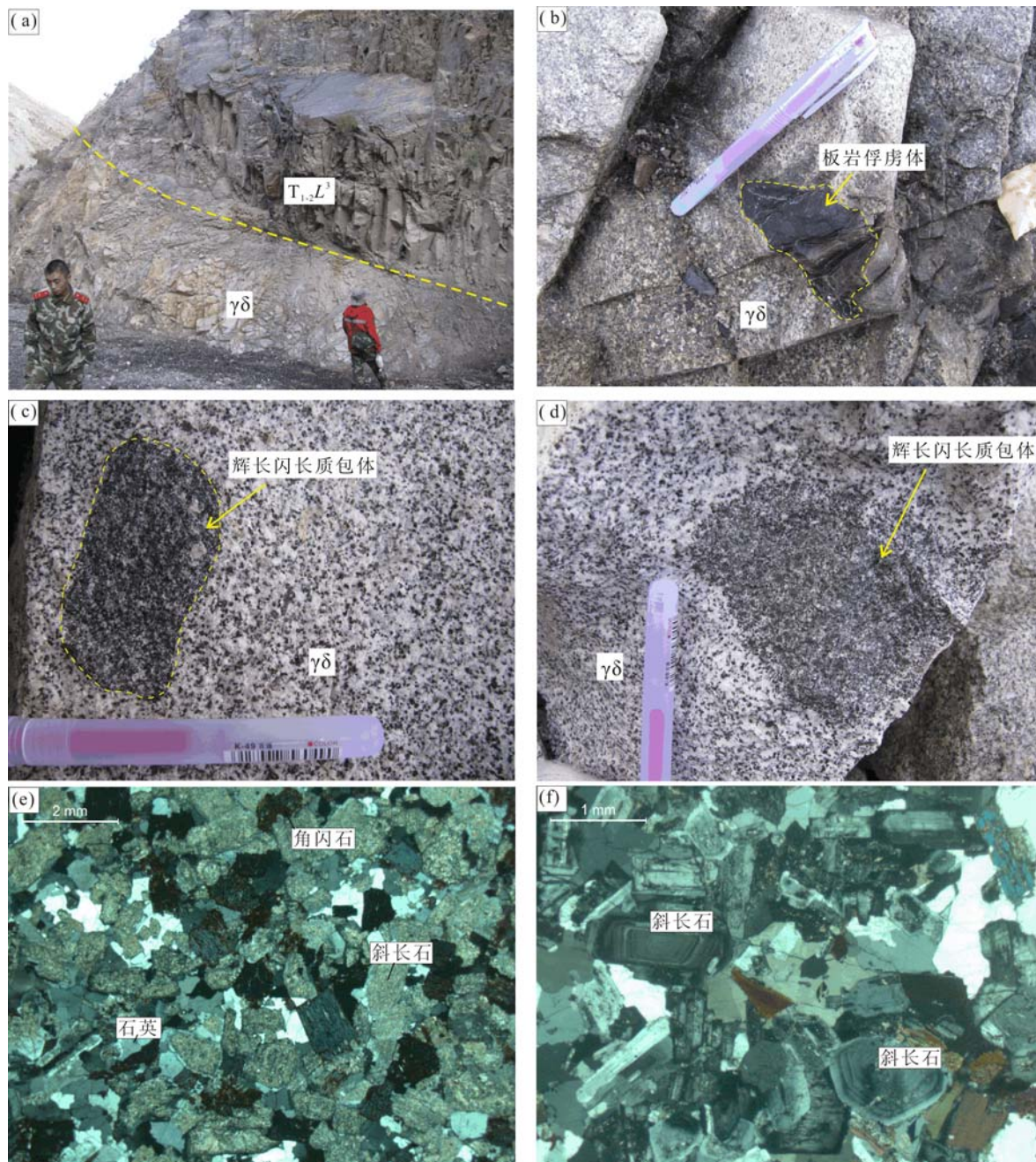
3.1 主量元素地球化学

曲如沟花岗岩闪长岩的主量元素分析结果见表 1。曲如沟花岗岩体的 SiO₂ 含量较为稳定,含量为 62.49%~64.39%,平均为 63.08%,属于中性岩;TiO₂ 含量较低,为 0.65%~0.75%,平均为 0.69%;Na₂O 和 K₂O 的含量分别为 3.16%~3.30 和 2.44%~2.58%,全碱(Na₂O+K₂O)含量为 5.71%~5.84%,平均为 5.77%,Na₂O/K₂O 值为 1.24~1.35,平均为 1.29,具有 I 型花岗岩的特

①魏立勇,李瑞保. 青海海南州塔秀一曲什安地区四幅 1:5 万区域地质矿产调查报告,2015.

征。里特曼指数 σ 为 1.56~1.75, 均小于 3, 表明岩石类型为钙碱性系列, 在 $\text{SiO}_2 - \text{K}_2\text{O}$ 图解(图 3a)中, 所有样品均落入高钾钙碱性系列范围内。 Al_2O_3 含量为 16.61%~17.10%, 平均为 16.78%, A/CNK 值主体小于 1.0 (0.96~1.01),

平均为 0.99, 在 $\text{A/CNK} - \text{A/NK}$ 图解(图 3b)中, 样品点主体落在准铝质区域, 具 I 型花岗岩特征。 TFe_2O_3 和 MgO 的含量分别为 4.80%~5.69% 和 1.83%~2.18%。总之曲如沟花岗岩体总体具有富 Na、低 K、准 Al 的高钾钙碱性花岗岩特征。



a. 花岗闪长岩侵入于隆务河群含碳泥质板岩层; b. 花岗闪长岩中板岩俘虏体; c. 花岗闪长岩中暗色辉长闪长质包体, 包体与寄主岩界线截然; d. 花岗闪长岩中暗色辉长闪长质包体, 包体与寄主岩界线渐变; e. 花岗闪长岩镜下照片(正交偏光), 花岗结构; f. 花岗闪长岩镜下照片(正交偏光), 斜长石环带结构

图2 曲如沟花岗闪长岩体岩石学特征图

Fig. 2 Photos of Qurugou granodiorite in the West Qinling area showing the field contact relationship and features

表 1 曲如沟花岗闪长岩的主量(%)、稀土元素和微量元素(10^{-6})测试结果表Tab. 1 Results of major elements(%), trace elements and rare earth elements(10^{-6}) from the Qurugou granodiorite

Sample	DQ02-1	DQ02-2	DQ02-3	DQ02-4	DQ02-5	DQ02-7	DQ02-8	DQ02-9	DQ02-10	DQ02-11
SiO ₂	62.57	62.68	62.69	62.85	63.54	62.96	62.49	62.78	63.82	64.39
TiO ₂	0.67	0.75	0.69	0.69	0.71	0.70	0.70	0.68	0.65	0.65
Al ₂ O ₃	16.73	16.65	16.85	16.81	16.61	16.84	17.10	16.83	16.75	16.66
TF ₂ O ₃	5.07	5.69	5.29	5.28	5.30	5.26	5.34	5.26	4.89	4.80
MnO	0.07	0.08	0.08	0.08	0.08	0.07	0.08	0.08	0.07	0.07
MgO	1.93	2.18	2.03	2.04	2.09	2.02	2.07	2.06	1.83	1.84
CaO	5.24	4.72	5.02	4.88	4.84	4.86	4.84	4.85	4.72	4.84
Na ₂ O	3.16	3.20	3.30	3.26	3.22	3.27	3.26	3.30	3.25	3.27
K ₂ O	2.55	2.56	2.44	2.49	2.51	2.51	2.58	2.55	2.55	2.51
P ₂ O ₅	0.14	0.15	0.15	0.15	0.15	0.14	0.15	0.15	0.14	0.14
LOI	1.41	1.43	1.01	1.03	1.17	1.13	0.95	1.08	0.91	0.85
Total	99.54	100.09	99.55	99.56	100.22	99.76	99.56	99.62	99.58	100.02
N ₂ O/K ₂ O	1.24	1.25	1.35	1.31	1.28	1.30	1.26	1.29	1.27	1.30
N ₂ O+K ₂ O	5.71	5.76	5.74	5.75	5.73	5.78	5.84	5.85	5.80	5.78
σ	1.67	1.69	1.67	1.67	1.60	1.67	1.75	1.73	1.62	1.56
A/CNK	0.96	1.00	0.98	0.99	0.99	0.99	1.01	0.99	1.00	0.99
A/NK	2.10	2.07	2.09	2.09	2.07	2.08	2.10	2.05	2.07	2.06
Li	41.72	50.86	48.81	45.58	45.23	46.41	46.10	44.69	48.67	46.76
Be	2.22	2.13	2.15	2.14	2.17	2.19	2.26	2.12	2.29	2.23
Cr	17.31	19.43	17.91	32.20	18.91	36.78	15.31	16.78	16.96	14.99
Co	12.85	13.95	12.77	12.67	12.67	12.58	12.78	12.67	12.10	11.87
Ni	5.63	6.75	6.09	13.05	5.76	17.03	4.66	5.31	5.50	4.68
Cu	5.37	4.83	3.77	3.87	4.14	3.87	3.87	3.75	3.97	3.57
Zn	70.91	72.61	66.45	66.09	70.91	68.00	71.52	70.26	66.21	62.19
Ga	20.52	20.92	20.59	20.34	20.61	20.87	20.74	20.58	20.54	20.27
Rb	92.12	94.42	87.19	87.39	91.87	92.82	93.76	89.82	90.87	88.33
Sr	396.31	392.49	402.62	398.39	392.47	423.68	404.95	404.12	400.43	402.01
Y	18.59	18.07	18.98	18.29	18.58	17.00	19.38	18.71	15.74	16.22
Nb	10.89	11.84	11.02	10.92	11.12	11.21	11.21	10.91	10.57	10.37
V	50.72	54.81	51.39	50.24	50.32	50.03	51.55	49.59	44.37	44.37
Cs	5.16	4.94	4.08	4.30	4.49	4.78	4.93	5.37	3.90	3.43
Ba	620.10	691.56	645.15	649.29	639.29	655.90	643.88	630.98	633.42	631.22
Hf	4.37	4.18	4.47	3.98	4.43	4.11	4.43	4.78	4.13	3.60
Ta	0.75	0.77	0.74	0.75	0.77	0.76	0.85	0.76	0.76	0.72
Pb	14.64	12.94	12.43	12.28	14.19	12.60	14.81	13.34	13.51	13.80
Th	8.82	9.15	8.65	8.22	10.54	7.04	6.20	8.32	9.01	10.31

续表 1										
Sample	DQ02-1	DQ02-2	DQ02-3	DQ02-4	DQ02-5	DQ02-7	DQ02-8	DQ02-9	DQ02-10	DQ02-11
U	2.09	2.00	1.95	1.97	2.26	1.86	2.54	2.44	2.03	1.81
Zr	171.54	167.60	179.96	155.37	175.88	168.38	174.11	191.58	164.67	139.88
La	30.11	31.88	29.96	25.75	33.62	23.73	18.89	26.74	29.61	35.04
Ce	60.48	64.28	60.00	54.04	66.45	48.78	39.45	54.84	58.00	68.15
Pr	6.63	7.15	6.66	6.13	7.32	5.52	4.73	6.25	6.44	7.50
Nd	24.64	26.40	25.00	22.79	26.80	20.94	18.90	23.69	23.48	26.99
Sm	4.73	4.81	4.83	4.50	4.96	4.13	4.16	4.73	4.40	4.79
Eu	1.23	1.21	1.23	1.21	1.21	1.22	1.20	1.23	1.20	1.20
Gd	4.14	4.14	4.23	3.94	4.23	3.63	3.71	4.05	3.75	4.03
Tb	0.58	0.57	0.59	0.56	0.58	0.52	0.56	0.58	0.51	0.54
Dy	3.31	3.22	3.42	3.26	3.25	3.00	3.30	3.30	2.86	2.93
Ho	0.60	0.59	0.62	0.60	0.61	0.55	0.62	0.61	0.51	0.53
Er	1.72	1.69	1.74	1.68	1.73	1.56	1.78	1.70	1.40	1.47
Tm	0.24	0.23	0.24	0.23	0.24	0.22	0.25	0.24	0.20	0.21
Yb	1.52	1.49	1.58	1.51	1.54	1.40	1.63	1.53	1.26	1.30
Lu	0.23	0.22	0.23	0.22	0.23	0.21	0.23	0.23	0.19	0.19
ΣREE	140.18	147.87	140.33	126.43	152.77	115.40	99.41	129.71	133.83	154.85
ΣLREE	127.82	135.72	127.68	114.42	140.35	104.31	87.33	117.47	123.14	143.67
ΣHREE	12.36	12.15	12.65	12.01	12.42	11.08	12.08	12.24	10.69	11.18
ΣLREE/ΣHREE	10.34	11.17	10.09	9.53	11.30	9.41	7.23	9.60	11.52	12.85
δEu	0.83	0.81	0.81	0.86	0.79	0.94	0.92	0.84	0.88	0.81
(La/Yb) _N	13.32	14.44	12.82	11.46	14.70	11.44	7.81	11.76	15.79	18.21
(La/Sm) _N	4.01	4.17	3.90	3.60	4.26	3.62	2.85	3.56	4.23	4.61
Sr/Y	21.32	21.72	21.22	21.78	21.12	24.92	20.89	21.60	25.43	24.79
Nb/Ta	14.54	15.39	14.88	14.51	14.38	14.79	13.11	14.39	13.93	14.42
La/Nb	1.19	1.17	1.17	1.08	1.32	0.97	0.77	1.11	1.31	1.54

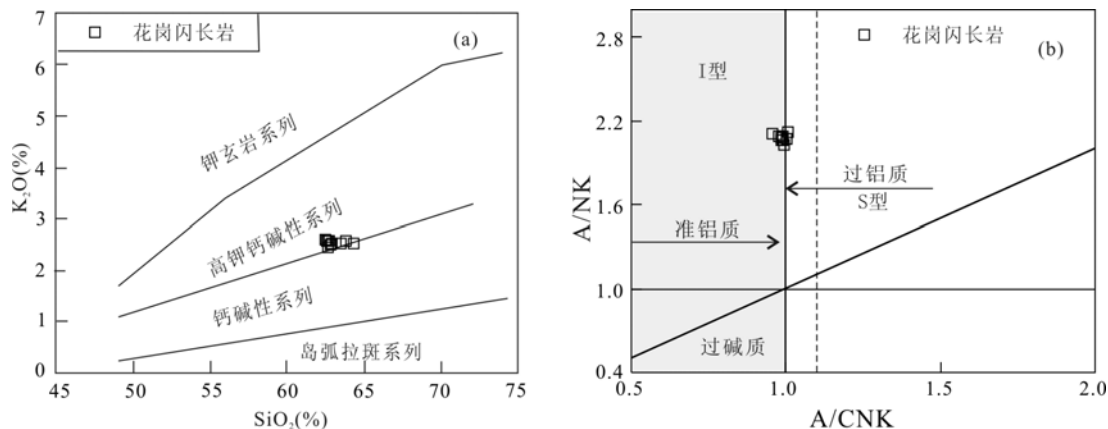


图 3 曲如沟花岗闪长岩的 SiO₂-K₂O 图解(a)和 A/CNK-A/NK 图解(b)
(图 a 据 Rickwood,1989; 图 b 据 Maniar and Piccoli, 1989)

Fig. 3 SiO₂-K₂O diagram (a) and A/CNK-A/NK diagram (b) of Qurugou granodiorite

3.2 稀土元素、微量元素特征

曲如沟花岗闪长岩的稀土元素和微量元素分析结果见表 1。岩体的稀土总量 $\Sigma \text{REE} = 99.41 \times 10^{-6} \sim 154.85 \times 10^{-6}$, 轻稀土 $\text{LREE} = 87.33 \times 10^{-6} \sim 143.67 \times 10^{-6}$, 重稀土 $\text{HREE} = 11.08 \times 10^{-6} \sim 12.65 \times 10^{-6}$, LREE/HREE 值为 $7.23 \sim 12.85$, 表明岩石轻重稀土元素分馏较强。 $(\text{La}/\text{Yb})_N$ 变化较大, 为 $7.81 \sim 18.21$, 平均为 13.18 。 δEu 为 $0.79 \sim 0.94$, 平均为 0.85 , 具弱的负 Eu 异常, 表明岩浆源区残留有少量的斜长石晶体。在球粒陨石标准化稀土元素配分曲线图解上(图 4a), 样品表现出轻稀土富集、重稀土显著亏损的曲线平滑的右倾特征, 曲线具有不明显的 Eu 谷, 在配分曲线上还可以看出轻

稀土较重稀土内部分异更明显。

微量元素特征方面, Sr 含量为 $392.49 \times 10^{-6} \sim 423.68 \times 10^{-6}$, 平均为 401.75×10^{-6} ; Y 含量为 $15.74 \times 10^{-6} \sim 19.38 \times 10^{-6}$, 平均为 17.96×10^{-6} , Sr/Y 值为 $20.89 \sim 25.43$, 平均为 22.48 。Yb 含量为 $1.30 \times 10^{-6} \sim 1.63 \times 10^{-6}$, 平均为 1.48×10^{-6} 。在原始地幔标准化微量元素蛛网图(图 4b)上, Cs、Rb、Ba、Th、U 等大离子亲石元素明显富集, 高场强元素(Nb、Ta、P)和 Ti 明显亏损, Nb、Ta、Ti 的亏损表明岩浆源区岩石是以陆壳组分为主。此外, 微量元素蛛网图从左向右随着元素不相容性逐渐降低, 元素含量整体上也逐渐降低, 曲线总体呈右倾状。

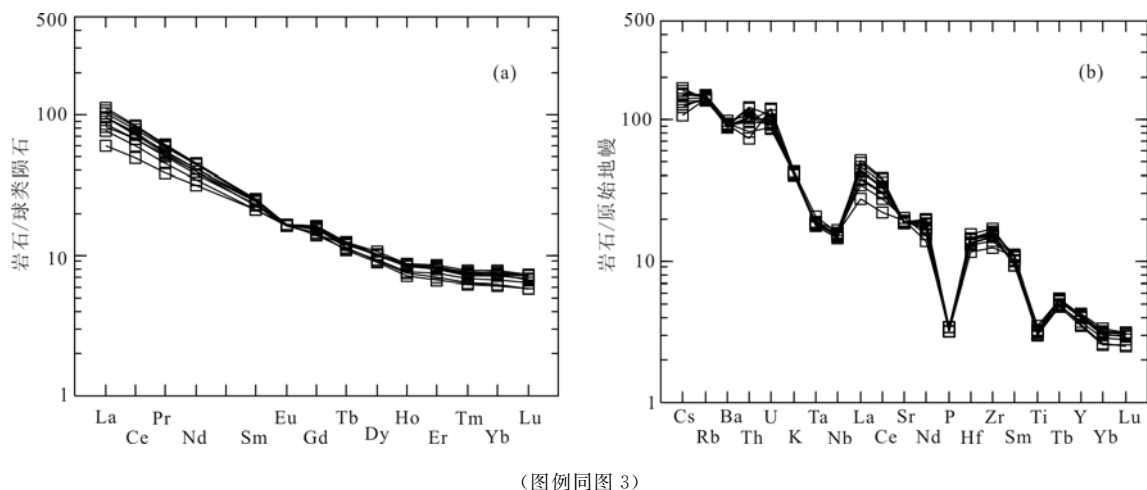


图 4 曲如沟花岗闪长岩球粒陨石标准化 REE 配分模式图(a)和原始地幔标准化微量元素蛛网图(b)
(球粒陨石标准化数据据 Boynton, 1984);原始地幔标准化数据据 Sun and McDonough, 1989)

Fig. 4 Chondrite-normalized REE pattern (a) and primitive mantle-normalized trace elements spidergram (b) for Qurugou granodiorite

4 LA-ICP-MS 锆石 U-Pb 年代学特征

为了精确限定曲如沟花岗闪长岩的形成时代, 对该岩体(样品 DQ2-5)进行高精度 LA-ICP-MS 锆石 U-Pb 同位素年代学研究。采样地理坐标为 $N35^{\circ}31'53''$, $E100^{\circ}11.47'$ 。

样品 DQ2-5 中的锆石为无色透明或浅黄色, 呈短柱状或长柱状, 锆石的自形程度较好, 晶体长度在 $80 \sim 180 \mu\text{m}$, 宽度为 $30 \sim 80 \mu\text{m}$, 长宽比为 $2:1 \sim 4:1$, 锆石均具有明显的岩浆韵律环带和明暗相间的条带结构(图 5), 表明锆石为岩浆成因(Belousova et al., 2002; 吴元保, 2004)。本次共测试 25 个点,

测试结果见表 1。

由测试结果可以看出, 锆石年龄可以分为 3 组: 第 1 组有一个测点, 为 DQ2-5-19, 测点的 $^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$ 年龄较小, 为 $(204 \pm 4)\text{Ma}$; 第二组年龄有 6 个测点, 分别为 DQ2-5-1、DQ2-5-2、DQ2-5-3、DQ2-5-8、DQ2-5-11、DQ2-5-22, 测点的 $^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$ 年龄为 $(238 \pm 3) \sim (263 \pm 4)\text{Ma}$, 相对较大, 可能为捕获锆石的年龄; 第三组年龄有 18 个测点, 测点的 $^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$ 和 $^{207}\text{Pb}/^{235}\text{U}$ 谐和性较好(图 6a), $^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$ 加权平均年龄为 $(224.1 \pm 2.4)\text{Ma}$ ($\text{MSWD} = 2.4$)(图 6b), 该组年龄应该代表岩体的结晶年龄。

因此, 笔者将曲如沟花岗闪长岩的结晶年龄确定为 $(224.1 \pm 2.4)\text{Ma}$, 为晚三叠世。

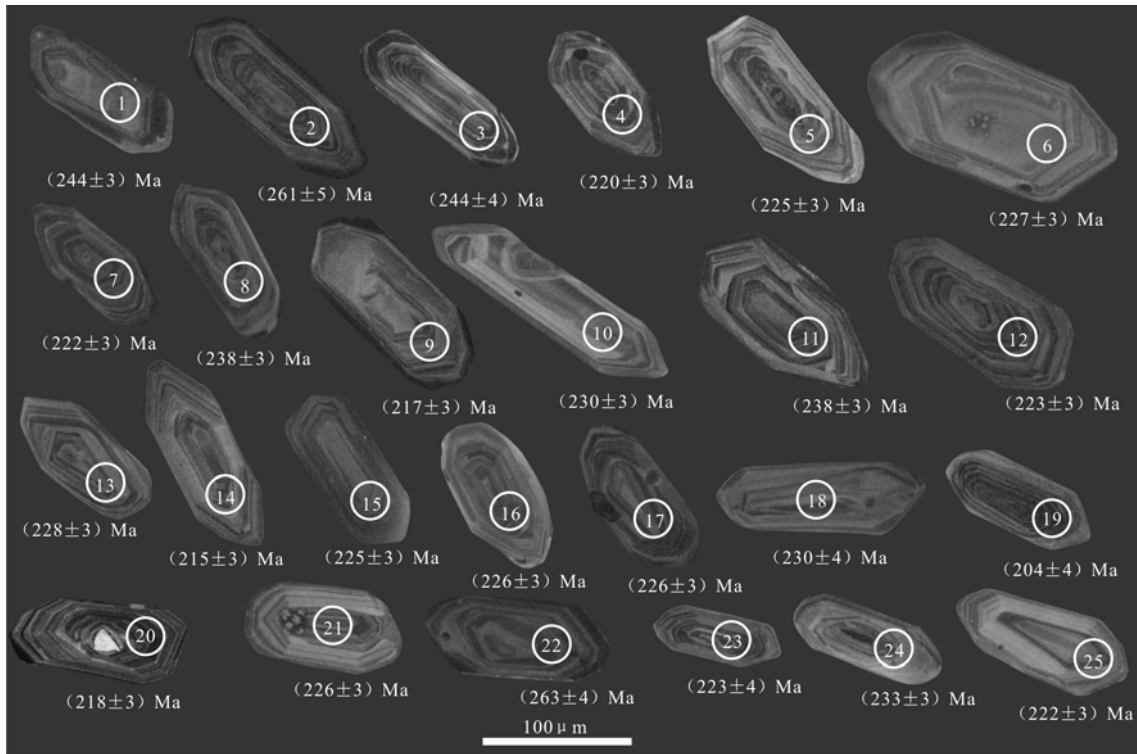


图 5 曲如沟花岗闪长岩单颗粒锆石阴极发光(CL)图像及其表面年龄图(Ma)

Fig. 5 Cathodoluminescence photos of typical single-crystal zircons and their apparent ages(Ma) from Qurugou granodiorite

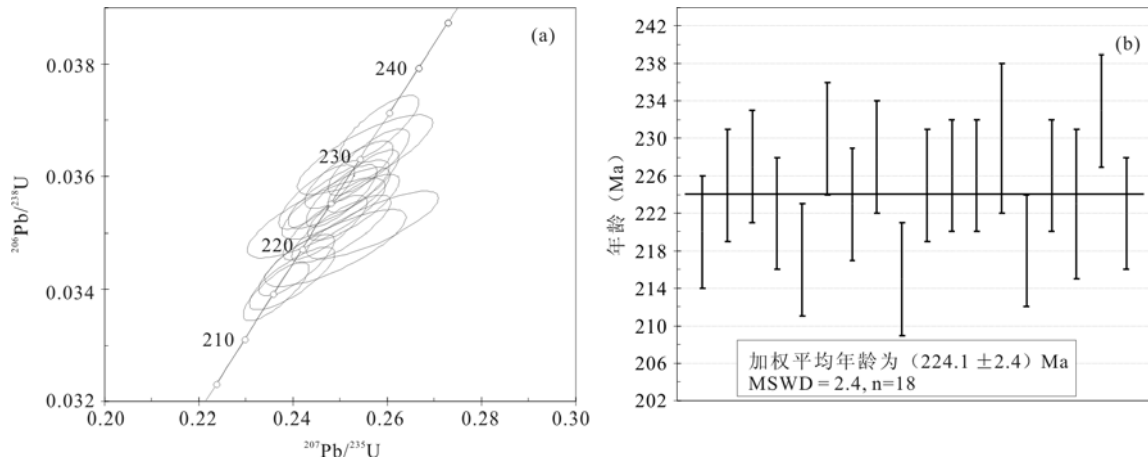


图 6 曲如沟花岗闪长岩的 LA-ICP-MS 锆石 U-Pb 年龄谐和图(a)及图直方图(b)

Fig. 6 LA-ICP-MS zircon U-Pb concordant age diagram (a) and weighted histogram (b) of Qurugou granodiorites

5 讨论

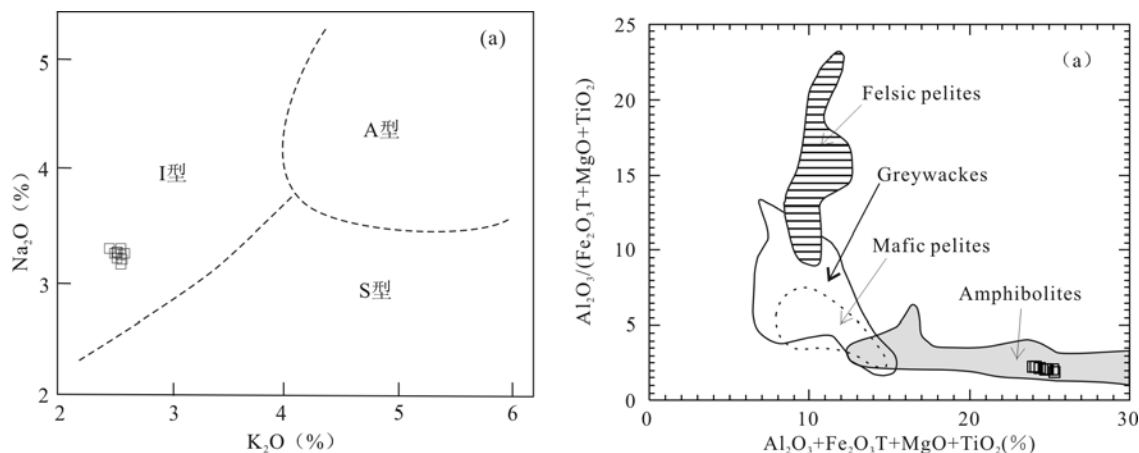
5.1 岩石类型及岩石成因

曲如沟花岗闪长岩主量元素具有富 Na_2O (含量为 3.16%~3.30, 平均为 3.25%)、贫 K_2O (含

量介于 2.44%~2.58%, 平均为 2.53%)、 $\text{Na}_2\text{O}/\text{K}_2\text{O}$ 均大于 1.0、 A/CNK 主体小于 1.0 (0.96~1.01) 的特征, 这些都是 I 型花岗岩的特征。在 $\text{K}_2\text{O}-\text{Na}_2\text{O}$ 图解(图 7a)中, 所有数据点落入 I 型花岗岩区域内, 显示曲如沟花岗闪长岩为 I 型花岗岩。微量元素方面, 曲如沟花岗闪长岩的 Rb/Sr

值为 0.22~0.24, 均小于 0.9, Rb/Sr 小于 0.9, 是 I 型花岗岩的特征(王德滋等, 1993)。在原始地幔标准化微量元素蛛网图(图 4b)上, Nb、Ti、P 具有

明显的负异常, 亦表明曲如沟花岗闪长岩为 I 型花岗岩。总之, 曲如沟花岗闪长岩具有 I 型花岗岩的地球化学特征。



(图例同图 3)

图 7 花岗闪长岩的 K_2O-Na_2O 图(a)和 $Al_2O_3/(TFe_2O_3+MgO+TiO_2)-(Al_2O_3+TFe_2O_3+MgO+TiO_2)$

图(b)(图 a 据参考文献 Collins, 1982; 图 b 据参考文献 Patino - Douce, 1999)

Fig. 7 K_2O-Na_2O diagram (a) and $Al_2O_3/(TFe_2O_3+MgO+TiO_2)-(Al_2O_3+TFe_2O_3+MgO+TiO_2)$ diagram (b)

已有研究表明, 某些花岗岩可以是幔源铁镁质母岩浆结晶分异或与同化混染的耦合作用的产物, 但地球上巨量花岗岩体的形成大多与地壳岩石的部分熔融相关(Collins, 1996; 王德滋, 2002)。实验岩石学已经证明地壳中砂泥质岩的部分熔融通常产生化学成分偏酸性的过铝质花岗岩类(Johannes et al., 1996; Patino - Douce et al., 1998), 而下地壳变基性岩石的部分熔融可以产生准铝质 I 型花岗岩类(Wolf et al., 1989; Beard et al., 1991; Sisson et al., 2005)。曲如沟花岗闪长岩具有弱的负 Eu 异常, La/Nb(1.69~3.38, 平均 2.60)均大于 1, 与地幔来源的岩浆明显不同(DePaolo et al., 2000)。Rb/Sr 值为 0.22~0.24, 与大陆地壳的平均值 0.24 相当(Taylor et al., 1985); Nb/Ta 值为 13.11~15.39, 平均为 14.43, 接近大陆地壳的比值(12~13, Barth et al., 2000), 说明曲如沟花岗闪长岩的岩浆可能是由地壳熔融形成的。曲如沟花岗闪长岩较低的 TFe_2O_3 、MgO、CaO 含量暗示源区不可能为具有过铝质特征的变泥质岩及变质杂砂岩。前已述及曲如沟花岗闪长岩体为典型的 I 型花岗岩, 应为下地壳变基性岩石部分熔融的产物。在 $Al_2O_3/(TFe_2O_3+MgO+TiO_2)-(Al_2O_3+TFe_2O_3+MgO+TiO_2)$

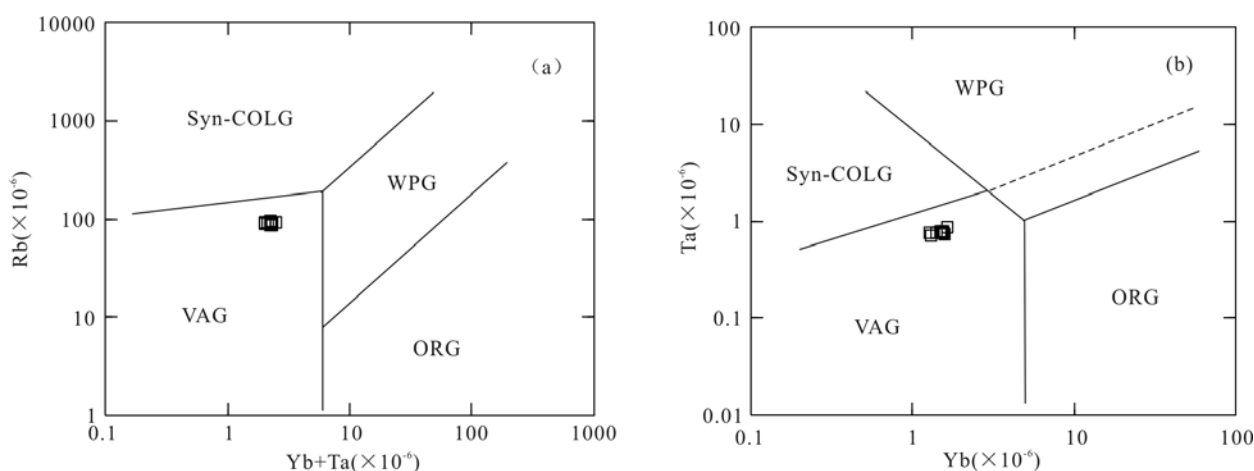
+ TiO_2)图解中(图 7b), 样品全部落入下地壳角闪岩区域, 亦表明曲如沟花岗闪长岩的源区为下地壳变基性岩石。此外, 该岩体 Eu 负异常不明显的特征与下地壳变基性岩石在流体饱和条件下部分熔融作用相关, 且源区仅残留少量的斜长石(Helz, 1976; Beard et al., 1991; Tepper et al., 1993)。锆石饱和温度计(Watson et al., 2006)显示其岩浆结晶平均最低温度和平均最高温度为 688~711 °C(表 2)。此外, 在曲如沟花岗闪长岩体中见较多的暗色辉长闪长质包体, 包体锆石 U-Pb 同位素年龄为 (224.1 ± 4.3) Ma, 与寄主岩花岗闪长岩年龄近似相同, 从年代学角度有力地证明了壳幔岩浆混合作用的存在。

一般认为幔源基性岩浆底侵作用是导致岩浆混合的直接原因。张宏飞等(2006)通过研究温泉花岗岩体, 提出西秦岭造山带西段印支晚期岩石圈曾发生拆沉作用的认识。因此, 笔者认为西秦岭造山带(西段)于印支晚期在地壳加厚体制下, 岩石圈由于重力不稳定而发生拆沉作用, 随后幔源基性岩浆底侵加热下地壳导致下地壳熔融形成酸性岩浆, 之后与底侵的幔源基性岩浆发生一定程度的混合作用, 从而形成了现今含有一定数量暗色辉长闪长质包体的曲如沟花岗闪长岩。

5.2 构造环境

野外宏观产出状态方面,曲如沟花岗闪长岩呈面状侵位于中下三叠统隆务河群重力流砂板岩中,具有碰撞或后碰撞型花岗岩产出状态特征,而明显不同于大面积具线状展布的与洋壳俯冲相关的弧侵入岩。矿物学特征方面,曲如沟花岗闪长岩的矿物组合为斜长石、石英、钾长石、角闪石和少量黑云母,CIPW 标准矿物刚玉分子含量较低($<0.36\%$),与板块主碰撞之后应力相对松弛的后碰撞阶段形成的高钾钙碱性花岗岩矿物组合一致(Barbarin, 1999)。地球化学特征方面,由球

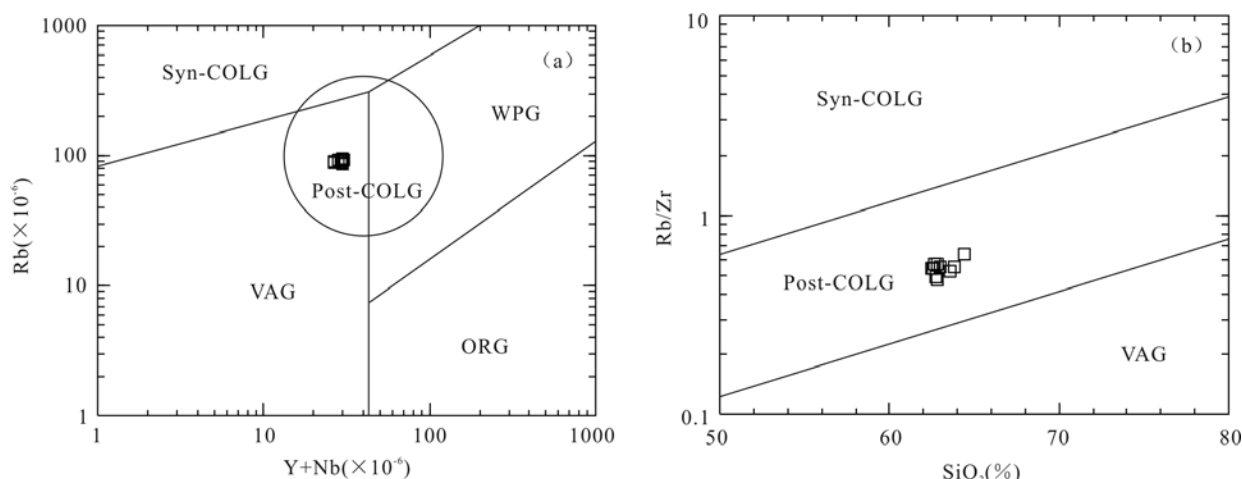
粒陨石标准化稀土元素配分模式图和原始地幔标准化微量元素蛛网图可以看出(图4),岩石富集轻稀土元素(LREE)和大离子亲石元素(LILE),亏损Nb、Ta、Ti等高场强元素(HFSE),这也显示出后碰撞高钾钙碱性I型花岗岩的特征(Kuster et al., 1998)。在 $(Yb+Ta)-Rb$ 图解(图8a)和 $Yb-Ta$ 图解(图8b)中,样品数据点都落入火山弧花岗岩(VAG)区域,而在 $(Y+Nb)-Rb$ 图解(图9a)和 SiO_2-Rb/Zr 图解(图9b)中,样品数据点全部落入后碰撞花岗岩区域。综上所述,曲如沟花岗闪长岩形成于后碰撞构造环境。



图例同图3

图8 曲如沟花岗闪长岩的 $(Yb+Ta)-Rb$ 图解(a)和 $Yb-Ta$ 图解(b)(图a、b据Pearce et al., 1984)

Fig. 8 $(Yb+Ta)-Rb$ diagram (a) and $Yb-Ta$ diagram (b) of Qurugou granodiorite



图例同图3

图9 曲如沟花岗闪长岩的 $(Y+Nb)-Rb$ 图解(a)和 SiO_2-Rb/Zr 图解(b)

(图a据Pearce, 1996; 图b据Harris et al., 1986)

Fig. 9 $(Y+Nb)-Rb$ diagram (a) and SiO_2-Rb/Zr diagram (b) of Qurugou granodiorite

表 1 长岭湖 4-ICP-VS 给石 P-10 国位基岩岩体裂隙

[illegible]

5.3 区域构造意义

曲如沟花岗闪长岩出露于西秦岭造山带与东昆仑造山带的构造交汇部位,孙延贵等(2004a,2004b)认为这一交汇部位在晚古生代很可能为一坳拉谷,并认为该坳拉谷是秦-昆三联点构造的反映;张志勇等(2004)认为三联点构造北支苦海-塞什塘小洋盆存在。最近,闫臻等(2012)从增生造山作用角度,认为西秦岭造山带西段为一早古生代以来洋壳不断向北俯冲增生造山的结果,并提出晚古生代古特提斯洋在西秦岭西段与西侧的东昆仑及东侧的西秦岭是联通的,并具有相同的大地构造背景。该联通的古大洋以阿尼玛卿-布青山构造混杂带中的德尔尼蛇绿岩(陈亮等,2004;杨经绥等,2004)、玛积雪山洋岛玄武岩(郭安林等,2006)、哈尔郭勒蛇绿岩(刘战庆等,2011)、哥日卓托洋岛玄武岩(李瑞保等,2014)等为代表。晚二叠世一早中三叠世,该古洋盆向北俯冲消减,形成了大面积近东西向展布的钙碱性弧岩浆岩(刘成东等,2004;莫宣学等,2007;熊富浩等,2010,2011;李瑞保,2012;李碧乐等,2012;马昌前等,2013)及弧前盆地洪水川组和隆务河群沉积(李瑞保等,2012;闫臻等,2008),对碎屑锆石年龄谱物源研究,显示弧前盆地物源主要来自于北侧的增生杂岩及岛弧(陈岳龙等,2009;闫臻等,2012)。区域上,东昆仑造山带中三叠统希里可特组与下伏地层角度不整合接触为碰撞造山事件的沉积构造响应;兴海北西侧发育晚三叠世磨拉石和陆相火山岩,其以角度不整合覆盖在中下三叠统之上,表明研究区于中三叠世末期亦发生了全面的碰撞造山作用(孙延贵,2004c)。共和盆地西侧的东昆仑造山带在晚三叠世进入到后碰撞构造演化阶段,形成大量的具面状分布 226~218 Ma 的后碰撞花岗岩(李佐臣等,2013;陈国超等,2013a,2013b,2013c)。闫臻等(2012)报道了秦-祁昆-结合部位晚三叠世 OIB 型玄武岩,认为其形成于大陆伸展构造环境下的产物。张宏飞等(2006)报道了西秦岭西段黑马河岩体锆石 U-Pb 年龄为 235 Ma,温泉岩体锆石 U-Pb 年龄为 218 Ma,均形成于后碰撞构造环境。李佐臣等(2013)报道了西秦岭具后造山构造属性的糜署岭花岗岩锆石 U-Pb 年龄为 215 Ma。以上证据表明西秦岭造山带西段及邻区在中三叠世晚期已开始碰撞造山,并于晚三叠世进入后碰撞造山阶段。从造山演化的构造岩浆事件年代学序列来看,曲如沟花岗

闪长岩年龄为 (224.1 ± 2.4) Ma (MSWD=2.4), 基本与西秦岭及东昆仑造山带后碰撞造山事件年龄一致,亦表明西秦岭造山带西段于晚三叠世进入到后碰撞构造演化阶段。该期构造岩浆热事件还与区域上金、锑等金属矿化密切相关。例如,已发现的兴海县加吾金锑矿和泽库县瓦勒根金矿床等。至此,西秦岭造山带西段及邻区基本完成了南北陆块的碰撞与拼合,奠定了西秦岭造山带的基本构造格局。

6 结论

通过对曲如沟花岗闪长岩地质学、锆石 U-Pb 年代学和岩石地球化学详细研究,得出如下结论。

(1) 西秦岭造山带西段曲如沟花岗闪长岩主体岩性为灰白色细块状粒花岗闪长岩,侵位于中下三叠统隆务河群。主量元素表现出高 SiO_2 、富 Na_2O 、准铝、高钾钙碱性 I 型花岗岩特征。稀土元素和微量元素具有岛弧或碰撞型花岗岩特征。

(2) 曲如沟花岗闪长岩 LA-ICP-MS 锆石 U-Pb 年龄为 (224.1 ± 2.4) Ma (MSWD=2.4), 代表该岩体于晚三叠世形成侵位。

(3) 曲如沟花岗闪长岩源区为下地壳变基性岩石,为岩石圈拆沉后幔源基性岩浆底侵导致下地壳变基性岩石部分熔融形成,并发生了一定程度的壳幔岩浆混合作用。

(4) 曲如沟花岗闪长岩形成于后碰撞环境,结合区域资料表明西秦岭造山带西段于印支晚期(224 Ma)古特提斯洋已经关闭,进入到后碰撞构造演化阶段,并奠定了西秦岭造山带西段的基本构造格局。

致谢:参加野外工作的还有陈力子、孙赋、李国英、许东东、徐多勋、张哲等同志,LA-ICP-MS 锆石 U-Pb 年龄测试得到西北大学大陆动力学国家重点实验室柳小明博士和第五春荣博士等的帮助,在此表示诚挚的谢意。

参考文献(References):

- 陈国超,裴先治,李瑞保,等. 东昆仑造山带东段南缘和勒冈希里可特花岗岩体时代、成因及其地质意义[J]. 地质学报,2013,87(10):1525-1541.
- CHEN Guochao, PEI Xianzhi, LI Ruibao, et al. Geochronology and Genesis of the Helegang Xilikete

- Granitic Plutons form the Southern Margin of the Eastern East Kunlun Orogenic Belt and Their Tectonic Significance[J]. *Acta Geological Sinica*, 2013, 87(10): 1525-1541.
- 陈亮,孙勇,裴先治,等. 古特提斯蛇绿岩的综合对比及其动力学意义-以德尼蛇绿岩为例[J]. *中国科学 D 辑*, 2004, 33(12):1136-1142.
- CHEN Liang, SUN Yong, PEI Xianzhi, et al. The Paleotethys Ophiolite Comprehensive Comparison and Its Dynamic Significance for Deerni Ophiolite [J]. *Science in China(Series D)*. 2004, 33(12):1136-1142.
- 陈岳龙,周建,皮桥辉,等. 青海共和-花石峡三叠纪碎屑沉积岩的地球化学特征与锆石 U-Pb 年龄及地质意义[J]. *地学前缘*, 2009, 16(2):161-174.
- CHEN Yuelong, ZHOU Jian, PI Qiaohui, et al. Zircon U-Pb dating and geochemistry of clastic sedimentary rocks in the Gonghe-Huashixia Area, Qinghai Province and their geological implications [J]. *Earth Science Frontiers*, 2009, 16(2):161-174.
- 郭安林,张国伟,孙延贵,等. 阿尼玛卿蛇绿岩带 OIB 和 MORB 的地球化学及空间分布特征:玛积雪山古洋脊热点构造证据[J]. *中国科学(D 辑):地球科学*, 2006, 36(7):618-629.
- GUO Anling, ZHANG Guowei, SUN Yangui, et al. The OIB and MORB Geochemical and space distribution features of the Ophiolite Belt of A'nyemaqen Orogenic Belt: the tectonic proof of Maji snow Mountain Ocean Ridge[J]. *Science in China(Series D: Earth Science)*, 2006, 36(7): 618-629.
- 李瑞保,裴先治,李佐臣,等. 东昆仑东段晚古生代-中生代若干不整合面特征及其对重大构造事件的响应[J]. *地学前缘*, 2012, 19(5):244-254.
- LI Ruibao, PEI Xianzhi, LI Zuochen, et al. Geological characteristics of Late Paleozoic-Mesozoic unconformities and their response to some significant tectonic events in eastern part of Eastern Kunlun [J]. *Earth Sciences Frontiers*, 2012, 19(5):244-254.
- 李佐臣,裴先治,李瑞保,等. 西秦岭糜屠岭花岗岩体年代学、地球化学特征及其构造意义[J]. *地质学报*, 2013, 29(8):2617-2634.
- LI Zuochen, PEI Xianzhi, LI Ruibao, et al. LA-ICP-MS zircon U-Pb dating, geochemistry of the Mishuling intrusion in western Qinling and their tectonic significance[J]. *Acta Petrologica Sinica*, 2013, 29(8): 2617-2634.
- 刘成东,莫宣学,罗照华,等. 东昆仑壳-幔岩浆混合作用:来自锆石 SHRIMP 年代学的证据[J]. *科学通报*, 2004, 49(6):596-602.
- LIU Chendong, MO Xuanxue, LUO Zhaohua. East Kunlun crust-mantle magma mixing: Evidence from zircon SHRIMP chronology [J]. *Chinese Science Bulletin*, 2004, 49(6): 596-602.
- 刘战庆,裴先治,李瑞保,等. 东昆仑南缘阿尼玛卿构造带布青山地区两期蛇绿岩的 LA-ICP-MS 锆石 U-Pb 定年及其构造意义[J]. *地质学报*, 2011, 85(2):185-194.
- LIU Zhanqing, PEI Xianzhi, LI Ruibao, et al. LA-ICP-MS Zircon U-Pb Geochronology of the Two Suites of Ophiolite at the Buqingshan Area of the A'nyemaqen Orogenic Belt in the Southern Margin of East Kunlun and Its Tectonic Implication[J]. *Acta Geologica Sinica*, 2011, 85(2):185-194.
- 裴先治,张国伟,赖绍聪,等. 西秦岭南缘勉略构造带主要地质特征[J]. *地质通报*, 2002, 21(8-9):486-494.
- PEI Xianzhi, ZHANG Guowei, LAI Saocong, et al. Main geological features of the Mianlue tectonic belt on the southern margin of the west Qinling [J]. *Geological Bulletin of China*, 2002, 21(8-9): 486-494.
- 孙延贵,张国伟,郭安林,等. 秦昆三向联结构造及其构造过程的同位素年代学证据[J]. *中国地质*, 2004a, 31(4): 372-378.
- SUN Yangui, ZHANG Guowei, Guo Anlin, et al. Qinling-kunlun triplejunction and isotope chronological evidence of its tectonic process[J]. *Geology in China*, 2004, 31(4):372-378.
- 孙延贵. 西秦岭-东昆仑造山带的衔接转换与共和坳拉谷[D]. 西安:西北大学, 2004b.
- SUN Yangui. Gonghe aulacogen and conjugate and transfer between the westQinling and east Kunlun orogen[D]. Xi'an:Northwestern Univerity, 2004b.
- 王秉璋,张智勇,张森琦,等. 东昆仑东端苦海-塞什塘地区晚古生代蛇绿岩的特征[J]. *地球科学*, 2000, 25(6): 592-598.
- WANG Bingzhang, ZHANG Zhiyong, ZHANG Senqi, et al. Geological feature of lower Paleozoic ophiolite in

- Kuhai-Saishitang region, East Section of Eastern Kunlun[J]. *Earth Science*, 2000, 25 (6): 592-598.
- 王德滋,刘昌实. 桐庐 I 型和相山 S 型两类碎斑熔岩对比[J]. *岩石学报*, 1993, 9(1): 44-54.
- WANG Dezi, LIU Changshi. The contrast between Tonglu I-Type and Xiangshan S-Type clastoporphyritic lava[J]. *Acta Petrologica Sinica*, 1993, 9(1): 44-54.
- 肖庆辉,邱瑞照,邢作云,等. 花岗岩成因研究前沿的认识[J]. *地质论评*, 2007, 53(增刊): 17-27.
- XIAO Qinghui, QIU Ruizhao, XING Zuoyun, et al. Major frontiers on studies of granite formation[J]. *Geological Review*, 2007, 53 (suppl): 17-27.
- 熊富浩,马昌前,张金阳,等. 东昆仑造山带白日其利辉长岩体 LA-ICP-MS 锆石 U-Pb 年龄及地质意义[J]. *地质通报*, 2011, 30(8): 1196-1202.
- XIONG Fuhao, MA Changqian, ZHANG Jinyang, et al. Zircon LA-ICP-MS U-Pb dating of Bairiqili gabbro pluton in East Kunlun orogenic belt and its geological significance[J]. *Geological Bulletin of China*, 2011, 30 (8): 1196-1202.
- 许志琴,杨经绥,李文昌,等. 青藏高原中的古特提斯体制与增生造山作用[J]. *岩石学报*, 2013, 29(6): 1847-1860.
- XU Zhiqin, YANG Jingsui, LI Wenchang, et al. Paleo-Tethys system and accretionary orogen in the Tibet Plateau[J]. *Acta Petrologica Sinica*, 2013, 29 (6): 1847-1860.
- 闫臻,郭现轻,付长垒,等. 秦祁昆结合部晚三叠世 OIB 型玄武岩岩石学、地球化学及 SHRIMP 锆石 U-Pb 年代学研究[J]. *地学前缘*, 2012, 19(5): 164-176.
- YAN Zhen, GUO Xianqing, FU Changlei, et al. Petrology, geochemistry and SHRIMP U-Pb dating of zircons from Late Triassic OIB-basalt in the conjunction of the Qinling-Kunlun orogens[J]. *Earth Science Frontiers*, 2012, 19(5): 164-176.
- 闫臻,王宗起,李继亮,等. 西秦岭楔的构造属性及其增生造山过程[J]. *岩石学报*, 2012, 28(6): 1808-1828.
- YAN Zhen, WANG Zongqi, LI Jiliang, et al. Tectonic settings and accretionary orogenesis of the West Qinling Terrane, northeastern margin of the Tibet Plateau[J]. *Acta Petrologica Sinica*, 2012, 28(6): 1808-1828.
- 杨经绥,王希斌,史仁灯,等. 青藏高原北部东昆仑南缘德尔尼蛇绿岩: 一个被肢解了的古特提斯洋壳[J]. *中国地质*, 2004, 31(3): 225-239.
- YAN Jingsui, WANG Xibin, SHI Rendeng, et al. The Dur'ngoi ophiolite in East Kunlun, northern Qinghai-Tibet Plateau: a fragment of paleo-Tethyan oceanic crust[J]. *Geology in China*, 2004, 31(3): 225-239.
- 张国伟,郭安林,姚安平. 中国大陆构造中的西秦岭-松潘大陆构造结[J]. *地学前缘*, 2004, 1: 23-32.
- ZHANG Guowei, GUO Anlin, YAO Anping. Western Qinling-Songpan continental tectonic node in China's continental tectonics [J]. *Earth Science Frontiers*, 2004, 1: 23-32.
- 张宏飞,陈岳龙,徐旺春,等. 青海共和盆地周缘印支期花岗岩类的成因及其构造意义[J]. *岩石学报*, 2006, 22 (12): 2910-2922.
- ZHANG Hongfei, CHEN Yuelong, XU Wangchun, et al. Granitoids around Gonghe basin in Qinghai province: petrogenesis and tectonic implications [J]. *Acta Petrologica Sinica*, 2006, 22(12): 2910-2922.
- 张宏飞,靳兰兰,张利,等. 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)*, 2005, 35(10): 914-926.
- ZHANG Hongfei, JING Lanlan, ZHANG Li, et al. West Qinling granitic rock geochemistry and Pb-Sr-Nd isotopic composition of the limitation on the basal properties and structural properties [J]. *Science in China (Series D)*, 2005, 35(10): 914-926.
- 张智勇,殷鸿福,王秉璋,等. 昆秦接合部海西期苦海-塞什塘分支的存在及证据[J]. *地球科学*, 2004, 29(6): 691-696.
- ZHANG Zhiyong, YI Hongfu, WANG Bingzhang, et al. Presence and Evidence of Kuhai-Saishitang Branching Ocean in Copulae between Kunlun-Qinling Mountains [J]. *Earth Science*, 2004, 29(6): 691-696.
- Barbarin B. A review of the relationships between granitoid types, their origins and their tectodynamic environments [J]. *Lithos*, 1999, 46: 605-626.
- Barth M G, McDonough W F, Rudnick R L. Tracking the budget of Nb and Ta in the continental crust [J]. *Chemical Geology*, 2000, 165(3/4): 197-213.
- Belousova E A, Suzanne G W, Fisher Y. Igneous zircon: trace element compositions as an indicator of source rock type [J]. *Contributions to Mineralogy and*

- Petrology, 2002, 143: 602-622.
- Chappell B W, Bryant C J, Wyborn D. Peraluminous I-type granites [J]. Lithos, 2012, 153: 142-153.
- Collins W J. S2 and I2 type granitoids of the eastern Lachlan fold belt: Products of three-component mixing [J]. Trans. Royal Soc. Edinburgh: Earth Sci., 1996, 88: 171-179.
- DePaolo D J, Daley E E. Neodymium isotopes in basalts of the southwest basin and range and lithosphere thinning during continental extension [J]. Chemical Geology, 2000, 169: 157-185.
- Harris N B W, Pearce J A, Tindle A G. Geochemical characteristics of collision-zone magmatism. In: Coward, M P, Reis, A S (Eds.), Collision Tectonics [M]: Geological Society of London, Special Publication, 1986, 19: 67-81.
- Kuster D, Harms U. Post-collisional potassic granitoids from the southern and northwestern parts of the late Neoproterozoic East African Orogen: A review [J]. Lithos, 1998, 45: 177-195.
- Ludwig K R. Isoplot /Ex version 2. 49. A Geochronological Toolkit for Microsoft Excel [J]. Berkeley: Berkeley Geochronology Center Special Publication, 2003, 1a: 1-56.
- Maniar P D, Piccoli P M. Tectonic discrimination of granitoids [J]. Geological Society of America Bulletin, 1989, 101: 635-643.
- Patino Dounce AE, Harris N. Experimental constraints on Himalayan anatexis [J]. Journal of Petrology, 1998, 39 (4): 689-710.
- Pearce J A, Harris N B W, Tindle A G. Trace element discrimination diagrams for the tectonic interpretation of granitic rocks [J]. Journal of Petrology, 1984, 25: 956-983.
- Pearce J A. Sources and setting of granitic rocks [J]. Episodes, 1996, 19(14): 120-125.
- Rickwood P C. Boundary lines within petrologic diagrams which use oxides of major and minor elements [J]. Lithos, 1989, 22(4): 247-263.
- Sisson TW, Ratajeski K, Hankins WB, et al. Voluminous granite magmas from common basaltic sources [J]. Contrib. Mineral Petri, 2005, 148(5): 635-661.
- Sun S S, McDonough W F. Chemical and isotopic systematics of oceanic basalts: Implications for mantle composition and processes In: Saunders AD and Norry MJ [M]. Magmatism in the Ocean Basins. London: Geological Society of London, 1989, 313-345.
- Taylor S R, McLennan S M. The Continental Crust: its Composition and Evolution [M]. Oxford: Blackwell Scientific, 1985: 312.
- Tepper J H, Nelson B K and Berganz G W. Petrology of the Chilliwack batholith, North Cascades, Washington: generation of calcalkaline granitoids by melting of mafic lower crust with variable water fugacity. Contrib [J]. Mineral Petrol, 1993, 113: 333-351.
- Watson E B, Wark D A, Thomas J B. Crystallization thermometers for zircon and rutile [J]. Contributions to Mineralogy and Petrology, 2006, 151: 413-433.
- Yuan Honglin, Gao Shan, Liu Xiaoming, et al. Accurate U-Pb age and trace element determinations of zircon by laser ablation inductively coupled plasma mass spectrometry [J]. Geostandard and Geoanalytical Research, 2004, 28: 353-370.