



引文格式: 冉亚洲, 陈涛, 梁文天, 等. 西秦岭郎木寺组火山岩锆石 U-Pb 年龄及其构造意义[J]. 西北地质, 2024, 57(1): 110-121. DOI: 10.12401/j.nwg.2023043

Citation: RAN Yazhou, CHEN Tao, LIANG Wentian, et al. Zircon U-Pb Age of Volcanic Rocks from the Langmusi Formation in the Western Qinling Mountains and Its Tectonic Significance[J]. Northwestern Geology, 2024, 57(1): 110-121. DOI: 10.12401/j.nwg.2023043

西秦岭郎木寺组火山岩锆石 U-Pb 年龄及其构造意义

冉亚洲¹, 陈涛², 梁文天^{1,*}, 李阳¹, 申琪¹, 李传志³

(1. 西北大学, 大陆动力学国家重点实验室, 陕西 西安 710069; 2. 陕西国土测绘工程院有限公司, 陕西 西安 710054;
3. 中国海洋大学, 山东 青岛 266100)

摘要: 西秦岭郎木寺地区发育了大量的火山岩, 是探讨秦岭造山带印支期岩浆作用的重要窗口。目前, 关于郎木寺组火山岩的形成时代尚未有很好的约束。据此, 笔者对郎木寺组角闪安山岩开展了详细的 LA-ICP-MS 锆石 U-Pb 年代学研究。CL 图像显示, 郎木寺组角闪安山岩的锆石结构表现出典型的岩浆成因特征。锆石 U-Pb 定年结果显示, 角闪安山岩具略有差异的两组年龄, 加权平均年龄分别为 (221.8 ± 1.2) Ma 和 (210.6 ± 2.1) Ma。因此, 郎木寺组角闪安山岩的形成时代为晚三叠世。结合前人已有成果, 笔者认为郎木寺组火山岩代表了秦岭印支期造山作用重要的岩浆事件产物, 形成于同碰撞挤压的构造环境。

关键词: 郎木寺组; 角闪安山岩; 锆石 U-Pb 定年; 构造环境; 秦岭造山带

中图分类号: P597.3

文献标志码: A

文章编号: 1009-6248(2024)01-0110-12

Zircon U-Pb Age of Volcanic Rocks from the Langmusi Formation in the Western Qinling Mountains and Its Tectonic Significance

RAN Yazhou¹, CHEN Tao², LIANG Wentian^{1,*}, LI Yang¹, SHEN Qi¹, LI Chuanzhi³

(1. State Key Laboratory for Continental Dynamics, Northwest University, Xi'an 710069, Shaanxi, China; 2. Shaanxi Institute of Surveying and Mapping of Land LTD, Xi'an 710054, Shaanxi, China; 3. Ocean University of China, Qingdao 266100, Shandong, China)

Abstract: Volcanic rocks are wide spread in Langmusi area of western Qinling, which is an important window to study the Indosinian magmatism of the Qinling Orogen. However, the formation age of langmusi volcanic rocks is not well constrained. In this contribution, a detailed study of LA-ICP-MS zircon U-Pb geochronology for the hornblende andesites from Langmusi Formation was conducted. CL images show that the internal structures of zircon from hornblende andesites show typical magmatic origin. Zircon U-Pb dating results demonstrate that the horndiorite andesites have slightly different ages, with weighted average ages of (221.8 ± 1.2) Ma

收稿日期: 2022-09-25; 修回日期: 2022-12-10; 责任编辑: 曹佰迪

基金项目: 国家自然科学基金“秦岭造山带早中生代花岗岩构造及其与造山作用关系”(41672200), “秦岭造山带中生代构造-岩浆演化与构造体制转换研究”(42172230), “秦岭晚中生代花岗岩的构造研究及其对陆内造山过程的约束”(41802212)联合资助。

作者简介: 冉亚洲(1990-), 男, 硕士研究生, 工程师, 主要从事构造地质学、第四纪古海洋学与古环境研究。E-mail: ranyazhou@nwu.edu.cn。

* 通讯作者: 梁文天(1981-), 男, 博士, 副教授, 主要从事构造地质学研究及教学工作。E-mail: wliang@nwu.edu.cn。

and (210.6±2.1) Ma respectively. Therefore, the hornblende andesites of Langmusi Formation were formed the Late Triassic period. Combining with previous studies, we argue that the volcanic rocks of the Langmusi Formation represent an important magmatic event of the Qinling Indosinian orogeny, which were formed in a syn-collisional tectonic setting.

Keywords: Langmusi formation; hornblende andesite; zircon U-Pb dating; tectonic setting; Qinling orogen

1 地质背景

秦岭造山带是分割中国大陆南北、经历多期次造山作用而形成的复合型大陆造山带(张国伟等, 1995, 2001; Dong et al., 2016)。它的形成至少经历了前寒武纪造山带结晶基底的形成、古生代—早中生代板块构造体制下的俯冲—碰撞造山以及中生代陆内造山等阶段(王汉辉等, 2023)。其中, 印支期的碰撞造山作用对于秦岭造山带具有重要意义, 不仅使得华南和华北陆块发生最终拼合并形成了秦岭的基本构造格架, 也是秦岭造山带从碰撞造山向陆内造山转换的重要阶段(Dong et al., 2011; 李平等, 2023)。然而, 关于秦岭印支期碰撞造山的结束时间还存在较大争议, 主要体现在秦岭晚三叠世岩浆作用形成的构造环境存在重要分歧(张成立等, 2008; 秦江锋等, 2010; 王晓霞等, 2011; Dong et al., 2012; Wang et al., 2013; Liang et al., 2015; Li et al., 2017, 2019; Tao et al., 2021; 李积清等, 2021)。

印支期随着勉略洋的关闭, 秦岭造山带发生全面碰撞造山过程(Li et al., 2007; Dong et al., 2011)。强烈的造山作用引发了广泛的岩浆作用, 形成大量的花岗岩。这些花岗岩广泛分布在秦岭造山带的各个构造单元内, 多呈岩体和岩体群形态展布, 主要包括中川岩体群、宝鸡岩体群、糜署岭岩体群、东江口岩体群、五龙岩体群、光头山岩体群。值得注意的是, 前人关于秦岭晚三叠世岩浆作用构造环境的探讨主要集中在花岗岩(侵入岩), 而少有火山岩(喷出岩)方面的相关研究。一方面是由于秦岭地区大量晚三叠世花岗岩的发育和出露同时期的火山岩分布有限; 另一方面则是因为早期研究受到火山岩定年手段的限制。近年来, 一些研究表明西秦岭地区分布了较多的印支期火山岩(孙延贵等, 2001; 黄雄飞等, 2013; 田绒, 2020)。因此, 它们是探讨印支期火山岩形成阶段区域构造环境的重要对象。

西秦岭火山岩主要出露于共和—贵德—同仁—夏河一带以及合作东部的德乌鲁和若尔盖等地区, 向西与鄂拉山三叠纪岩浆岩带相连(闫臻等, 2012)。其中, 若尔盖火山岩分布在甘肃玛曲—迭部一带, 具有岛弧火山岩的地球化学特征(曾宜君等, 2009), 可能代表了岛弧—活动大陆边缘构造环境。该套火山岩由郎木寺组和财宝山组构成(图1), 其中郎木寺组火山岩为一套陆相中基性火山岩。前人根据组内角闪安山岩全岩 K-Ar 法和 ^{40}Ar - ^{39}Ar 同位素方法得到的年龄为 199~185 Ma(四川省地矿局川西北地质队, 1992; 曾宜君等, 2009), 结合上覆财宝山组火山岩 Rb-Sr 年龄值(112±27 Ma)和 K-Ar 年龄(136±4 Ma)(四川省地矿局川西北地质队, 1992), 以及下伏不整合接触的甲秀组中产有侏罗世—白垩纪常见植物分子和晚三叠世至早侏罗世孢子化石组合, 认为其时代为早侏罗世—早白垩世。考虑 Rb-Sr 体系的不均一性及 Rb-Sr 和 ^{40}Ar - ^{39}Ar 体系较低的封闭温度, 两种方法得出的年龄通常晚于岩体的实际就位年龄。因此, 郎木寺火山岩的形成时代和地质属性尚未有很好的约束。而锆石 U-Pb 定年方法已经成为同位素年代学研究中最常见和最有效的方法, 具有快速、高效以及精确的特点。据此, 笔者对若尔盖地区郎木寺组角闪安山岩开展了 LA-ICP-MS 锆石 U-Pb 定年。结合前人已经开展的地球化学研究以及区域地质资料, 探讨了该角闪安山岩形成的构造环境。

2 研究方法

2.1 样品描述和采集

若尔盖地区的郎木寺组火山岩, 为一套灰黑色中性—中基性火山岩, 以安山质火山角砾岩为主, 包括爆发相和溢流相两部分。爆发相岩类出现在火山活动早期, 底界不整合于甲秀组含煤碎屑岩之上。溢流相岩类以黑云母安山岩为主, 部分岩石出现气孔构造和杏仁构造, 柱状节理发育。黑云母安山岩常与角闪安

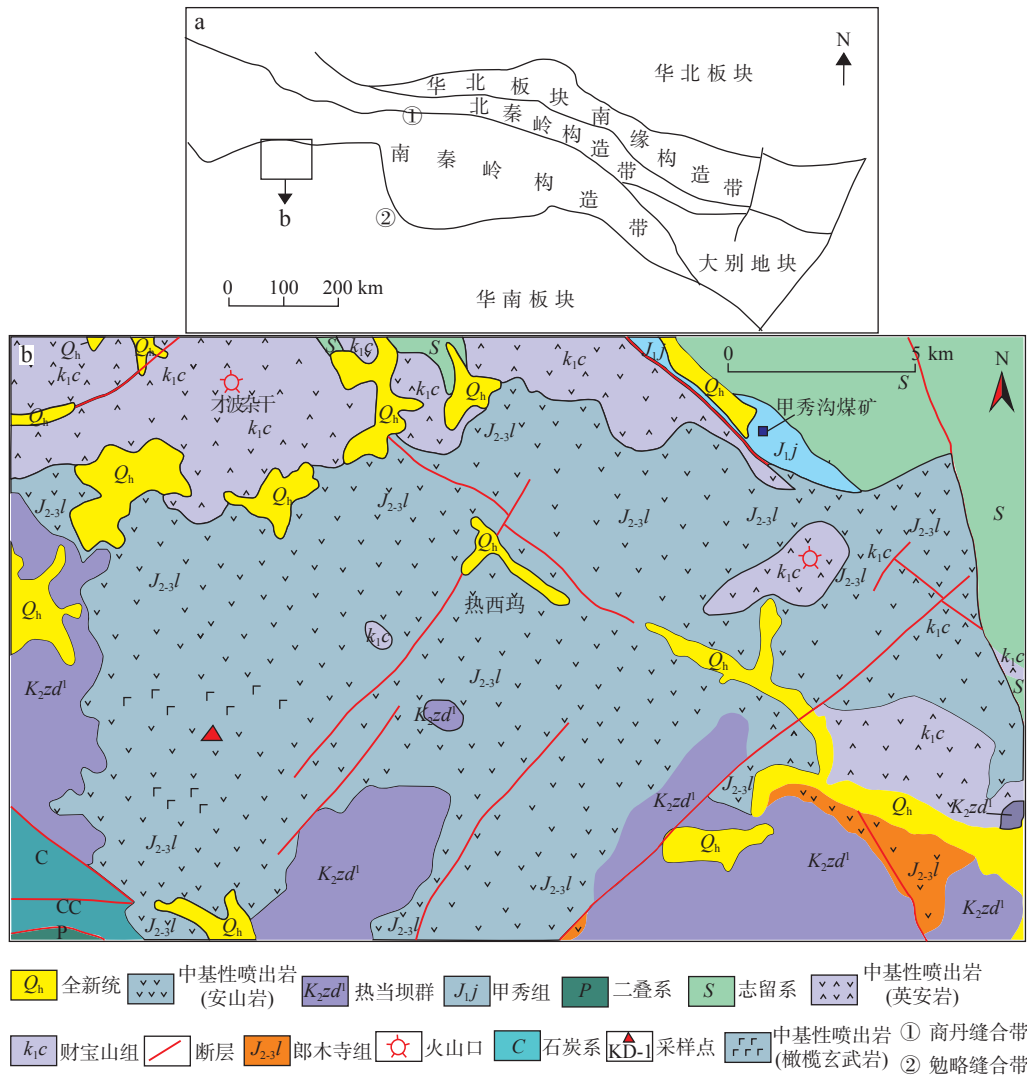


图1 西秦岭郎木寺镇一带区域地质图

Fig. 1 Regional geological map of Langmusi town, west Qinling mountains

山岩相伴生,具斑状结构,斑晶约占 35%~50%,主要矿物为黑云母、角闪石,副矿物为磁铁矿。辉石安山岩具有较明显斑状结构,斑晶约占 30%~45%,主要为紫苏辉石、斜长石、角闪石和黑云母,副矿物主要为磁铁矿、钛铁矿等。角闪安山岩具斑状结构,气孔构造,斑晶主要为角闪石和黑云母,基质具有玻质交织结构,副矿物为磁铁矿等。财宝山组为一套浅色中酸性火山岩建造,按岩性分为下部爆发相流纹质火山角砾岩和上部溢流相流纹岩或安山粗面岩。流纹岩具有斑状结构,流纹构造,斑晶主要为石英、斜长石和黑云母。若尔盖火山岩喷发活动总体上具有中基性-中性-中酸性-酸性演化的特征。

样品 KD-1 采自于甘肃省甘南藏族自治州碌曲县和四川阿坝藏族羌族自治州若尔盖县共同下辖的郎

木寺镇附近,以开展 LA-ICP-MS 锆石 U-Pb 定年。样品岩性为角闪安山岩,具斑状结构,气孔构造,斑晶主要为角闪石和黑云母,基质具有玻质交织结构,副矿物为磁铁矿等。

2.2 测试方法

角闪安山岩样品在河北廊坊区域地质调查研究所的实验室粉碎后,使用常规的重液浮选和电磁分离方法挑选出锆石。然后在双目镜下根据锆石的自形成度和形态等特征初步分类,挑选出具有代表性的锆石。将锆石样品分别用双面胶粘在载玻片上,放上 PVC 环,然后将环氧树脂和固化剂进行充分混合后注入 PVC 环中。待树脂充分固化后将样品座从载玻片上剥离,并对其样打磨抛光,直到样品露出一个光洁的平面。然后再进行锆石显微(反射光和透射光)

照相。

激光剥蚀电感耦合等离子质谱(LA-ICP-MS)锆石 U-Pb 定年在西北大学大陆动力学国家重点实验室完成。阴极发光(CL)照相采用英国 Gatan 公司生产的 Mono CL³⁺阴极发光装置, 锆石定年所用的 ICP-MS 为 Agilent 公司最新一代 7500a。激光剥蚀系统为德国 MicroLas 公司生产的 Geolas 200M, 该系统由德国 Lambda Physic 公司的 ComPex102ArF 准分子激光器(波长 193nm)与 MicroLas 公司的光学系统组成。激光频率为 8 Hz, 能量密度为 4 J/cm², 激光剥蚀斑束直径为 30 μm, 激光剥蚀样品的深度为 20~40 μm。试验中采用 He 作为剥蚀物质的载气, 用美国国家标准研究院研制的人工合成硅酸盐玻璃标准参考物质 NIST SRM 610 进行仪器最佳化, 采样方式为单点剥蚀。数据采集选用一个质量峰一点的跳峰方式, 每完成 4~5 个待测样品测定, 插入测标样一次。在所测锆石样品 20 个点前后各测两次 NIST SRM 610。锆石年龄采用标准锆石 91 500 为外部标样, 元素含量使用 NIST SRM 610 作为外标。由于 SiO₂ 在锆石中的含量

较恒定, 选择²⁹Si 作为内标来消除激光能量在点分析过程中以及分析点之间的漂移。数据处理采用 GLITTER 4.0 软件, 并用 ISOPLOT 3.0 软件绘制 U-Pb 谐和图以及计算²⁰⁶Pb/²³⁸U 年龄加权平均值。详细的实验原理和流程及仪器参数可参见文献(袁洪林等, 2003; 柳小明等, 2007; 李艳广等, 2023)。

3 锆石微区 U-Pb 定年

3.1 锆石特征

内部结构显示锆石晶型较好(图 2), 多数锆石呈半自形到自形结构。根据长短轴的比例大致可以分为两类: 一类锆石颗粒呈短柱状-长柱状, 长轴为 80~200 μm, 短轴为 50~100 μm, 长宽比为 1~3; 另一类锆石颗粒呈菱状, 长轴为 100~180 μm, 短轴为 80~120 μm, 长宽比为 1~2。多数锆石具有核-幔-边结构, 但边部较窄。大部分锆石的 CL 图像(图 2)较亮, 锆石表面蜕晶化较弱, 大部分锆石呈现典型的岩浆成因密集震荡环带(图 2)。

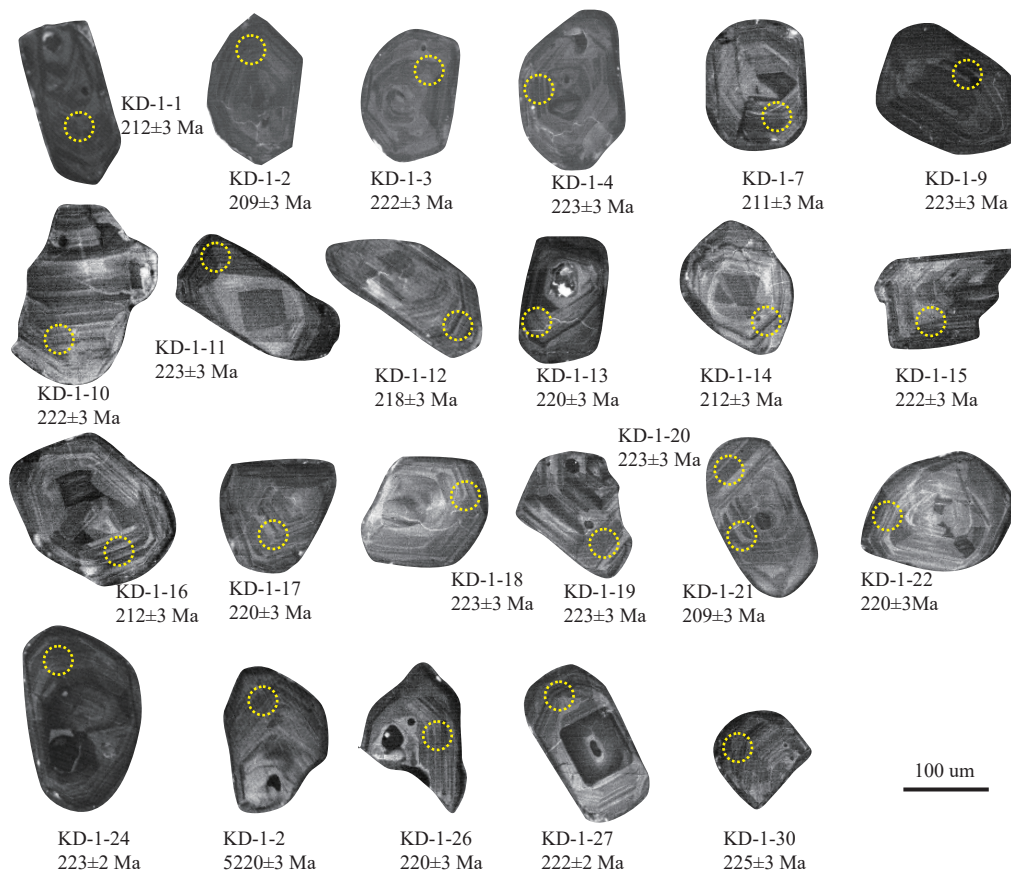


图2 郎木寺组角闪安山岩锆石 CL 图像

Fig. 2 Zircon CL image of Jiaoshan Andesite in Langmusi Formation

此外,样品中锆石 Th 含量为 $105 \times 10^{-6} \sim 348 \times 10^{-6}$, 平均值为 228×10^{-6} , U 含量为 $191 \times 10^{-6} \sim 506 \times 10^{-6}$, 平均值为 369×10^{-6} 。Th/U 值为 $0.49 \sim 0.82$ (表 1), 平均值为 0.62, 表明样品中锆石属于典型的岩浆锆石(李长民等, 2009; 王梓桐等, 2022; 熊万宇康等, 2023)。锆石的稀土元素组成显示, Σ REE 含量较 HREE 富集(表 2), 具有岩浆锆石的稀土元素球粒陨石配分曲线

(图 3), Ce 正异常和 Eu 负异常明显, 表明这种火成岩中的锆石没有流体的参与, 属于典型的岩浆成因锆石。

3.2 定年结果

最终的锆石 U-Pb 定年结果见表 1。样品 KD-1 共获得 30 个点的锆石 U-Pb 同位素数据, 除去 6 个年龄不谐和点, 其余锆石边部 24 个测点均集中落在谐和线上及其附近(图 3a)。

表 1 郎木寺组角闪安山岩锆石 U-Pb 同位素分析结果统计表

Tab. 1 Zircon U-Pb isotope analysis of jiaoshan andesite in Langmusi formation

分析点	含量 (10^{-6})				同位素比值						年龄 (Ma)					
	Pb*	Th	U	Th/U	$^{207}\text{Pb}/^{206}\text{Pb}$	1 σ	$^{207}\text{Pb}/^{235}\text{U}$	1 σ	$^{206}\text{Pb}/^{235}\text{U}$	1 σ	$^{207}\text{Pb}/^{206}\text{Pb}$	1 σ	$^{207}\text{Pb}/^{235}\text{U}$	1 σ	$^{206}\text{Pb}/^{235}\text{U}$	1 σ
KD-1-1	14	210	344	0.61	0.050 5	0.002 4	0.232 1	0.010 0	0.033 4	0.000 4	216	106	212	8	212	3
KD-1-2	20	348	466	0.75	0.053 7	0.002 5	0.244 1	0.010 4	0.033 0	0.000 4	358	103	222	9	209	3
KD-1-3	14	234	340	0.69	0.053 4	0.002 4	0.257 8	0.010 1	0.035 0	0.000 4	344	97	233	8	222	3
KD-1-4	11	169	256	0.66	0.049 5	0.002 3	0.239 9	0.010 0	0.035 1	0.000 5	174	104	218	8	223	3
KD-1-5	13	182	279	0.65	0.073 8	0.002 8	0.351 3	0.011 3	0.034 5	0.000 4	1 036	74	306	8	219	3
KD-1-6	22	282	495	0.57	0.070 3	0.002 3	0.335 0	0.008 9	0.034 5	0.000 4	938	66	293	7	219	2
KD-1-7	15	207	382	0.54	0.050 5	0.002 3	0.231 1	0.009 3	0.033 2	0.000 4	218	101	211	8	211	3
KD-1-8	14	199	327	0.61	0.064 6	0.002 3	0.307 8	0.009 3	0.034 6	0.000 4	762	74	273	7	219	2
KD-1-9	18	314	407	0.77	0.050 6	0.002 1	0.245 6	0.008 7	0.035 2	0.000 4	222	91	223	7	223	3
KD-1-10	14	210	317	0.66	0.050 8	0.002 2	0.245 5	0.009 2	0.035 0	0.000 4	232	95	223	8	222	3
KD-1-11	16	196	365	0.54	0.050 6	0.002 0	0.245 3	0.008 2	0.035 2	0.000 4	220	87	223	7	223	3
KD-1-12	17	234	412	0.57	0.055 1	0.002 5	0.261 5	0.010 5	0.034 4	0.000 5	417	97	236	8	218	3
KD-1-13	13	158	307	0.51	0.053 3	0.002 1	0.255 1	0.008 8	0.034 7	0.000 4	339	87	231	7	220	3
KD-1-14	14	221	332	0.66	0.050 3	0.002 2	0.231 8	0.009 1	0.033 4	0.000 4	210	99	212	8	212	3
KD-1-15	16	262	356	0.74	0.052 4	0.002 0	0.253 7	0.008 4	0.035 1	0.000 4	304	85	230	7	222	3
KD-1-16	17	244	401	0.61	0.050 3	0.002 2	0.231 7	0.009 1	0.033 4	0.000 4	210	99	212	7	212	3
KD-1-17	14	216	393	0.55	0.053 0	0.002 3	0.254 1	0.010 0	0.034 7	0.000 4	330	96	230	8	220	3
KD-1-18	11	157	253	0.62	0.050 6	0.002 6	0.245 8	0.011 8	0.035 2	0.000 5	223	116	223	10	223	3
KD-1-19	21	326	506	0.64	0.050 5	0.002 1	0.245 7	0.009 0	0.035 3	0.000 4	220	93	223	7	223	3
KD-1-20	13	174	305	0.57	0.050 6	0.002 6	0.245 2	0.011 3	0.035 2	0.000 5	221	113	223	9	223	3
KD-1-21	17	330	403	0.82	0.048 4	0.002 2	0.220 1	0.009 1	0.033 0	0.000 4	119	105	202	8	209	3
KD-1-22	16	230	377	0.61	0.051 4	0.002 2	0.246 5	0.009 3	0.034 8	0.000 4	259	95	224	8	220	3
KD-1-23	8	105	191	0.55	0.058 3	0.005 6	0.264 2	0.024 4	0.032 9	0.000 8	541	198	238	20	208	5
KD-1-24	23	307	524	0.59	0.050 7	0.001 7	0.245 3	0.007 0	0.035 1	0.000 4	225	78	223	6	223	2
KD-1-25	16	199	382	0.52	0.054 6	0.002 7	0.261 5	0.011 8	0.034 7	0.000 5	395	107	236	10	220	3
KD-1-26	16	279	374	0.75	0.050 2	0.002 2	0.240 8	0.009 6	0.034 8	0.000 4	206	100	219	8	220	3
KD-1-27	15	161	331	0.49	0.053 8	0.002 0	0.259 3	0.008 1	0.035 0	0.000 4	361	81	234	7	222	2
KD-1-28	19	264	480	0.55	0.081 0	0.003 4	0.368 8	0.013 7	0.033 0	0.000 5	1 222	81	319	10	209	3
KD-1-29	17	206	380	0.54	0.062 0	0.002 5	0.298 5	0.010 4	0.034 9	0.000 4	674	84	265	8	221	3
KD-1-30	20	211	395	0.53	0.055 4	0.002 4	0.270 8	0.010 2	0.035 5	0.000 4	427	92	243	8	225	3

表 2 郎木寺组角闪安山岩锆石稀土元素分析结果统计表(10⁻⁶)

Tab. 2 Zircon analysis of rare earth elements in jiaoshan andesite of Langmusi formation(10⁻⁶)

分析点	La	Ce	Pr	Nd	Sm	Eu	Gd	Tb	Dy	Ho	Er	Tm	Yb	Lu	δEu	(La/Yb) _N	(La/Sm) _N	(Gd/Yb) _N	(Gy/Yb) _N	Sm/Yb	Eu/Yb	Tb/Yb
KD-1-1	127.26	112.30	72.21	62.74	46.54	8.31	65.45	90.64	130.43	195.58	278.01	375.29	548.00	686.61	0.15	0.23	2.73	0.12	0.24	0.08	0.02	0.17
KD-1-2	1505.82	1226.62	893.26	737.94	425.75	46.72	301.80	280.21	316.73	406.71	520.66	651.76	894.88	1068.50	0.13	1.68	3.54	0.34	0.35	0.48	0.05	0.31
KD-1-3	0.86	15.92	2.35	5.05	23.14	6.72	64.14	104.28	152.83	231.63	332.21	444.31	629.65	764.57	0.17	0.00	0.04	0.10	0.24	0.04	0.01	0.17
KD-1-4	0.09	12.99	1.31	3.58	16.21	5.62	50.27	82.09	122.95	187.10	266.71	355.69	523.00	636.61	0.20	0.00	0.01	0.10	0.24	0.03	0.01	0.16
KD-1-5	28.73	32.73	13.94	11.97	22.61	9.21	47.40	75.67	114.06	169.96	243.50	329.41	484.65	596.85	0.28	0.06	1.27	0.10	0.24	0.05	0.02	0.16
KD-1-6	331.14	283.81	196.53	159.91	98.82	11.03	90.07	106.15	146.93	213.78	306.77	407.84	574.71	730.71	0.12	0.58	3.35	0.16	0.26	0.17	0.02	0.18
KD-1-7	37.89	46.42	23.80	20.62	22.94	6.33	45.94	76.20	119.96	190.28	277.82	376.47	575.18	703.94	0.19	0.07	1.65	0.08	0.21	0.04	0.01	0.13
KD-1-8	1.96	13.84	1.95	3.47	16.93	5.07	39.95	71.20	110.91	171.73	248.04	340.00	493.65	604.72	0.19	0.00	0.12	0.08	0.22	0.03	0.01	0.14
KD-1-9	0.12	17.86	2.12	8.24	41.63	10.59	109.98	164.44	236.06	355.65	497.04	636.08	880.06	1080.31	0.16	0.00	0.00	0.12	0.27	0.05	0.01	0.19
KD-1-10	0.11	14.72	0.96	3.49	17.71	4.84	48.37	76.47	116.30	181.10	263.14	350.20	511.41	613.39	0.17	0.00	0.01	0.09	0.23	0.03	0.01	0.15
KD-1-11	0.44	15.83	0.92	1.86	11.11	4.21	37.23	63.90	104.17	168.55	240.85	341.96	497.18	613.39	0.21	0.00	0.04	0.07	0.21	0.02	0.01	0.13
KD-1-12	6.01	22.19	4.03	5.74	15.56	4.55	44.23	75.40	117.68	178.62	263.32	358.43	522.41	627.17	0.17	0.01	0.39	0.08	0.23	0.03	0.01	0.14
KD-1-13	0.44	12.94	0.83	1.58	7.78	3.09	32.17	52.46	87.87	138.34	204.71	282.75	423.65	509.84	0.20	0.00	0.06	0.08	0.21	0.02	0.01	0.12
KD-1-14	0.23	16.16	1.47	3.75	18.56	6.55	54.55	83.69	125.83	193.99	269.91	367.06	544.24	631.50	0.21	0.00	0.01	0.10	0.23	0.03	0.01	0.15
KD-1-15	0.24	16.49	2.85	7.84	34.18	10.14	84.82	134.22	197.17	293.29	404.29	550.98	752.82	897.24	0.19	0.00	0.01	0.11	0.26	0.05	0.01	0.18
KD-1-16	0.15	17.86	1.00	2.66	16.67	4.69	44.96	78.07	119.17	180.74	271.72	366.67	524.35	644.09	0.17	0.00	0.01	0.09	0.23	0.03	0.01	0.15
KD-1-17	0.11	14.17	0.43	2.66	19.02	5.91	46.57	79.68	117.64	187.81	265.68	369.02	561.41	661.81	0.20	0.00	0.01	0.08	0.21	0.03	0.01	0.14
KD-1-18	0.11	14.04	1.15	3.23	13.59	4.43	41.31	67.59	103.90	154.77	233.41	309.80	454.47	552.76	0.19	0.00	0.01	0.09	0.23	0.03	0.01	0.15
KD-1-19	1.00	21.72	2.01	4.97	22.48	5.81	60.19	101.07	153.50	225.80	322.24	442.75	639.41	752.76	0.16	0.00	0.04	0.09	0.24	0.04	0.01	0.16
KD-1-20	0.13	15.96	0.59	1.78	10.07	3.97	35.67	60.94	92.20	148.94	213.78	295.29	437.59	529.53	0.21	0.00	0.01	0.08	0.21	0.02	0.01	0.14
KD-1-21	0.59	18.68	7.03	16.15	53.73	17.66	133.92	200.27	292.01	408.83	556.31	716.86	995.29	1157.87	0.21	0.00	0.01	0.13	0.29	0.05	0.02	0.20
KD-1-22	0.12	18.01	0.89	2.87	14.71	4.38	47.93	75.13	117.99	180.57	260.66	354.51	525.53	629.53	0.16	0.00	0.01	0.09	0.22	0.03	0.01	0.14
KD-1-23	18.35	22.47	10.07	7.37	6.73	4.29	24.33	42.22	62.36	100.35	151.96	209.02	306.06	377.95	0.34	0.06	2.73	0.08	0.20	0.02	0.01	0.14
KD-1-24	0.17	20.78	1.37	3.73	20.07	5.05	54.50	90.11	135.28	214.66	306.16	422.35	622.06	720.08	0.15	0.00	0.01	0.09	0.22	0.03	0.01	0.14
KD-1-25	365.86	290.28	202.84	173.79	96.01	13.28	81.75	90.91	121.42	168.37	245.98	343.14	485.18	582.68	0.75	0.75	3.81	0.17	0.25	0.20	0.03	0.19
KD-1-26	0.20	17.71	3.94	10.81	39.35	13.24	104.96	155.88	228.62	329.51	455.47	601.96	840.65	965.35	0.00	0.00	0.01	0.12	0.27	0.05	0.02	0.19
KD-1-27	20.89	30.25	13.65	10.79	14.05	4.12	36.01	57.59	83.11	135.69	206.59	290.20	425.71	516.54	0.05	0.05	1.49	0.08	0.20	0.03	0.01	0.14
KD-1-28	0.39	20.05	0.81	2.55	17.78	4.71	48.13	84.22	132.05	204.95	304.71	437.25	614.47	681.50	0.00	0.00	0.02	0.08	0.21	0.03	0.01	0.14
KD-1-29	156.54	135.82	87.89	73.23	45.03	6.48	53.63	76.47	110.28	168.02	241.21	338.43	501.06	583.86	0.31	0.31	3.48	0.11	0.22	0.09	0.01	0.15
KD-1-30	4.21	18.66	2.38	3.62	11.24	3.60	36.74	62.09	100.20	160.78	237.40	330.59	489.88	601.97	0.01	0.01	0.37	0.07	0.20	0.02	0.01	0.13

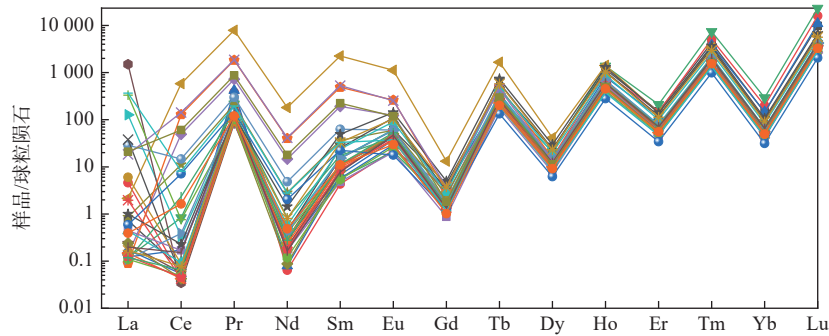


图3 郎木寺组角闪安山岩稀土元素球粒陨石配分曲线 (Boynnton et al., 1984)

Fig. 3 Zircon rare earth element chondrite partition curve of Jiaoshan andesite in Langmusi formation

锆石呈现略有差异的两组年龄(图4a、图4b):第1组年龄有18个测试点, $^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$ 年龄为225~218 Ma,加权平均年龄为(221.8±1.2) Ma(MSWD=0.35)(图4c);

第2组年龄有6个测试点, $^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$ 年龄为212~208 Ma,加权平均年龄为(210.6±2.1) Ma(MSWD=0.23)(图4d)。

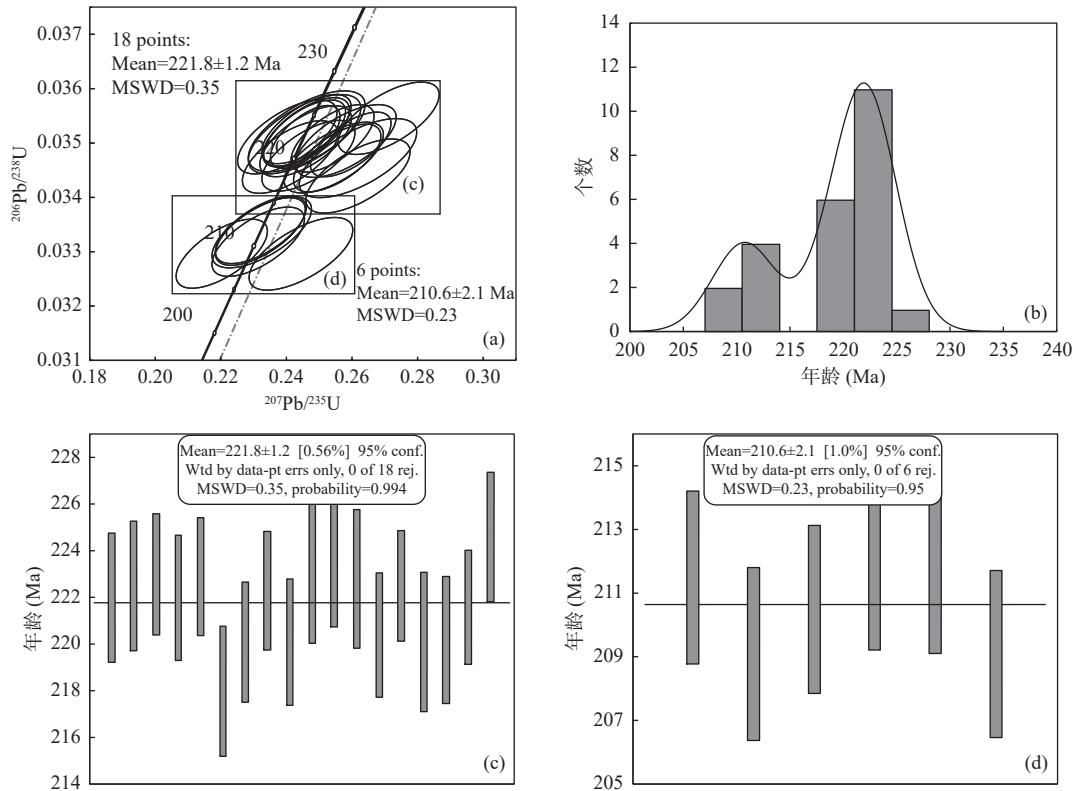


图4 郎木寺组角闪安山岩锆石年龄谐和图

Fig. 4 Zircon age map of jiaoshan andesite in Langmusi formation

4 讨论

4.1 郎木寺组角闪安山岩形成时代

本次研究中,锆石U-Pb年代学研究表明,郎木寺组角闪安山岩同一个样品中存在两组加权平均年龄,分别为(221.8±1.2) Ma (MSWD=0.35)和(210.6±2.1)

Ma (MSWD=0.23),类似的情况在秦岭造山带的其他研究也有记录。例如, Hu等(2017)从柞水岩体的二长花岗岩中获得两组结晶年龄(216 Ma和200 Ma);张成立等(2009)从沙河湾寄主花岗岩获取两组结晶年龄(210 Ma和197 Ma)、镁铁质暗色包体两组年龄(197 Ma和188 Ma)、闪长质围岩两组年龄(230 Ma和210 Ma); Niu等(2016)认为西秦岭构造带中的间井

岩体有两期岩浆结晶年龄(212 Ma 和 225 Ma); Li 等(2019)对东江口岩体生长历史的研究认为, 该岩体至少经历了两次相差~10 Ma 岩浆事件。因此, 秦岭造山带晚三叠世花岗岩和火山岩, 同一样品中存在 2 组岩浆结晶年龄是普遍现象。

对于同一样品存在两组年龄这种现象主要有 2 种解释: ①存在捕获锆石。②同一岩浆系统侵位之前, 已经存在该岩浆系统结晶出的锆石。已有的研究表明, 岩浆作用是一个相对快速的过程, 时间尺度小于 10 万 a(Petford et al., 2000)。因此, 郎木寺组角闪安山岩的两组结晶年龄更倾向于代表晚期岩浆捕获早期岩浆结晶的锆石。再者, 前人通过矿物温压计获得岩浆结晶温度较低~700 °C(冉亚洲, 2018; Li et al., 2019)。岩浆结晶温度低和快速结晶过程能够很好地解释在晚期岩浆中大量存在岩浆捕获锆石的可能(Miller et al., 2003)。

曾宜君等(2009)获得郎木寺组火山岩年龄为(202±1)Ma, 结合层型剖面和相邻地区测年数据, 将郎木寺组形成时代厘定为早侏罗世。丁德建(2014)获得郎木寺组安山岩锆石 11 个测点的锆石²⁰⁶Pb/²³⁸U 加权平均年龄为(214.5±2.8)Ma, 认为该年龄代表郎木寺组安山岩的岩浆冷却结晶年龄。因此, 结合前人的研究笔者认为郎木寺组火山岩的形成时代为晚三叠世, 而不是前人所认为的早侏罗世(四川省地矿局川西北地质队, 1992)。同时, 其上覆的财宝山组火山岩的形成时代也可能早于前人所得出的早白垩世。郎木寺组角闪安山岩到财宝山组火山岩表现出从基性到中性再到酸性的连续演化特征。因此, 推断它们很有可能是同一岩浆演化阶段不同时期的产物。而锆石 U-Pb 定年的结论与下伏不整合接触的甲秀组中产有侏罗纪—白垩纪常见植物分子的事实并不矛盾。因此, 可将郎木寺组火山岩和财宝山组火山岩划分到同一组内, 共同反映晚三叠世连续的岩浆喷发事件。文中郎木寺组内角闪安山岩是秦岭造山带在晚三叠世造山事件的岩浆响应。

4.2 区域构造意义

伴随印支期全面碰撞造山, 秦岭造山带内(尤其是南秦岭以及宁陕断裂以西部分)发育大量的岩浆作用, 形成规模宏大的花岗岩体群。研究表明, 这些岩体年龄大多为 225~200 Ma, 地球化学成分多具有相对富集 LILE、LREE, 贫化 HFSE 和 Nb、Ta 不同程度亏损的地球化学特征(张成立等, 2008), 部分花岗岩

显示了埃达克质(或高 Sr、低 Y)花岗岩和 I-A 型过渡的环斑结构花岗岩的特征, 所包含的大量暗色包体指示了壳、幔两端元岩浆的混合作用(张成立等, 2005, 2008; 梁文天, 2009)。然而, 秦岭造山带晚三叠世岩浆作用的构造背景一直存在俯冲(Jiang et al., 2010; Qin et al., 2013)、碰撞造山(孙卫东等, 2000; 张静等, 2002; 王晓霞等, 2003; 周斌等, 2008; Li et al., 2017)以及后碰撞挤压向伸展转换(卢欣祥等, 1996; 张成立等, 2008; 弓虎军等, 2009a, 2009b; 王晓霞等, 2011; Dong et al., 2012)等众多解释。

前人关于晚三叠世岩浆作用构造环境的探讨主要集中在岩石学和地球化学方面。例如, 孙卫东等(2000)认为这些花岗岩体是勉略洋闭合时由陆壳俯冲造成; 张成立等(2005)认为勉略缝合带内的光头山岩体群(219~214 Ma)是秦岭造山带主造山期后岩石圈拆沉, 幔源岩浆上涌导致下地壳的部分熔融所形成。因此, 认为这些花岗岩可能形成于后碰撞构造环境; Jiang 等(2010)认为这些岩体形成于同碰撞构造背景下; Qin 等(2013)认为这些花岗岩形成于后碰撞的构造背景; Li 等(2015)认为三叠纪花岗岩体是在三叠纪活动大陆构造背景下形成的, 而非同碰撞或后碰撞环境。近来, 有一些花岗岩构造方面的研究, 结果一致认为这些岩体形成于板块碰撞引起的挤压构造环境。例如, 梁文天等(2015)认为西秦岭糜署岭岩体形成于同碰撞构造背景下, 岩浆上升侵位过程受到右行走滑断裂的控制; 陶威(2014)认为南秦岭老城岩体和胭脂坝岩体的花岗岩浆活动受区域左旋挤压变形的控制, 可能与晚三叠世宁陕断裂活动密切相关; Li 等(2017, 2019)认为八里坪岩体和东江口岩体的侵位受区域构造控制, 形成同碰撞斜向汇聚下的左旋挤压运动学状态, 边界断裂和剪切带控制了岩体侵位过程。

本次研究所揭示的郎木寺组角闪安山岩与秦岭造山带晚三叠世花岗岩属于同一时代岩浆产物。前人的地球化学研究显示, 郎木寺组角闪安山岩以富集放射性元素 Th, 亏损 Nb、Ta、Ti 等高场强元素为特征, 在微量元素蛛网图上同样表现大离子亲石元素 Ba、Th、U、Pb 富集和高场强元素 Nb、Ta、Sr、Ti 的强烈亏损; Nb/La 值为 0.28~0.54, Hf/Ta 值为 7.07~8.52, La/Ta 值为 25.13~41.68(郭现轻等, 2011)。郎木寺组角闪安山岩表现出岛弧火山岩的地球化学特征(曾宜君等, 2009), 形成于岛弧—活动大陆边缘造山带环境。研究表明, 若尔盖地区郎木寺组角闪安山岩成岩年龄

为220~211 Ma, 据此认为至少在这个阶段, 西秦岭郎木寺地区仍处于同碰撞挤压的构造环境, 而非后碰撞更不是碰撞后环境。笔者的结论可以得到其他地质证据的支持: ①近来越来越多的构造年代学研究均揭示了秦岭造山带于中晚三叠世期间记录了大量的构造活动(李阳, 2017), 并主要集中在晚三叠世, 说明此时仍在碰撞造山。②秦岭造山带内的变质记录也支持碰撞造山作用主要发生在中晚三叠世, 如安子山麻粒岩(李三忠等, 2000; 张宗清等, 2002)以及黑沟峡变质火山岩(李曙光等, 1996)。③印支期主逆冲推覆构造中卷入的最新地层为中三叠统, 这说明碰撞造山不早于中三叠世(张国伟, 2001), 印支期碰撞之后, 造山带内普遍发育了早中侏罗系陆相断陷沉积盆地, 这些断陷盆地明显不整合覆盖在强烈变形的主造山期地层之上(梁文天, 2009; 谢晋强, 2014), 因此它们限制了秦岭造山带发生大规模伸展垮塌的时间是早中侏罗世, 而不是晚三叠世。④详细的古地磁研究也表明, 华南和华北的碰撞拼合是发生在晚三叠世(朱日祥等, 1998)。所以, 通过郎木寺组角闪安山岩形成的构造环境分析以及其他地质证据, 笔者认为秦岭造山带晚三叠世岩浆作用形成于同碰撞挤压的构造环境。

5 结论

(1) 郎木寺组火山岩为一套灰黑色中性-中基性火山岩, 包括爆发相岩类角闪安山岩和溢流相岩类黑云母安山岩, 部分岩石出现气孔构造和杏仁构造, 柱状节理发育。

(2) 郎木寺组角闪安山岩锆石 U-Pb 定年结果获得两组年龄, 分别为 $(221.8 \pm 1.2) \text{Ma}$ (MSWD=0.35), $(210.6 \pm 2.1) \text{Ma}$ (MSWD=0.23)。前者可能代表捕获锆石年龄, 而后者应为岩浆结晶年龄。认为郎木寺组火山岩的形成时代为晚三叠世。

(3) 结合前人研究, 认为郎木寺组火山岩形成于同碰撞挤压的构造环境。

致谢: 博士研究生陶咸参与了野外工作, 西北大学地质学系张成立教授和柳小明教授在锆石数据分析与解释方面给予的指导, 审稿专家宝贵的意见耐心指正, 使本人受益匪浅, 在此一并深表谢意!

参考文献(References):

丁德建. 若尔盖岩浆活动与铀成矿[D]. 成都: 成都理工大学,

2014.

DING Dejian. Magmatic activities in Ruoergai and uranium mineralization[D]. Chengdu: Chengdu University of Technollgy, 2014.

弓虎军, 朱赖民, 孙博亚, 等. 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, 2009a, 25(2): 248-264.

GONG Hujun, ZHU Laimin, SUN Boya, et al. Zircon U-Pb ages and Hf isotope characteristic and their geological significance of the Shahewan, Caoping and Zhashui granitic plutons in the South Qinling orogen[J]. Acta Petrologica Sinica, 2009a, 25(2): 248-264.

弓虎军, 朱赖民, 孙博亚, 等. 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, 2009b, 25(11): 337-350.

GONG Hujun, ZHU Laimin, SUN Boya, et al. Zircon U-Pb ages and Hf isotope composition of the Dongjiangkou granitic pluton and its mafic enclaves in the South Qinling terrain[J]. Acta Petrologica Sinica, 2009b, 25(11): 337-350.

郭现轻, 闫臻, 王宗起, 等. 西秦岭谢坑砂卡岩型铜金矿床地质特征与矿区岩浆岩年代学研究[J]. 岩石学报, 2011, 27(12): 3811-3822.

GUO Xianqing, YAN Zhen, WANG Zongqi, et al. Geological characteristic and associated magmatic ages of the Xiekeng skantype Cu-Au deposit in the West Qinling terrane[J]. Acta Petrologica Sinica, 2011, 27(12): 3811-3822.

黄雄飞, 莫宣学, 喻学惠, 等. 西秦岭宕昌地区晚三叠世酸性火山岩的锆石 U-Pb 年代学、地球化学及其地质意义[J]. 岩石学报, 2013, 29(11): 3968-3980.

HUANG Xiongfei, MO Xuanxue, YU Xuehui, et al. Zircon U-Pb chronology, geochemistry of the Late Triassic acid volcanic rocks in Tanchang area, West Qinling and their geological significance[J]. Acta Petrologica Sinica, 2013, 29(11): 3968-3980.

李长民. 锆石成因矿物学与锆石微区定年综述[J]. 地质调查与研究, 2009, 32(3): 161-174.

LI Changmin. A Review on the Minerageny and Situ Microanalytical Dating Techniques of Zircons[J]. Geological Survey and Research, 2009, 32(3): 161-174.

李积清, 张鑫利, 王涛, 等. 东昆仑战红山地区花岗斑岩 LA-ICP-MS 锆石 U-Pb 测年及岩石地球化学特征[J]. 西北地质, 2021, 54(1): 30-40.

李平, 陈隽璐, 张越, 等. 商丹俯冲增生带南缘土地沟-池沟地区侵入岩形成时代及地质意义[J]. 西北地质, 2023, 56(2): 10-27.

LI Ping, CHEN Junlu, ZHANG Yue, et al. The Formation Age of Intrusions from Tudigou-Chigou Region in Southern Margin of Shangdan Subduction-Accretion Belt and Its Geological Significance[J]. Northwestern Geology, 2023, 56(2): 10-27.

李三忠, 张国伟, 李亚林, 等. 勉县地区勉略带内麻粒岩的发现

- 及构造意义[J]. *岩石学报*, 2000, 14(2): 220–226.
- LI Sanzhong, ZHANG Guowei, LI Yalin, et al. Discovery of granulite in the Mianxian-Lueyang suture zone, Mianxian area and its tectonic significance[J]. *Acta Petrologica Sinica*, 2000, 14(2): 220–226.
- 李曙光, 孙卫东, 张国伟, 等. 南秦岭勉略构造带黑沟峡变质火山岩的年代学和地球化学——古生代洋盆及其闭合时代的证据[J]. *中国科学 (D辑:地球科学)*, 1996, 26(3): 223–230.
- LI Shuguang, SUN Weidong, ZHANG Guowei, et al. Chronology and geochemistry of metamorphic volcanic rocks in Heigou Gorge, Mianlue Structural Belt, South Qinling Mountains: Evidence for a Paleozoic oceanic basin and its closing age[J]. *Scientia Sinica (Terrae)*, 1996, 26(3): 223–230.
- 李艳广, 靳梦琪, 汪双双, 等. LA-ICP-MS U-Pb 定年技术相关问题探讨[J]. *西北地质*, 2023, 56(4): 274–282.
- LI Yanguang, JIN Mengqi, WANG Shuangshuang, et al. Exploration of Issues Related to the LA-ICP-MS U-Pb Dating Technique [J]. *Northwestern Geology*, 2023, 56(4): 274–282.
- 李阳. 秦岭造山带晚三叠世东江口岩体的侵位机制及其构造意义[D]. 西安: 西北大学, 2017.
- LI Yang. Emplacement Mechanism and its Tectonic Implication of the Dongjiangkou Pluton, Qinling Orogen[D]. Xi'an: Northwest University, 2017.
- 梁文天. 秦岭造山带东西秦岭交接转换区陆内构造特征与演化过程[D]. 西安: 西北大学, 2009.
- LIANG Wentian. Characteristics and evolution process of intracontinental structure in the transition zone of Qinling orogenic belt[D]. Xi'an: Northwest University, 2009.
- 梁文天, 靳春胜, PRAYATH Nantasin, 等. 秦岭造山带晚三叠世糜棱岩体的岩石磁学及磁组构可靠性约束[J]. *地球物理学报*, 2015, 58(3): 953–970.
- LIANG Wentian, JIN Chunsheng, PRAYATH Nantasin, et al. Magnetic mineralogy and the reliability of AMS in the Late Triassic Mishuling pluton, Qinling orogen[J]. *Chinese Journal of Geophysics*, 2015, 58(3): 953–970.
- 柳小明, 高山, 第五春荣, 等. 单颗粒锆石的 20 μm 小斑束原位微区 LA-ICP-MS U-Pb 年龄和微量元素的同时测定[J]. *科学通报*, 2007, 52(2): 228–235.
- LIU Xiaoming, GAO Shan, DIWU Chunrong, et al. Simultaneous determination of LA-ICP-MS U-Pb age and trace elements of single grain zircon in situ microzone by 20 μm specular beam[J]. *Chinese Science Bulletin*, 2007, 52(2): 228–235.
- 卢欣祥, 董有, 常秋玲, 等. 秦岭早中生代沙河湾奥长环斑花岗岩及动力学意义[J]. *中国科学 (D辑)*, 1996, 26(3): 244–248.
- LU Xinxiang, DONG You, CHANG Qiuling, et al. The Indosinian Shahewan Aochang ring porphyry granite of Qinling Mountains and its kinetic significance[J]. *Scientia Sinica (Terrae)*, 1996, 26(3): 244–248.
- 秦江锋. 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]. 西安: 西北大学, 2010.
- QIN Jiangfeng. Genetic mechanism and deep dynamic background of Late Triassic granitoids in Qinling orogenic belt[D]. Xi'an: Northwest University, 2010.
- 冉亚洲. 秦岭晚三叠世花岗岩侵位温压条件及地质意义[D]. 西安: 西北大学, 2018.
- RAN Yazhou. The Emplacement Temperature and Pressure Conditions of Late Triassic Granites in Qinling Orogen and their Geological Significance[D]. Xi'an: Northwest University, 2018.
- 四川省地矿局川西北地质队. 贡巴、扎尕那等 1:5 万八副联测区调报告[M]. 北京: 地质出版社, 1992.
- Sichuan Bureau of Geology and Mineral Resources northwest Sichuan geological team. Gomba, Zhaagana and other 1: 58,000 side test area report[M]. Beijing: Geological Publishing House, 1992.
- 孙延贵, 张国伟, 郑健康, 等. 柴达木地块东南缘岩浆弧(带)形成的动力学背景[J]. *华南地质与矿产*, 2001, 17(4): 16–21.
- SUN Yangui, ZHANG Guowei, ZHENG Jiankang, et al. Analysis of Dynamic Backgrounds of Magmatic Arc in the Southeastern Margin of Qaidam Massif[J]. *South China Geology*, 2001, 17(4): 16–21.
- 孙卫东, 李曙光, Chen Yadong, 等. 南秦岭花岗岩锆石 U-Pb 定年及其地质意义[J]. *地球化学*, 2000, 29(3): 209–216.
- SUN Weidong, LI Shuguang, Chen Yadong, et al. Zircon U-Pb dating of granitoids from South Qinling, Central China and their geological significance[J]. *Geochimica*, 2000, 29(3): 209–216.
- 陶威, 梁文天, 张国伟. 南秦岭晚三叠世胭脂坝岩体的磁组构特征及意义[J]. *吉林大学学报 (地球科学版)*, 2014, 44(5): 1575–1586.
- TAO Wei, LIANG Wentian, ZHANG Guowei. Magnetic Fabric Features and Its Significance of the Late Triassic Yanzhiba Pluton, South Qinling[J]. *Journal of Jilin University (Earth Science Edition)*, 2014, 44(5): 1575–1586.
- 田绒. 西秦岭解板沟一带晚三叠世火山作用特征研究[D]. 北京: 中国地质大学(北京), 2020.
- TIAN Rong. The Geological Characteristics of Late Triassic Volcanism in Haibangou, West Qinling[D]. Beijing: China University of Geoscience (Beijing), 2020.
- 王汉辉, 唐利, 杨勃畅, 等. 东秦岭黄水庵碳酸岩型 Mo-REE 矿床方解石地球化学特征和氟碳铈矿 U-Th-Pb 年龄及其意义[J]. *西北地质*, 2023, 56(1): 48–62.
- WANG Hanhui, TANG Li, YANG Bochang, et al. Geochemical Characteristics of Calcite and Bastnäsite U-Th-Pb Age of the Huangshui'an Carbonatite-hosted Mo-REE Deposit, Eastern Qinling[J]. *Northwestern Geology*, 2023, 56(1): 48–62.

- 王晓霞, 王涛, 卢欣祥, 等. 北秦岭老君山和秦岭梁环斑结构花岗岩及构造环境——一种可能的造山带型环斑花岗岩[J]. *岩石学报*, 2003, 19(4): 650–660.
- WANG Xiaoxia, WANG Tao, LU Xinxiang, et al. Laojunshan and Qinlingliang rapakivi-textured granitoids in North Qinling and their tectonic setting: A possible orogenic-type rapakivi granitoids[J]. *Acta Petrologica Sinica*, 2003, 19(4): 650–660.
- 王晓霞, 王涛, 齐秋菊, 等. 秦岭晚中生代花岗岩时空分布、成因演变及构造意义[J]. *岩石学报*, 2011, 27(6): 1573–1593.
- WANG Xiaoxia, WANG Tao, QI Qiuju, et al. Temporal-spatial variations, origin and their tectonic significance of the Late Mesozoic granites in the Qinling, Central China[J]. *Acta Petrologica Sinica*, 2011, 27(6): 1573–1593.
- 王梓桐, 王根厚, 张维杰, 等. 阿拉善地块南缘志留纪花岗闪长岩 LA-ICP-MS 锆石 U-Pb 年龄及地球化学特征[J]. *成都理工大学学报(自然科学版)*, 2022, 49(5): 586–600.
- WANG Zitong, WANG Genhou, ZHANG Weijie, et al. LA-ICP-MS zircon U-Pb dating and geochemical characteristics of the Silurian granodiorite in the southern margin of Alxa Block, China [J], *Journal of Chengdu University of Technology (Science & Technology Edition)*, 2022, 49(5): 586–600.
- 谢晋强. 北大巴山推覆构造形成时代及其复合演化[D]. 西安: 西北大学, 2014.
- XIE Jinqiang. Formation age and composite evolution of nappe structure in Daba Mountain[D]. Xi'an: Northwest University, 2014.
- 熊万宇康, 赵梦琪, 于淼, 等. 造山带洋陆转换过程与岩浆作用: 以东昆仑都兰地区古生代花岗岩为例[J]. *西北地质*, 2023, 56(6): 113–139.
- XIONG Wanyukang, ZHAO Mengqi, YU Miao, et al. Ocean-Continent Transition Process and Magmatism in Orogenic Belts: A Case Study of Paleozoic Granites in the Dulan Area of East Kunlun[J]. *Northwestern Geology*, 2023, 56(6): 113–139.
- 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[J]. *Acta Petrologica Sinica*, 2012, 28(6): 1808–1828.
- 袁洪林, 吴福元, 高山, 等. 东北地区新生带侵入岩体的锆石激光探针 U-Pb 年龄测定与稀土元素成分分析[J]. *科学通报*, 2003, 48(14): 1511–1520.
- YUAN Honglin, WU Fuyuan, GAO Shan, et al. Zircon laser probe U-Pb dating and REE composition analysis of Cenozoic intrusions in Northeast China[J]. *Chinese Science Bulletin*, 2003, 48(14): 1511–1520.
- 曾宜君, 黄思静, 熊昌利, 等. 川西色达早侏罗世郎木寺组火山岩特征及构造意义[J]. *成都理工大学学报(自然科学版)*, 2009, 36(1): 78–86.
- ZENG Yijun, HUANG Sijing, XIONG Changli, et al. Characteristics and tectonic significance of the Lower Jurassic Langmusi Formation volcanic rocks in Seda, West Sichuan, China[J]. *Journal of Chengdu University of Technology (Science & Technology Edition)*, 2009, 36(1): 78–86.
- 张成立, 张国伟, 晏云翔, 等. 南秦岭勉略带北光头山花岗岩体群的成因及其构造意义[J]. *岩石学报*, 2005, 21(3): 711–720.
- ZHANG Chengli, ZHANG Guowei, YAN Yunxiang, et al. Genesis and tectonic significance of the Guowanshan granitic body group in Mianxiaobei, South Qinling Mountains[J]. *Acta Petrologica Sinica*, 2005, 21(3): 711–720.
- 张成立, 王晓霞, 王涛, 等. 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)*, 2009, 39(3): 453–465.
- ZHANG Chengli, WANG Xiaoxia, WANG Tao, et al. 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)*, 2009, 39(3): 453–465.
- 张成立, 王涛, 王晓霞. 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*, 2008, 14(3): 304–316.
- ZHANG Chengli, WANG Tao, WANG Xiaoxia. Origin and Tectonic Setting of the Early Mesozoic Granitoids in Qinling Orogenic Belt[J]. *Geological Journal of China Universities*, 2008, 14(3): 304–316.
- 张静, 陈衍景, 舒桂明, 等. 陕西西南部秦岭梁花岗岩体的矿物成分和相关问题讨论[J]. *中国科学(D辑)*, 2002, 32(2): 113–120.
- ZHANG Jing, CHEN Yanjing, SHU Guiming, et al. Study on mineral composition and related problems of Qinling Liang granitic body in southwestern Shaanxi Province[J]. *Scientia Sinica (Terrae)*, 2002, 32(2): 113–120.
- 张国伟, 孟庆任, 赖绍聪. 秦岭造山带的结构构造[J]. *中国科学*, 1995, (9): 994–1003.
- ZHANG Guowei, MENG Qingren, LAI Shaocong. Structure and structure of Qinling orogenic belt[J]. *Scientia Sinica*, 1995, (9): 994–1003.
- 张国伟. 秦岭造山带与大陆动力学[M]. 北京: 科学出版社, 2001.
- ZHANG Guowei. Qinling orogenic belt and continental dynamics [M]. Beijing: Sciences Press, 2001.
- 张宗清. 南秦岭变质地层同位素年代学[M]. 北京: 地质出版社, 2002.
- ZHANG Zongqing. Isotopic chronology of metamorphic strata in the South Qinling Mountains[M]. Beijing: Geology Press, 2002.
- 周斌, 汪方跃, 孙勇, 等. 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*, 2008, 24(6): 1261–1272.

- ZHOU Bin, WANG Fangyue, SUN Yong, et al. Geochemistry and tectonic affinity of Shahewan Orogenic rapakivi from Qinling[J]. *Acta Petrologica Sinica*, 2008, 24(6): 1261–1272.
- 朱日祥, 杨振宇, 马醒华, 等. 中国主要地块显生宙古地磁视极移曲线与地块运动[J]. *中国科学 (D 辑: 地球科学)*, 1998, (S1): 1–16.
- ZHU Rixiang, YANG Zhenyu, MA Xinghua, et al. Paleomagnetic apparent pole shift curves and block motion in Phanerozoic of major blocks in China[J]. *Scientia Sinica (Terrae)*, 1998, (S1): 1–16.
- Boynton WV. Cosmochemistry of the rare earth elements: meteorite studies[J]. *Developments in Geochemistry*, 1984, 2: 63–114.
- Dong Yunpeng, Zhang Guowei, Franz Neubauer, et al. Tectonic evolution of the Qinling orogen, China: Review and synthesis[J]. *Journal of Asian Earth Sciences*, 2011, 41: 213–237.
- Dong Yunpeng, Liu Xiaoming, Zhang Guowei, et al. Triassic diorites and granitoids in the Foping area: Constraints on the conversion from subduction to collision in the Qinling orogen, China[J]. *Journal of Asian Earth Sciences*, 2012, 47: 123–142.
- Dong Yunpeng, Stantosh M. Tectonic architecture and multiple orogeny of the Qinling Orogenic Belt, Central China[J]. *Gondwana Research*, 2016, 29: 1–40.
- Niu Yaoling, Zhang Yu, Duan Meng, et al. Zircon U-Pb geochronology, Sr-Nd-Hf isotopic composition and geological significance of the Late Triassic Baijiazhuang and Lvjing granitic plutons in West Qinling Orogen[J]. *Lithos*, 2016, 260: 443–456.
- Hu Fangyang, Liu Shuwen, Ducea Mihai, et al. The geochemical evolution of the granitoid rocks in the South Qinling Belt: Insights from the Dongjiangkou and Zhashui intrusions, central China[J]. *Lithos*, 2017, 278–281: 195–214.
- Jiang Yaohui, Jin Guodong, Liao Shiyong, et al. Geochemical and Sr-Nd-Hf isotopic constraints on the origin of Late Triassic granitoids from the Qinling orogen, central China: Implications for a continental arc to continent-continent collision[J]. *Lithos*, 2010, 117(1–4): 183–197.
- Li Sanzhong, Kusky Timothy, Wang Lu, et al. Collision leading to multiple-stage large-scale extrusion in the Qinling orogen: Insights from the Mianlue suture[J]. *Gondwana Research*, 2007, 12(1–2): 121–143.
- Li Yang, Liang Wentian, Zhang Guowei, et al. Tectonic setting of the Late Triassic magmatism in the Qinling Orogen: New constraints from the interplay between granite emplacement and shear zone deformation in the Shagou area[J]. *Geological Journal*, 2017, 52(S1): 250–271.
- Li Yang, Li Sanzhong, Liang Wentian, et al. Incremental emplacement and syn-tectonic deformation of Late Triassic granites in the Qinling Orogen: Structural and geochronological constraints-ScienceDirect[J]. *Gondwana Research*, 2019, 72: 194–212.
- Liang Wentian, Zhang Guowei, Bai Yong, et al. New insights into the emplacement mechanism of the Late Triassic granite plutons in the Qinling orogen: A structural study of the Mishuling pluton[J]. *Geological Society of America Bulletin*, 2015, 127(11–12): 1583–1603.
- Miller C F, Mcdowell S M, Mapes R W. Hot and cold granites Implications of zircon saturation temperatures and preservation of inheritance[J]. *Geology*, 2003, 31(6): 529.
- Petford N, Cruden A R, Mccaffrey K J, et al. Granite magma formation, transport and emplacement in the Earth's crust[J]. *Nature*, 2000, 408(6813): 669–673.
- Qin Jiangfeng, Lai Shaocong, Li Yongfei. Multi-stage granitic magmatism during exhumation of subducted continental lithosphere: Evidence from the Wulong pluton, South Qinling[J]. *Gondwana Research*, 2013, 24(3–4): 1108–1126.
- Tao Wei, Li Yang, Chen Yingtao, et al. Syn-tectonic emplacement during sinistral transpression: The Late Triassic Gaoqiao pluton in the South Qinling Belt, central China[J]. *Geological Journal*, 2021, 56(2): 995–1011.
- Wang Xiaoxia, Wang Tao, Zhang Chengli. Neoproterozoic, Paleozoic, and Mesozoic granitoid magmatism in the Qinling Orogen, China: Constraints on orogenic process[J]. *Journal of Asian Earth Sciences*, 2013, 72: 129–151.