

doi: 10.12029/gc20210520

吴纪修, 王文, 黄增保, 王晓赛, 薛倩冰, 苏新. 2021. 西秦岭温泉钼矿区含钼花岗斑岩锆石 U-Pb 年龄、Hf 同位素组成及岩浆物质来源讨论[J]. 中国地质, 48(5): 1596-1608.

Wu Jixiu, Wang Wen, Huang Zengbao, Wang Xiaosai, Xue Qianbing, Su Xin. 2021. Zircon U-Pb age, Hf isotope composition, and magma source of Mo-bearing granite porphyry in the Wenquan Mo deposit from West Qinling[J]. *Geology in China*, 48(5): 1596-1608(in Chinese with English abstract).

西秦岭温泉钼矿区含钼花岗斑岩锆石 U-Pb 年龄、Hf 同位素组成及岩浆物质来源讨论

吴纪修^{1,2}, 王文¹, 黄增保³, 王晓赛¹, 薛倩冰¹, 苏新²

(1. 中国地质科学院勘探技术研究所, 河北 廊坊 065000; 2. 中国地质大学(北京), 北京 100083;
3. 甘肃省地质调查院, 甘肃 兰州 730000)

摘要: 温泉钼矿床位于西秦岭造山带北缘, 是西秦岭地区唯一斑岩型钼矿床。矿体产于花岗斑岩体及其与围岩接触带内。对温泉钼矿含钼花岗斑岩开展锆石 U-Pb 年代学与原位 Hf 同位素研究, 有助于精确约束含钼花岗斑岩时代, 揭示岩浆演化信息, 深化温泉钼矿床成因的认识。本文利用 LA-ICPMS 锆石 U-Pb 定年方法, 对温泉钼矿区含钼岩体进行精确同位素定年。结果表明: 花岗斑岩的锆石环带结构明显, Th/U 比值较大(0.41~0.88), 为典型的岩浆锆石, 含钼花岗斑岩侵位年龄为 212.43~213.4 Ma, 其侵入的似斑状二长花岗岩年龄(围岩)则为 219.9 Ma, 均属晚三叠世岩浆活动的产物。温泉矿区花岗斑岩锆石 Hf 同位素组成较为一致, $\epsilon_{\text{Hf}}(t)$ 值均为负值, 介于 -1.89~-0.63, 平均 -1.59, 在 $\epsilon_{\text{Hf}}(t)-t$ 图解中, 样点集中分布于球粒陨石以及亏损地幔线之下, 暗示其岩浆源区较单一, 应为经改造过的地壳物质部分熔融的产物。二阶段模式年龄(T_{DM2})主要集中在 1291~1408 Ma, 表明中元古代地壳物质可能为岩体主要来源。

关键词: 锆石 U-Pb 年龄; LA-ICPMS; Hf 同位素; 温泉钼矿; 西秦岭; 地质调查工程

中图分类号: P597; P588.12¹ 文献标志码: A 文章编号: 1000-3657(2021)05-1596-13

Zircon U-Pb age, Hf isotope composition, and magma source of Mo-bearing granite porphyry in the Wenquan Mo deposit from West Qinling

WU Jixiu^{1,2}, WANG Wen¹, HUANG Zengbao³, WANG Xiaosai¹, XUE Qianbing¹, SU Xin²

(1. Institute of exploration techniques, CAGS, Langfang 065000, Hebei, China; 2. China University of Geosciences, Beijing 100083, China; 3. Geological Survey Institute of Gansu Province, Lanzhou 735000, Gansu, China)

Abstract: The Wenquan Mo ore deposit, the only one porphyry-type Mo deposit in the West Qinling, is located on the northern margin of the West Qinling orogenic belt. The ore bodies are mainly distributed within the granite porphyry and the contact zone between the granite porphyry and its surrounding rocks. The zircon U-Pb dating and Hf isotope studying of the ore deposit have great significance to define the forming age of the granite porphyry, reveal the evolution of the magma, and furthermore to clarify

收稿日期: 2019-08-30; 改回日期: 2019-11-15

基金项目: 中国地质调查局项目“共和-略阳地区区域地质调查”(DD20190072)资助。

作者简介: 吴纪修, 男, 1984 年生, 博士生, 工程师, 从事区域地质调查工作; E-mail: 272139943@qq.com。

genesis of the ore deposit. The zircon LA-ICP MS U-Pb dating method was used to constrain the forming age of Mo-bearing granite porphyry in the Wenquan mine. Zircons from the granite porphyry have clear zonal texture and large value of Th/U ratio (0.41~0.88). The LA-ICPMS U-Pb dating of zircons from the Mo-bearing granite porphyry and its intruding porphyritic monzogranite yield ages of 212.43~213.4Ma and 219.9Ma respectively, indicating Late Triassic magmatic product. The hafnium isotope of the granite porphyry has a negative value between -1.89 and -1.63, with an average value of -1.59. On the $\varepsilon_{\text{Hf}}(t)-t$ diagram, the sampling points are plotted below the chondrite and the deficit mantle line, which indicates a unitary magmatic source. This source is the partially melting product of the modified earth crust. The age of the second stage (T_{DM2}) model ranges from 1291 to 1408 Ma, which indicates that the magma was probably derived from the partial melting of Mesoproterozoic earth crust.

Key words: zircon U-Pb age; LA-ICP MS; Hf isotope; Wenquan Mo deposit; West Qinling; geological survey engineering

About the first author: WU Jixiu, male, born in 1984, doctor candidate, engineer, engaged in regional geological survey; E-mail: 272139943@qq.com.

Fund support: Supported by the project of China Geological Survey (No. DD20190072).

1 引言

西秦岭造山带位于中国西部陕西、甘肃和青海交界部位,是中央造山系重要组成部分,也是中国重要的金、铅锌、铜、钼和重晶石成矿带(冯益民等, 2003; 殷勇等, 2009; 张瑞雪等, 2018)。该地区中生代花岗质岩浆活动强烈,岩体分布广泛,成矿作用显著,区域上多数斑岩型铜矿、矽卡岩-热液型铜矿、斑岩型钼矿、热液型铅锌矿、金矿等金属成矿作用与中生代岩浆活动有密切的时空和成因联系(殷勇等, 2009; 朱赖民等, 2009; 徐学义等, 2014; 邱坤峰等, 2015; 刘彦良等, 2018)。

温泉钼矿床为西秦岭地区唯一成型的钼矿床,赋存于温泉岩体晚期侵入的花岗斑岩株及其接触带内。前人对钼矿床地质特征(梁亚忠等, 2008; 朱赖民等, 2009; 欧阳玉飞等, 2009; 任新红, 2009; 韩海涛, 2009; 周俊烈等, 2010; 王飞, 2011; 邱坤峰等, 2014; 黄典豪, 2015; 刘彦良等, 2018)和温泉岩体开展过大量的研究工作(李永军等, 2003; 金维浚等, 2005; 张宏飞等, 2005; 张立成等, 2008; 韩海涛等, 2008; Cao et al., 2011; 胡海珠等, 2013; 徐学义等, 2014; 尚丽萍等, 2015),但主要针对整个岩体和温泉钼矿床成因,对含钼斑岩体缺少精细的测年和 Hf 同位素研究,导致岩体形成的区域构造背景及岩石源区特征,及其与钼矿床的关系认识不统一。李永军等(2003)、朱赖民等(2009)先后对温泉钼矿床进行了常量、微量、稀土元素及 Re-Os 同位素组成研究,并讨论了成岩成矿事件与其动力学背景,认为温泉岩体由壳、幔岩浆混合而成,形成于印支晚期

陆陆碰撞挤压转化为伸展的构造背景之下。徐学义等(2014)通过对温泉岩体的地球化学及 LA-ICP-MS 锆石 U-Pb 年代学的研究,认为该岩体来源于加厚的下地壳的熔融,其形成时代为三叠纪时期陆陆碰撞或陆陆俯冲。本文在前人研究的基础上,通过对温泉钼矿含矿花岗斑岩的岩石学、锆石 U-Pb 年代学与原位 Hf 同位素进行研究,探讨斑岩的形成年代、源区特征,以及大地构造背景,以期为深化研究温泉钼矿床提供基础性资料,精确约束含钼花岗斑岩时代,揭示岩浆演化信息,深化温泉钼矿床的成因研究。

2 地质背景

研究区位于西秦岭造山带北缘,与祁连-北秦岭加里东构造拼结部位。以关子镇蛇绿混杂岩为界,以北属祁连-北秦岭加里东造山带,出露有古元古代的秦岭群、中新元古代宽坪群和早古生代李子园群;以南属中秦岭新元古-一晚古生代裂隙大陆边缘夏河-礼县陆缘沉积区,分布有泥盆系大草滩群、李坝群、舒家坝群等碎屑岩建造,石炭系巴都组,二叠系十里墩组、大关山组、大石关组等碎屑岩-灰岩建造,少量三叠系碎屑岩系(甘肃省地质矿产局, 1989; 裴先治等, 2004)。区域上中生代花岗岩岩浆活动非常发育,分布有中川、碌础坝、柏永庄、阎井和教场坝五大花岗岩群(图 1a),因岩体周缘发育热晕型金矿床,也称为“五朵金花”岩体,其岩性主要为二长花岗岩,其次为闪长岩、花岗闪长岩等,发育深灰色深源细粒花岗闪长岩包体,形成时代 264.4~207 Ma,构造环境形成经历了同碰撞到后碰

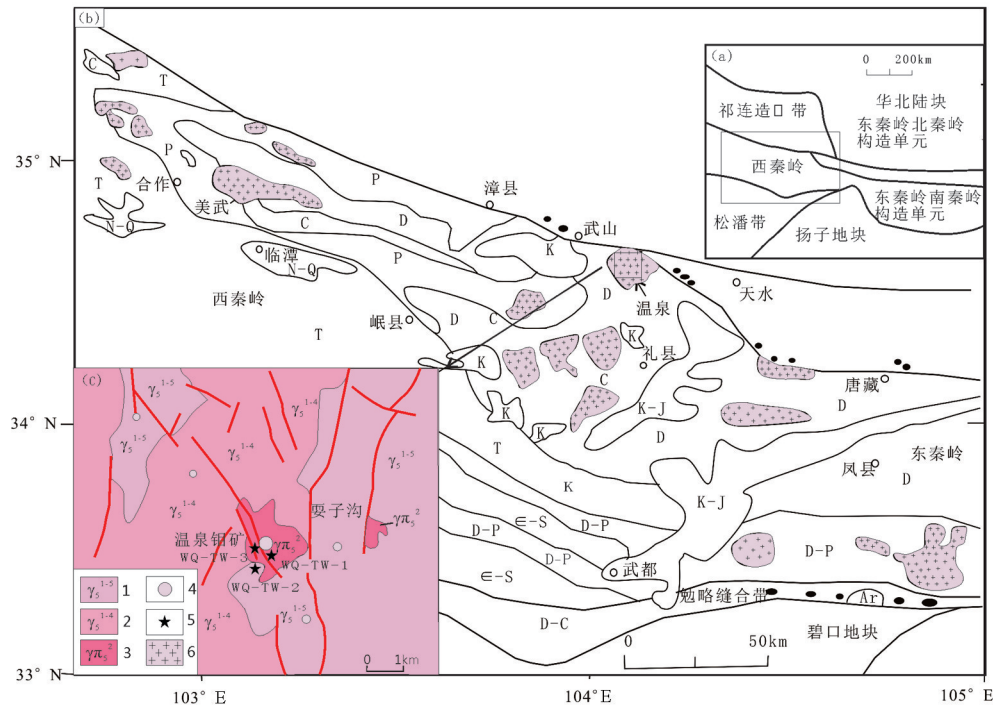


图1 西秦岭区域地质图(a,b)及矿区地质简图(c)(据朱赖民等,2009;邱坤峰等,2015修改)

Q—第四系松散沉积物;N—新近系砂砾岩及泥岩;K—白垩系红色碎屑岩;J—侏罗系含煤碎屑岩及泥质岩;T—三叠系砂岩、泥质岩及碳酸盐岩;P—二叠系碳酸盐岩及碎屑岩;C—石炭系碎屑岩及碳酸盐岩;D—泥盆系碎屑岩及碳酸盐岩;S—志留系碎屑岩及泥质岩;E—寒武系泥质岩、细碎屑岩及碳酸盐岩;Ar—太古宙片麻岩类;1—黑云母花岗岩;2—似斑状黑云母二长花岗岩;3—花岗斑岩;4—矿化点;5—采样点;6—花岗岩类

Fig.1 Regional geological map (a, b) of West Qinling and geological map of Wenquan Mo deposit (c) (after Zhu et al., 2009; Qiu et al.,2015)

Q—Quaternary unconsolidated sediments; N—Neogene glutenite and mudstone; K—Cretaceous red clastic rocks; J—Jurassic coal-bearing clastic rocks and pelite; T—Triassic sandstone, pelite and carbonate rock; P—Permian carbonate rock and clastic rock; C—Carboniferous clastic rock and carbonate rock; D—Devonian clastic rock and carbonate rock; S—Silurian clastic rock and pelite; E—Cambrian pelite, fine clastic rock and carbonate rock; Ar—Archean gneiss; 1—Biotite granite; 2—Porphyritic biotite monzogranite; 3—Granite porphyry; 4—Mineralized occurrence; 5—Sampling site; 6—Granitic rock

撞的构造演化过程(Zhu et al., 2012, 2013; Zeng et al., 2014)。

温泉复式岩体位于“五朵金花”岩体之北,因产有西秦岭地区唯一钼矿床为地学界熟知,该岩体地表呈似圆形,出露面积约 253 km²。岩体北部侵入于秦岭群高绿片岩相变质火山-沉积岩系和李子园群低绿片岩相变质火山-沉积岩系中,南侵入于泥盆统大草滩群、李坝岩群浅变质碎屑岩系中。据本次调查结合前人资料,该岩体为一个多期侵位的复式岩体,由早一晚依次为花岗闪长岩、黑云母二长花岗岩、似斑状黑云母二长花岗岩、二长花岗斑岩和花岗斑岩等组成,其中二长花岗岩为其主要岩石类型。岩体见有数量不等,大小不一的暗色闪长质微粒包体。大量同位素测年结果表明,该岩体锆石 U-Pb 年龄介于 224.6~216.2 Ma(金维浚等,2005;张

宏飞等,2005;王飞,2011;Cao et al., 2011;徐学义等,2014),与“五朵金花”岩体同期,为中生代晚三叠世岩浆活动的产物。其中,该岩体晚期侵入的花岗斑岩为温泉钼矿床最主要的含矿斑岩体。

3 含钼斑岩及钼矿化

斑岩型矿化常产于似斑状黑云母二长花岗岩(有时含少而小暗色微粒包体)、钾长花岗斑岩、花岗斑岩和花岗闪长斑岩等岩石中(丰成友等,2010)。温泉钼矿床主要赋存在温泉岩体晚期侵入的花岗斑岩内,出露于武山县陈家大湾、松树湾一带,呈不规则状岩株产出,侵入于温泉岩体似斑状二长花岗岩中(图 1b),接触界线呈波状、不规则状,在地表上由相对孤立的两个岩株组成,东西相距 100 m 左右,直径分别为 120 m 和 30 m,均向外倾斜。含钼斑岩

体内断裂、节理、裂隙等构造十分发育,它们共同控制了温泉钼矿体的产出。断裂构造走向以北东向、近南北向和北西向为主,节理走向主要有近东西向、北西向两组,其次为北东向和近东西,大多数节理充填含辉钼矿石英脉,节理的密集程度与矿化强弱呈正相关关系,这些节理与断裂的交汇聚合部位,往往是成岩成矿的有利部位(马玉明等,2009)。岩体侵入接触面及外接触带围岩的岩性界面、破碎带为构造薄弱带,当岩体冷却时,常构成低压带,为矿液的运移、贯入、交代和沉淀提供了良好的场所(丰成友等,2012)。

温泉含钼斑岩体岩石类型相对单一,主要岩石类型有花岗斑岩(图2a、b、c、e),呈浅灰色—肉红色,斑状结构,块状构造。斑晶主要为钾长石(3%),呈半自形—他形晶粒状,具显微条纹结构,属显微条纹长石,粒径在2.0~4.0 mm;石英(2%),呈他形粒状,粒径在4.0 mm左右。基质具微晶花岗结构,由斜长石(15%)、钾长石(50%)、石英(20%)、黑云母(10%)等组成,其中斜长石呈半自形板状、宽板状,粒径0.2~0.5 mm,弱绢云母化,为钠—更长石;钾长石为他形晶粒状,属显微条纹长石,粒径在0.2~1.0 mm,个别与石英交生成文像结构;石英为不规则的他形粒状,单体粒径在0.2~0.5 mm;黑云母呈片状、鳞片状自形晶,粒径一般在0.2~0.3 mm,部分已绿泥石化。副矿物有磷灰石、榍石、磁铁矿,少量锆石、钛铁矿等,含量不足1%。金属矿物零星可见,见有细脉状穿插的含钼石英脉。据王飞(2011)研究资料表明,含钼花岗斑岩的SiO₂为71.42%~73.19%,K₂O/Na₂O为1.26%~1.53%,(K₂O+Na₂O)为8.31%~8.93%,A/CNK为171~24.1,属高钾钙碱性过铝质系列岩石;∑REE介于100.63×10⁻⁶~140.9×10⁻⁶, (La/Yb)_N为6.83~14.31,δEu为0.59~0.74,稀土配分曲线右倾,轻稀土元素富集,负铈异常;微量元素中富集Rb、Ba、Th和U等大离子亲石元素和放射性元素,而亏损Nb、Ta、Ti等高场强元素,具有陆内碰撞造山环境形成花岗岩地球化学特征。

温泉钼矿床主要赋存于温泉岩体的花岗斑岩株及其侵入的中粒似斑状二长花岗岩接触带内。钼矿化蚀变严格受含矿岩体内各方向的原生节理、断裂控制。断裂构造既是导矿构造,也是容矿构造,而原生节理是矿质沉淀主要场所,相互平行或

网状含辉钼矿—石英细脉沿断裂、节理裂隙充填构成钼矿体(图2a)。沿断裂、节理裂隙岩石蚀变强烈,主要有钾化、硅化,其次绢云母化、沸石化、绿帘石化、绿泥石化、高岭土化,其中钾化和硅化与钼矿化关系密切。根据有关勘探资料,矿区已控制有4个矿化带,总体呈南北向展布,长约800 m,宽约100 m,共圈定矿体34条,单条矿体长50~650 m,厚度为5~24.4 m,埋深38.5~516.5 m,矿体品位0.03%~3.99%,平均品位0.053%。钼矿矿化由地表分散、不连续矿化到深部变为连续面型矿化,深部矿体连成一体(朱赖民等,2009)。矿化类型以细脉状和细脉浸染状为主(图2c、d),矿石具有他形—自形粒状结构、不等粒结构和交代结构,构造主要有细脉状、网脉状和浸染状三种。矿石矿物主要为辉钼矿、黄铁矿(图2f)和黄铜矿,少量磁黄铁矿、闪锌矿、斑铜矿、毒砂和白钨矿等;脉石矿物主要为石英、斜长石、钾长石和黑云母等。矿石中有益元素以钼为主,含钼0.01%~0.48%,伴生铜0.01%~0.05%,铀0.001%~0.0001%,钨0.01%~0.03%,铍0.001%。温泉钼矿床赋存于温泉岩体末期侵入的花岗斑岩中,具有全岩矿化特征,矿床地质特征可与东秦岭斑岩型钼矿床对比,成因类型应属广义的斑岩型钼矿床(朱赖民等,2009)。

4 样品采集与测试

2件含矿斑岩锆石U-Pb同位素测年样品采自温泉钼矿区陈家大湾斑岩株地表露头,其中WQ-TW-1(采集坐标:105°4'35"E,34°37'42"N)为星点浸染状黄铁矿化新鲜花岗斑岩(图2e、f),样品重量3.5kg,WQ-TW-3(采集坐标:105°4'20"E,34°37'50"E)样品采集为细脉状石英—辉钼矿脉穿插的新鲜花岗斑岩(图2c、d),样品重量2 kg。此外,在花岗斑岩岩株所侵入的似斑状二长花岗岩体(图2b)中也采集了1件同位素样品(WQ-TW-2采集坐标:105°4'29"E,34°37'45"N),重量3 kg,该岩石硅化、钾化较强,见有脉状分布的石英—辉钼矿脉体,采样位置见图1c。锆石分选在河北廊坊岩拓服务有限公司进行,首先将样品人工破碎后,采用磁选和重选相结合的方法挑出锆石,并在双目镜下提纯,然后将锆石颗粒嵌入环氧树脂样靶中,并在固化后进行打磨、抛光。最后,在武汉上谱分析有限公司完成锆

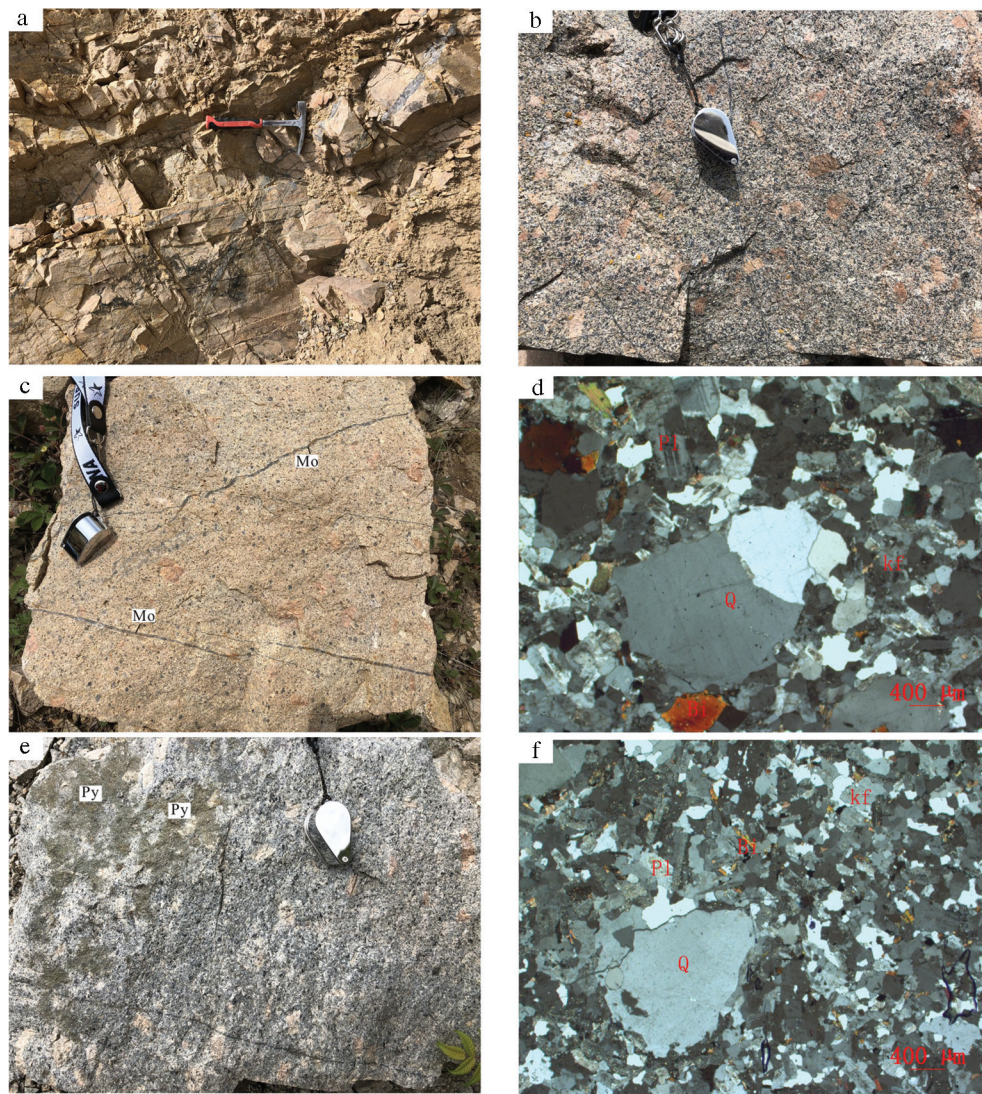


图2 温泉矿区花岗斑岩的野外和镜下显微照片

a—网脉状钼矿化花岗斑岩野外照片;b—似斑状二长花岗岩野外照片;c—细脉状钼矿化的花岗斑岩野外照片;d—细脉状钼矿化的花岗斑岩显微照片(正交偏光);e—浸染状黄铁矿化花岗斑岩野外照片;f—浸染状黄铁矿化花岗斑岩显微照片(正交偏光);Q—石英;Kf—钾长石;Pl—斜长石;Bi—黑云母;Mo—辉钼矿化石英脉;Py—黄铁矿

Fig. 2 Outcrops and microscope photos of Mo-bearing granite porphyry in the Wenquan Mo deposit in West Qinling

a—Granite porphyry mineralized by net vein-like molybdenum; b—Porphyritic monzogranite; c—Vein-like molybdenum mineralized granite porphyry; d—Granitic porphyry mineralized by vein-like molybdenum (orthogonal polarization); e—Disseminated pyritic granite porphyry; f—Micrograph of disseminated pyritic granite porphyry (orthogonal polarization); Q—Quartz; Kf—Potash feldspar; Pl—Plagioclase; Bi—Biotite; Mo—Molybdenite quartz vein; Py—Pyrite

石阴极发光(CL)图像照相,并利用激光剥蚀系统(GeoLas2005)和四级杆等离子质谱仪(Agilent7500a)组成的激光等离子质谱仪(LA-ICPMS)进行了锆石激光原位U-Pb同位素分析。详细分析方法和实验流程参考Liu et al. (2008),同位素比值和元素含量计算采用软件ICPMSDataCal (Liu et al., 2008)处理,并利用Isoplot/Ex_ver3 (Ludwig, 2003)获得谐和年龄和图解。

在锆石U-Pb定年基础上,选择与矿化密切的WQ-TW-3样品,在武汉上谱分析有限公司采用激光剥蚀多接受等离子体质谱仪(LA-MC-ICPMS),完成了Lu-Hf同位素测试。分析点与U-Pb定年分析点基本重合。实验过程采用He作为剥蚀物质载气,单点剥蚀模式,激光斑束直径44 μm,剥蚀时间60 s。详细仪器运行条件、分析方法及数据处理方法参见(Hu et al., 2012)。

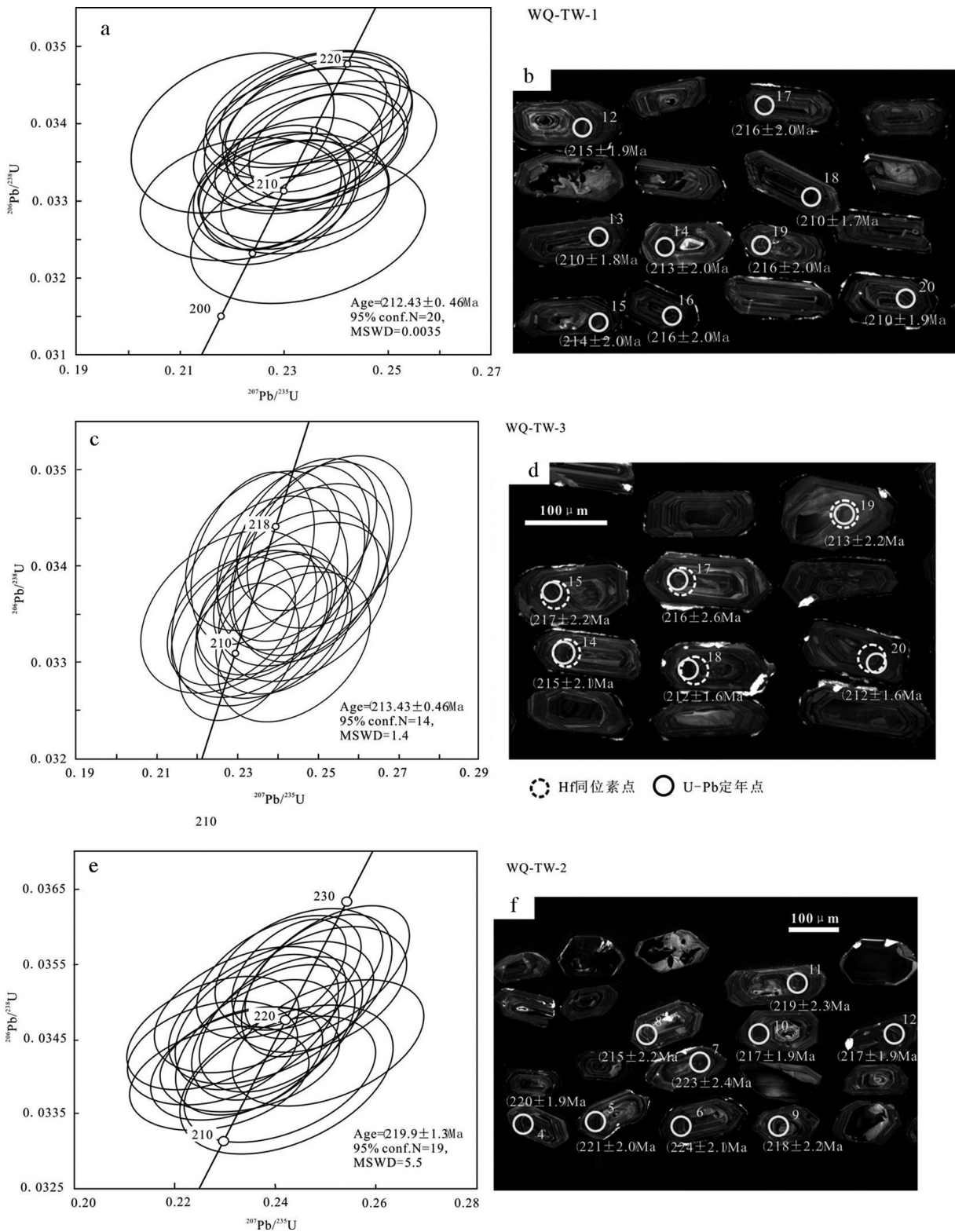


图3 温泉矿区花岗斑岩锆石阴极发光图像(b, d, f)和 $^{207}\text{Pb}/^{235}\text{U}$ - $^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$ 谐和图(a, c, e)

Fig.3 Cathodoluminescence (CL) images (b, d, f) and $^{207}\text{Pb}/^{235}\text{U}$ - $^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$ concordia diagram (a, c, e) of representative zircons from the granite porphyry in the Wenquan Mo deposit

表1 温泉矿区花岗斑岩类锆石 LA-ICPMS U-Pb测年数据

Table 1 Zircon LA-ICP-MS U-Pb isotopic data of the granite porphyry in the Wenquan Mo deposit

点号	元素含量/10 ⁻⁶			Th/U	同位素比值						表面年龄/Ma					
	Pb	Th	U		²⁰⁷ Pb/ ²⁰⁶ Pb	1σ	²⁰⁷ Pb/ ²³⁵ U	1σ	²⁰⁶ Pb/ ²³⁸ U	1σ	²⁰⁷ Pb/ ²⁰⁶ Pb	1σ	²⁰⁷ Pb/ ²³⁵ U	1σ	²⁰⁶ Pb/ ²³⁸ U	1σ
WQ-TW-1																
1	24.3	352	619	0.57	0.0522	0.0020	0.2348	0.0093	0.0326	0.0004	300	89	214	7.6	207	2.3
2	39.1	641	922	0.70	0.0504	0.0013	0.2332	0.0060	0.0334	0.0003	213	90	213	4.9	212	1.7
3	32.7	487	807	0.60	0.0498	0.0014	0.2269	0.0064	0.0329	0.0003	183	68	208	5.3	209	1.9
4	31.0	481	748	0.64	0.0511	0.0015	0.2372	0.0067	0.0337	0.0003	256	60	216	5.5	213	1.9
5	23.8	340	583	0.58	0.0517	0.0017	0.2408	0.0078	0.0337	0.0003	333	74.1	219	6.4	214	2.1
6	36.5	695	835	0.83	0.0506	0.0015	0.2357	0.0071	0.0338	0.0003	220	68.5	215	5.8	214	2.0
7	26.8	346	689	0.50	0.0485	0.0017	0.2221	0.0080	0.0330	0.0003	124	84.2	204	6.6	210	2.1
8	25.9	350	658	0.53	0.0508	0.0016	0.2319	0.0072	0.0330	0.0003	232	67.6	212	6.0	209	2.0
9	24.4	443	580	0.76	0.0467	0.0016	0.2199	0.0080	0.0339	0.0004	35.3	87.0	202	6.6	215	2.6
10	34.2	546	807	0.68	0.0506	0.0013	0.2386	0.0062	0.0340	0.0003	220	59.2	217	5.1	215	2.0
11	27.5	347	689	0.50	0.0503	0.0015	0.2350	0.0074	0.0337	0.0003	206	38.0	214	6.1	213	2.1
12	25.2	322	626	0.52	0.0503	0.0015	0.2376	0.0071	0.0340	0.0003	206	36.1	216	5.8	215	1.9
13	29.4	452	723	0.62	0.0502	0.0018	0.2310	0.0079	0.0332	0.0003	211	79.6	211	6.6	210	1.8
14	32.6	512	789	0.65	0.0495	0.0016	0.2311	0.0075	0.0336	0.0003	169	77.8	211	6.2	213	2.0
15	33.6	577	798	0.72	0.0497	0.0016	0.2331	0.0075	0.0338	0.0004	189	75.9	213	6.2	214	2.3
16	31.48	454	762	0.60	0.0495	0.0015	0.2347	0.0069	0.0341	0.0003	172	70.4	214	5.7	216	2.0
17	30.6	459	750	0.61	0.0491	0.0015	0.2327	0.0072	0.0341	0.0003	150	68.5	212	5.9	216	2.0
18	34.2	531	866	0.61	0.0505	0.0012	0.2313	0.0055	0.0331	0.0003	217	52.8	211	4.5	210	1.7
19	44.3	942	1074	0.88	0.0507	0.0012	0.2393	0.0060	0.0340	0.0004	228	55.5	218	4.9	216	2.3
20	25.3	391	653	0.60	0.0498	0.0015	0.2283	0.0070	0.0331	0.0003	183	65.7	209	5.8	210	1.9
WQ-TW-2																
1	30.7	434	746	0.58	0.0510	0.0013	0.2501	0.0065	0.0354	0.0004	239	52.8	227	5.3	224	2.5
2	34.9	480	846	0.57	0.0489	0.0013	0.2388	0.0061	0.0353	0.0004	146	63.9	217	5.0	224	2.2
3	38.9	552	778	0.71	0.0504	0.0014	0.2810	0.0082	0.0404	0.0005	213	64.8	251	6.5	255	3.3
4	31.6	579	729	0.79	0.0479	0.0013	0.2304	0.0060	0.0348	0.0003	94.5	67.6	211	4.9	220	1.9
5	36.5	601	862	0.70	0.0495	0.0012	0.2384	0.0058	0.0349	0.0003	172	54.6	217	4.8	221	2.0
6	37.5	595	870	0.68	0.0490	0.0013	0.2406	0.0068	0.0354	0.0003	150	61.1	219	5.6	224	2.1
7	31.7	460	752	0.61	0.0503	0.0014	0.2459	0.0073	0.0352	0.0004	209	64.8	223	6.0	223	2.4
8	31.0	526	731	0.72	0.0512	0.0016	0.2410	0.0076	0.0340	0.0003	250	70.4	219	6.2	215	2.2
9	26.6	372	643	0.58	0.0500	0.0015	0.2373	0.0069	0.0344	0.0003	198	70.4	216	5.6	218	2.2
10	31.7	504	747	0.67	0.0477	0.0014	0.2260	0.0065	0.0343	0.0003	87	70.4	207	5.4	217	1.9
11	28.3	466	659	0.71	0.0475	0.0014	0.2270	0.0068	0.0346	0.0004	76.0	126.8	208	5.6	219	2.3
12	42.6	593	1021	0.58	0.0493	0.0014	0.2331	0.0066	0.0342	0.0003	161	63.9	213	5.4	217	1.9
13	29.9	421	700	0.60	0.0525	0.0016	0.2508	0.0077	0.0345	0.0004	306	68.5	227	6.2	218	2.2
14	32.4	468	770	0.61	0.0488	0.0016	0.2293	0.0073	0.0340	0.0003	139	75.9	210	6.0	215	2.0
15	35.0	572	797	0.72	0.0496	0.0016	0.2388	0.0082	0.0347	0.0004	176	77.8	217	6.7	220	2.4
16	56.2	996	1253	0.79	0.0497	0.0013	0.2402	0.0065	0.0347	0.0003	183	61.1	219	5.4	220	2.0
17	28.3	369	662	0.56	0.0512	0.0015	0.2486	0.0074	0.0351	0.0004	250	63.9	225	6.0	223	2.2
18	46.7	677	1056	0.64	0.0500	0.0013	0.2458	0.0064	0.0355	0.0003	198	26.8	223	5.2	225	2.0
19	32.5	493	748	0.66	0.0498	0.0016	0.2408	0.0081	0.0349	0.0004	187	75.9	219	6.7	221	2.4
20	21.6	313	516	0.61	0.0513	0.0021	0.2401	0.0098	0.0340	0.0004	254	88.0	218	8.0	216	2.6
WQ-TW-3																
1	42.7	713	974	0.73	0.0521	0.0015	0.2471	0.0070	0.0343	0.0003	300	58.3	224	5.7	218	2.0
2	36.1	625	830	0.75	0.0497	0.0013	0.2338	0.0064	0.0341	0.0004	189	63.0	213	5.3	216	2.3
3	40.4	768	939	0.82	0.0496	0.0014	0.2288	0.0065	0.0334	0.0003	176	64.8	209	5.4	212	1.7
4	34.5	511	845	0.60	0.0505	0.0013	0.2306	0.0060	0.0331	0.0003	217	61.1	211	5.0	210	1.8
5	29.7	425	714	0.60	0.0518	0.0023	0.2396	0.0084	0.0333	0.0003	280	108.3	218	6.9	211	2.1

续表1

点号	元素含量/ 10^{-6}				Th/U						同位素比值						表面年龄/Ma					
1	42.7	713	974	0.73	0.0521	0.0015	0.2471	0.0070	0.0343	0.0003	300	58.3	224	5.7	218	2.0						
2	36.1	625	830	0.75	0.0497	0.0013	0.2338	0.0064	0.0341	0.0004	189	63.0	213	5.3	216	2.3						
3	40.4	768	939	0.82	0.0496	0.0014	0.2288	0.0065	0.0334	0.0003	176	64.8	209	5.4	212	1.7						
4	34.5	511	845	0.60	0.0505	0.0013	0.2306	0.0060	0.0331	0.0003	217	61.1	211	5.0	210	1.8						
5	29.7	425	714	0.60	0.0518	0.0023	0.2396	0.0084	0.0333	0.0003	280	108.3	218	6.9	211	2.1						
6	32.0	470	779	0.60	0.0533	0.0016	0.2443	0.0076	0.0331	0.0003	343	38.0	222	6.2	210	2.0						
7	26.1	364	630	0.58	0.0530	0.0017	0.2475	0.0081	0.0337	0.0003	332	104.6	225	6.6	213	2.0						
8	38.6	656	890	0.74	0.0519	0.0017	0.2441	0.0078	0.0341	0.0004	280	69.4	222	6.3	216	2.3						
9	30.0	438	719	0.61	0.0528	0.0016	0.2464	0.0077	0.0337	0.0003	320	67.6	224	6.3	214	2.1						
10	32.0	448	789	0.57	0.0513	0.0016	0.2374	0.0071	0.0335	0.0003	254	70.4	216	5.8	212	1.9						
11	21.3	347	513	0.68	0.0509	0.0020	0.2353	0.0091	0.0336	0.0004	235	90.7	215	7.5	213	2.7						
12	30.4	473	742	0.64	0.0511	0.0015	0.2360	0.0067	0.0334	0.0003	256	73.1	215	5.5	212	1.8						
13	23.6	283	580	0.49	0.0533	0.0017	0.2531	0.0083	0.0342	0.0004	339	72.2	229	6.7	217	2.3						
14	28.7	404	694	0.58	0.0517	0.0020	0.2437	0.0072	0.0340	0.0003	272	88.9	221	5.9	215	2.1						
15	27.0	387	658	0.59	0.0500	0.0020	0.2366	0.0078	0.0342	0.0003	195	94.4	216	6.4	217	2.2						
16	26.5	352	657	0.54	0.0529	0.0017	0.2485	0.0078	0.0340	0.0004	324	74.1	225	6.4	215	2.3						
17	17.8	262	433	0.60	0.0529	0.0018	0.2489	0.0082	0.0340	0.0004	324	71.3	226	6.7	216	2.6						
18	36.3	599	882	0.68	0.0524	0.0015	0.2423	0.0068	0.0334	0.0003	302	64.8	220	5.6	212	1.6						
19	12.6	134	325	0.41	0.0493	0.0021	0.2274	0.0089	0.0335	0.0003	165	96.3	208	7.4	213	2.2						
20	41.5	751	965	0.78	0.0515	0.0014	0.2390	0.0063	0.0335	0.0003	265	64.8	218	5.2	212	1.6						

*计量单位: $\mu\text{g/L}$

5 测试结果

5.1 锆石 U-Pb 定年

3件温泉矿区同位素样品测试分析结果见表1以及图3(所示为岩石中代表性锆石,标注了测试位置及年龄)。其中WQ-TW-1和WQ-TW-3两件含钼花岗斑岩样品锆石特征较相似,呈自形一半自形长柱状,长100~150 μm ,宽30~80 μm ,长宽比为1.5:1~2:1,阴极发光图像显示绝大多数锆石晶体自形程度高,不具核幔构造,发育明显震荡环(图3b, d),少部分锆石局部呈云雾状、冷杉状,表明后期热液对其产生了蚀变改造。

似斑状二长花岗岩同位素样品(WQ-TW-2)有差异,呈自形一半自形短柱状,长80~200 μm ,宽80~100 μm ,长宽比为1:1~2:1,晶体自形程度高,震荡环明显,不具核幔构造(图3f),锆石边部或多或少有蚀变现象,少部分锆石内部呈云雾状,受后期热液蚀变明显。测试时对靶上震荡环清楚,表面没有明显裂纹和内部没有包裹体的原生锆石进行了U-Pb同位素测试分析,采用锆石年龄为 $^{206}\text{Pb}/^{238}\text{Pb}$ 年龄。

从表1中可以看出,样品WQ-TW-1测试数据

中,锆石U含量为 $580 \times 10^{-6} \sim 1074 \times 10^{-6}$,Th含量为 $322 \times 10^{-6} \sim 942 \times 10^{-6}$,Th/U比值为0.50~0.88,均大于0.4,阴极发光照片中可见明显的震荡环,表明其为岩浆成因的锆石。20颗锆石 $^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$ 年龄较为集中,介于207~217 Ma,加权平均年龄为 $(212.43 \pm 1.3)\text{Ma}$,MSWD=2,谐和年龄为 $(212.43 \pm 0.46)\text{Ma}$,MSWD=0.0035(图3a)。

样品WQ-TW-3测试数据显示,锆石的U为 $325 \times 10^{-6} \sim 974 \times 10^{-6}$,Th为 $134 \times 10^{-6} \sim 768 \times 10^{-6}$,Th/U比值为0.41~0.82,也大于0.4,阴极发光照片中发育明显震荡环,与WQ-TW-1类似,属于岩浆成因的锆石范畴。20颗锆石 $^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$ 年龄介于210~218Ma,加权平均年龄为 $(213.4 \pm 1.1)\text{Ma}$,14粒锆石谐和年龄为 $(213.43 \pm 0.46)\text{Ma}$,MSWD=1.4(图3c)。

样品WQ-TW-2测试数据显示,锆石的U为 $516 \times 10^{-6} \sim 1253 \times 10^{-6}$,Th为 $313 \times 10^{-6} \sim 996 \times 10^{-6}$,Th/U比值为0.53~0.79,阴极发光照片中发育明显震荡环,也属于岩浆成因的锆石范畴。19颗锆石 $^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$ 年龄介于215~225 Ma,加权平均年龄为 $(220.0 \pm 1.5)\text{Ma}$ 谐和年龄为 $(219.9 \pm 1.3)\text{Ma}$,MSWD=5.5(图3e),有1粒锆石 $^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$ 年龄为255 Ma,推测是为捕获围岩锆石的年龄。

表2 温泉矿区花岗斑岩 Lu-Hf 同位素分析结果(WQTW-3)

Table 2 Lu-Hf isotopic data of the granite porphyry in the Wenquan Mo

样号	$^{176}\text{Hf}/^{177}\text{Hf}$	1σ	$^{176}\text{Lu}/^{177}\text{Hf}$	1σ	$^{176}\text{Yb}/^{177}\text{Hf}$	1σ	$(^{176}\text{Hf}/^{177}\text{Hf})_i$	$\epsilon_{\text{Hf}}(t)$	1σ	T_{DM1}	T_{DM2}	f_{LuHf}
WQTW-3-1	0.282608	0.000011	0.001379	0.000009	0.045381	0.000286	0.282603	-1.32	0.38	922	1334	-0.96
2	0.282575	0.000010	0.001351	0.000015	0.044746	0.000511	0.282570	-2.48	0.34	968	1408	-0.96
3	0.282595	0.000008	0.000814	0.000006	0.025645	0.000305	0.282591	-1.71	0.29	927	1359	-0.98
4	0.282600	0.000009	0.001189	0.000009	0.038563	0.000184	0.282595	-1.58	0.32	929	1351	-0.96
5	0.282627	0.000010	0.001352	0.000020	0.044511	0.000531	0.282622	-0.63	0.34	894	1291	-0.96
6	0.282591	0.000009	0.001025	0.000007	0.033470	0.000317	0.282587	-1.89	0.32	938	1370	-0.97
7	0.282595	0.000009	0.000786	0.000005	0.025111	0.000305	0.282592	-1.70	0.33	926	1358	-0.98
8	0.282597	0.000009	0.000929	0.000008	0.030071	0.000243	0.282594	-1.64	0.32	926	1355	-0.97
9	0.282607	0.000010	0.000878	0.000005	0.028746	0.000247	0.282604	-1.28	0.34	911	1332	-0.97
10	0.282597	0.000009	0.000830	0.000009	0.026485	0.000452	0.282594	-1.64	0.31	924	1355	-0.98
11	0.282609	0.000010	0.000809	0.000007	0.026398	0.000317	0.282606	-1.21	0.35	907	1328	-0.98
12	0.282593	0.000009	0.001224	0.000009	0.040631	0.000404	0.282588	-1.84	0.32	940	1368	-0.96
13	0.282593	0.000009	0.000945	0.000004	0.030257	0.000216	0.282589	-1.81	0.32	933	1365	-0.97
14	0.282598	0.000009	0.000884	0.000004	0.027475	0.000153	0.282595	-1.59	0.33	923	1352	-0.97
15	0.282600	0.000009	0.000728	0.000004	0.022836	0.000087	0.282597	-1.52	0.32	918	1347	-0.98
16	0.282602	0.000008	0.000696	0.000004	0.022062	0.000202	0.282599	-1.44	0.29	914	1342	-0.98
17	0.282592	0.000010	0.000743	0.000006	0.023967	0.000299	0.282589	-1.81	0.35	929	1365	-0.98
18	0.282594	0.000008	0.001076	0.000007	0.035656	0.000293	0.282590	-1.76	0.30	934	1362	-0.97
19	0.282607	0.000008	0.001015	0.000036	0.032458	0.001200	0.282603	-1.31	0.28	915	1334	-0.97
20	0.282596	0.000009	0.001383	0.000033	0.046397	0.001019	0.282591	-1.73	0.32	938	1361	-0.96

5.2 锆石 Hf 同位素

朱赖民等(2009)采集了5件辉钼矿样本并对其进行了Re-Os同位素定年,结果显示其成矿期为(214.4±7.1)Ma,而本次锆石U-Pb定年试验中,WQ-TW-3的结果为(213.43±0.46)Ma,与前人所测的钼矿成矿期较为接近,表明此样品与矿化密切相关,并且,此样品的谐和图显示年龄较为集中,年龄结果误差较小,因此,选取WQ-TW-3样品在原位测点进行了原位Hf同位素分析,且测试位置与锆石点位基本重合(图3c),测试结果见表2,由表中可知,样品 $^{176}\text{Yb}/^{177}\text{Hf}$ 值介于0.022062~0.046397, $^{176}\text{Lu}/^{177}\text{Hf}$ 值介于0.000696~0.001383,其比值均小于0.002,表明锆石在岩体形成之后放射成因Hf积累很少(吴元保等,2007)。样品中锆石($^{176}\text{Hf}/^{177}\text{Hf}$)_i为0.282570~0.282622,平均0.282595;相应 $\epsilon_{\text{Hf}}(t)$ 值均为负值,介于-1.89~-0.63,平均-1.59。采用平均地壳 $^{176}\text{Lu}/^{177}\text{Hf}$ 值计算(Griffin et al., 2004),获得的Hf同位素二阶段模式年龄(T_{DM2})介于1291~1408 Ma。

6 讨论

6.1 岩体形成时代

本文利用LA-ICPMS锆石U-Pb定年方法,对温泉钼矿区含钼岩体进行了精确同位素定年。结

果表明,含钼花岗斑岩侵位年龄为212.43~213.4 Ma,其侵入的似斑状二长花岗岩年龄(围岩)则为219.9 Ma,均属晚三叠世岩浆活动的产物。

温泉岩体为一个多期侵位的复式岩体,前人对温泉岩体及赋存其内的温泉钼矿开展过大量同位素测年工作(表3)。从表3中可以看出,温泉岩体似斑状二长花岗岩LA-ICPMS锆石U-Pb年龄为224.6 Ma(Cao et al., 2011);二长花岗岩及其中的暗色包体(MMEs)LA-ICPMS锆石U-Pb年龄介于216.2~217.4 Ma(王飞, 2011);花岗闪长岩的LA-ICPMS锆石U-Pb年龄介于216.2~216.3 Ma(金维浚等, 2005;徐学义等, 2014);二长花岗斑岩LA-ICPMS和SHRIMP锆石U-Pb年龄介于217.2~223 Ma(张宏飞等, 2005;Cao et al., 2011;王飞, 2011)。本文获得含钼花岗斑岩年龄为212.43~213.4 Ma,较温泉岩体其它单位侵位年龄小,属岩浆演化末期的产物。同时,该年龄与朱赖民等(2009)获得辉钼矿Re-Os年龄((215.1±2.6)~(212.7±2.6)Ma)基本一致,暗示晚三叠世钼成矿作用与花岗斑岩侵位有着密切时空关系。

6.2 岩浆物质来源

由于锆石封闭温度较高,很少受到岩浆分异和后期风化作用的影响,因此,被认为是示踪岩体源

表3 西秦岭造山带温泉钼矿成岩、成矿同位素年龄

Table 3 Isotopic chronological data of the granite porphyry and mineralization in the Wenquan Mo deposit

样号	岩性	年龄/Ma	定年矿物	定年方法	资料来源
WQ-TW-1	花岗斑岩	212.43±0.46	锆石	LA-ICPMS U-Pb	本文
WQ-TW-3	花岗斑岩	213.4±1.1	锆石	LA-ICPMS U-Pb	本文
WQ-TW-2	似斑状二长花岗岩	219.9±1.3	锆石	LA-ICPMS U-Pb	本文
W23-5	二长花岗岩	216.2±1.7	锆石	LA-ICPMS U-Pb	王飞,2011
W17-4	二长花岗岩斑岩	217.2±2	锆石	LA-ICPMS U-Pb	王飞,2011
W23-1	二长花岗岩中MMEs	217.4±2	锆石	LA-ICPMS U-Pb	王飞,2011
3-1	花岗闪长岩	216.3±1.4	锆石	LA-ICPMS U-Pb	金维浚等,2005
2-2	二长花岗斑岩	222.5±2.8	锆石	LA-ICPMS U-Pb	Cao et al.,2011
2-3	似斑状二长花岗岩	224.6±2.5	锆石	LA-ICPMS U-Pb	Cao et al.,2011
08-44	花岗闪长岩	216.2±1.1	锆石	LA-ICPMS U-Pb	徐学义等.,2014
2-1	二长花岗斑岩	223±7	锆石	SHRIMP U-Pb	张宏飞等,2005
Ws-zk-1	辉钼矿-石英脉	214.3±2.7	辉钼矿	Re-Os	宋史刚等,2008
Ws-zk-2	辉钼矿-石英脉	212.7±2.6	辉钼矿	Re-Os	宋史刚等,2008
Ws-5	辉钼矿-石英脉	213.8±2.5	辉钼矿	Re-Os	宋史刚等,2008
Ws-3	辉钼矿-石英脉	215.1±2.6	辉钼矿	Re-Os	宋史刚等,2008
Ws-1	辉钼矿-石英脉	214.4±2.9	辉钼矿	Re-Os	宋史刚等,2008

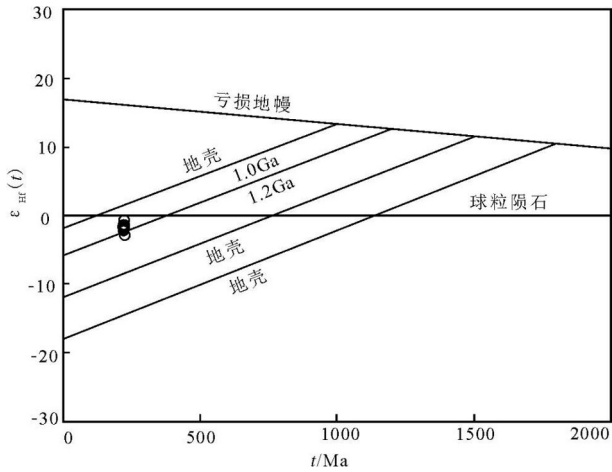


图4 温泉矿区花岗斑岩锆石 Hf 同位素特征
Fig.4 Hafnium isotopic composition of the granite porphyry in the Wenquan Mo deposit

区的最好手段。温泉钼矿含矿斑岩 Hf 同位素分析结果显示, 锆石 $^{176}\text{Lu}/^{177}\text{Hf}$ 值介于 0.000696~0.001383, 其比值均小于 0.002, 表明锆石在岩体形成之后放射成因 Hf 积累很少, 可以利用锆石 $^{176}\text{Hf}/^{177}\text{Hf}$ 值来讨论岩体成因信息(吴元保等, 2004)。

一般认为 $\epsilon_{\text{Hf}}(t) > 0$ 的岩石为源自亏损地幔或新生壳源物质部分熔融, 而 $\epsilon_{\text{Hf}}(t) < 0$ 的岩石为地壳物质部分熔融的产物 (Vervoort et al., 1999; Griffin et al., 2004)。温泉矿区含钼花岗斑岩锆石 Hf 同位素组成一致, 暗示其岩浆源区较单一; $\epsilon_{\text{Hf}}(t)$ 值均为负值, 介于 -1.89 ~ -0.63, 平均 -1.59, 在 $\epsilon_{\text{Hf}}(t)-(t)$ 图解

(图4)中, 样点集中分布于球粒陨石以及亏损地幔线之下, 应为经改造过的地壳物质部分熔融的产物。此外, 前人地球化学研究表明(徐学义等, 2014), 温泉岩体为钙碱性系列, 其 Al_2O_3 、 K_2O 、 Na_2O 、 FeO 、 MgO 及 Fe 含量分别变化于 14.59%~16.51%、2.71%~3.99%、3.59%~3.97%、1.28%~3.66%、0.93%~1.72%、0.64~0.69, $\text{K}_2\text{O}/\text{Na}_2\text{O}$ 比值为 0.57~1.19, 里特曼指数介于 2.02~3.99, 具埃达克型或喜马拉雅型花岗岩的特征, 且其 $\text{Mg}^\#$ 小于 0.5, 为典型的下地壳熔融的产物, 其原岩可能为古老玄武质岩石 (Rapp and Watson, 1995; 徐学义, 2014)。锆石 Hf 同位素 $T_{\text{DM}2}$ 可以代表岩浆源岩蚀源区地壳物质从亏损地幔库分离的平均年龄, 即代表地壳物质增生期(陈能松等, 2007), 温泉矿区含矿花岗斑岩 Hf 同位素二阶段模式年龄 ($T_{\text{DM}2}$) 介于 1291~1408 Ma, 表明源区可能为中元古代地壳物质。

西秦岭地区分布有很多前寒武基底岩系, 如北秦岭构造单元中的秦岭岩群、宽坪岩群等, 碧口古陆的鱼洞子群、碧口群等。这些基底岩系的同位素年龄研究表明, 形成于中元古代的地层主要有宽坪岩群和碧口群。宽坪岩群为一套高绿片岩相-低角闪岩相变质的火山-沉积岩系, 主体形成时代为 1800~1000 Ma; 碧口群同位素年龄多介于 1400~800 Ma, 为一套中浅变质的火山-沉积岩系, 这两套地层为西秦岭地区中元古代裂解事件的产物(徐学义等, 2008)。温泉矿区含钼花岗斑岩两阶段 Hf 模

式年龄(T_{DM2})介于1291~1408 Ma,由此推测其源岩可能为西秦岭地区中元古代晚期裂解形成的碧口群或宽坪岩群火山-沉积岩系。

6.3 岩浆活动的大地构造背景

据张国伟等(2004)研究结果,西秦岭地区中生代构造演化与勉略洋盆裂解和闭合关系密切,勉略洋裂解始于中一晚泥盆世,早二叠世裂解成小洋盆,于中二叠世—中三叠世洋盆发生俯冲和碰撞作用,晚三叠世—早侏罗世全面进入碰撞后发展阶段,碰撞后伸展减压作用及地幔物质上涌,诱发不同深度的地壳物质发生部分熔融,并侵入于构造薄弱部位,形成了西秦岭地区广泛发育的具有埃达克岩或喜马拉雅型地球化学特征的花岗岩体(殷勇等,2009;徐学义等,2011),这些中酸性岩体及岩浆期后热液与西秦岭地区金、铅、锌、铜、钼等矿产大规模成矿关系十分密切。温泉钼矿区含矿斑岩侵位年龄形成于晚三叠世(212.43~213.4 Ma),晚于秦岭造山带主碰撞期,可能为碰撞后后期地壳增厚,下部地壳岩石发生麻粒岩或榴辉岩相变,变质形成的高压麻粒岩或榴辉岩因其高密度和大比重而发生拆沉进入软流圈上地幔,并由于地壳均衡作用使岩石圈地幔快速隆升,地幔物质上涌减压熔融形成基性岩浆上侵到地壳底部对地壳烘烤,同时上部地壳由挤压状态转为伸展拉张,诱发下部地壳物质减压熔融,上侵形成了具埃达克岩地球化学特征的温泉岩体。

7 结 论

(1) LA-ICP MS 锆石 U-Pb 年龄测试结果显示,温泉矿区含钼花岗斑岩体形成年龄为212.43~213.4 Ma,其侵入的似斑状二长花岗岩(围岩)年龄为219.9 Ma,均属晚三叠世岩浆活动的产物。含钼花岗斑岩成岩年龄与赋存于其内的辉钼矿 Re-Os 年龄(215.1~212.7 Ma)十分接近,表明二者有密切成因联系。

(2) 温泉矿区花岗斑岩锆石 Hf 同位素组成一致, $\epsilon_{Hf}(t)$ 值均为负值,变化于-1.89~-0.63,平均-1.59,在 $\epsilon_{Hf}(t)-t$ 图解中,样点集中分布于球粒陨石以及亏损地幔线之下,暗示其岩浆源区较单一,应为经改造过的地壳物质部分熔融的产物。 T_{DM2} 介于1291~1408 Ma,显示岩浆源区可能为中元古代地壳物质,推测其源岩可能为西秦岭地区中元古代晚期

裂解形成的碧口群或宽坪岩群火山-沉积岩系。

References

- Cao Xiaofeng, Lü Xinbiao, Chen Chao, Liu Shentai, Zhang Ping, Su Yuyun, Mei Wei, Zhang Bin. 2011. LA-ICP-MS U-Pb zircon geochronology, geochemistry and kinetics of the Wenquan ore-bearing granites from West Qinling, China[J]. *Ore Geology Reviews*, 43(1): 120-131.
- Chen Nengsong, Xia Xiaoping, Li Xiaoyan, Sun Min, Xu Ping, Liu Xiaoming, Wang Xinyu, Wang Qinyan. 2007. Timing of magmatism of the gneissic-granite plutons along North Qaidam margin and implications for precambrian crustal accretions: Zircon U-Pb Dating and Hf isotope evidences[J]. *Acta Petrologica Sinica*, 23(2): 501-512(in Chinese with English abstract).
- Feng Chengyou, Li Dongsheng, Wu Zhengshou, Li Hongjun, Zhang Zhanyu, Zhang Aikui, Shu Xiaofeng, Su Shengshun. 2010. Major types, time-space distribution and metallogenesis of polymetallic deposits in the Qimantage Metal orogenic Belt, Eastern Kunlun Area[J]. *Northwest Geoscience*, 43(4):10-17(in Chinese with English abstract).
- Feng Chengyou, Wang Song, Li Guochen, Ma Shengchao, Li Dongsheng. 2012. Middle to Late Triassic granitoids in the Qimantage area, Qinghai Province, China: Chronology, geochemistry and metallogenic significances. [J]. *Acta Petrologica Sinica*, 28(2): 665-678 (in Chinese with English abstract).
- Gansu Bureau of Geological and Mineral. 1989. Regional Geological Records of Gansu Province[M]. Beijing: Geological Publishing House (in Chinese).
- Gansu Bureau of Geology and Mineral Exploration. 1989. Geology of Gansu Province[M]. Beijing: Geological Publishing House, (in Chinese).
- Griffina W L, Belousova E A, Shee S R, Pearson N J, O'Reilly S Y. 2004. Archean crustal evolution in the northern Yilgarn Craton: U-Pb and Hf-isotope evidence from detrital zircons[J]. *Precambrian Research*, 131(3/4): 231-282.
- Han Haitao, Liu Jishun, Dong Xin, Zhou Yuguo, Shi Jianjun. 2008. Geochemical Characteristics of the Wen Quan Porphyry Molybdenum Deposit in West Qinling Area[J]. *Geophysical and Geochemical Exploration*, 32(2): 139-143 (in Chinese with English abstract).
- Han Haitao. 2009. Geological-Geochemical Characters and Metallogenic Prediction of Wen Quan Molybdenum Deposit in the West Qinling area[D]. Changsha: Central South University, 1-116 (in Chinese with English abstract).
- Hu Haizhu, Li Nuo, Deng Xiaohua, Chen Yanjiang, LI Yi. 2013. Indosinian Mo mineralization in Qinling area and prospecting potential[J]. *Geology in China*, 40(2): 549-564(in Chinese with English abstract).

- Huang Dianhao. 2015. Discussion with Prof. Mao Jingwen on types, ore-forming material source of some deposits and geological significance of rhenium content in Molybdenite[J]. Geological Review, 61(5): 991–1000 (in Chinese with English abstract).
- Jin Weijun, Zhang Qi, He Dengfa, Jia Xiuqin. 2005. Shrimp Dating of Ddakites in Western Qinling and their Implications[J]. Acta Petrologica Sinica, 21 (3):959–966(in Chinese with English abstract).
- Li Yongjun, Li Ying, Liu Zhiwu, Li Zhucang, Li Jinbao. 2003. Litho-geochemical features and magma mixing information of Wenquan Granite in Western Qinling Area [J]. Acta Geologica Gansu,12(1): 31–35 (in Chinese with English abstract).
- Li Yongjun. 2005. Collecting and Integariton of the Geological Information of Granitoids[D]. Xi'an: Chang'an University, 1–163 (in Chinese with English abstract).
- Liang Yazhong. 2008. Geological characteristics of Wenquan molybdenum of deposit in Wushan County of Province[J]. Gansu Geology, 17(2) 40–49 (in Chinese with English abstract).
- Liu Yanliang, Gao Ya, Luo Weibin, Ji Wenzhong. 2018. Metallogenic regularity and prospect prediction of metallic deposits in Wenquan–Zhongchuan area of Western Qinling[J]. Geological Survey of China, 5 (4): 40–49 (in Chinese with English abstract).
- Liu Yongsheng, Hu Zhaochu, Gao Shan, Detlef Günther, Xu Juan, Gao Changgui, Chen Haihong. 2008. In situ analysis of major and trace elements of anhydrous minerals by LA–ICP–MS without applying an internal standard[J]. Chemical Geology, 257(1/2): 34–43.
- Ludwig K R. 2003. ISOPLOT3.00: A Geochronological Toolkit for Microsoft Excel[M]. California, Berkeley: Berkeley Geochronol Center Special Publication., 4:1–71.
- Ming Li, Haihong Chen, Lian Zhou, Lu Yang. 2012. Improved in situ Hf isotope ratio analysis of zircon using newly designed X skimmer cone and jet sample cone in combination with the addition of nitrogen by laser ablation multiple collector ICP–MS[J]. Journal of Analytical Atomic Spectrometry, 27(9):1391–1399.
- Ou Yang, Yufei, Liu Jishun, Han Haitao, Liu Weiming, Wu Zicheng. 2009. Characteristics of ore minerals and modes of occurrence of molybdenum in Wenquan Molybdenum deposit in the West Qinling Area[J]. Bulletin of Mineralogy, Petrology and Geochemistry, 28 (4): 336–342 (in Chinese with English abstract).
- Pei Xianzhi, Ding Saping, Li Yong. 2004. Report of 1:250000 Tianshui Geological Map (in Chinese) [R]. Xi'an: Geological Survey Department of Chang'an University (in Chinese).
- Qingtao Zeng, M Cc Uaig T C, Hart C, Jourdan F, Muhling J, Bagas, L. 2012. Structural and geochronological studies on the Liba goldfield of the West Qinling Orogen, Central China [J]. Mineralium Deposita, 47(7): 799–819.
- Qiu Kunfeng, Li Nan, Taylor R D, Song Yaohui, Song Kairui, Han Wangzhen, Zhang Dongxu. 2014. Timing and duration of metallogeny of the Wenquan deposit in the West Qinling, and its constrain on a proposed classification for porphyry molybdenum deposits[J]. Acta Petrologica Sinica,30(9) : 2631–2643(in Chinese with English abstract).
- Rapp R P, Watson E B. 1995. Dehydration melting of metabasalt at 8–32 kbar: Implications for continental growth and crust–mantlerecycling[J]. J. Petrol., 36: 891–931.
- Ren Hongxin. 2009. Geological characteristics and genesis of Molybdenum Deposits in Wushan County of Gansu[J] Gansu Metallurgy,31(6): 58–61. (in Chinese with English abstract)
- Shang Liping, Liu Lihui, Lü Caiping, Tang Lin. 2015. Geochemical characteristics of intrusive rock in the Western Qinling [J]. Gansu Metallurgy, 37(6): 92–96 (in Chinese with English abstract).
- Song Shigang, Ding Zhenju, Yao Shuzhen, Zhou Zonggui, Zhang Shixin, Du Andao. 2008. Re–Os isotopic dating of molybdenite and its implication for molybdenum mineralization of Wenquan porphyry, Wushan, Gansu Province[J]. Northwest Geology, 41(1): 67–72 (in Chinese with English abstract).
- Vervoort J D, Blichert–Toft J. 1999. Evolution of the depleted mantle: Hf isotope evidence from juvenile rocks through time[J]. Geochimica et Cosmochimica Acta, 63: 533–566.
- Wang Fei. 2011. Geological and Geochemical Characteristics and Geodynamic Setting of Mineralization of the Wenquan Molybdenum ore deposit in the west Qinling [D]. Xi'an: Northwestern University (in Chinese with English abstract).
- Wu Yuanbao, Zheng Yongfei. 2004. Zircon minerageny and its restrictions on U–Pb age interpretation[J]. Chinese Science Bulletin, 49(16): 1589–1604 (in Chinese).
- Xu Xueyi, Chen Junlu, Gao Ting, Li Ping, Li Ting. 2014. Granitoid magmatism and tectonic evolution in northern edge of the Western Qinling terrane, NW China[J]. Acta Petrologica Sinica, 30(2): 371–389 (in Chinese with English abstract).
- Xu Xueyi, He Shiping, Wang Hongliang, Chen Juanlu, Zhang Erpeng, Feng Yimin. 2008. Geology of Northwest China–Qinling, Qilian and Tianshan Area[M]. Beijing: Science Press, 131–133(in Chinese).
- Xu Xueyi, Li Ting, Chen Junlu. 2011. The granitoid magmatism and mineralization in west section of the Western Qin ling, NW China[J]. Northwest Geoscience, 45(4): 76–83 (in Chinese).
- Yin Yong, Yin Xianming. 2009. Porphyry Cu–Mo–Au mineralization related to adakite and Himalayan type granite in the northern margin of West Qinling[J]. Acta Petrologica Sinica, 25(5): 1239–1252 (in Chinese with English abstract).
- Zhang Chengli, Wang Tao, Wang Xiaoxia. 2008. Origin and tectonic setting of the early Mesozoic granitoids in Qinling Orogenic belt. Geological Journal of China Universities, 14(3): 304–316 (in Chinese with English abstract).
- Zhang Guowei, Guo Anlin, Yao Anping. 2004. Western Qinling–Songpan continental tectonic in China's continental tectonics[J]. Earth Science Frontiers, 11(3): 23–33 (in Chinese with English abstract).

- Zhang Hongfei, Jin lanlan, Zhang Li, Zhou Lian, Hu Shenhong, Zhang Benren. 2005. Geochemistry of granitoids and limitation of Pb-Sr-Nd isotope composition on basement properties and tectonic properties in the West Qinling [J]. Chinese Science (Series D), 35 (10): 914-926 (in Chinese with English abstract).
- Zhou Junlie, Han Haitao. 2010. Mineralization characteristics and alteration zoning of Wenquan molybdenum deposit in West Qinling[J]. Global Geology, 29(2): 248-255 (in Chinese with English abstract).
- Zhu L M, Zhang G W, Ding Z, Guo B, Wang F, Lee B. 2011. Zircon U-Pb ages and geochemistry of the Wenquan Mo-bearing granitoids in Western Qinling, China: Constraints on the geodynamic setting for the newly discovered Wenquan Mo deposit [J]. Ore Geology Review, 39: 46-62.
- Zhu Laimin, Ding Zhenju, Yao Shuzhen, Zhang Guowei, Song Shigan, Qu Wenjun, Guo Bo, Li Beng. 2009. Ore-forming event and geodynamic setting of molybdenum deposit at Wenquan in Gansu Province, Western Qinling[J]. Chinese Sci. Bull., 54, 2337-2347 (in Chinese with English abstract).
- ### 附中文参考文献
- 陈能松, 夏小平, 李晓彦, 孙敏, 徐平, 柳小明, 王新宇, 王勤燕. 2007. 柴北缘花岗岩片麻岩的岩浆作用计时和前寒武纪地壳增长的锆石 U-Pb 年龄和 Hf 同位素证据[J]. 岩石学报, 23(2): 501-512.
- 丰成友, 李东生, 吴正寿, 李军红, 张占玉, 张爱奎, 舒晓峰, 苏生顺. 2010. 东昆仑祁漫塔格成矿带矿床类型、时空分布及多金属成矿作用[J]. 西北地质, 43(4): 10-17.
- 丰成友, 王松, 李国臣, 马圣钊, 李东生. 2012. 青海祁漫塔格中晚三叠世花岗岩: 年代学、地球化学及成矿意义[J]. 岩石学报, 28(2): 665-678.
- 冯益民, 曹宣铎, 张二朋, 胡云绪, 潘晓萍, 杨军录, 贾群子, 李文明. 2003. 西秦岭造山带的演化、构造格局和性质[J]. 西北地质, 36 (1): 1-10.
- 甘肃省地质矿产局. 1989. 甘肃省区域地质志[M]. 北京: 地质出版社.
- 韩海涛, 刘继顺, 董新, 周余国, 史建军. 2008. 西秦岭温泉斑岩型铜矿花岗岩类地球化学特征[J]. 物探与化探, 32(2): 139-143.
- 韩海涛. 2009. 西秦岭温泉铜矿床地质化学特征及成矿预测[D]. 长沙: 中南大学, 1-116.
- 胡海珠, 李诺, 邓小华, 陈衍景, 李毅. 2013. 秦岭地区印支期铜矿化特征及找矿前景[J]. 中国地质, 40(2): 549-564.
- 黄典豪. 2015. 就若干矿床的类型、成矿物质来源及辉钼矿含量量的地质意义等与毛景文研究员商榷[J]. 地质评论, 61(5): 991-1000.
- 金维浚, 张旗, 何登发, 贾秀琴. 2005. 西秦岭埃达克岩的 SHRIMP 定年及其构造意义[J]. 岩石学报, 21(3): 959-966.
- 李永军, 李英, 刘志武, 李注苍, 李金宝. 2003. 西秦岭温泉花岗岩类岩石化学特征及岩浆混合信息[J]. 甘肃地质学报, 12(1): 31-35.
- 李永军. 2005. 花岗岩类地质信息的采集与集成[D]. 西安: 长安大学, 1-163.
- 梁亚忠. 2008. 甘肃武山温泉铜矿床地质特征[J]. 甘肃地质, 17(2): 40-49.
- 刘彦良, 高雅, 罗维斌, 季文中. 2018. 西秦岭温泉—中川一带金属矿床的成矿规律及找矿预测[J]. 中国地质调查, 5(4): 40-49.
- 马玉明, 汪建彪. 2009. 温泉铜矿床地质特征及成因浅析[J]. 甘肃冶金, 31(5): 81-85.
- 欧阳玉飞, 刘继顺, 韩海涛, 刘卫明, 吴自成. 2009. 西秦岭温泉铜矿床矿石矿物特征及铜的赋存状态[J]. 矿物岩石地球化学通报, 28 (4): 336-342.
- 裴先治, 丁仁平, 李勇. 2004. 1:250000 天水市幅区域地质调查报告[R]. 西安: 长安大学地质调查研究院.
- 邱坤峰, 宋开瑞, 宋耀辉. 2015. 西秦岭温泉斑岩铜矿床岩浆-热液演化[J]. 岩石学报, 31(11): 3391-3404.
- 邱坤峰, 李楠, Taylor R D, 宋耀辉, 宋开瑞, 韩旺珍, 张东旭. 2014. 西秦岭温泉铜矿床成矿作用时限及其对斑岩型铜矿床系统分类制约[J]. 岩石学报, 30(9): 2631-2643.
- 任新红. 2009. 甘肃武山温泉铜矿床地质特征及成因[J]. 甘肃冶金, 31(6): 58-61.
- 尚丽萍, 刘莉晖, 吕彩萍, 汤琳. 2015. 西秦岭侵入岩地球化学特征[J]. 甘肃冶金, 37(6): 92-96.
- 宋史刚, 丁振举, 姚书振, 周宗桂, 张世新, 杜安道. 2008. 甘肃武山温泉辉钼矿 Re-Os 同位素定年及其成矿意义[J]. 西北地质, 41(1) 67-72.
- 王飞. 2011. 西秦岭温泉铜矿床地质-地球化学特征与成矿动力学背景[D]. 西安: 西北大学.
- 吴元保, 郑永飞. 2004. 锆石成因矿物学研究及其对 U-Pb 年龄解释的制约[J]. 科学通报, 49(16): 1589-1604.
- 徐学义, 何世平, 王洪亮, 陈隽璐, 张二朋, 冯益民. 2008. 中国西北部地质概论——秦岭、祁连、天山地区[M]. 北京: 科学出版社, 131-133.
- 徐学义, 李婷, 陈隽璐, 等. 2011. 西秦岭西段花岗岩浆作用与成矿[J]. 西北地质, 45(4): 76-83.
- 徐学义, 陈隽璐, 高婷, 李平, 李婷. 2014. 西秦岭北缘花岗岩岩浆作用及构造演化[J]. 岩石学报, 30(2): 371-389.
- 殷勇, 殷先明. 2009. 西秦岭北缘与埃达克岩和喜马拉雅型花岗岩有关的斑岩型铜-钼-金成矿作用[J]. 岩石学报, 25(5): 1239-1252.
- 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.
- 张国伟, 郭安林, 姚安平. 2004. 中国大陆构造中的西秦岭—松潘大陆构造结[J]. 地学前缘, 11(3): 23-33.
- 张宏飞, 靳兰兰, 张利, 周炼, 胡圣虹, 张本仁. 2005. 西秦岭花岗岩类地球化学和 Pb-Sr-Nd 同位素组成对基底性质及其构造属性的限制[J]. 中国科学(D辑), 35(10): 914-926.
- 张瑞雪, 司雪峰, 姚强. 2018. 西秦岭地区钨铜成矿特征及找矿预测[J]. 甘肃科技, 34(5): 22-24, 104.
- 周俊烈, 韩海涛. 2010. 西秦岭温泉铜矿床矿化特征与蚀变分带[J]. 世界地质, 29(2): 248-255.
- 朱赖民, 丁振举, 姚书振, 张国伟, 宋史刚, 屈文俊, 郭波, 李彝. 2009. 西秦岭甘肃温泉铜矿床成矿地质事件及其成矿构造背景[J]. 科学通报, 54: 2337-2347.