

<https://doi.org/10.3799/dqkx.2021.233>



北秦岭官坡地区稀有金属伟晶岩锡石年代学、岩石地球化学特征及地质意义

曾 威^{1,2,3}, 孙丰月¹, 周红英^{2,3}, 王佳莹^{2,3}, 李志丹^{2,3}, 陈军强^{2,3}, 毕君辉^{2,3}, 崔玉荣^{2,3}

1. 吉林大学地球科学学院, 吉林长春 130061
2. 中国地质调查局天津地质调查中心, 天津 300170
3. 华北地质科技创新中心, 天津 300170

摘 要: 北秦岭官坡—丹凤地区是我国重要的伟晶岩型铀和稀有金属成矿区, 目前官坡地区稀有金属伟晶岩的形成时代和成因机制尚不清楚. 通过对该地区花岗伟晶岩开展锡石 U-Pb 年代学、锆石 Hf 同位素地球化学及全岩主微量元素地球化学研究, 分析了伟晶岩成因并探讨秦岭造山带古生代造山作用的时限. 锡石 LA-MC-ICP-MS U-Pb 测年首次确定官坡地区南阳山稀有金属伟晶岩的成岩成矿时代为 420 ± 2 Ma, 形成于末志留世, 表明此时北秦岭造山带处于造山作用晚期或造山后相对稳定的构造背景. 花岗伟晶岩锆石 ϵ_{Hf} (420 Ma) 值为 $-7.0 \sim -7.8$, 二阶段 Hf 模式年龄为 2.45~2.52 Ga, 表明其源区为古老的地壳物质. 花岗伟晶岩铝饱和指数大于 1.10, 具有极低的稀土总量 ($\Sigma\text{REE} = 0.43 \times 10^{-6} \sim 23.14 \times 10^{-6}$), 变化范围较大的 La_N/Yb_N 值 (0.7~22.3) 和 δEu 值 (0.09~1.84). 岩石富集大离子亲石元素 Rb、K 和高场强元素 Nb、Ta、P、Hf, 亏损 Ba、Nd、Zr、Ti, 具有低的 Nb/Ta 比值 (平均值 2.66), 稀土元素四分组效应明显, 这些特征指示岩浆经历了高度结晶分异作用. 同位素和岩石地球化学研究表明, 官坡地区花岗金属伟晶岩与其南侧灰池子岩体和大毛沟岩体不具岩浆演化关系, 稀有金属伟晶岩为过铝质花岗岩浆高程度结晶分异演化的产物.

关键词: 锡石 U-Pb 定年; 地球化学; 花岗伟晶岩; 稀有金属; 官坡; 北秦岭.

中图分类号: P611.1; P581

文章编号: 1000-2383(2023)08-2851-21

收稿日期: 2021-10-11

Cassiterite U-Pb Age, Geochemistry and Their Geological Significances of Rare Metal Pegmatites in Guanpo Area, North Qinling, China

Zeng Wei^{1,2,3}, Sun Fengyue¹, Zhou Hongying^{2,3}, Wang Jiaying^{2,3}, Li Zhidan^{2,3},
Chen Junqiang^{2,3}, Bi Junhui^{2,3}, Cui Yurong^{2,3}

1. College of Earth Sciences, Jilin University, Changchun 130061, China
2. Tianjin Center, China Geological Survey, Tianjin 300170, China
3. North China Center of Geoscience Innovation, Tianjin 300170, China

Abstract: The Guanpo-Danfeng area in the North Qinling Belt is the most important pegmatite-type uranium metallogenic and an

基金项目: 中国地质调查项目 (Nos. DD20160043-5, DD20230274); 河南省财政地质科研项目 (豫国土资发[2018]98号-02、03); 河南省自然资源厅科技攻关项目 (豫财招标采购-2020-165-3).

作者简介: 曾威 (1985-), 男, 正高级工程师, 在读博士, 主要从事区域成矿规律研究. ORCID: 0000-0002-7734-8430. E-mail: 314818431@qq.com

* **通讯作者:** 孙丰月, E-mail: sunfeng0669@sina.com

引用格式: 曾威, 孙丰月, 周红英, 王佳莹, 李志丹, 陈军强, 毕君辉, 崔玉荣, 2023. 北秦岭官坡地区稀有金属伟晶岩锡石年代学、岩石地球化学特征及地质意义. 地球科学, 48(8): 2851-2871.

Citation: Zeng Wei, Sun Fengyue, Zhou Hongying, Wang Jiaying, Li Zhidan, Chen Junqiang, Bi Junhui, Cui Yurong, 2023. Cassiterite U-Pb Age, Geochemistry and Their Geological Significances of Rare Metal Pegmatites in Guanpo Area, North Qinling, China. *Earth Science*, 48(8): 2851-2871.

important pegmatite-type rare metal metallogenic region in China. However, the formation age and the genetic mechanism of the rare metal pegmatites in this area still remain unclear. This paper presents LA-MC-ICP-MS cassiterite U-Pb age, Hf isotopic and geochemical data of granitic pegmatites in the Guanpo area to determine the formation age, the petrogenesis and tectonic setting of the rare metal pegmatites. Cassiterite LA-MC-ICP-MS dating of Nanyangshan rare metal pegmatites yields concordant age of 420 ± 2 Ma, representing the the formation age of the end of the Silurian, which indicated North Qinling was in late or postorogenic tectonic setting. The pegmaties exhibit a restricted range of negative zircon $\epsilon_{\text{Hf}}(t)$ values of -7.0 to -7.8 , with T_{DM2} age of 2.45 to 2.52 Ga, suggesting that the magma dominantly derived from ancient crust. The pegmatites are characterized by high A/CNK ($A/CNK > 1.1$), with extremely low rare earth content ($\Sigma\text{REE} = 0.43 \times 10^{-6} \sim 23.14 \times 10^{-6}$) and widely variable La_N/Yb_N ratios ($0.7 \sim 22.3$) and δEu ($0.09 \sim 1.84$). The enrichment in large ion lithophile elements (Rb and K) and high field strength elements (Nb, Ta, P and Hf), depletion in Ba, Nd, Zr, and Ti, low Nb/Ta ratios (average 2.66) and tetrad effects of rare earth elements comprehensively indicated that the magma has experienced high degree crystallization differentiation. The isotopic and geochemical data confirm that the rare metal pegmatite in the Guanpo area formed from high degree crystallization differentiation of peraluminous granitic magma and the genetic connection between the pegmatites and Huichizi and Damaogou granites is absent.

Key words: Cassiterite U-Pb dating; geochemistry; granitic pegmatite; rare metal; Guanpo; North Qinling.

北秦岭官坡—丹凤地区是我国重要的伟晶岩型铀和稀有金属成矿区(李建康等, 2014; 李志丹等, 2021)(图 1), 分布有光蚀沟、小花岔等伟晶岩型铀矿床, 以及南阳山锂钽矿、蔡家沟锂钽矿、七里沟锂钽矿等伟晶岩型稀有金属矿。前人通过对区内含铀伟晶岩中的锆石和晶质铀矿开展 U-Pb 测年, 获得了大量精确可靠的年龄信息, 其主要形成于 420~405 Ma(万吉等, 1992; 赵如意等, 2013; Chen *et al.*, 2019; Yuan *et al.*, 2020)。但由于该地区稀有金属伟晶岩中锆石蜕晶质化作用强烈, 难以获得可靠的锆石 U-Pb 年龄, 前人鲜有报道。作者曾多次尝试对稀有金属伟晶岩中的锆石进行 U-Pb 测年, 均未获得理想的成岩年龄。由于对北秦岭官坡地区稀有金属伟晶岩的成岩成矿时代不清楚, 严重制约了北秦岭稀有金属伟晶岩的成因研究及伟晶岩型铀矿和稀有金属成矿机制的对比研究。

目前, 关于官坡地区稀有金属伟晶岩的成因, 前人开展了一定的研究工作。王盘喜等(2017)对官坡地区伟晶岩的全岩地球化学进行了分析, 认为其为过铝质钙碱性—高钾钙碱性岩石系列, 成因上与灰池子岩体具有亲源性; 卢欣祥等(2010)、陈骏等(1999)根据不同类型花岗伟晶岩围绕灰池子岩体显示明显的分带性的特点, 认为灰池子岩体是官坡地区伟晶岩的母岩。但他们均未从伟晶岩年代学、同位素和主微量地球化学方面与灰池子岩体进行系统的对比研究, 缺乏确切的证据证明它们之间的亲缘关系。周起凤等(2019)通过对官坡地区伟晶岩中绿柱石的地球化学研究, 认为官坡锂矿化伟晶岩岩浆就位时是高度分异演化的稀有金属伟晶岩岩浆。

秦岭造山带古生代构造演化是秦岭造山带研究的热点问题, 目前关于秦岭造山带古生代造山作用的时限存在较大的争议。部分学者通过大量的岩浆岩年代学和地球化学研究认为秦岭古洋盆自新元古代末形成至早古生代早期开始俯冲消减, 此后相继发生多期弧—陆碰撞, 并在泥盆纪秦岭洋盆沿商丹一线最终闭合(Dong *et al.*, 2011a, 2011b; Wang *et al.*, 2011; Wu and Zheng, 2013); 而另一部分学者近年来通过对北秦岭超高压岩石的研究限定了秦岭洋盆闭合的时间为~500 Ma, 之后发生了 452 Ma 和 420 Ma 两期退变质作用及与退变质作用相关的花岗岩浆事件(Cheng *et al.*, 2011; Cheng *et al.*, 2012; Zhang *et al.*, 2013; Chen *et al.*, 2015; Liu *et al.*, 2016)。学者们通过总结全球大量稀有金属伟晶岩的形成时代, 认为稀有金属伟晶岩多形成于造山作用晚期、造山后或非造山环境的相对稳定的构造背景(Černý, 1991; 王登红等, 2004), 造山强烈阶段稀有金属由于缺乏稳定的环境而不能有效聚集。因此, 稀有金属伟晶岩的大量分布可以指示当时的构造背景。

针对上述地质问题, 本文通过官坡地区稀有金属伟晶岩的锡石 LA-MC-ICP-MS U-Pb 测年获得了稀有金属伟晶岩精确的形成年龄; 通过锆石 Hf 同位素和地球化学对比研究, 分析了官坡地区伟晶岩的成因, 探讨了稀有金属伟晶岩与灰池子岩体之间的关系。本次研究, 不仅对探讨官坡地区伟晶岩型稀有金属矿的成因机制和成矿背景提供了重要的参考信息, 也对该地区稀有金属矿找矿工作具有一定的理论指导意义。

1 区域地质背景

北秦岭构造带是秦岭造山带中构造变形最强烈、构造演化最复杂的地区,其南以商丹缝合带为界与南秦岭相邻,北以栾川断裂带为界与华北陆块南缘毗邻。自北向南主体由宽坪单元、二郎坪单元、北秦岭单元和丹凤单元组成,各单元之间为断裂带或剪切带分隔。官坡伟晶岩型稀有金属矿集区位于北秦岭构造带北秦岭单元中(图1)。

宽坪单元主体由宽坪岩群组成,岩性为变质陆源碎屑岩、变质基性火山岩和大理岩组合。其中变质基性火山岩具N-MORB的地球化学特征(第五春荣等,2010),代表古洋壳残片。前人对宽坪岩群中变质碎屑岩的锆石U-Pb测年和古生物化石研究表明其形成于早古生代(王宗起等,2009;Shi *et al.*, 2013;李承东等,2018)。二郎坪单元主要由二郎坪群和侵入其中的花岗岩类组成。二郎坪群火神庙组发育具N-MORB、E-MORB和IAB特点的多种类型玄武岩,其形成于洋内弧环境(Wang *et al.*, 2011;Wu and Zheng, 2013;吴元保等,2019)还是弧后盆地环境尚存争议(Dong *et al.*, 2011b;),其中基性火山岩的年龄为463~495 Ma(赵娇,2012;李振强,2021)。二郎坪群碎屑岩中锆石的U-Pb年龄集中区为0.9~1.0 Ga、500~600 Ma、750~850 Ma、1.35~1.75 Ga、2.6~2.7 Ga(杨敏等,2016),与秦岭岩群变质碎屑岩的年龄谱系基本一致(赵利刚等,2018),表明二郎坪群碎屑岩的物源主要来自北秦岭单元。北秦岭单元由秦岭岩群、峡河岩群和侵入其中的新元古代和早古生代花岗岩组成。秦岭岩群和峡河岩群主体为一套具有孔兹岩系特征的中深变质岩,夹斜长角闪岩,近年的研究表明秦岭岩群的形成时代为中新元古代(赵利刚等,2018),其中产出榴辉岩和榴闪岩透镜体。年代学研究表明榴辉岩高压—超高压变质年龄为485~511 Ma,其原岩形成年龄为~800 Ma,反映早古生代早期的大陆深俯冲作用(刘良等,2013;陈丹玲等,2015)。丹凤单元位于北秦岭构造带的最南部,由超镁铁质岩、变辉长岩、变玄武岩和放射状硅质岩等各种类型的岩块及云母片岩基质组成,其中的玄武岩包括3种类型,分别具N-MORB、E-MORB和IAB的特征,可能形成于岛弧或弧后盆地环境(Dong *et al.*, 2011a, 2011b;Wu and Zheng, 2013)。

北秦岭构造带在新元古代、古生代和中生代均

发育强烈的中酸性岩浆活动,并伴生大规模成矿作用(曾威等,2019)。其中古生代花岗岩类在北秦岭构造带分布最广(图1),宽坪单元、二郎坪单元和北秦岭单元中均有古生代侵入岩分布。其时间跨度从505~405 Ma,岩性包括二长花岗岩、石英闪长岩、英云闪长岩、花岗闪长岩、奥长花岗岩、正长花岗岩和花岗伟晶岩。前人对北秦岭古生代花岗岩体开展了大量的研究工作,但对花岗伟晶岩的研究较少,尤其对含稀有金属花岗伟晶岩缺少年代学和岩石成因方面的系统研究。

在北秦岭单元内官坡—丹凤地区分布有6000余条伟晶岩脉,构成商南、栾庄、官坡、龙泉坪4个伟晶岩密集区(卢欣祥等,2010),其中商南和栾庄地区形成伟晶岩型铀矿集区,官坡地区形成伟晶岩型稀有金属矿集区。官坡地区自西向东依次分布有南阳山、七里沟和蔡家沟锂钽矿床(图1),另外有大量稀有金属矿化伟晶岩分布。

2 矿区地质特征

本文研究的样品采自官坡镇南阳山锂钽矿区。矿区内出露地层为峡河岩群界牌岩组,下段为白云石大理岩,向上变为薄层条带状透辉石大理岩夹斜长角闪片岩。上段为薄层状、条带状阳起石大理岩夹斜长角闪岩。矿区内未见花岗岩体分布,仅发育花岗伟晶岩脉,为锂钽矿的成矿母岩,伟晶岩侵入界牌岩组大理岩中,少量侵入斜长角闪岩中。距离矿区最近的花岗岩体为矿区南部的灰池子复式岩体和矿区西北部蟒岭二长花岗岩。灰池子岩体主要岩性为黑云母二长花岗岩,出露面积约340 km²,西自桃萍乡,东至瓦窑沟西部,岩体北部离矿区最近距离为7 km,其形成时代为434~422 Ma(Wang *et al.*, 2009;秦拯纬,2016)。蟒岭岩体岩性为二长花岗岩,岩体东南角离矿区最近距离约4 km,其形成时代为124~157 Ma(杨阳等,2014)。区内断裂构造发育,朱阳关—夏馆断裂带和瓦穴子断裂带从矿区北侧通过,控制着区域上地层的展布。朱阳关—夏馆断裂为北秦岭单元与二郎坪单元的边界断裂,断裂面北倾,倾角50°~70°,宽数十米,发育片理化带和碎裂岩化构造带。瓦穴子断裂发育片理化带和挤压破碎带,总体北倾,倾角60°~70°。矿区内成矿前或成矿期次级小断裂发育,一般长度80~150 m,最长930 m,断距10~20 m,以北东和北西向压扭性裂隙为主,次为近南北向张性裂隙。花岗伟晶岩脉即沿

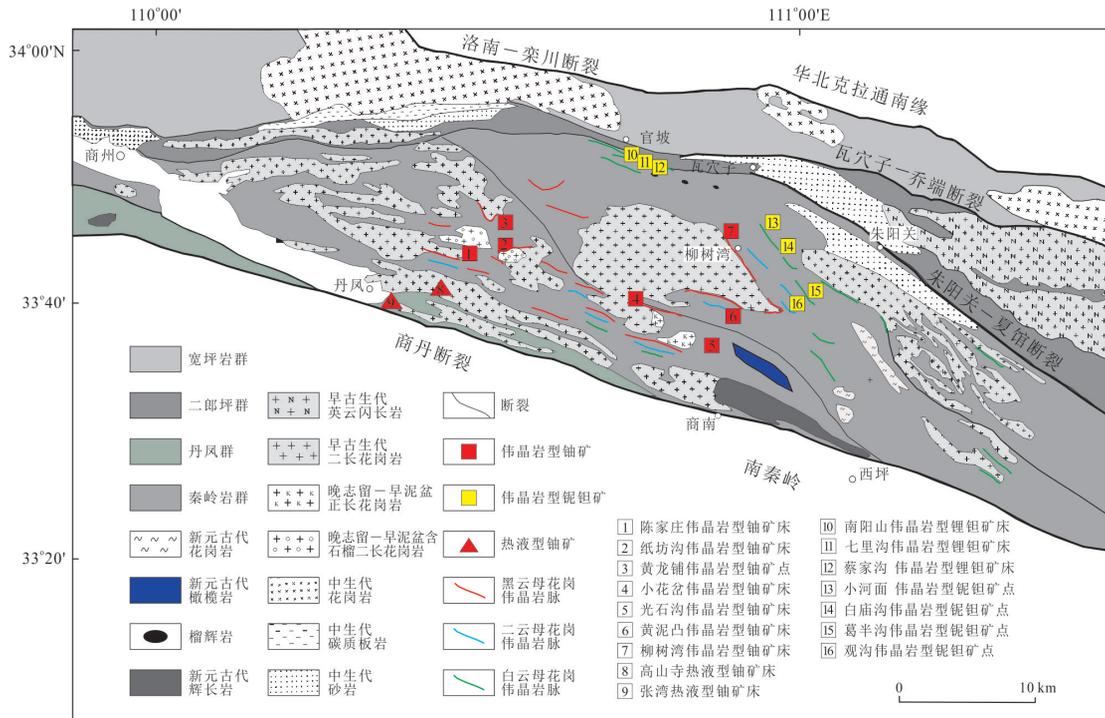


图1 研究区区域地质图

Fig.1 Regional geological map of the study area

图中伟晶岩脉为示意性分布

这些裂隙充填或呈追踪状产出. 矿区位于母猪坑背斜北翼, 区内为一向北东倾斜的单斜构造, 倾角 $50^{\circ} \sim 75^{\circ}$. 母猪坑背斜核部位于磨沟口—母猪坑—七里沟口一线, 背斜核部和南翼伟晶岩脉密集分布, 北翼伟晶岩脉相对稀疏, 但稀有金属伟晶岩主要产于背斜北翼.

矿区共有伟晶岩脉 80 余条, 有稀有金属矿化的伟晶岩脉五十余条, 较具规模保有锂资源储量的锂矿化伟晶岩脉 11 条, 脉长二十几米至两百多米, 脉宽不足一米至近十米, 倾向延深几十米至两百多米且产状变化大(表 1)(图 2). 矿体形态为脉状或透镜状, 产状与伟晶岩产状一致, 走向北西或北东, 倾向北东或北西. 区内非矿化伟晶岩脉走向各异, 南北向、近东西向、北西向、北东向均有分布. 依伟晶岩矿物成分可划分为多种伟晶岩类型, 包括微斜长石伟晶岩、钠长石微斜长石伟晶岩、锂辉石钠长石微斜长石伟晶岩、锂辉石钠长石伟晶岩和锂云母锂电气石钠长石伟晶岩等(图 3), 含锂伟晶岩主要为后 3 种(河南省地质矿产勘查开发局第四地质探矿队, 2010. 河南省卢氏县南阳山铍、锂矿核查区资源储量核查报告).

$\rho 312$ 号伟晶岩脉为矿区最大矿脉, 分布于南阳

山矿区北东部, 平面呈不规则团块状, 矿脉倾向 $22^{\circ} \sim 36^{\circ}$, 倾角 $14^{\circ} \sim 40^{\circ}$, 长 243 m, 宽 3.30~8.66 m, 延深 210 m, 侵入界牌岩组大理岩地层中(图 3). 伟晶岩脉即为锂矿体, 矿体平均品位 $\text{Li}_2\text{O} = 1.31\%$.

矿石构造主要为块状构造, 矿石结构为伟晶结构、粗晶结构、中晶结构、交代结构、压碎结构等. 锂矿物主要有 2 种, 为锂辉石和锂云母, 其它矿石矿物有铌铁矿、铌锰矿、钽锰矿、绿柱石、锡石等. 锂辉石: 灰绿色、灰白色, 呈粗大的板状晶体或板条状, 长轴长度可达十几厘米, 宽 1~3 cm(图 4a, 4b, 4c, 4h, 4l, 4m). 锂云母: 白色、浅玫瑰色, 片状或鳞片状(图 4d, 4l). 脉石矿物主要有石英、微斜长石、钠长石、白云母、黑色电气石和粉色电气石(图 4a, 4c, 4d, 4e, 4j, 4k), 其他微量.

3 样品采集和分析方法

本文用于锡石和锆石测年的稀有金属伟晶岩样品采自南阳山矿区 $\rho 312$ 号脉平硐中, 岩石类型为锂辉石钠长石伟晶岩, 岩石白色, 块状构造, 主要矿物成分为石英(30%~35%)、钠长石(30%~35%)、锂辉石(~15%)、白云母(5%~10%)、电气石(~5%), 少量微斜长石(~5%), 副矿物主要有铌锰矿、

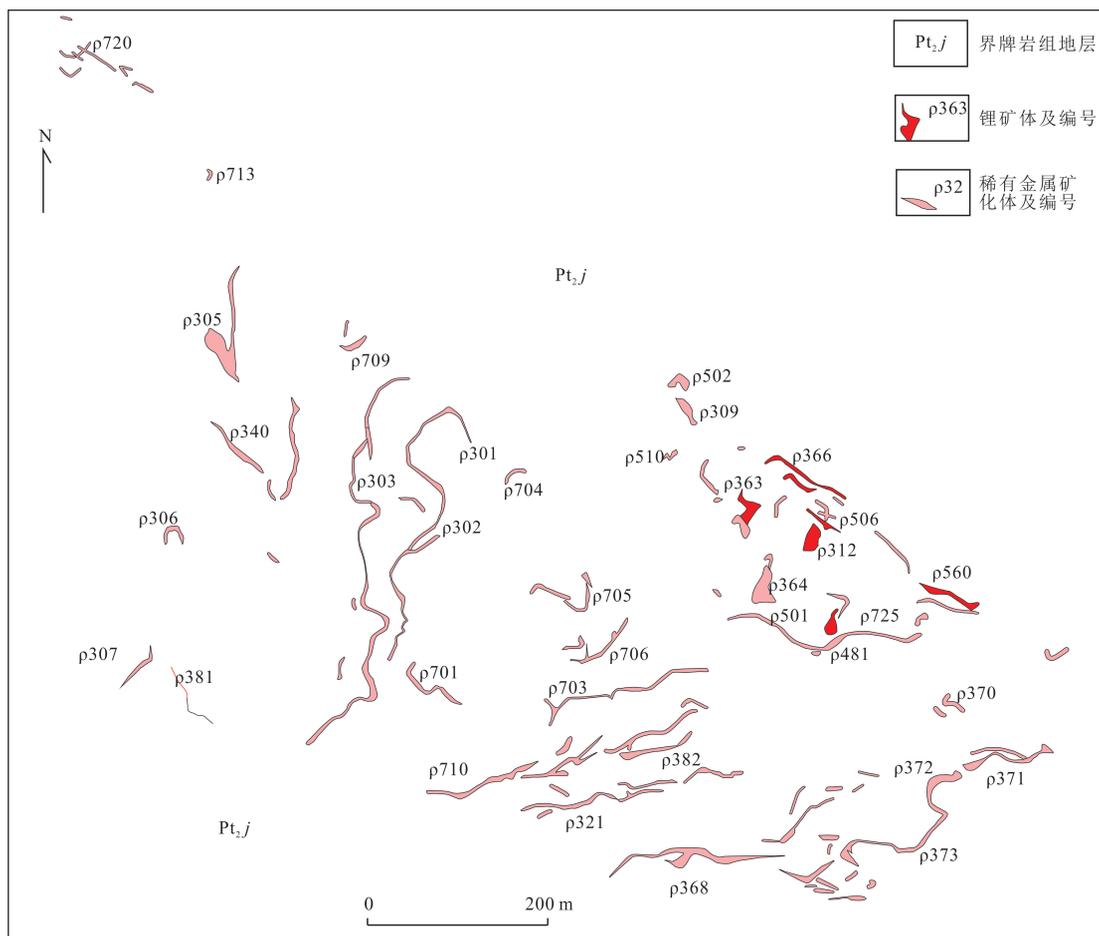


图 2 官坡地区南阳山矿区花岗伟晶岩分布图

Fig.2 Distribution map of pegmatites in Nanyangshan deposit Guanpo area

铌铁矿、锡石、锆石等。

用于主微量元素测试的样品采于南阳山矿区和矿区西部曹家院一带,岩性包括电气石钠长石微斜长石伟晶岩、粉色电气石钠长石伟晶岩、锂辉石钠长石微斜长石伟晶岩、锂辉石微斜长石钠长石伟晶岩,共测试样品 8 件。其中所采含矿伟晶岩样品岩性为锂辉石钠长石微斜长石伟晶岩、锂辉石微斜长石钠长石伟晶岩,矿石矿物主要为锂辉石,脉石矿物为钠长石、微斜长石、白云母、电气石。所采不含矿伟晶岩样品岩性主要为电气石钠长石微斜长石伟晶岩,一般微斜长石含量约 35%~50%,石英含量约 25%~35%,钠长石约含 15%~20%,白云母约含 5%~15%,电气石约含 5%~10%。由于伟晶岩颗粒较粗,为保证样品分析结果能代表相应伟晶岩的地球化学特征,尽量选择成分均匀处进行取样,且加大了每件样品的采样量,每件主微量元素分析样品重量约 3~4 kg。粉末样制备时每件样品经过多次破碎—过筛—混匀—缩分过程,最后制成

200 目的粉末用于化学分析。

在河北省区域地质调查研究所完成锡石和锆石单矿物分选后,在天津地质调查中心实验室开展锡石和锆石制靶、透反射和阴极发光照相及锡石和锆石 LA-MC-ICP-MS U-Pb 同位素测年。U-Pb 同位素测年所使用的仪器为 Neptune 多接受电感耦合等离子体质谱仪和 193 nm 激光取样系统。锡石测年选取的激光斑束为 35 μm,激光量密度为 10~13 J/cm²,频率为 8~10 Hz,采用 ID-TIMS U-Pb 年龄的锡石 AY-4 样品(²⁰⁶Pb/²³⁸年龄为 158.2 Ma)作为外标对锡石分析数据进行校正(崔玉荣等,2017;涂家润等,2019)。锆石测年采用 GJ-1 为外标,锆石元素含量以 NIST610 玻璃为外标。数据处理和制图使用 ICPMSDataCal 程序和 Isoplot 程序。Lu-Hf 同位素分析时激光束斑直径为 50 μm,所用的激光脉冲速率为 6~8 Hz,激光束脉冲能量为 100 mJ。

锡石电子探针成分分析在天津地质调查中心实验室完成,仪器型号为日本岛津 EPMA-1720,测

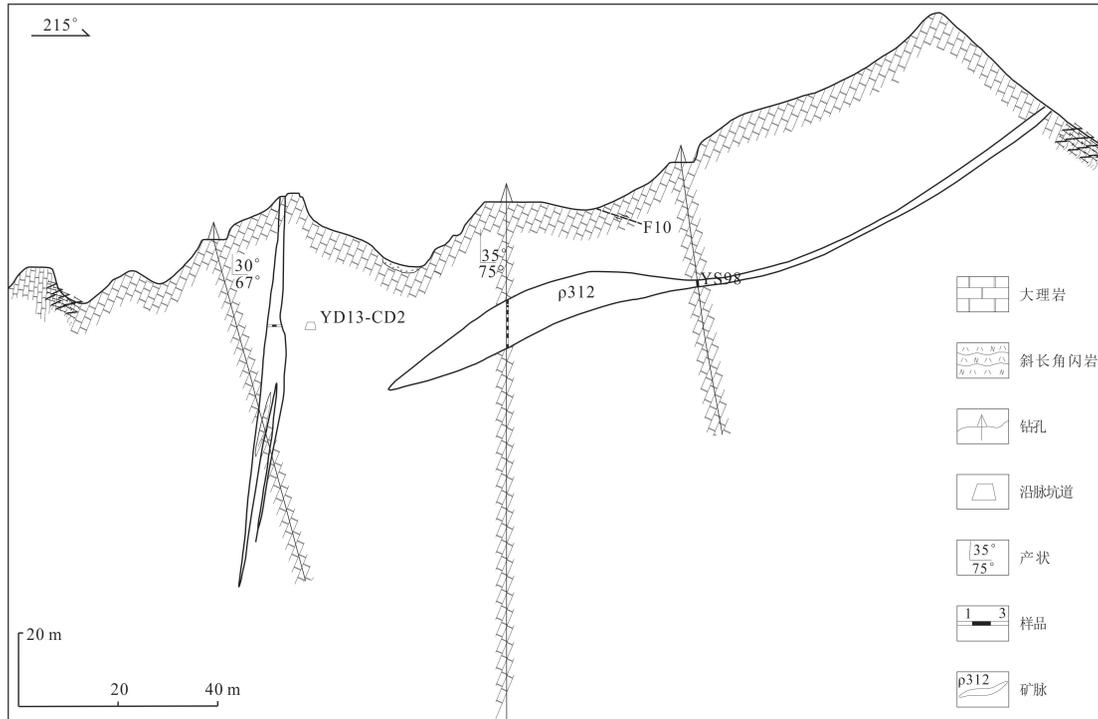


图 3 官坡地区南阳山矿区 VI-VI' 剖面图

Fig.3 Section map of line VI-VI' in Nanyangshan deposit Guanpo area

表 1 南阳山矿区部分锂矿化伟晶岩脉特征表

Table 1 Characteristics of some lithium mineralized pegmatites in Nanyangshan deposit

矿脉 编号	规模(m)		产状		平均 品位 (%)	主要矿物		
	长度	平均 厚度	延伸	倾向		倾角	工业	脉石
ρ401	36	1.19		11°	54°~40°	1.24	锂辉石、绿柱石、铌钽铁矿等	微斜长石、钠长石、石英、白云母等
ρ363	75	4.55	40	290°	73°	1.55	锂云母、锂辉石、绿柱石、铌锰矿等	钠长石、石英、白云母高岭石、红电气石等
ρ312	243	5.30	210	22°~35°	14°~40°	1.31	锂辉石、锂云母、铌锰矿、钽锰矿等	钠长石、微斜长石、石英、白云母、电气石等
ρ501	27	5.10	38.6	287°	65°	1.35	锂辉石、锂云母、绿柱石、铌锰矿等	钠长石、石英、白云母高岭石、红电气石等
ρ366	123	2.54	115	170°~203°	32°~69°	1.23	锂辉石、锂白云母、钽钽矿等	钠长石、微斜长石、石英、白云母等
ρ506	262	3.84	172	35°	79°	1.24	锂辉石、锂白云母、钽钽矿等	钠长石、微斜长石、石英、白云母等

试条件为加速电压 15 kV, 速流强度 10 nA, 束斑直径 5 μm, 选点位于锡石颗粒中干净杂质较少部位。

主微量元素分析在天津地质调查中心实验室完成, 主量元素分析使用 PW4400/40 X 射线荧光光谱仪进行测试, FeO 由氢氟酸、硫酸溶样, 采用重铬酸钾滴定容量法进行测试, 分析精度优于 2%。微量元素使用 X Series II 型电感耦合等离子体质谱仪进行测试, 分析精度优于 5%。

4 分析结果

4.1 锡石电子探针和测年结果

伟晶岩中的锆石因其高的铀和钍含量, 常常引发蜕晶质化作用, 使得锆石的年龄数据偏离谐和线, 无法获得准确的形成年龄。稀有金属伟晶岩中锡石是常见的副矿物, 结构与性质稳定, 其 U-Pb 同位素体系不易因扩散迁移导致同位素信息丢失, 因此锡石 LA-ICP-MS U-Pb 测年成为确定稀有金属伟晶岩成岩成矿时代的最有效方法之一被广泛使用(图 4, 图 5)。

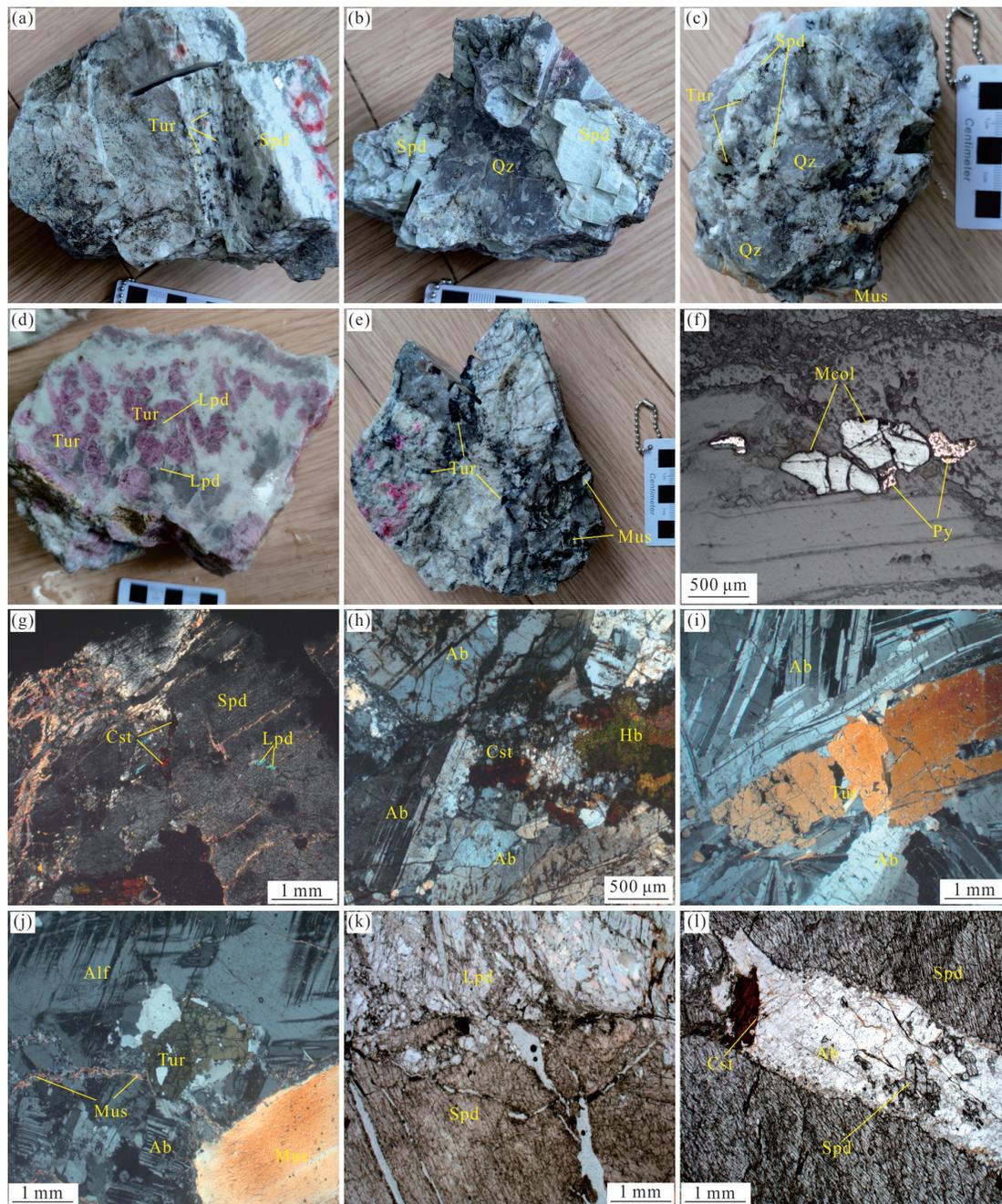


图 4 南阳山矿区稀有金属伟晶岩手标本和镜下照片

Fig.4 Hand specimens and microscope images of rare metal pegmatites in Nanyangshan deposit

a. 锂辉石钠长石微斜长石伟晶岩中锂辉石和黑色电气石;b. 锂辉石钠长石伟晶岩中锂辉石和深灰色石英;c. 锂辉石微斜长石伟晶岩中锂辉石和黑色电气石;d. 锂电气石钠长石伟晶岩中粉色电气石和锂云母;e. 钠长石微斜长石伟晶岩中黑色电气石和白云母;f. 铌锰矿和黄铁矿反射光照片;g. 锂辉石、锡石和锂云母正交镜下照片;h. 钠长石、角闪石、锡石正交镜下照片;i. 钠长石、电气石正交镜下照片;j. 微斜长石、钠长石、白云母、电气石正交镜下照片;k. 锂辉石、锂云母单偏光下照片;l. 锂辉石、钠长石、石英、锡石单偏光下照片;Tur. 电气石;Spd. 锂辉石;Qz. 石英;Lpd. 锂云母;Mus. 白云母;Mcol. 铌锰矿;Py. 黄铁矿;Cst. 锡石;Ab. 钠长石;Hb. 角闪石;Alf. 微斜长石

样品中锡石呈半自形粒状分布于锂辉石矿物中或钠长石、石英、白云母粒间(图 4h, 4i, 4m), 粒径 80~200 μm, 多在 100 μm 左右, 长宽比 2:1~1:1(图 5)。锡石透射光下为深红褐色和黄褐色, 正交镜下具鲜艳的高级干涉色。反射光和背散射图像上见锡

石矿物结构简单, 表面干净, 少量锡石中见矿物包体, 裂纹不发育, 是进行 U-Pb 测年的理想样品。从锡石的结构和分布形式判断为岩浆结晶成因锡石。

对 16 颗锡石进行了电子探针成分分析(表 2), 其 Ta₂O₅ 含量为 0.13%~1.96% (平均 0.82%),

Nb_2O_5 含量为 0.05%~0.70% (平均 0.22%), ($\text{Ta}_2\text{O}_5+\text{Nb}_2\text{O}_5$) 含量为 0.13%~2.56% (平均 1.03%), FeO 含量为 0.06%~0.63% (平均 0.23%), MnO 含量为 0~0.04% (平均 0.01%), ($\text{FeO}+\text{MnO}$) 含量为 0.06%~0.67% (平均 0.23%) (表 2). 岩浆结晶成因的锡石 Ta、Nb 含量较高, Fe、Mn 含量较低, 而热液成因的锡石均较贫 Ta、Nb (低于 1%), 而 Fe、Mn 含量较高 (陈俊等, 1999). 南阳山锂辉石钠长石伟晶岩中锡石 Ta、Nb 含量高, Fe、Mn 含量

低, 显示岩浆结晶成因锡石的特点. 在 ($\text{Fe}+\text{Mn}$)-($\text{Nb}+\text{Ta}$) 锡石成因判别图解中, 所有测点均落入岩浆结晶成因锡石范围内 (图 6), 除个别测点外, 大部分点呈线性排列, ($\text{Fe}+\text{Mn}$) 和 ($\text{Nb}+\text{Ta}$) 比值为 1:2, 与四川可尔因锂矿田稀有金属伟晶岩中的锡石成分类似 (费光春等, 2020; 许家斌等, 2020), 均具有伟晶岩中岩浆结晶成因锡石的成分特点. 因此, 本文测得锡石的形成年龄可代表伟晶岩的结晶年龄和稀有金属的成矿年龄.

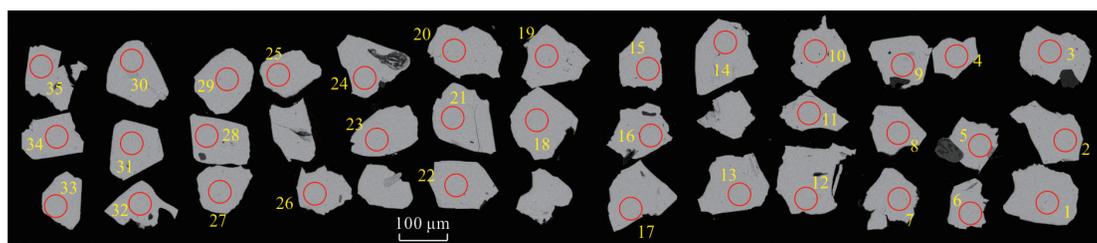


图 5 南阳山矿区伟晶岩锡石背散射图像

Fig.5 Back-scattered electron(BSE) images of cassiterites from Nanyangshan deposit

表 2 南阳山矿区伟晶岩中锡石电子探针成分数据

Table 2 Chemical composition data of the cassiterite from pegmatites in Nanyangshan deposit(analyzed by EPMA)

样品号	NYSSN1	NYSSN2	NYSSN4	NYSSN5	NYSSN8	NYSSN9	NYSSN11	NYSSN12
MgO	0.06	0.08	0.09	0.07	0.08	0.12	0.08	0.10
Al_2O_3	0.02	0.01	0.04	0.02	0.01	BDL	0.03	0.01
Ta_2O_5	1.64	1.79	1.69	0.36	0.13	0.20	0.31	0.27
WO_3	0.11	0.03	0.09	BDL	BDL	0.11	0.01	BDL
ZrO_2	0.06	0.08	0.08	0.05	BDL	0.01	0.07	0.05
Nb_2O_5	0.55	0.48	0.70	0.14	0.05	0.06	0.13	0.09
SnO_2	96.81	95.86	96.11	99.28	99.38	98.26	97.37	98.16
Sc_2O_3	BDL	0.02	BDL	BDL	0.00	BDL	BDL	0.02
TiO_2	0.07	0.21	0.02	0.01	BDL	0.01	BDL	0.05
Cr_2O_3	0.04	BDL	0.01	0.01	0.02	0.02	BDL	BDL
MnO	BDL	0.02	0.04	BDL	BDL	0.02	0.01	BDL
FeO	0.41	0.45	0.63	0.16	0.07	0.07	0.10	0.08
TOTAL	99.77	99.03	99.51	100.09	99.74	98.88	98.12	98.83
Mg	0.004	0.006	0.007	0.005	0.006	0.009	0.006	0.007
Al	0.001	0.001	0.002	0.001	0.000	BDL	0.002	0.000
Ta	0.022	0.024	0.023	0.005	0.002	0.003	0.004	0.004
W	0.001	0.000	0.001	BDL	BDL	0.001	0.000	BDL
Zr	0.002	0.002	0.002	0.001	BDL	0.000	0.002	0.001
Nb	0.012	0.011	0.016	0.003	0.001	0.001	0.003	0.002
Sn	1.927	1.908	1.913	1.976	1.978	1.956	1.938	1.954
Ti	0.002	0.008	0.001	0.000	BDL	0.001	BDL	0.002
Cr	0.001	BDL	0.000	0.000	0.001	0.001	BDL	BDL
Mn	BDL	0.001	0.002	BDL	BDL	0.001	0.000	BDL
Fe	0.017	0.019	0.026	0.007	0.003	0.003	0.004	0.003
Nb+Ta	0.035	0.035	0.039	0.008	0.003	0.004	0.007	0.006

续表 2

样品号	NYSSN1	NYSSN2	NYSSN4	NYSSN5	NYSSN8	NYSSN9	NYSSN11	NYSSN12
Mn+Fe	0.017	0.019	0.028	0.007	0.003	0.004	0.005	0.003
样品号	NYSSN13	NYSSN14	NYSSN17	NYSSN16	NYSSN18	NYSSN19	NYSSN20	NYSSN23
MgO	0.10	0.09	0.10	0.13	0.07	0.10	0.08	0.39
Al ₂ O ₃	0.01	BDL	0.01	BDL	BDL	BDL	0.02	0.02
Ta ₂ O ₅	1.59	0.60	0.13	0.35	0.23	1.35	1.96	0.47
WO ₃	BDL	BDL	BDL	0.02	BDL	0.03	0.15	0.09
ZrO ₂	0.06	BDL	0.03	BDL	0.04	0.06	0.08	0.05
Nb ₂ O ₅	0.16	0.20	BDL	BDL	0.09	0.10	0.60	0.15
SnO ₂	97.08	98.66	99.56	98.18	98.48	97.61	95.60	97.49
Sc ₂ O ₃	BDL	BDL	0.03	BDL	BDL	BDL	BDL	0.01
TiO ₂	BDL	0.03	BDL	BDL	0.05	0.01	0.09	0.07
Cr ₂ O ₃	BDL	BDL	BDL	0.02	BDL	BDL	0.01	0.01
MnO	0.01	0.01	BDL	0.01	BDL	0.02	BDL	BDL
FeO	0.30	0.17	0.06	0.07	0.06	0.27	0.60	0.12
TOTAL	99.30	99.74	99.92	98.79	99.02	99.55	99.18	98.86
Mg	0.007	0.007	0.007	0.010	0.005	0.007	0.006	0.029
Al	0.001	BDL	0.000	BDL	BDL	BDL	0.001	0.001
Ta	0.022	0.008	0.002	0.005	0.003	0.018	0.027	0.006
W	BDL	BDL	BDL	0.000	BDL	0.000	0.002	0.001
Zr	0.001	BDL	0.001	BDL	0.001	0.001	0.002	0.001
Nb	0.004	0.005	BDL	BDL	0.002	0.002	0.014	0.003
Sn	1.933	1.964	1.982	1.954	1.960	1.943	1.903	1.941
Ti	BDL	0.001	BDL	BDL	0.002	0.000	0.003	0.002
Cr	BDL	BDL	BDL	0.001	0.000	BDL	0.000	0.000
Mn	0.000	0.000	BDL	0.000	BDL	0.001	BDL	BDL
Fe	0.013	0.007	0.002	0.003	0.002	0.011	0.025	0.005
Nb+Ta	0.025	0.013	0.002	0.005	0.005	0.021	0.040	0.010
Mn+Fe	0.013	0.007	0.002	0.004	0.002	0.012	0.025	0.005

注:阳离子数按照氧原子数为 4 来计算。

本次共对 48 个锡石测点进行了 LA-MC-ICP-MS U-Pb 年龄测试,所有测点的 ²³⁸U/²⁰⁶Pb 值变化范围为 13.16~15.87, ²⁰⁷Pb/²⁰⁶Pb 值变化范围为 0.0314~0.0929, ²⁰⁷Pb/²³⁵U 值变化范围为 0.2640~0.8035 (见表 3),表明样品普通铅含量很低。将 48 个测点在 Isoplot 中作图,得到下交点年龄为 420.0±4.3 Ma,MSWD=5.3。由于部分测点明显偏离不一致线,删除这些测点后,得到 34 个测点的下交点年龄为 421.5±1.5 Ma,MSWD=0.62(图 7a)。利用分布于谐和线上的 31 个测点计算加权平均年龄,获得年龄值为 420±2 Ma,MSWD=1.5(图 7b)。3 个年龄值在误差范围内一致,表明测年结果的可靠性。测年结果表明南阳山矿区稀有金属伟晶岩的形成时代为 420 Ma,同时也代表稀有金属的成矿时代,成岩成矿作用发生于末志留世。

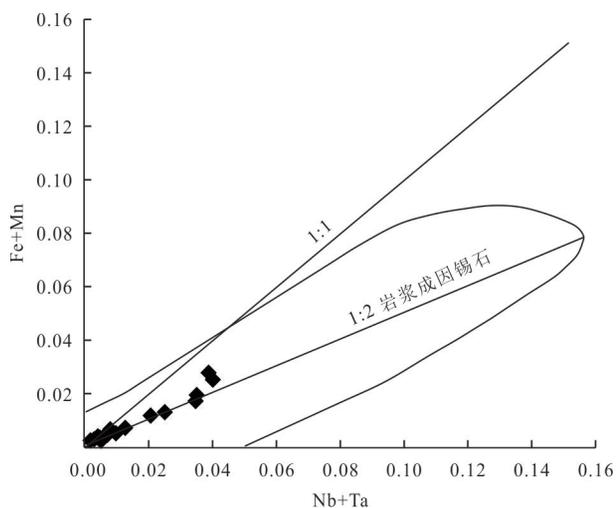


图 6 锡石成因判别图解(底图据 Tindle and Breaks, 1998)
Fig.6 Genesis covariation of cassiterite(base map after Tindle and Breaks, 1998)

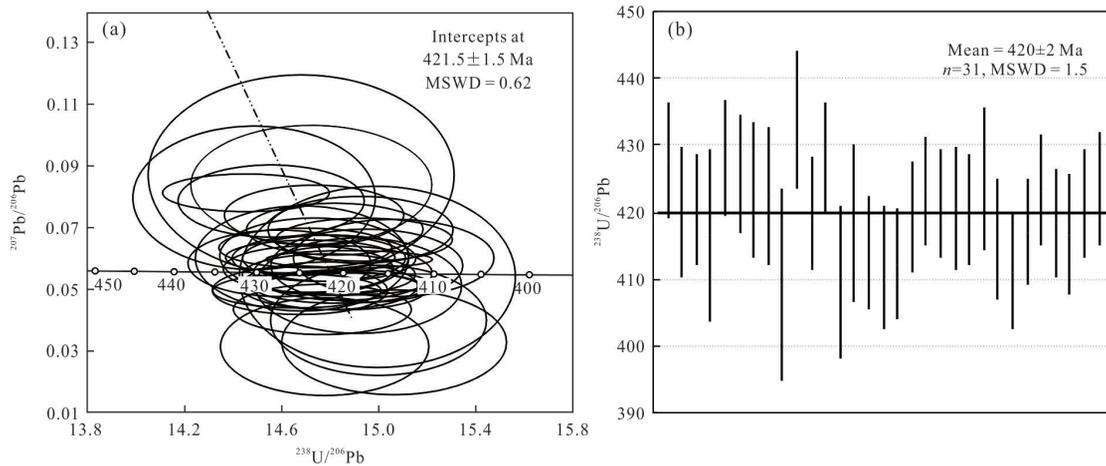


图 7 南阳山矿区伟晶岩锡石 U-Pb 测年谐和图(a)和加权平均年龄(b)

Fig.7 U-Pb Tera-Wasserburg concordia plot(a) and average age(b) of cassiterite from Nanyangshan raremetal pegmatites

表 3 南阳山花岗伟晶岩锡石 LA-MC-ICP-MS U-Pb 分析结果

Table 3 LA-MC-ICP-MS U-Pb isotope data of cassiterite from Nanyangshan pegmatites

样品	测点号	同位素比值					
		$^{238}\text{U}/^{206}\text{Pb}$	ERR %	$^{207}\text{Pb}/^{206}\text{Pb}$	ERR %	$^{207}\text{Pb}/^{235}\text{U}$	ERR %
NYS18	1	14.68	1.01	0.049 7	6.44	0.401 4	6.47
	2	14.92	1.16	0.051 2	12.34	0.421 4	11.91
	3	15.27	1.03	0.071 2	5.58	0.559 9	5.62
	4	14.70	0.99	0.063 4	4.12	0.515 0	4.20
	5	14.99	1.55	0.054 0	22.19	0.466 6	19.46
	6	14.77	1.01	0.043 5	7.65	0.354 0	7.60
	7	14.18	1.18	0.059 7	11.46	0.508 6	11.23
	8	14.59	1.05	0.058 4	7.52	0.475 9	7.51
	9	14.10	1.21	0.076 1	8.44	0.646 5	8.26
	10	15.00	1.21	0.040 0	18.21	0.329 6	16.99
	11	14.68	1.22	0.060 0	11.58	0.483 3	11.53
	12	14.68	1.76	0.087 0	15.24	0.774 5	12.37
	13	14.78	1.19	0.031 4	20.56	0.264 0	19.29
	14	14.85	1.01	0.055 2	6.49	0.444 6	6.51
	15	15.69	1.61	0.063 8	2.37	0.483 2	2.89
	16	14.66	0.97	0.049 5	4.55	0.403 1	4.63
	17	14.72	1.38	0.083 8	9.39	0.703 5	9.03
	18	13.40	1.00	0.090 1	3.30	0.803 5	3.41
	19	14.49	1.41	0.079 6	11.92	0.677 5	11.20
	20	14.82	1.00	0.069 5	4.93	0.560 1	5.02
	21	15.06	1.12	0.060 2	8.48	0.488 3	8.32
	22	14.94	1.00	0.066 1	4.31	0.528 0	4.36
	23	14.09	1.12	0.058 0	1.65	0.488 2	1.83
	24	13.72	1.10	0.061 3	2.79	0.532 3	2.92
	25	14.80	0.99	0.060 1	5.10	0.485 9	5.17
	26	14.84	0.96	0.049 5	5.13	0.397 3	5.17
	27	14.86	0.95	0.052 2	3.20	0.418 1	3.26
	28	14.73	1.08	0.060 8	8.22	0.497 7	8.17

续表 3

样品	测点号	同位素比值					
		$^{238}\text{U}/^{206}\text{Pb}$	ERR %	$^{207}\text{Pb}/^{206}\text{Pb}$	ERR %	$^{207}\text{Pb}/^{235}\text{U}$	ERR %
NYS18	29	14.75	0.99	0.060 1	5.07	0.486 3	5.14
	30	15.06	1.26	0.032 8	21.11	0.271 3	19.94
	31	14.95	1.08	0.057 7	8.39	0.467 8	8.39
	32	13.92	1.03	0.075 5	4.58	0.648 8	4.78
	33	14.93	1.04	0.069 3	6.38	0.554 8	6.35
	34	14.88	0.94	0.059 7	1.95	0.476 9	2.05
	35	15.42	1.98	0.053 5	29.55	0.506 7	21.44
	36	13.16	1.49	0.070 1	17.41	0.654 7	15.59
	37	14.71	0.98	0.056 6	5.43	0.457 9	5.46
	38	14.45	0.97	0.081 3	3.06	0.669 8	3.15
	39	14.73	1.03	0.074 0	5.37	0.598 0	5.49
	40	15.87	1.09	0.063 1	7.05	0.478 2	7.08
	41	14.84	0.96	0.050 6	4.11	0.405 6	4.14
	42	14.79	0.98	0.054 8	4.99	0.443 4	5.08
	43	15.38	2.00	0.083 7	23.83	0.738 6	18.64
	44	13.74	1.34	0.075 2	11.05	0.657 3	10.86
	45	14.56	1.08	0.078 6	6.07	0.650 2	6.06
	46	15.28	1.65	0.092 9	14.40	0.753 6	13.72
	47	14.72	0.97	0.060 3	3.78	0.489 3	3.86
	48	14.80	1.01	0.051 1	6.17	0.415 1	6.19

4.2 锆石测年和 Hf 同位素测试结果

本次对南阳山矿区伟晶岩进行了锆石 U-Pb 测年和 Hf 同位素分析. 伟晶岩锆石颗粒较小, 粒径 50~100 μm, 半自形-他形, 长宽比 1:1~2:1. 阴极发光图上呈黑色, 无环带结构, 背散射图上显示锆石内部较干净, 部分锆石中分布有黑色斑点(图 8d). 共对 81 颗锆石进行了 LA-ICP-MS U-Pb 测年, 由于锆石中 U 含量高($1.321 \times 10^{-6} \sim 10.120 \times 10^{-6}$),

伟晶岩锆石蜕晶化作用强烈,大多数数据点偏离谐和线并呈串珠状分布(图 8a),获得 6 颗锆石的谐和年龄分布于 386~408 Ma 之间($^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$ 年龄)(表 4),其加权平均年龄为 392.8 ± 8.3 Ma(图 8b、c),该年龄较本次测得的伟晶岩锡石 U-Pb 年龄小 27 Ma. 由于锆石蜕晶化作用可能导致其封闭体系破坏,我们不以该年龄值作为伟晶岩的形成年龄,而是以锡石谐和年龄作为伟晶岩的形成年龄. 但这些锆石的 Hf 同位素组成对分析伟晶岩的源区具有重要的参考意义. 这 6 颗锆石 Hf 同位素测试结果显示,其 ($^{176}\text{Hf}/^{177}\text{Hf}$)_i 值介于 0.282 290~0.282 313 之间(表 5),以锡石年龄数据 420 Ma 计算锆石初始 Hf 同位素值,得到 $\epsilon_{\text{Hf}}(t)$ 值为 -7.0~-7.8,平均值为 -7.4, Hf 同位素单阶段模式年龄 T_{DM} 变化于 1 293~1 324 Ma,平均值为 1 309 Ma, Hf 同位素二阶段模式年龄 T_{DM2} 变化于 2 446~2 516 Ma,平均值为 2 480 Ma,反映花岗伟晶岩为古老陆壳熔融的产物.

4.3 主微量元素分析结果

样品的主微量元素含量见附表 1.

官坡地区伟晶岩具高的 SiO_2 、 K_2O 、 Na_2O 含量,

低的 TiO_2 (0.005%~0.060%)、 MgO (0.03%~0.26%)、 TFeO (0.10%~1.84%)、 MnO_2 (0.01%~0.26%)、 CaO (0.16%~1.78%) 含量,变化大的 Al_2O_3 (11.76%~24.31%) 含量,较高的分异系数 ($\text{DI} = 85.5 \sim 97.1$). 样品的 SiO_2 含量分布于 63.45%~87.99%,绝大多数样品分布于 70%~80% 范围内,仅有 1 个样品小于 70%,一个样品大于 80%. K_2O 含量 1.03%~8.03%, Na_2O 含量 0.94%~6.33%, $\text{K}_2\text{O} + \text{Na}_2\text{O} = 1.97\% \sim 10.41\%$, $\text{K}_2\text{O}/\text{Na}_2\text{O} = 0.28 \sim 3.68$,钾、钠含量和钾钠比值变化范围均很大. 在 TAS 分类命名图解上除各有一个样品投于硅英岩、花岗闪长岩和石英二长岩范围内外,其余样品均位于花岗岩区(图 9a). 在硅-钾图上,大部分样品分布于钙碱性系列和高钾钙碱性系列区内(图 9d),里特曼指数为 0.77~4.00,在 $\lg\tau$ - $\lg\sigma$ 图解上,样品落于造山带和岛弧岩浆岩区(图 9b). 岩石 A/CNK 值为 1.10~2.36,在 A/NK-A/CNK 图解中,样品均落于过铝质花岗岩区域(图 9c),伟晶岩中过铝质矿物电气石、白云母含量高,CIPW 标准矿物中出现较高含量的刚玉,显示岩石具明显的过铝质特征.

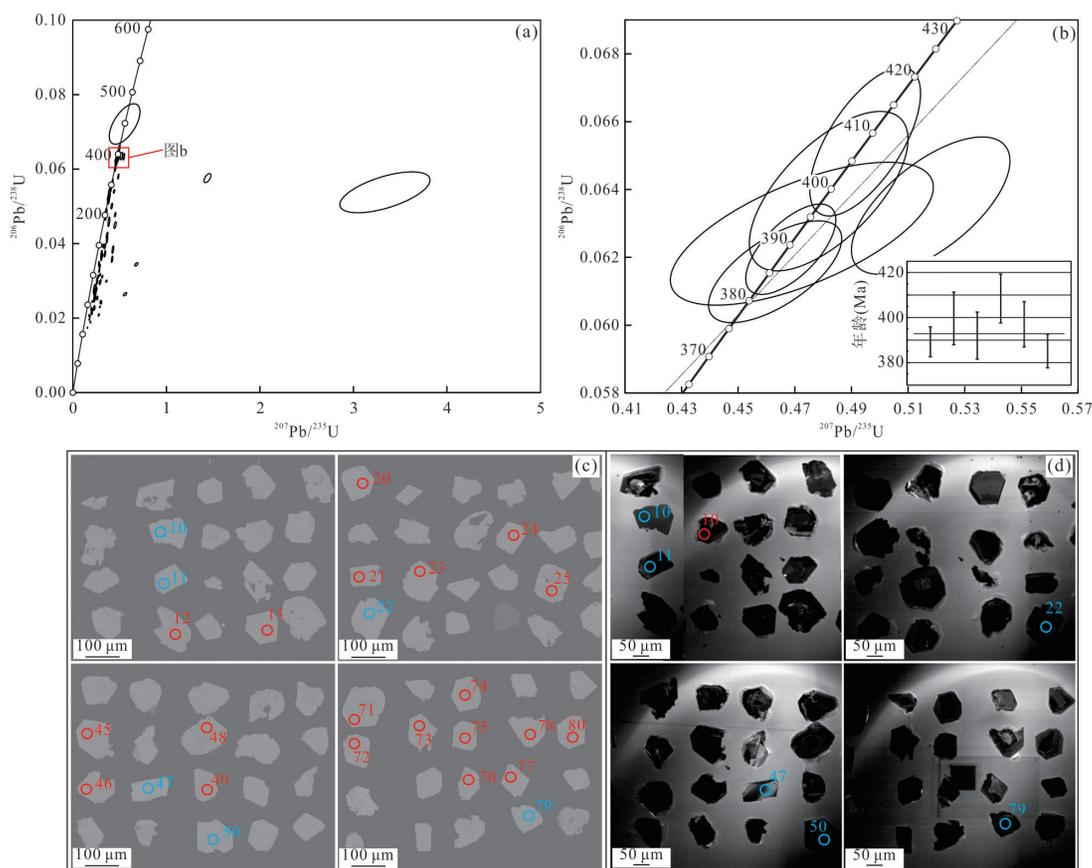


图 8 花岗伟晶岩锆石 U-Pb 谐和图(a和 b)、背散射图像(c)和阴极发光图像(d)

Fig 8 U-Pb concordia diagrams(a and b), BSE images(c)and cathodoluminescence images(d)of zircons from Nanyangshan pegmatites

表 4 花岗伟晶岩锆石 LA-ICP-MS U-Pb 分析结果

Table 4 LA-ICP-MS U-Pb isotopic data of zircons from Nanyangshan pegmatites

样品	测点号	含量($\times 10^{-6}$)		Th/U	同位素比值						年龄(Ma)					
		Th	U		$^{207}\text{Pb}/^{206}\text{Pb}$		$^{207}\text{Pb}/^{235}\text{U}$		$^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$		$^{207}\text{Pb}/^{206}\text{Pb}$		$^{207}\text{Pb}/^{235}\text{U}$		$^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$	
					1σ	1σ	1σ	1σ	1σ	1σ	1σ	1σ				
NYS18	10	4	1365	0.0027	0.0545	0.0006	0.4686	0.0065	0.0622	0.0005	391	26	390	5	389	3
	11	5	1534	0.0030	0.0543	0.0010	0.4630	0.0096	0.0616	0.0006	387	45	386	7	385	4
	22	7	1670	0.0043	0.0545	0.0018	0.4819	0.0114	0.0640	0.0010	391	71	399	8	400	6
	47	8	1321	0.0060	0.0544	0.0019	0.4725	0.0190	0.0627	0.0009	387	78	393	13	392	5
	50	4	1440	0.0031	0.0548	0.0006	0.4948	0.0080	0.0654	0.0009	406	19	408	5	408	5
	79	7	1699	0.0039	0.0590	0.0012	0.5180	0.0114	0.0635	0.0008	569	46	424	8	397	5

表 5 花岗伟晶岩锆石 Hf 同位素组成

Table 5 Hf isotopic composition data of zircons from Nanyangshan pegmatites

样品	测点	$^{176}\text{Yb}/^{177}\text{Hf}$	2σ	$^{176}\text{Lu}/^{177}\text{Hf}$	2σ	$^{176}\text{Hf}/^{177}\text{Hf}$	2σ	$^{176}\text{Hf}/^{177}\text{Hf}_i$	$\epsilon_{\text{Hf}}(0)$	$\epsilon_{\text{Hf}}(t)$	T_{DM} (Ma)	T_{DM2} (Ma)
NYS18	10	0.000054	0.000001	0.000002	0	0.282303	0.000007	0.282303	-16.6	-7.4	1306	2475
	11	0.000091	0.000001	0.000003	0	0.282313	0.000007	0.282313	-16.2	-7.0	1293	2446
	22	0.000042	0.000001	0.000001	0	0.282290	0.000007	0.282290	-17.0	-7.8	1324	2516
	47	0.000033	0.000001	0.000001	0	0.282302	0.000006	0.282302	-16.6	-7.4	1307	2479
	50	0.000095	0.000001	0.000003	0	0.282296	0.000007	0.282296	-16.8	-7.6	1316	2499
	79	0.000101	0.000001	0.000003	0	0.282306	0.000006	0.282306	-16.5	-7.2	1302	2466

注:计算过程所用参数: ^{176}Lu 衰变常数为 $1.865 \times 10^{-11} \text{a}^{-1}$; $(^{176}\text{Lu}/^{177}\text{Hf})_{\text{CHUR}}=0.0332$, $(^{176}\text{Hf}/^{177}\text{Hf})_{\text{CHUR},0}=0.282772$; $(^{176}\text{Lu}/^{177}\text{Hf})_{\text{DM},0}=0.0384$, $(^{176}\text{Hf}/^{177}\text{Hf})_{\text{DM}}=0.28325$

含矿和不含矿花岗伟晶岩在微量元素蛛网图上总体具有相似的分配形式,均显示大离子亲石元素 Rb、K 和高场强元素 Nb、Ta、P、Hf 的富集,亏损 Ba、Nd、Zr、Ti 和稀土元素(图 10),显示高分异花岗岩的特征.含矿花岗伟晶岩较不含矿花岗伟晶岩具有明显更高的 Rb、Cs、Sr 含量,更低的 Zr、Y 含量,在微量元素蛛网图上含矿花岗伟晶岩显示明显的 Sr 峰,而不含矿花岗伟晶岩不发育 Sr 峰.

含矿和不含矿花岗伟晶岩具有稀土含量极低、轻稀土相较于重稀土略富集、发育负铕异常的特征(图 11).含矿伟晶岩稀土总量 $0.43 \times 10^{-6} \sim 2.97 \times 10^{-6}$,平均 1.49×10^{-6} ,具右倾的稀土配分模式, LREE/HREE 比值 4.16~8.17,平均值 6.82, La_N/Yb_N 比值 4.02~11.20,平均值 7.94, δEu 值除一个样品为 1.84 外,其余样品为 0.63~0.87,显示弱 Eu 负异常.不含矿伟晶岩稀土总量 $3.15 \times 10^{-6} \sim 23.14 \times 10^{-6}$,平均 10.48×10^{-6} , LREE/HREE、 La_N/Yb_N 值和 δEu 值变化范围大, LREE/HREE 值 0.86~6.84,平均 3.12, La_N/Yb_N 值 0.7~22.3,平均 6.87, δEu 值 0.09~1.03,平均 0.53,除一个样品 δEu 大于 1 外,其

余样品均具 Eu 负异常.含矿伟晶岩与不含矿伟晶岩相比具明显更低的稀土总量,轻重稀土分馏也更明显(图 11).花岗伟晶岩稀土 TE3,4 值分布于 0.80~1.53,17 个样品有 11 个样品 TE3,4 值大于 1.1,显示稀土四分组效应.与北秦岭地区同时期含榴二长花岗岩体和秦岭岩群中分布的含石榴子石包体花岗质脉体以及秦岭岩群副片麻岩的稀土配分模式相比(图 11),花岗伟晶岩具有明显更低的稀土总量,轻重稀土分馏程度更低.

5 讨论

5.1 成岩成矿时代

官坡地区南阳山锂钽矿区稀有金属伟晶岩中锡石呈半自形粒状分布于锂辉石矿物中或钠长石、石英、白云母粒间(图 4h,4i,4m),未见呈脉状分布或交代造岩矿物的特征,说明锡石为岩浆结晶成因.锡石的电子探针成分分析表明锡石中 Nb_2O_5 、 Ta_2O_5 含量较高,而 FeO、MnO 含量较低,在锡石成因判别图解中(图 6),所有测点均落入岩浆结晶成因锡石范围内,其成分特征与可尔因锂矿田稀有金

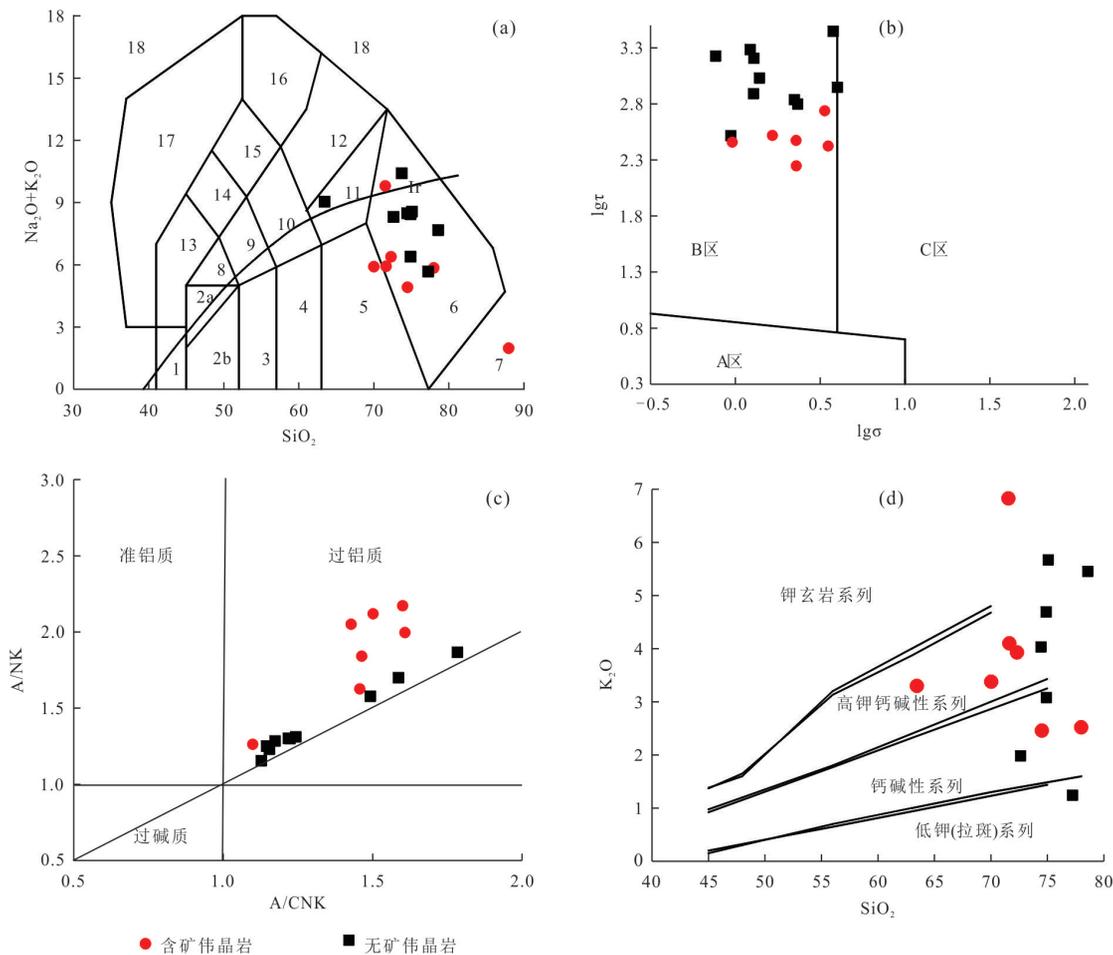


图 9 官坡地区花岗伟晶岩主要元素地球化学图解

Fig. 9 Major element diagram of granitic pegmatites in Guanpo area

TAS 图解,底图据 Middlemost(1994),5区为花岗闪长岩,6区为花岗岩,7区为硅英岩,11区为二长花岗岩;b.底图据 Yang(2007),A区代表非造山带的熔浆,B区代表造山带和岛弧的熔浆,C区代表A和B的衍生物;c.为 A/NK-A/CNK 图解,底图据 Maniar and Piccoli(1989);d.为硅钾图,底图据 Peccerillo *et al.*,(1976)

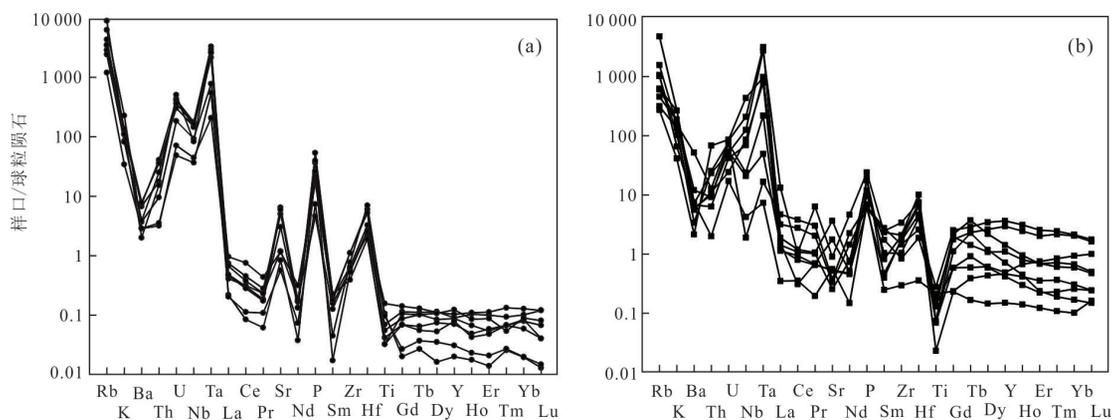


图 10 花岗伟晶岩微量元素蛛网图

Fig.10 Primitive mantle-normalized spidergrams of granitic pegmatites

a. 含矿伟晶岩;b. 为不含矿伟晶岩;原始地幔数据据 McDonough and Sun(1995)

属伟晶岩的锡石成分类似,均具有伟晶岩中岩浆结晶成因锡石的特点.本文通过对稀有金属伟晶岩中

锡石进行 LA-MC-ICP-MS U-Pb 测年,获得到 34 个测点的下交点年龄为 421.5 ± 1.5 Ma, MSWD=

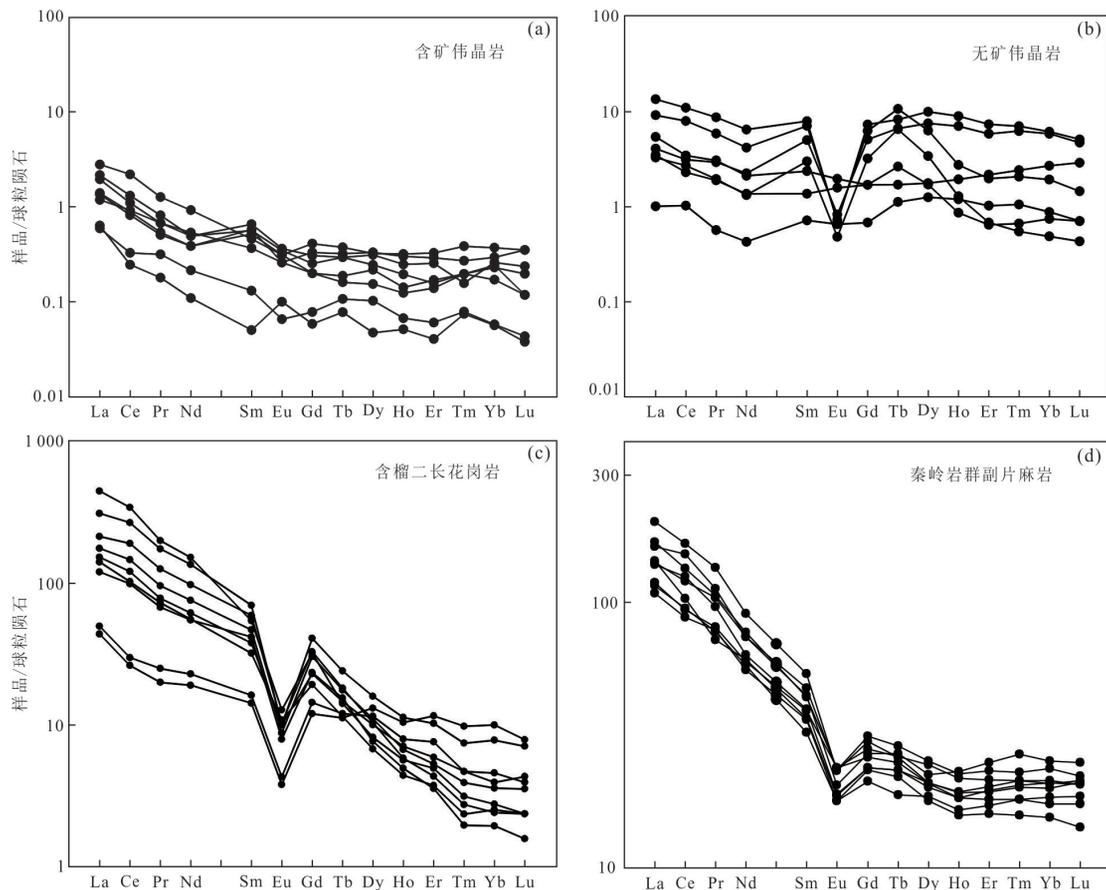


图 11 花岗伟晶岩、含榴二长花岗岩和秦岭岩群副片麻岩稀土元素球粒陨石标准化图

Fig.11 Chondrite-normalized REE distribution patterns of granitic pegmatites, garnet bearing monzogranite and paragneiss of Qinling Group

球粒陨石数据据 Sun and McDonough(1989), 含榴二长花岗岩数据黄龙庙岩体据赵如意等(2012), 骡子坪岩体据张良等(2021), 秦岭岩群副片麻岩数据据河南省地质调查院, 2002. 内乡县幅区域地质调查报告

0.62, 加权平均年龄为 420 ± 2 Ma, $MSWD=1.5$. 表明南阳山矿区稀有金属伟晶岩的形成时代为 420 Ma, 同时也代表稀有金属的成矿时代, 成岩成矿作用发生于末志留世. 这一年龄与前人获得的丹凤地区伟晶岩型铀矿的形成时代(420~405 Ma)(赵如意等, 2013; Yuan *et al.*, 2020) 基本一致, 表明丹凤地区伟晶岩型铀矿和伟晶岩型稀有金属矿为同一期岩浆作用的产物, 这为今后对比研究含铀伟晶岩和稀有金属伟晶岩的成因机制及铀和稀有金属在花岗伟晶岩中的矿化富集机制的异同提供了很好的基础.

5.2 伟晶岩成因

前人对官坡地区稀有金属伟晶岩的成因开展了一定的研究工作, 多数学者认为其与灰池子岩体具有岩浆演化关系(卢欣祥等, 2010; 王盘喜等, 2017). 本次获得官坡地区稀有金属伟晶岩的形成时代为 420 Ma, 与灰池子岩体晚期黑云母花岗岩

(422 Ma) 和大毛沟正长花岗岩(420 Ma) 的形成时代一致(袁峰等, 2017; Qin *et al.* 2015), 而明显晚于灰池子岩体早期黑云母二长花岗岩的年龄(441~434 Ma)(Wang *et al.*, 2009), 反映官坡地区稀有金属伟晶岩与大毛沟正长花岗岩和灰池子岩体晚期花岗岩均为志留纪晚期岩浆活动的产物. 本次获得花岗伟晶岩中锆石的 ϵ_{Hf} (420 Ma) = -7.0~-7.8, 平均值 -7.4, 二阶段 Hf 模式年龄($t_{\text{DM}2}$) 为 2.45~2.52 Ga, 说明花岗伟晶岩的源区为古老的地壳物质. 这一 Hf 同位素组成明显区别于灰池子黑云母花岗岩(441~422 Ma) 的 Hf 同位素组成, 其 $\epsilon_{\text{Hf}}(t)$ 值为 3.4~8.4, 二阶段模式年龄($t_{\text{DM}2}$) 为 0.88~1.20 Ga (Wang *et al.*, 2009; Yuan *et al.*, 2018), 显示为新生基性下地壳源区, 表明官坡地区稀有金属伟晶岩与灰池子岩体具有不同的源区. Černý *et al.*(1991) 研究认为 I 型花岗岩由于其 Li、Cs、B、P 的含量较低, 很难分异形成富 Li、Cs 的花岗伟晶岩, 灰池子岩体

属于I型花岗岩,来源于新生下地壳的部分熔融(Wang *et al.*, 2009;秦拯纬等, 2016),其不太可能为官坡稀有金属伟晶岩的母岩.灰池子岩体南侧大毛沟正长花岗岩(420 Ma)的 $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ 值为0.7035~0.7046, $\epsilon_{\text{Nd}}(t)$ 值为-0.9~-0.3(袁峰等, 2017; Yuan *et al.*, 2018),显示了接近原始地幔的同位素组成,其源区同灰池子岩体类似,也为新生的下地壳,与官坡地区稀有金属伟晶岩Hf同位素反映的源区特征明显不同.因此,官坡地区稀有金属伟晶岩与灰池子黑云母花岗岩体和大毛沟正长花岗岩体不存在岩浆演化关系.

官坡稀有金属花岗伟晶岩富Li、Rb、Cs、Ta,铝饱和指数 $A/\text{CNK}=1.10\sim 2.36$,均大于1.1,指示了所有样品具有强过铝质特征(图9c).按照Černý (1991)对花岗伟晶岩的分类,属于LCT型伟晶岩.LCT型伟晶岩通常来源于过铝质花岗岩浆的结晶分异或直接来源于变质碎屑沉积岩的低程度部分熔融(London, 2004; Martin and DeVito, 2005; McKechnie *et al.*, 2012; Melleton *et al.*, 2012).在灰池子岩体西部存在2个过铝质S型花岗岩体,分别为骡子坪含榴二长花岗岩和黄龙庙含榴二长花岗岩,前人获得黄龙庙岩体的年形成时代为415 Ma(赵如意等, 2012),与官坡地区含稀有金属花岗伟晶岩的形成时代一致,同时也有研究人员在灰池子岩体南部大寺沟地区发现大量时代为420 Ma的含榴花岗质脉体,侵入秦岭岩群地层中,具S型花岗岩的地球化学特征,说明区域上存在与稀有金属伟晶岩同期的过铝质花岗岩浆活动.那么,官坡地区稀有金属伟晶岩的成因存在两种可能,一是由变质碎屑沉积岩低程度部分熔融形成的岩浆直接结晶形成,二是同期的过铝质岩浆经过结晶分异后的残余岩浆结晶形成花岗伟晶岩.

Nb和Ta具有相似的电价和原子半径,地球化学特征相似,在部分熔融过程中Nb和Ta不会发生分馏.典型大陆地壳的Nb/Ta比值约为11,北秦岭地区基底秦岭岩群黑云斜长片麻岩(原岩恢复为变质碎屑岩)的Nb/Ta比值为10.9(时毓等, 2009),官坡地区伟晶岩的Nb/Ta比值为0.55~10.0,平均值2.66,除3个样品外,其余所有样品Nb/Ta比值均小于2,而同时期的过铝质花岗岩黄龙庙含榴二长花岗岩和大寺沟含榴花岗质脉体的Nb/Ta比值分别为8.11~28.9和16.2~22.3,明显高于官坡地区花岗伟晶岩.官坡地区花岗伟晶岩具有如此低的Nb/Ta

比值,其不可能由北秦岭地区变质碎屑岩部分熔融后直接结晶形成.Wang *et al.*(1997)指出,在富挥发分的过铝质岩浆中,矿物/熔体间分配系数 $D_{\text{Nb}}/D_{\text{Ta}}$ 约为10,铌铁矿、铌锰矿等富Nb矿物更容易在早期结晶,导致残余熔体中Nb/Ta比值降低.因此,要形成本区具极低Nb/Ta比值的伟晶岩,岩浆须经历高程度的结晶分异作用.从稀土元素特征来看,区内花岗伟晶岩均具有极低的稀土含量, ΣREE 仅为 $0.23\times 10^{-6}\sim 23.14\times 10^{-6}$,为球粒陨石标准值的0.17~9.03倍,北秦岭地区秦岭岩群变质碎屑岩的稀土总量为 $159.99\times 10^{-6}\sim 265.15\times 10^{-6}$ (河南省地质调查院, 2002.内乡县幅区域地质调查报告),黄龙庙含榴二长花岗岩和大寺沟含榴花岗质脉体被认为来源于秦岭岩群变质碎屑岩的部分熔融,其稀土总量为 $(129.7\sim 418.2)\times 10^{-6}$ (赵如意等, 2012),二者均明显大于官坡地区伟晶岩的稀土含量.由秦岭岩群变质碎屑沉积岩低程度部分熔融形成的花岗伟晶岩不可能具有如此低的稀土含量.综合上述分析,认为官坡地区花岗伟晶岩不可能由变质碎屑沉积岩低程度部分熔融形成的岩浆直接结晶形成,而应为过铝质花岗岩浆高程度分异演化的结果.

官坡地区花岗伟晶岩强烈富集Rb、Cs,亏损Ba,由于Rb、Cs在岩浆演化过程中易进入残余岩浆或岩浆晚期热液中,Ba则易占据早期含K矿物中K的位置,因此Rb、Cs的强烈富集和Ba的亏损指示岩浆经历了高程度的结晶分异作用.在Rb-Ba-Sr判别图解上(图12),本区花岗伟晶岩投于钠长石化云英岩化花岗岩和高分异的花岗岩区内,显示本区伟晶岩具有高分异的特征.在主量元素哈克图解上(图13), Al_2O_3 、 P_2O_5 、MgO与 SiO_2 具有线性关系,随着 SiO_2 含量的增加, Al_2O_3 、 P_2O_5 、MgO含量减少,指示他们来源于同源岩浆,并发生了结晶分异作用.在Rb- SiO_2 散点图上,二者具有很好的线性关系,随着 SiO_2 的升高,Rb含量降低(图12),也说明岩浆演化过程中发生了钾长石的分离结晶.赵振华等(1992)的研究表明,花岗岩中发育的稀土元素四分组效应,是岩浆演化晚期熔体与流体相互作用的结果.本文测试的官坡地区多数伟晶岩样品具有稀土四分组效应,17个样品中11个样品 $\text{TE}_{3,4}>1.1$,说明官坡地区伟晶岩经历了高程度的岩浆演化,晚期存在岩浆流体与熔体的相互作用.官坡地区伟晶岩具有非常低的稀土元素含量,可能为岩浆在不断分离结晶过程中,大量的富稀土矿物(如磷灰石、榍石)

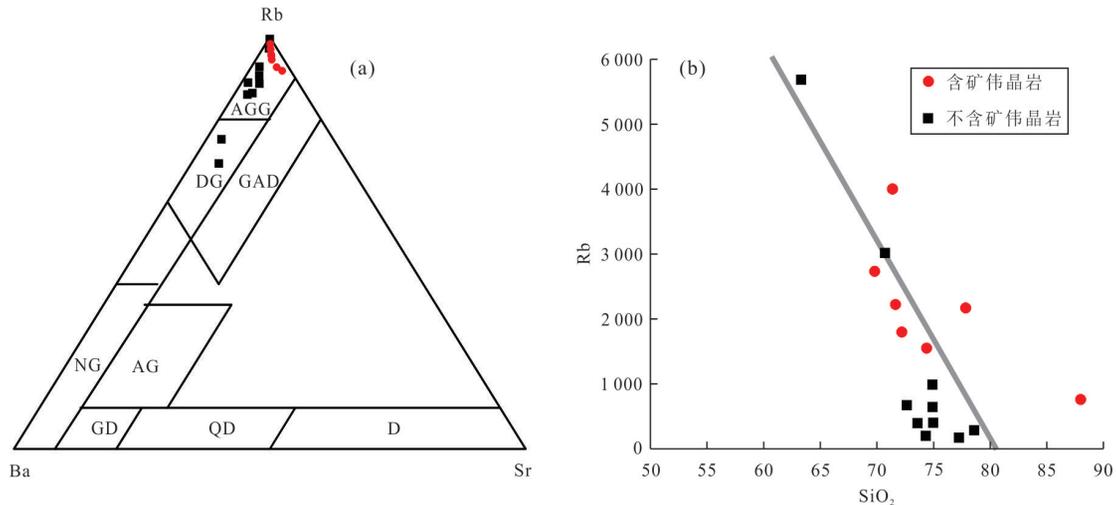


图 12 花岗伟晶岩 Rb-Ba-Sr 图解(a)和 Rb-SiO₂ 散点图(b)

Fig. 12 Rb-Ba-Sr diagram (a), and Rb-SiO₂ scatter diagram (b) of granitic pegmatite

a. 底图据 Blouseily and Sokkary (1975); AGG. 钠长石化和云英岩化花岗岩; DG. 分异的花岗岩; NG. 正常花岗岩; AG. 异常花岗岩; GD. 花岗闪长岩; QD. 石英闪长岩; D. 闪长岩; GAD. 与 W、Mo、Sn 有关矿化花岗岩

在早期结晶,导致残余熔体中稀土含量明显降低。

另外,含矿花岗伟晶岩较不含矿花岗伟晶岩具有明显更高的 Rb、Cs、Sr 含量,更低的 Zr、Y 含量,含矿花岗伟晶岩具有明显更低的稀土总量,轻重稀土分馏也更明显,这些特征表明含矿花岗伟晶岩较不含矿花岗伟晶岩经历了更高程度的岩浆演化,或是由于含矿花岗伟晶岩经历了更高程度的流体-熔体相互作用。

5.3 构造意义

前人对北秦岭东部古生代侵入岩进行了大量的研究工作,积累了丰富的年代学和地球化学数据。北秦岭东部早古生代最早的花岗质岩浆活动发生于~490 Ma,代表性岩体为漂池二长花岗岩,其形成于超高压变质沉积岩折返至中下地壳后的部分熔融(Wang *et al.*, 2009; 秦拯纬, 2016)。形成于 490~511 Ma 的超高压变质岩,为南秦岭向北秦岭深俯冲的产物(刘良等, 2013; 陈丹玲等, 2015)。480~460 Ma,北秦岭地区发育大量奥长花岗岩、英云闪长岩、闪长岩和花岗闪长岩,形成于岛弧构造环境(Wang, 2016),为二郎坪岛弧的组成部分; 440~430 Ma,北秦岭地区形成以灰池子早期岩体和五垛山岩体为代表的大规模花岗岩浆活动(Wang *et al.*, 2009; 秦拯纬, 2016; 李开文等, 2019),地球化学研究表明,灰池子岩体和五垛山岩体具有 I 型花岗岩的特征,为新生玄武质下地壳部分熔融的产物,为弧陆碰撞造山作用的物质响应; 420~405 Ma,北秦岭地区仅分布有小的正长花岗岩、二

长花岗岩珠(脉)和伟晶岩脉(赵如意等, 2012; Zhang *et al.*, 2013; 袁峰等, 2017; 本人测试未发表数据)。Zhang *et al.* (2013) 通过研究和总结该期花岗岩的地球化学特征,认为它们属于高分异的淡色花岗岩,是非挤压伸展环境下陆壳物质熔融岩浆较强分异演化的结果,并认为其形成指示构造活动已明显减弱。本次确定官坡地区稀有金属伟晶岩的形成时代为 420 Ma,由于稀有金属伟晶岩多形成于造山作用晚期、造山后或非造山相对稳定的构造背景(Černý, 1991; 王登红等, 2004),据此可以认为~420 Ma 时北秦岭构造带已进入造山作用晚期或造山后相对稳定的构造背景,这一结论与前人的研究结果是一致的。该期花岗质岩浆活动之后,一直到三叠纪之前,北秦岭构造带一直处于相对稳定的构造环境,缺乏岩浆活动。

6 结论

(1) 官坡地区稀有金属伟晶岩的形成时代为 420±2 Ma,同时也是该地区稀有金属矿的成矿时代。

(2) 官坡地区花岗伟晶岩与其南侧灰池子岩体和大毛沟岩体不具岩浆演化关系为过铝质花岗岩浆高度分异演化的产物。

(3) 志留纪末期,北秦岭造山带处于造山作用晚期或造山后相对稳定的构造背景。

致谢:感谢两位审稿专家对稿件提出的宝贵的

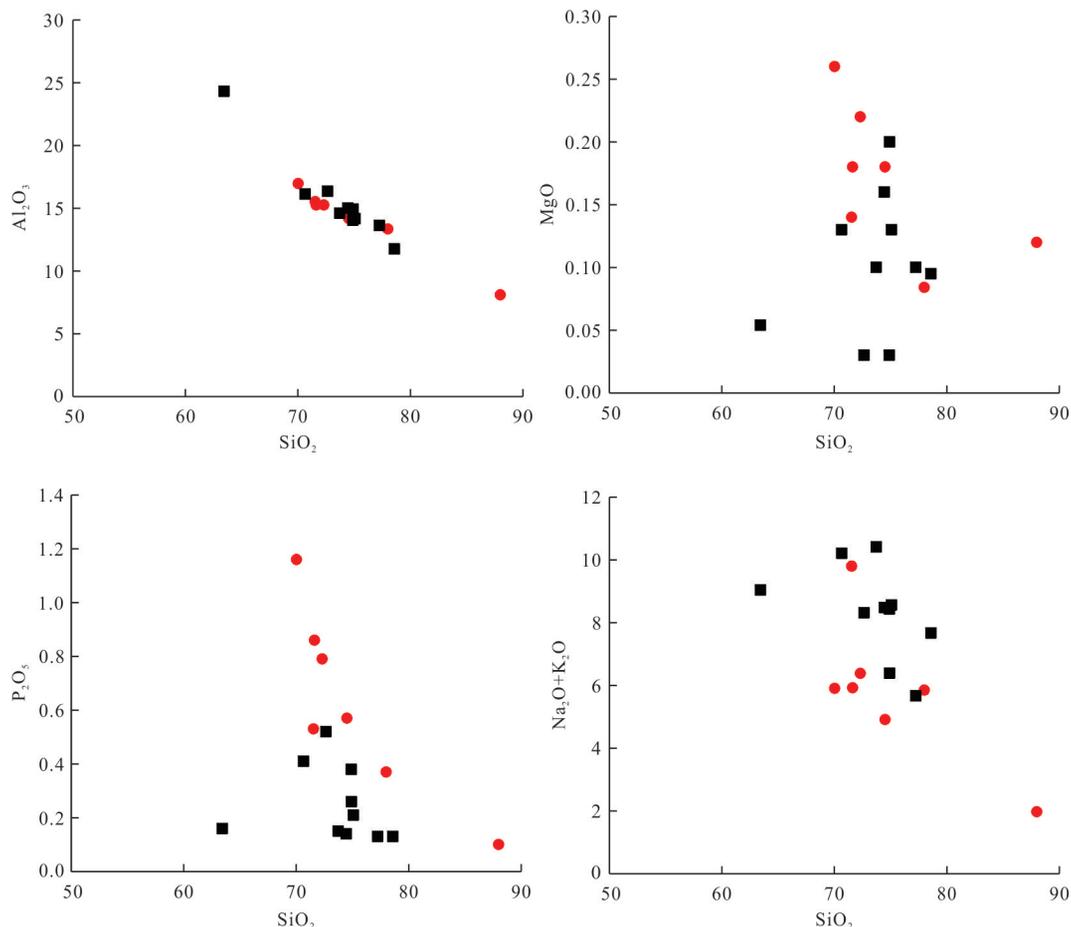


图 13 官坡地区伟晶岩主量元素哈克图解

Fig.13 Harker diagrams of the major elements of granitic pegmatites in Guanpo area

意见,感谢李承东教授级高工、王惠初研究员在文章撰写过程中给予的指导。

附表见本刊官网:www.earth-science.net.

References

- Blouseily, A. M., Sokkary, A. A., 1975. The Relation Between Rb, Ba and Sr in Granitic Rocks. *Chemical Geology*, 16 (3): 207—219. [https://doi.org/10.1016/0009-2541\(75\)90029-7](https://doi.org/10.1016/0009-2541(75)90029-7)
- Černý P., 1991. Fertile Granites of Precambrian Rare-Element Pegmatite Fields: is Geochemistry Controlled by Tectonic Setting or Source Lithologies? *Precambrian Research*, 51: 429—468. [https://doi.org/10.1016/0301-9268\(91\)90111-M](https://doi.org/10.1016/0301-9268(91)90111-M)
- Chen J, Wang R.C., Zhou J.P., 1999. The Geochemistry of Tin. Nanjing University Press, Nanjing, 1—165(in Chinese).
- Chen, D. L., Ren, Y. F., Gong, X. K., et al., 2015. Identification and Its Geological Significance of Eclogite in Songshugou, the North Qinling. *Acta Petrologica Sinica*, 31(7): 1841—1854 (in Chinese with English abstract)
- Chen, Y. W., Hu, R. Z., Bi, X. W., et al., 2019. Genesis of the Guangshigou Pegmatite-Type Uranium Deposit in the North Qinling Orogenic Belt, China. *Ore Geology Reviews*, 115: 103165. <https://doi.org/10.1016/j.oregeorev.2019.103165>
- Cheng, H., Zhang, C., Vervoort, J. D., et al., 2011. Geochronology of the Transition of Eclogite to Amphibolite Facies Metamorphism in the North Qinling Orogen of Central China. *Lithos*, 125: 969—983.
- Cheng H, Zhang, C., Vervoort J D, et al., 2012. Timing of Eclogite Facies Metamorphism in the North Qinling by U—Pb and Lu-Hf Geochronology. *Lithos*, 136—139: 46—59.
- Cui, Y. R., Tu, J. R., Chen, F., et al., 2017. The Research Advances in LA-(MC)-ICP-MS U-Pb Dating of Cassiterite. *Acta Geologica Sinica*, 91(6): 1386—1399 (in Chinese with English abstract).
- Diwu, C.R., Sun, Y., Liu, L., et al., 2010. The Disintegration of Kuanping Group in North Qinling Orogenic Belts and Neo-Proterozoic N-MORB. *Acta Petrologica Sinica*, 26 (7): 2025—2038 (in Chinese with English abstract).
- Dong, Y. P., Zhang, G. W., Hauzenberger, C., et al., 2011a.

- Palaeozoic Tectonics and Evolutionary History of the Qinling Orogen: Evidence from Geochemistry and Geochronology of Ophiolite and Related Volcanic Rocks. *Lithos*, 122(1–2): 39–56. <https://doi.org/10.1016/j.lithos.2010.11.011>
- Dong, Y. P., Zhang, G. W., Neubauer, F., et al., 2011b. Tectonic Evolution of the Qinling Orogen, China: Review and Synthesis. *Journal of Asian Earth Sciences*, 41(3): 213–237. <https://doi.org/10.1016/j.jseaes.2011.03.002>
- Fei, G. C., Yang, Z., Yang, J. Y., Luo, W., et al., 2020. New Precise Timing Constraint for the Dangba Granitic Pegmatite Type Rare-Metal Deposits, Markam, Sichuan Province: Evidence from Cassiterite LA-MC-ICP-MS U-Pb Dating. *Acta Geologica Sinica*, 94(3): 836–849(in Chinese with English abstract).
- Li, C. D., Zhao, L. G., Xu, Y. W., et al., 2018. Chronology of Metasedimentary Rocks from Kuanping Group Complex in North Qinling Belt and Its Geological Significance. *Geology in China*, 45(5): 992–1010. (in Chinese with English abstract).
- Li, J. K., Liu, X. F., Wang, D. H., 2014. The Metallogenetic Regularity of Lithium Deposit in China. *Acta Geologica Sinica*, 88(12): 2269–2283 (in Chinese with English abstract).
- Li, K. W., Fang, H. B., Guo, J. G., et al., 2019. Petrogeochemistry, Zircon U-Pb Dating and Geological Significance of Two-Mica Granites from Wuduoshan Granite in Nanzhao County, Eastern Qinling Mountains. *Earth Science*, 44(1): 123–134 (in Chinese with English abstract).
- Li, Z. D., Xie, Y., Li, J. J., et al., 2021. Characteristics and Metallogenetic Regularity of Lithium Resources in North China. *North China Geology*, 44(3): 41–49(in Chinese with English abstract).
- Li, Z. Q., Ren, S. L., Dong, S. W., et al., 2021. Tectonic Evolution Time Limit of Subduction in Erlangping Back-Arc Basin, North Qinling. *Chinese Journal of Geology*, 56(3): 770–791(in Chinese with English abstract).
- Liu, L., Liao, X. Y., Wang, Y. W., et al., 2016. Early Palaeozoic Tectonic Evolution of the North Qinling Orogenic Belt in Central China: Insights on Continental Deep Subduction and Multiphase Exhumation. *Earth-Science Reviews*, 159: 58–81. <https://doi.org/10.1016/j.earscirev.2016.05.005>
- Liu, L., Liao, X. Y., Zhang, C. L., et al., 2013. Multi-Matamorphic Timings of HP-UHP Rocks in the North Qinling and Their Geological Implications. *Acta Petrologica Sinica*, 29(5): 1643–1656(in Chinese with English abstract).
- London, D., 2004. Granitic Pegmatites: an Assessment of Current Concepts and Directions for the Future. *Lithos*, 80(1–4): 281–303. <https://doi.org/10.1016/j.lithos.2004.02.009>
- Lu, X. X., Zhu, C. H., Gu, D. M., et al., 2010. The Main Geological and Metallogenic Characteristics of Granitic Pegmatite in Eastern Qinling Belt. *Geological Review*, 56(1): 21–30 (in Chinese with English abstract).
- Maniar, P. D., Piccoli, P. M., 1989. Tectonic Discrimination of Granitoids. *Geological Society of America Bulletin*, 101(5): 635–643. [https://doi.org/10.1130/0016-7606\(1989\)101<0635:TDOG>2.3.CO;2](https://doi.org/10.1130/0016-7606(1989)101<0635:TDOG>2.3.CO;2)
- Martin, R. F., De Vito, C., 2005. The Patterns of Enrichment in Felsic Pegmatites Ultimately Depend on Tectonic Setting. *The Canadian Mineralogist*, 43(6): 2027–2048. <https://doi.org/10.2113/gscanmin.43.6.2027>
- McDonough, W. F., Sun, S. S., 1995. The Composition of the Earth. *Chemical Geology*, 120(3–4): 223–253. [https://doi.org/10.1016/0009-2541\(94\)00140-4](https://doi.org/10.1016/0009-2541(94)00140-4)
- McKechnie, C. L., Annesley, I. R., Ansdell, K. M., 2012. Medium- to Low-Pressure Politic Gneisses of Fraser Lakes Zone -B, Wollaston Domain, Northern Saskatchewan, Canada: Mineral Compositions, Metamorphic *p-t-t* Path, and Implications for the Genesis of Radioactive Abyssal Granitic Pegmatites. *The Canadian Mineralogist*, 50(6): 1669–1694. <https://doi.org/10.3749/canmin.50.6.1669>
- Melleton, J., Gloaguen, E., Frei, D., et al., 2012. How are the Emplacement of Rare - Element Pegmatites, Regional Metamorphism and Magmatism Interrelated in the Moldanubian Domain of the Variscan Bohemian Massif, Czech Republic? *The Canadian Mineralogist*, 50: 1751–1773. <https://doi.org/10.3749/canmin.50.6.1751>
- Middlemost, E. A. K., 1994. Naming Materials in the Magma /Igneous Rock System. *Earth-Science Reviews*, 37(3–4): 215–224. [https://doi.org/10.1016/0012-8252\(94\)90029-9](https://doi.org/10.1016/0012-8252(94)90029-9)
- Peccerillo, A., Taylor, S. R., 1976. Geochemistry of Eocene Calc-Alkaline Volcanic Rocks from the Kastamonu Area, Northern Turkey. *Contributions to Mineralogy and Petrology*, 58: 63–81. <https://doi.org/10.1007/BF00384745>
- Qin, Z. W., 2016. Early Paleozoic Magmatism in the North Qinling Orogenic Belt and Its Implications for Continental Crust Evolution(Dissertation). China University of Geosciences, Wuhan (in Chinese with English abstract).
- Qin, Z. W., Wu, Y. B., Siebel, W., et al., 2015. Genesis of Adakitic Granitoids by Partial Melting of Thickened Lower Crust and Its Implications for Early Crustal Growth: A case Study from the Huichizi Pluton, Qinling Orogen, Central China. *Lithos*, 238: 1–12. <https://doi.org/10.1016/j.lithos.2015.05.005>

- lithos.2015.09.017
- Shi, Y., Yu, J. H., Santosh, M., 2013. Tectonic Evolution of the Qinling Orogenic Belt, Central China: New Evidence from Geochemical, Zircon U-Pb Geochronology and Hf Isotopes. *Precambrian Research*, 231: 19–60. <https://doi.org/10.1016/j.precamres.2013.03.001>
- Shi, Y., Yu, J. H., Xu, X. S., et al., 2009. Geochronology and Geochemistry of the Qinling Group in the Eastern Qinling Orogen. *Acta Petrologica Sinica*, 25(10): 2651–2670 (in Chinese with English abstract).
- Sun, S., McDonough, W. F., 1989. Chemical and Isotopic Systematics of Oceanic Basalts: Implications for Mantle Composition and Processes. *Geological Society, London, Special Publications*, 42(1): 313–345. <https://doi.org/10.1144/gsl.sp.1989.042.01.19>
- Tang, L., Santosh, M., Dong, Y. P., 2015. Tectonic Evolution of a Complex Orogenic System: Evidence from the Northern Qinling Belt, Central China. *Journal of Asian Earth Sciences*, 113: 544–559. <https://doi.org/10.1016/j.jseas.2015.03.033>
- Tindle, A. G., Breaks, F. W., 1998. Oxide Minerals from the Separation Rapids Rare - Element Granitic Pegmatite Group, Northwestern Ontario. *Canadian Mineralogist*, 36(2): 609–635. <https://www.researchgate.net/publication/279706098>
- Tu, J.R., Cui, Y.R., Zhou, H.Y., et al., 2019. Review of U-Pb Dating Methods for Cassiterite. *Geological Survey and Research*, 42(4): 241–249(in Chinese with English abstract).
- Wan, J., Gao, L. B., Wang, L. X., 1992. Metallogenic Environmental Study and Prospect Assessment of the Granite-Pegmatite-Type Uranium Deposit in Shangxian-Danfeng Triangle Area, Shaanxi. *Uranium Geology*, 8(5): 257–263–270 (in Chinese with English abstract).
- Wang, D. H., Zou, T. R., Xu, Z. G., et al., 2004. Advance in the Study of Using Pegmatite Deposits as the Tracer of Orogenic Process. *Advances in Earth Science*, 19(4): 614–620(in Chinese with English abstract).
- Wang, H., Wu, Y. B., Gao, S., et al., 2011. Eclogite Origin and Timings in the North Qinling Terrane, and Their Bearing on the Amalgamation of the South and North China Blocks. *Journal of Metamorphic Geology*, 29(9): 1019–1031. <https://doi.org/10.1111/j.1525-1314.2011.00955.x>
- Wang, H., Wu, Y. B., Gao, S., et al., 2016. Continental Growth Through Accreted Oceanic Arc: Zircon Hf-O Isotope Evidence for Granitoids from the Qinling Orogen. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 182: 109–130. <https://doi.org/10.1016/j.gca.2016.03.016>
- Wang, P. X., Zhu, L. K., Liu, L., et al., 2017. Geological and Geochemical Characteristics of Granitic Pegmatite in Guanpo, Henan Province. *Geological Survey of China*, 4(6): 40–49(in Chinese with English abstract).
- Wang, R. C., Fontan, F., Xu, S. J., et al., 1997. The Association of Columbite, Tantalite and Tapiolite in the Suzhou Granite, China. *The Canadian Mineralogist*. 35(3): 699–706.
- Wang, T., Wang, X. X., Tian, W., et al., 2009. North Qinling Paleozoic Granite Associations and Their Variation in Space and Time: Implications for Orogenic Processes in the Orogens of Central China. *Science in China(Series D)*, 52(9): 1359–1384. <https://doi.org/10.1007/s11430-009-0129-5>
- Wang, Z. Q., Yan, Z., Wang, T., et al., 2009. New Advances in the Study on Ages of Metamorphic Strata in the Qinling Orogenic Belt. *Acta Geoscientica Sinica*, 30(5) : 561–570 (in Chinese with English abstract).
- Wu, Y. B., 2019. Paleozoic Magmatism in the Qinling Orogen and Its Geodynamic Significance. *Earth Science*, 44(12): 4173–4177(in Chinese with English abstract).
- Wu, Y. B., Zheng, Y. F., 2013. Tectonic Evolution of a Composite Collision Orogen: An overview on the Qinling-Tongbai-Hong'an-Dabie-Sulu Orogenic Belt in Central China. *Gondwana Research*, 23(4) : 1402–1428. <https://doi.org/10.1016/j.gr.2012.09.007>
- Xu, J. B., Fei, G. C., Qin, L. Y., et al., 2020. LA-MC-ICP-MS U-Pb Dating of Cassiterite from the Lijiagou Pegmatite-Type Rare-Metal Deposit in the Ke'erlyn Orefield, Sichuan Province and Its Geological Implication. *Geology and Exploration*, 55(2): 0346–0358(in Chinese with English abstract).
- Yang, M., Liu, L., Wang, Y. W., et al. 2016. Geochronology of Detrital Zircons from Metaclastic of Erlangping Complex in the North Qinling Belt and Its Tectonic Implication. *Acta Petrologica Sinica*, 32(5): 1452–1466(in Chinese with English abstract).
- Yang, X. M., 2007. Using the Rittmann Serial Index to Define the Alkalinity of Igneous Rocks. *Neues Jahrbuch für Mineralogie-Abhandlungen*, 184(1): 95–103. <https://doi.org/10.1127/0077-7757/2007/0082>
- Yang, Y., Wang, X. X., Ke, C. H., et al., 2014. Zircon U-Pb Ages, Geochemistry and Evolution of Mangling Pluton in North Qinling Mountains. *Mineral Deposits*, 33(1): 14–36 (in Chinese with English abstract).
- Yuan, F., Jiang, S. Y., Liu, J. J., et al., 2020. Origin and Evolution of Uraniferous Pegmatite: A case Study from the Xiaohuacha Granite-Pegmatite System and Related Country

- Rocks in the Shangdan Uranium Mineralization District of North Qinling Orogenic Belt, China. *Lithos*, 356–357: 105379. <https://doi.org/10.1016/j.lithos.2020.105379>
- Yuan, F., Liu, J. J., Carranza, E. J. M., et al., 2018. Zircon Trace Element and Isotopic (Sr, Nd, Hf, Pb) Effects of Assimilation - Fractional Crystallization of Pegmatite Magma: a Case Study of the Guangshigou Biotite Pegmatites from the North Qinling Orogen, Central China. *Lithos*, 302–303: 20–36. <https://doi.org/10.1016/j.lithos.2017.12.022>
- Yuan, F., Liu, J. J., Lü, G. X., et al., 2017. Zircon U-Pb Geochronology, Geochemistry and Petrogenesis of the Granites and Pegmatites from the Guangshigou Uranium Deposit in the Northern Qinling Orogen, China. *Earth Science Frontiers*, 24(6): 25–45(in Chinese with English abstract).
- Yuan, F., Liu, J., Carranza, E. J. M., et al., 2018. The Guangshigou Uranium Deposit, Northern Qinling Orogen, China: A Product of Assimilation-Fractional Crystallization of Pegmatitic magma. *Ore Geology Reviews*, 99: 17–41. <https://doi.org/10.1016/j.oregeorev.2018.05.010>
- Zeng, W., Xu, Y. W., Sun, F. Y., 2019. Molybdenite Re-Os Geochronology and S, Pb Isotopic Characteristic of Banchang Copper Polymetallic Deposit in Neixiang, Henan Province. *Earth Science*, 44(1):109–122(in Chinese with English abstract).
- Zhang, C. L., Liu, L., Wang, T., et al., 2013. Granitic Magmatism Related to Early Paleozoic Continental Collision in the North Qinling Belt. *Chin Sci Bull*, 58. doi: 10.1007/s11434-013-6064-z
- Zhang, L., Hu, F. F., Wang, J. B., 2021. Geological and Geochemical Characteristics of Uranium-Bearing Pegmatite in the Danfeng Area, North Qinling. *Geology and Exploration*, 57(2): 370–379(in Chinese with English abstract).
- Zhao, J., Chen, D. L., Tan, Q. H., et al., 2012. Zircon LA-ICP-MS U-Pb Dating of Basic Volcanics from Erlangping Group of the North Qinling, Eastern Qinling Mountains and Its Geological Implications. *Earth Science Frontiers*, 19(4): 118–125(in Chinese with English abstract).
- Zhao, L. G., Li, C. D., Wu, Z. Y., et al., 2018. Detrital Zircon U-Pb Geochronology of the Qinling Group in Wuli-chuan-Zhaigen Area, West Henan. *Geology in China*, 45(4): 753–766(in Chinese with English abstract).
- Zhao, R. Y., Li, W. H., Jiang, C. Y., et al., 2013. Age and Geochemistry of Uranium Bearing Pegmatite in Danfeng Area, Shaanxi Province. *Acta Mineralogica Sinica*, 3(S2): 880–882 (in Chinese).
- Zhao, R. Y., Li, W. H., Jiang, C. Y., et al., 2014. The LA-ICP-MS Zircon U-Pb Dating, Petro-Geochemical Characteristics of Huanglongmiao Monzogranite in Danfeng Area in Eastern Qinling Mts. and Their Geological Significance. *Geological Review*, 60(5):1123–1132 (in Chinese with English abstract).
- Zhao, Z. H., Masuda, A., Shabani MB., 1992. Tetrad Effects of Rare-Earth Elements in Rare-Metal granites. *Geochimica*, 3: 221–233 (in Chinese with English abstract).
- Zhou, Q. F., Qin, K. Z., Tang, D.M., 2019. Mineralogical Characteristics and Significance of Beryl from the Rare-Element Pegmatites in the Lushi County, East Qinling, China. *Acta Petrologica Sinica*, 35 (7): 1999–2012.

附中文参考文献

- 曾威, 许雅雯, 孙丰月, 等, 2019. 河南内乡县板厂铜多金属矿辉钼矿 Re-Os 年代学及硫、铅同位素地球化学特征. *地球科学*, 44(1):109–122.
- 陈丹玲, 任云飞, 宫相宽, 等, 2015. 北秦岭松树沟榴辉岩的确定及其地质意义. *岩石学报*, 31(7): 1841–1854
- 陈骏, 王汝成, 周建平, 1999. 锡的地球化学. 南京: 南京大学出版社, 1–165
- 崔玉荣, 涂家润, 陈枫, 等, 2017. LA-(MC)-ICP-MS 锡石 U-Pb 定年研究进展. *地质学报*, 91(6): 1386–1399.
- 第五春荣, 孙勇, 刘良, 等, 2010. 北秦岭宽坪岩群的解体及新元古代 N-MORB. *岩石学报*, 26(7): 2025–2038.
- 费光春, 杨峥, 杨继忆, 等, 2020. 四川马尔康党坝花岗伟晶岩型稀有金属矿床成矿时代的限定: 来自 LA-MC-ICP-MS 锡石 U-Pb 定年的证据. *地质学报*, 94(3): 836–849.
- 李承东, 赵利刚, 许雅雯, 等, 2018. 北秦岭宽坪岩群变质沉积岩年代学及地质意义. *中国地质*, 45(5): 992–1010.
- 李建康, 刘喜方, 王登红, 2014. 中国锂矿成矿规律概要. *地质学报*, 88(12): 2269–2283.
- 李开文, 方怀宾, 郭君功, 等, 2019. 东秦岭南召县五朵山岩体二云母花岗岩地球化学、锆石 U-Pb 年代学及地质意义. *地球科学*, 44(1): 123–134.
- 李振强, 任升莲, 董树文, 等, 2021. 北秦岭二郎坪弧后盆地俯冲消减的构造演化时限. *地质科学*, 56(3): 770–791.
- 李志丹, 谢瑜, 李俊建, 等, 2021. 华北地区锂资源特征及成矿规律概要. *华北地质*, 44(3):41–49.
- 刘良, 廖小莹, 张成立, 等, 2013. 北秦岭高压-超高压岩石的多期变质时代及其地质意义. *岩石学报*, 29(5): 1634–1656
- 卢欣祥, 祝朝辉, 谷德敏, 等, 2010. 东秦岭花岗伟晶岩的基本地质矿化特征. *地质论评*, 56(1): 21–30.
- 秦拯纬, 2016. 北秦岭造山带早古生代岩浆作用及其大陆地壳演化意义(博士学位论文). 武汉: 中国地质大学.
- 时毓, 于津海, 徐夕生, 等, 2009. 秦岭造山带东段秦岭岩群的年代学和地球化学研究. *岩石学报*, 25(10): 2651–2670.

- 涂家润,崔玉荣,周红英,等,2019. 锡石 U-Pb 定年方法评述. 地质调查与研究, 42(4): 241—249.
- 万吉,高立宝,王莲香,1992. 商丹三角地区花岗伟晶岩型铀矿成矿环境研究及远景评价. 铀矿地质, 8(5): 257—263—270.
- 王登红,邹天人,徐志刚,等,2004. 伟晶岩矿床示踪造山过程的研究进展. 地球科学进展, 19(4): 614—620.
- 王盘喜,朱黎宽,刘璐,等,2017. 河南官坡花岗伟晶岩地质与地球化学特征. 中国地质调查, 4(6): 40—49.
- 王宗起,闫臻,王涛,等,2009. 秦岭造山带主要疑难地层时代研究的新进展. 地球学报, 30(5): 561—570.
- 吴元保,2019. 秦岭造山带古生代岩浆作用及地球动力学意义. 地球科学, 44(12): 4173—4177.
- 许家斌,费光春,覃立业,等,2020. 四川可尔因矿田李家沟伟晶岩型稀有金属矿床锡石 LA-MC-ICP-MS U-Pb 定年及地质意义. 地质与勘探, 56(2): 346—358.
- 杨敏,刘良,王亚伟,等,2016. 北秦岭二郎坪杂岩变沉积岩碎屑锆石年代学及其构造地质意义. 岩石学报, 32(5): 1452—1466.
- 杨阳,王晓霞,柯昌辉,等,2014. 北秦岭蟒岭岩体的锆石 U-Pb 年龄、地球化学及其演化. 矿床地质, 33(1): 14—36.
- 袁峰,刘家军,吕古贤,等,2017. 北秦岭光石沟铀矿区花岗岩、伟晶岩锆石 U-Pb 年代学、地球化学及成因意义. 地学前缘, 24(6): 25—45.
- 张良,胡菲菲,王江波,等,2021. 北秦岭丹凤地区含铀伟晶岩地质地球化学特征. 地质与勘探, 57(2): 370—379.
- 赵姣,陈丹玲,谭清海,等,2012. 北秦岭东段二郎坪群火山岩锆石的 LA-ICP-MS U-Pb 定年及其地质意义. 地学前缘, 19(4): 118—125.
- 赵利刚,李承东,武志宇,等,2018. 豫西五里川—寨根一带秦岭岩群碎屑锆石 U-Pb 年龄研究. 中国地质, 45(4): 753—766.
- 赵如意,李卫红,姜常义,等,2012. 东秦岭丹凤地区黄龙庙二长花岗岩 LA-ICP-MS 锆石 U-Pb 年龄、岩石地球化学特征及其地质意义. 地质论评, 60(5): 1123—1132.
- 赵如意,李卫红,姜常义,等,2013. 陕西丹凤地区含铀花岗岩伟晶岩年龄及其构造意义. 矿物学报, 3(S2): 880—882.
- 赵振华,增田彰正,夏巴尼,1992. 稀有金属花岗岩的稀土元素四分组效应. 地球化学, 3: 221—233.
- 周起凤,秦克章,唐冬梅,等,2019. 东秦岭卢氏稀有金属伟晶岩的绿柱石矿物学特征及其指示意义. 岩石学报, 35(7): 1999—2012.