

DOI:10.19751/j.cnki.61-1149/p.2022.03.019

渭河盆地南缘花岗岩中生氦元素(U、Th)赋存状态及制约因素研究——以华山复式岩体为例

张乔^{1,2}, 周俊林^{1,2,*}, 李玉宏^{1,2}, 陈高潮^{1,2}, 魏建设^{1,2}, 郭望^{1,2}

(1. 中国地质调查局西安地质调查中心, 自然资源部岩浆作用成矿与找矿重点实验室, 陕西 西安 710054; 2. 西北地质调查科技创新中心, 陕西 西安 710054)

摘要:花岗岩在氦气生成、储存和释放机理方面已经取得了诸多进展,但对其中 U、Th 生氦元素的赋存状态及相应的制约因素仍缺乏系统研究。渭河盆地南缘分布的巨量花岗质岩基被认为是盆地重要的氦源岩。笔者以渭河盆地南缘代表性的华山复式岩体为研究对象,对岩体样品进行了电子探针定性分析和副矿物组合定量分析。分析结果显示,样品中放射性 U、Th 元素主要赋存于锆石、榍石、磷灰石之中;燕山期侵入体中 Th 含量主要受控于锆石,U 含量由锆石和褐帘石联合制约;而印支期侵入体中 Th、U 含量主要受控于锆石和榍石及少量钍石。对放射性 U、Th 含量和部分熔融模拟联合研究表明,基底太华群不均一的成分及其部分熔融程度可能是样品中放射性 U、Th 含量的根本制约因素。

关键词:氦气;花岗岩;赋存状态;制约因素;渭河盆地

中图分类号:P618.13 **文献标志码:**A **文章编号:**1009-6248(2022)03-0241-16

The Occurrence State and Restraint Factors of Helium-produced Elements (U, Th) in the Granites from the Southern Margin of Weihe Basin: Evidences from Huashan Complex

ZHANG Qiao^{1,2}, ZHOU Junlin^{1,2,*}, LI Yuhong^{1,2}, CHEN Gaochao^{1,2}, WEI Jianshe^{1,2}, GUO Wang^{1,2}

(1. Key Laboratory for the Study of Focused Magmatism and Giant Ore Deposits, MNR, Xi'an Center of China Geological Survey, Xi'an 710054, Shaanxi, China; 2. Northwest China Center for Geoscience Innovation, Xi'an 710054, Shaanxi, China)

Abstract: Granites have been constantly concerned and much progress has been achieved on the production, storage and release of helium. However, there is lack of further study about the occurrence state, restraint factors and effective assessment of helium-produced elements (U, Th) in the granites when granites had been generated. A large number of granitic batholiths, located at the southern margin of Weihe basin, were considered to be the crucial source of helium. This study focused on the representative Huashan granitic batholith. The EMPA analyses and identifications for placer minerals showed that U and Th were mainly stored in zircons, titanites and apa-

收稿日期:2022-01-09;修回日期:2022-03-21;网络发表日期:2022-08-15;责任编辑:吕鹏瑞

基金项目:中国地质调查局项目“全国氦气资源潜力评价与战略选区调查(DD20221665)”、国家重点研发计划“富氦天然气成藏机制及氦资源分布预测技术——复杂地质介质中氦气运聚及富氦气藏封盖机制研究”(2021YFA0719003) 联合资助。

作者简介:张乔(1992-),男,硕士,工程师,主要从事氦源岩、花岗岩研究。E-mail:hotrock2012zq@163.com。

* 通讯作者:周俊林(1986-),男,硕士,工程师,长期从事氦气成藏研究。E-mail:zjlcug@163.com。

tites from Huashan granitic batholith. The Th content was mostly depended on the content of zircon and U content was controlled by zircon and allanite in the Yanshanian pluton, while Th and U content were dominantly related to zircon, titanite and minor thorite in the Indonian pluton. Meanwhile, the contents of U and Th in the samples mentioned above were determined and syn-thetical study suggested that the Taihua complex with various gneisses and the degree of parting melting were the dominant two factors for the divergence of U and Th in the Huashan granite.

Keywords: helium; granites; occurrence; restrict factor; Weihe basin

氦气是一种关系国家安全和高新技术发展的紧缺性战略资源,其广泛应用于航空航天、核工业、制冷、医疗、超导体、深海潜水、高精度焊接、半导体、科研和管道检漏等领域(Nuttall et al., 2012)。大气、地壳、地幔是氦气的3大来源(Ballentine et al., 2000)。其中,地壳来源的氦气是由岩石、矿物中的U、Th元素发生放射性衰变产生的。对全球已被工业利用的富氮天然气气藏的调研表明,气藏之下均发育有花岗岩基岩,证实花岗岩与氦气存在密切的联系(Ballentine et al., 2002; 李争等, 2009; Zhang et al., 2015; Danabalan et al., 2016)。

花岗岩作为重要的氮源岩,学者们对氦气与花岗岩相关的研究已经取得了诸多认识。在赋存位置方面,氦气被证实主要赋存在花岗岩中的矿物晶格中(Cherniak et al., 2009; 李玉宏等, 2018; Zhang et al., 2020),少量分布在矿物颗粒间(Hussain et al., 1997)、矿物的包裹体中(Zhu et al., 2013; 董敏等, 2018)。在释放机理方面,实验证明岩浆结晶以后产生的氦只有不到20%保存在花岗岩中,大部分(>80%)发生了运移或散失(张文, 2019)。在赋存状态方面, Basham等(1982)和 Martel等(1990)通过计算得出花岗岩 $\approx 90\%$ 的U及产生的氦储存在副矿物沥青铀矿之中, $76\% \sim 91\%$ 的Th及产生的氦储存在副矿物独居石之中,除了这2种矿物以外,还有磷钇矿、钍石、磷灰石、锆石(李玉宏等, 2018; 张文, 2019; Zhang et al., 2020)。尽管对花岗岩中生氮元素U、Th的赋存状态方面取得了一定的认识,但鉴于花岗岩成因及成分的复杂性,花岗岩作为氮源岩,对其形成时岩石中U、Th元素的赋存状态与相应的制约因素方面缺乏系统的认识。该研究将对于有效氮源岩的评价、氦气勘探等工作具有重要的支撑作用。

渭河盆地在构造位置上位于秦岭造山带与鄂尔多斯盆地之间(图1a)。近年来,对渭河盆地地

热井中伴生气的研究表明,伴生气中氦气丰度均高于工业利用标准(0.1%) (薛华锋等, 2004; 卢进才等, 2005; 刘建朝等, 2006; 韩伟等, 2014; 李玉宏等, 2018),表明盆地具有巨大的氦资源潜力。同时,对氦同位素研究表明,盆地地热井中伴生氦气主要为壳源成因(柴先平等, 2007; 李玉宏等, 2011),不同于中国东部富氮盆地中幔源氮的特征(戴春森等, 1995; 徐永昌等, 1996; 张晓宝等, 2003)。结合盆地地质背景及重磁资料,学者们认为渭河盆地内壳源氮来源于盆地南缘大面积分布的花岗质岩石的放射性衰变,即盆地南缘的花岗岩为重要氮源岩(刘建朝等, 2009; 李玉宏等, 2011, 2017; 张福礼等, 2012; 韩伟等, 2014)。此外,对渭河盆地南缘花岗岩中石英脉的流体包裹体研究揭示了盆地内2期氦气成藏,主要成藏期为中新世—上新世(董敏等, 2017)。因此,这些花岗岩为探讨岩石中生氮元素(U、Th)的赋存状态及制约因素等问题提供了良好的物质基础。

部分学者对盆地南缘部分花岗岩和少量相对高U、Th($15 \sim 55 \times 10^{-6}$ 、 $29 \sim 42 \times 10^{-6}$)的岩体样品进行了U、Th含量及赋存状态的初步研究(Zhang et al., 2020)。然而,这些花岗岩大多为复式岩体,U、Th含量变化较大(李玉宏等, 2018),对大多数U、Th含量相对低($< 10 \times 10^{-6}$ 、 $< 30 \times 10^{-6}$)的花岗岩缺乏系统的U、Th含量、赋存状态及相应的制约因素的对比研究。

笔者选取代表性的华山复式岩体作为研究对象,运用副矿物分析及电子探针方法,结合放射性研究,对其进行岩性及其中富U、Th矿物特征进行精确分析,查明岩石中U、Th含量、赋存状态,探讨这些岩石中U、Th含量的制约因素,并结合盆地南缘花岗岩已有资料,分析U、Th含量时空变化规律,为盆地内有效氮源岩评价标准的建立、盆地氦气远景资源量的预测提供启示。

1 岩体地质特征

区域调查结果显示,沿渭河盆地南缘自西向东分布有宝鸡岩体、太白岩体、翠华山岩体、牧护关岩体、蓝田岩体、老牛山岩体和华山岩体,均为复式岩体,呈岩基状产出(图 1a)。已发表的研究资料表明,宝鸡岩体、翠华山岩体形成于印支期,蓝田岩体和牧护关岩体则形成于燕山期,太白岩体、老牛山岩体和华山岩体则是由燕山期和印支期 2 期侵入体构成的复式岩体(张宗清等,2006;郭波等,2009;齐秋菊等,2012;刘锐等,2014;张兴康等,2015;Xue et al.,2018)。

华山复式岩体位于渭河盆地南缘最东部,呈岩基状侵入到太华群基底之中,呈东西向展布,面积为 130 km²(张国伟等,2001)。前人研究表明,华山复式岩体可以划分为 3 个侵入体:①大夫峪岩体岩性以细中粒黑云母二长花岗岩为主。②翁峪岩体岩性以细粒角闪黑云二长花岗岩、叶理化中细粒角闪二长花岗岩为主。③华山峪岩体岩性以中细粒含斑黑云母二长花岗岩、中粗粒含斑黑云母二长花岗岩为主(张兴康等,2015)。也有学者将其分为 3 个相带,以二长花岗岩和花岗闪长岩为主的内部相、以细粒花岗闪长岩和细粒含斑二长花岗岩为主的边缘相和以二长花岗岩为主的顶部混染相带(郭波等,2016)。

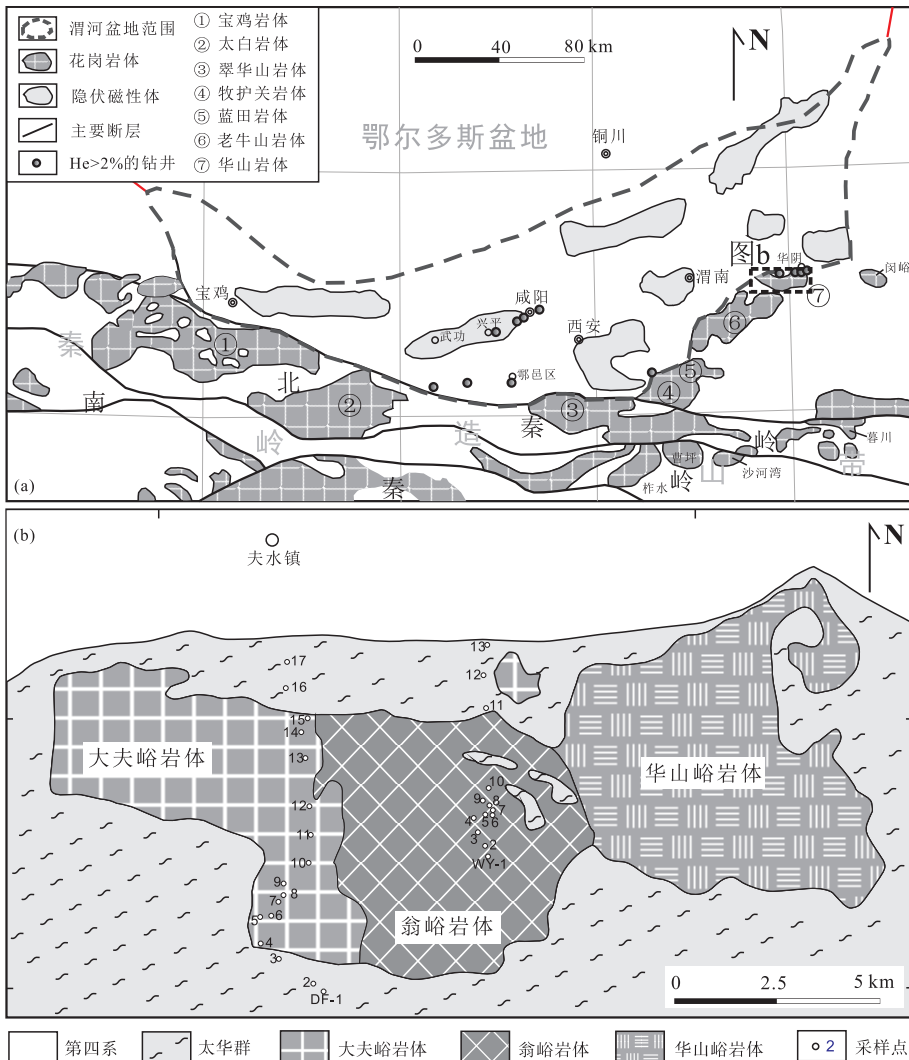


图 1 (a)渭河盆地南缘花岗岩分布与富氦井分布图(底图据李玉宏等,2018)和(b)华山复式岩体地质简图(底图据张兴康等,2015)

Fig. 1 (a) Distribution of granites and helium-enriched wells and (b) Geological sketch of Huashan composite pluton

年代学研究表明,华山岩体由印支期(205 Ma)和燕山期2期(132~143 Ma)侵入体组成(Hu et al., 2012;张兴康等,2015;郭波等,2016)。因此,华山岩体是一个多期侵入、多相带的复式岩体。

笔者对华山复式岩体中西侧的大夫峪岩体、翁峪岩体进行了详细的野外地质调查。通过野外观察和室内研究,可以将华山岩体西侧分为印支期(翁峪)和燕山期(大夫峪)2期侵入体。

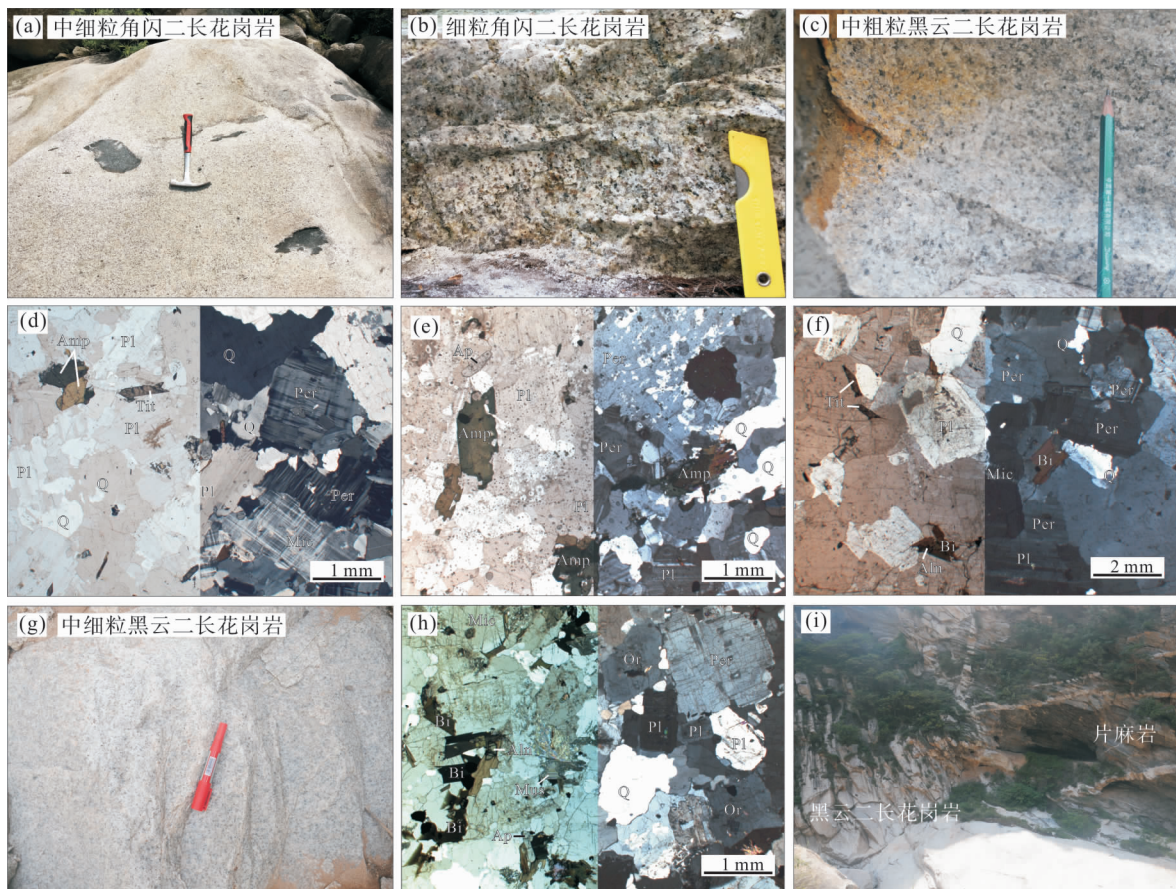
翁峪岩体:岩性主要为灰白色似斑状角闪二长花岗岩,分为南部中细粒和北部细粒2个岩相带,侵位于208~207 Ma(未发表数据);主要矿物组合为石英、微斜长石、条纹长石、斜长石、角闪石,及少量楣石、磷灰石(图2a、图2b、图2d、图2e)。

大夫峪岩体:岩性由南部的灰白色中粒-中粗粒黑云石英二长岩-二长花岗岩和北部的灰白色细粒-中细粒黑云二长花岗岩组成,分别形成于128 Ma、

124 Ma(未发表数据);主要矿物组成为石英、微斜长石、条纹长石、斜长石及少量黑云母;还包括楣帘石、楣石、磷灰石等副矿物(图2c、图2f、图2g、图2h)。前人在大夫峪路线上,观察到南部的中粗粒黑云二长花岗岩侵入到北部的中细粒二长花岗岩之中(图2i)(张兴康等,2015),表明细粒黑云二长花岗岩形成略早于中粗粒黑云二长花岗岩。除此之外,在翁峪岩体中普遍发育暗色包体(图2a)。

2 采样及分析方法

本次研究共采集华山复式岩体2期侵入体不同岩相代表性样品共22件,具体采样位置见图1b。分别对这些样品进行了电子探针、富Th、U副矿物及放射性分析。同时,在华山和老牛山复式岩体外围也采集了太华群基底片麻岩样品12件,并进行了



a~b、d~e. 印支期;c、f、g~h. 燕山期;i. 岩体与太华群片麻岩侵入关系;b、d、h. 正交偏光/单偏光 $\times 25$;f. 正交偏光/单偏光 $\times 12.5$; Q. 石英;Pl. 斜长石;Per. 条纹长石;Mic. 微斜长石;Or. 正长石;Amp. 角闪石;Bi. 黑云母;Mus. 白云母;Tit. 楣石;Ap. 磷灰石;Aln. 楣帘石

图2 华山复式岩体不同期次岩相图

Fig. 2 Lithologies of multi-stage plutons in Huashan complex

放射性分析,以便对比研究。

岩石样品在河北区域地质调查院磨制成探针片,随机进行背散色图像观察和能谱分析,确定富U、Th矿物组合,以便电子探针分析。电子探针(EMPA)分析在中国地质调查局西安地质调查中心自然资源部岩浆作用成矿与找矿重点实验室进行。电子探针仪器型号为JEOL JXA-8230,成分定量分析所选用的测试电压和电流为15 Kv、10 nA,束斑为1 μm ,标样为钛铁矿(Ti K α)、锆石(Zr L α)、晶质铀矿(U M α)、方钍石(Th M α)、磷灰石(Ca K α)、铬铅矿(Pb M α)、铌酸锂(Nb L α)、石英(Si K α)、硬玉(Al K α)。元素峰值检测时间为10 s,上下背景各为5 s,校正方法为ZAF。

富Th、U副矿物分离和挑选在河北省区域地质调查院进行,分析前将2 kg左右样品破碎至30~100目,经双氧水和稀盐酸处理,再经重液粗选、精淘分离出常出现的富Th、U副矿物(独居石、磷灰石、榍石、锆石、钍石、晶质铀矿、褐帘石等),结合双目镜鉴定分离出这些副矿物,采用高精度天平完成计量称重。假设上述副矿物总重量对应100%,将每种副矿物重新换算,取整数。

放射性分析在核工业二〇三研究所进行,样品经硝酸、氢氟酸、高氯酸分解和加热制成溶液,使用以氦分子激光器为光源的激光铀分析仪,测定溶液中荧光强度,计算得出样品中U含量。样品经分解、过滤、沉淀和萃取等一系列处理过程,最后在盐酸中使用分光光度法测定Th含量。U、Th的测定方法及详细步骤分别参考国家核行业标准EJ/T 550—2000、EJ/T 814—94。

3 U、Th元素的赋存状态及其含量

3.1 U、Th元素的赋存状态

背散色图像和能谱分析显示,在华山复式岩体中,放射性元素U、Th主要分布在岩石的副矿物锆石、榍石、磷灰石、褐帘石中,其次为钍石、Nb-Ta-U矿物,这些副矿物多呈半自形-自形产出,主要存在于岩石主要矿物(石英、长石、黑云母)中及颗粒间,且与磁铁矿伴生(图3,19WY-10),部分副矿物之间也可见相互包裹关系,表明这些富U、Th副矿物主要形成于岩浆结晶稍早时期(图3)。通过定性对比华山复式岩体中印支期和燕山期侵入体的富

U、Th矿物组合,发现锆石、榍石、磷灰石在复式岩体2期侵入体中广泛分布;不同的是,印支期侵入体以缺失褐帘石、出现钍石为特征,而燕山期侵入体则以大量的褐帘石及少量铀独立矿物(Nb-Ta-U矿物)产出为特征(图3)。富U、Th矿物组合特征明显不同于华山岩体南侧的华阳川铀矿及华南花岗岩型铀矿中以晶质铀矿为主的矿物组合特征。以华阳川铀矿为例,在主要富矿岩石脉状碳酸岩中,铀主要以晶质铀矿和铌钽铀矿形式伴生产出,主要赋存在烧绿石中(高龙刚等,2019;Zheng et al.,2020)。

笔者对华山复式岩体中富U、Th副矿物进行了电子探针分析。其中,燕山期岩石样品中ThO₂含量最高的是一个Nb-Ta-U矿物,达到1.1%,其次是褐帘石和锆石,ThO₂平均含量分别为0.66%、0.12%,榍石和磷灰石中ThO₂含量相对低,平均含量均为0.04%;在燕山期岩石样品中UO₂含量,除了在一个Nb-Ta-U矿物中达到24.3%以外,在其余副矿物中均相对低(锆石0.3%,褐帘石、榍石、磷灰石0.03%~0.04%)。而在印支期岩石样品中ThO₂含量最高的是钍石,平均高达68.8%;其次为少量褐帘石,ThO₂平均含量为1.32%;ThO₂在锆石、磷灰石、榍石中平均含量为0.29%、0.02%、0.05%,在一个铌钽铀矿中的含量为0.1%;UO₂含量较高的副矿物为铌钽铀矿(29.9%)、钍石(平均12.2%),在锆石、磷灰石、榍石、褐帘石中的平均含量依次为0.57%、0.03%、0.05%、0.06%。

副矿物组合特征常用于沉积岩物源分析。在定性归纳华山复式岩体不同期次、岩性带中U、Th赋存矿物组合特征的基础上,对岩石中这些副矿物组合进行了定量分析(表1)。印支期岩体各期侵入体中富U、Th矿物组成为榍石(58%~92%)、磷灰石(3%~21%)、锆石(4%~22%)、褐帘石(0%~3%);而燕山期岩体各期次侵入体富U、Th矿物组成为榍石(41%~65%)、磷灰石(5%~11%)、锆石(2%~4%)、褐帘石(28%~46%)(图4)。通过对比发现,在富U、Th副矿物组成上,印支期岩体明显富集榍石和锆石、缺少褐帘石,而燕山期岩体更富集褐帘石,这与岩相学观察及电子探针测试结果一致。结合前述燕山期和印支期岩体的岩相分带,得出同期岩体不同相带之间富U、Th矿物组合基本无差异。值得注意的是,背散色图像下见到的铀钍独立矿物(钍石、Nb-Ta-U矿物)(图3),这些矿物

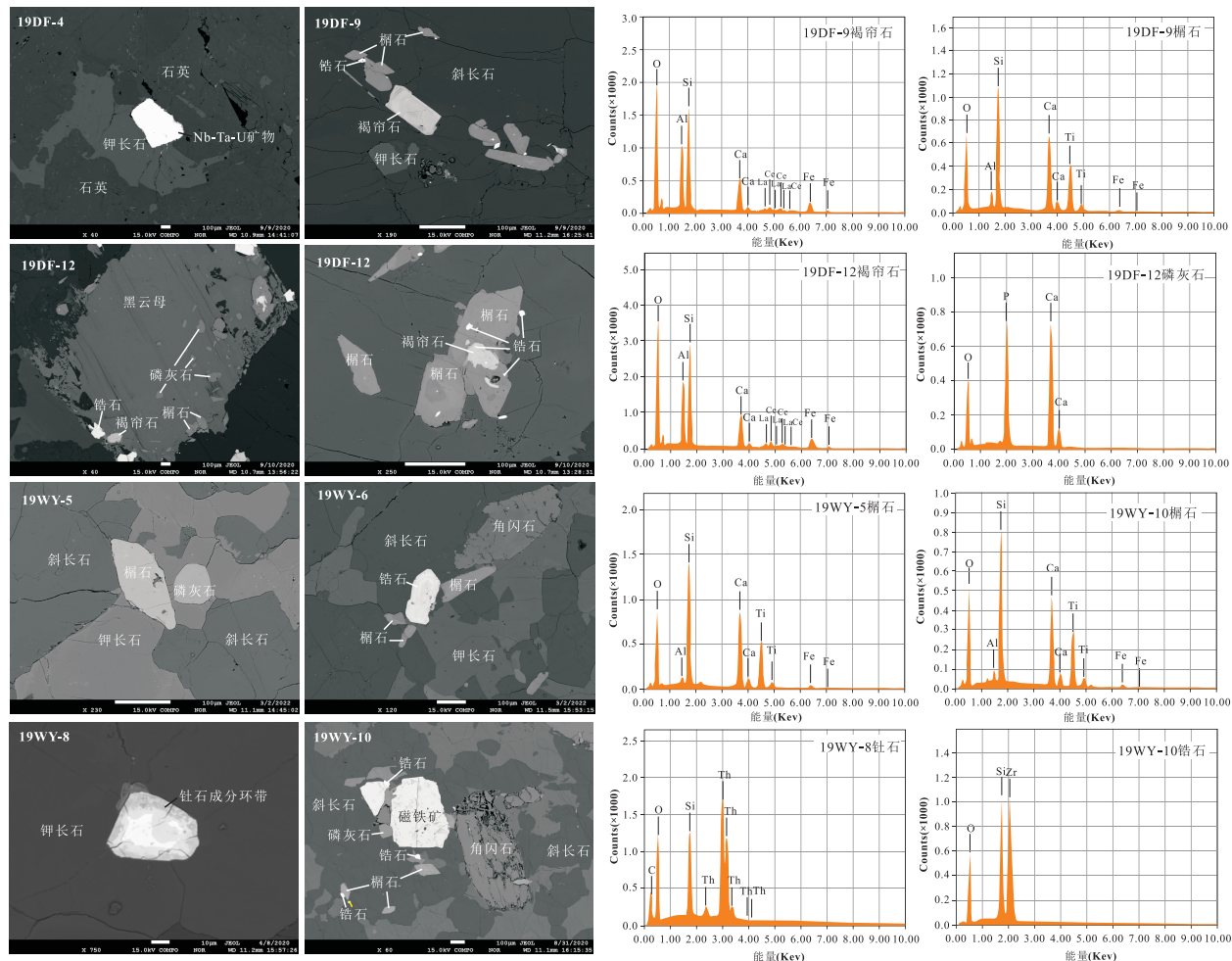


图3 燕山期及印支期岩石样品 SEM 背散色照片及矿物能谱分析图

Fig. 3 BSE images and spectrum analysis of SEM from samples in the Yanshanian and Indonian pluton

在副矿物定量分析中并未筛选出来,推测是由于这些铀钍独立矿物粒度过小(图3中的钍石粒度约为 $40\ \mu\text{m}$),远低于矿物挑选的最大目数($0.15\ \text{mm}$),或含量低(图3中的一颗Nb-Ta-U矿物、铌钽铀矿)未被人工挑选出来。

3.2 放射性元素U、Th含量

借助激光荧光法和分光光度法,对华山复式岩体及基底太华群样品中的放射性U、Th元素丰度进行了精确地测定(表2)。在华山复式岩体中,燕山期岩体的U元素含量为 $1.98 \times 10^{-6} \sim 10.2 \times 10^{-6}$,除2个样品(19DF-11、19DF-4)U含量分别为 8.87×10^{-6} 、 10.2×10^{-6} 以外,大部分样品中U含量集中为 $1.9 \times 10^{-6} \sim 5.72 \times 10^{-6}$,平均值为 3.0×10^{-6} ,稍高于平均上地壳中U含量(2.7×10^{-6})(Rudnick et al. 2003);燕山期岩体中Th丰

度为 $9.18 \times 10^{-6} \sim 14.6 \times 10^{-6}$,平均值为 11.1×10^{-6} ,稍高于平均上地壳的Th含量(10.5×10^{-6})(Rudnick et al. 2003)。而印支期岩体的U含量为 $1.77 \times 10^{-6} \sim 12.8 \times 10^{-6}$,除一个样品19WY-1的U含量(12.8×10^{-6})相对高以外,绝大多数样品U含量为 $1.77 \times 10^{-6} \sim 4.22 \times 10^{-6}$,平均值为 2.83×10^{-6} ;印支期岩体中Th含量则变化为 $10.46 \times 10^{-6} \sim 33.55 \times 10^{-6}$,平均值为 19.2×10^{-6} 。相比之下,燕山期和印支期岩体具有近似的U含量,而印支期岩体比燕山期岩体明显富集Th。而在岩体外围的太华群基底片岩和片麻岩中,U含量为 $0.26 \times 10^{-6} \sim 3.98 \times 10^{-6}$,Th含量为 $2.27 \times 10^{-6} \sim 18.6 \times 10^{-6}$,Th含量变化很大,但总体U、Th含量均低于华山复式岩体的对应值。

表 1 华山复式岩体富 U、Th 副矿物分析结果表

Tab. 1 Analyzed results for U- and Th- enriched accessory minerals in Huashan complex

岩体-期次	样品 编号	岩性	样品总重量 (mg)	矿物重量(mg)				矿物重量相对比例(wt%)				副矿物 组合占 比(wt%)	
				锆石	磷灰石	楣石	褐帘石	锆石	磷灰石	楣石	褐帘石		
大夫峪 岩体- 燕山期	19DF-4		1 845 655.3	40.170	0.618	8.975	0.000	81	1	18	0	0.002 7	
	19DF-5		1 643 584.8	2.743	8.229	150.831	84.197	1	3	61	34	0.015 0	
	19DF-6	中粒-中粗 粒石英二 长岩-二长 花岗岩	2 537 487.1	13.396	62.197	346.591	167.512	2	11	59	28	0.023 2	
	19DF-7		1 885 533.4	0.232	50.979	866.401	146.640	0	5	81	14	0.056 4	
	19DF-8		1 789 153.8	12.565	20.104	417.213	156.400	2	3	69	26	0.033 9	
	19DF-9		2 390 991.5	45.353	129.025	551.932	609.600	3	10	41	46	0.055 9	
	19DF-10		1 991 866.2	10.230	16.368	133.911	121.068	4	6	48	43	0.014 1	
	19DF-11		2 339 144.8	10.590	26.588	256.098	185.822	2	6	53	39	0.020 5	
	19DF-12	细粒-中细粒	2 130 176.9	52.288	71.896	936.834	376.845	4	5	65	26	0.067 5	
	19DF-13	黑云二长	2 286 838.6	27.188	65.057	737.589	305.660	2	6	65	27	0.049 7	
	19DF-14	花岗岩	2 232 079.8	46.487	108.203	590.557	580.566	4	8	45	44	0.059 4	
	19DF-15		2 437 678.6	6.550	15.720	183.415	139.224	2	5	53	40	0.014 1	
	翁峪岩体- 印支期	19WY-1		2 848 018.9	98.615	62.755	277.234	12.849	22	14	61	3	0.015 9
		19WY-2	中细粒	2 781 330	146.578	134.640	1 259.048	0.000	10	9	82	0	0.055 4
		19WY-3	角闪二长	2 194 658	62.320	79.458	581.247	0.000	9	11	80	0	0.032 9
19WY-4		花岗岩	2 584 132.2	152.193	153.762	663.414	0.000	16	16	68	0	0.037 5	
19WY-5			2 843 755	116.700	116.700	326.815	1.868	21	21	58	0	0.019 8	
19WY-6			2 836 030.8	106.120	30.320	962.100	21.380	9	3	86	2	0.039 5	
19WY-7			3 025 308.6	217.242	176.877	2 553.155	0.000	7	6	87	0	0.097 4	
19WY-8		细粒角闪 二长花岗岩	2 834 173.5	177.126	98.560	852.764	0.000	16	9	76	0	0.039 8	
19WY-9			2 186 757	177.849	100.415	1 171.870	0.000	12	7	81	0	0.066 3	
19WY-10			2 786 839.5	19.605	19.605	437.212	0.000	4	4	92	0	0.017 1	

4 华山复式岩体中 U、Th 含量的制约因素

研究表明,从基性岩—中性岩—酸性岩,岩体中的 U、Th 含量具有升高的趋势(Belousova et al., 2002)。由于 U、Th 为不相容元素,它们在岩浆演化过程中倾向于富集在熔体之中,因而作为花岗岩主要源区的大陆地壳,其 U、Th 含量也存在差异。其中,上地壳的 U、Th 含量分别为 2.7×10^{-6} 、 10.5×10^{-6} ,中地壳 U、Th 含量为 1.3×10^{-6} 、 6.5×10^{-6} (Rudnick et al., 2003),下地壳 U、Th 含量为

0.86×10^{-6} 、 5.23×10^{-6} (Gao et al., 1998)。花岗岩中副矿物作为 U、Th 元素的载体,其形成及含量差异取决于岩浆成分及岩石冷凝时的物理化学条件。同时,在 U、Th 元素进入矿物时分配系数也受岩浆成分、物理化学条件(温度、压力、氧逸度等)的影响(Nash et al., 1985; Green, 1994; Luo et al., 2009)。因此,岩浆源区和岩浆演化制约了花岗岩中 U、Th 含量。此外,由于 U 存在 2 种价态,其具有很强的流体活动性,在后期热液蚀变过程中 U 也会发生迁移(Jiang, 2000)。

4.1 副矿物比重及成分因素

华山复式岩体呈岩基产出,岩相带发育完全,虽

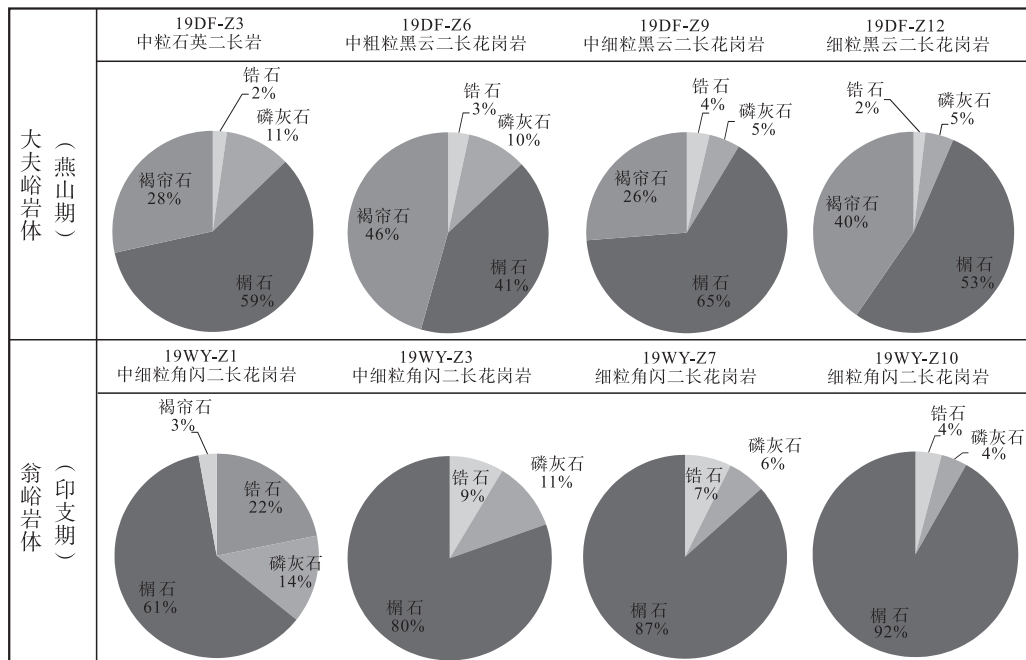


图4 华山复式岩体不同期次代表性的副矿物比例分布饼图(未挑选出钍钷独立矿物)

Fig. 4 Circle charts of representative accessory minerals from two-stage plutons in Huashan composite pluton with none of Th - U independent minerals in handpick

被细晶岩、伟晶岩脉穿切,总体成分并未受后期热液的影响,排除热液蚀变对岩体中U、Th含量的影响。华山复式岩体中富U、Th矿物或矿物组合相对重量百分比与对应样品中放射性元素U、Th含量并无正相关关系(表1),这表明放射性元素含量不受岩石中这些矿物的重量或相对重量百分比制约。通过电子探针数据获得岩石中 ThO_2 、 UO_2 平均含量,结合前述富U、Th副矿物重量,笔者计算出华山复式岩体燕山期和印支期侵入体中副矿物的平均 ThO_2 、 UO_2 含量。由于样品中磷灰石含量低,且磷灰石中 ThO_2 、 UO_2 含量相对低,故其对全岩U、Th含量贡献可以忽略。燕山期侵入体中全岩U含量与锆石和褐帘石的 UO_2 的平均含量呈现明显的正相关关系(图5);全岩Th含量则与锆石的 UO_2 平均含量呈正相关关系,其他并无相关关系。印支期侵入体中全岩Th含量与锆石和榍石中 ThO_2 平均含量呈正比(图5)。因此,笔者认为燕山期侵入体中U含量主要受锆石和褐帘石联合制约,Th含量主要受制于锆石;而在印支期侵入体中Th含量主要受锆石和榍石联合制约,U含量基本保持不变。值得注意的是,在印支期侵入体样品中发现了不少钍钷颗粒,尽管副矿物定量分析中未挑选出

钍钷,其重量不定,但其作为钍钷独立矿物具有极高的U、Th含量(ThO_2 平均为68.8%、 UO_2 为12.2%),明显高于其他U、Th副矿物的对应值。所以,笔者推测钍钷也可能是印支期侵入体中Th、U含量的重要制约因子。前人研究表明,华山复式岩体中燕山期侵入体是基底太华群部分熔融形成的,而印支期侵入体的形成则还需要少量幔源岩浆加入(Hu et al., 2012)。这与野外观察到印支期侵入体中的大量暗色包体一致。因而,幔源岩浆带来的高热量,即温度可能是导致印支期在侵入体中副矿物组合及其U、Th含量不同于燕山期侵入体的主要影响因素。

4.2 源区成分及岩浆演化因素

华山复式岩体中U、Th含量除了直接受控于副矿物以外,制约它的根本因素可能包括源区成分及部分熔融程度、结晶分异、壳幔混合等过程。在华山复式岩体中,其岩石样品中 SiO_2 含量(未发表数据)与Th、U含量亦无明显相关关系(图6a、图6b),表明岩浆结晶分异过程对同一期次侵入体中Th、U元素无明显影响。已有的研究表明,华山复式岩体中燕山期大夫峪岩体和翁峪岩体源区主要由古老基底下地壳(太华群)部分熔融形成,并有幔源岩浆参

表2 华山复式岩体样品的放射性 U、Th 含量表
Tab. 2 U and Th contents in samples from Huashan complex

期次	样品编号	岩性	U(10^{-6})	Th(10^{-6})	
大夫峪岩体(燕山期)	19DF-4	中粒黑云石英二长岩	10.2	14.6	
	19DF-5	中粒黑云二长花岗岩	1.98	11.18	
	19DF-6	中粗粒黑云二长花岗岩	3.23	9.67	
	19DF-7	中粒黑云二长花岗岩	1.9	9.88	
	19DF-8	中粗粒黑云二长花岗岩	2.14	11.09	
	19DF-9	中粗粒黑云二长花岗岩	5.72	11.51	
	19DF-10	中粒黑云二长花岗岩	3.18	9.18	
	19DF-11	中细粒黑云二长花岗岩	8.87	9.23	
	19DF-12	中细粒黑云二长花岗岩	3.69	10.67	
	19DF-13	细粒-中细黑云二长花岗岩	3.57	13.08	
	19DF-14	细粒-中细黑云二长花岗岩	2.07	10.23	
	19DF-15	细粒-中细黑云二长花岗岩	2.58	12.44	
	翁峪岩体(印支期)	19WY-1	中细粒黑云角闪二长花岗岩	12.8	17.57
		19WY-2	中细粒角闪二长花岗岩	2.25	16.41
		19WY-3	中细粒角闪二长花岗岩	4.22	16.84
19WY-4		中细粒角闪二长花岗岩	1.81	14.66	
19WY-5		中细粒角闪二长花岗岩	1.77	10.79	
19WY-6		细粒角闪二长花岗岩	2.84	33.55	
19WY-7		细粒角闪二长花岗岩	2.48	12.2	
19WY-8		细粒角闪二长花岗岩	3.3	29.05	
19WY-9		细粒角闪二长花岗岩	4.22	30.73	
19WY-10		细粒角闪二长花岗岩	2.58	10.46	
太华群	19DF-1	绿帘黑云斜长片麻岩	0.64	4.76	
	19DF-2	绿帘黑云斜长片麻岩	0.44	3.70	
	19DF-3	绿帘黑云斜长片麻岩	0.79	8.44	
	19DF-16	绿泥黑云花岗质片麻岩	0.60	2.90	
	19DF-17	黑云角闪斜长片麻岩	1.29	5.23	
	19WY-11	黑云斜长角闪片岩	0.30	2.78	
	19WY-12	黑云斜长片麻岩	0.26	3.34	
	19WY-13	绿泥黑云花岗质片麻岩	0.40	2.27	
	20TH-1	黑云角闪花岗质片麻岩	1.98	13.5	
	20TH-2	黑云角闪花岗质片麻岩	2.79	15.9	
	20TH-3	黑云角闪斜长片麻岩	3.98	18.6	
	20TH-4	黑云角闪斜长片麻岩	1.98	17.8	

与(Hu et al., 2012; 张兴康等, 2015)。然而, 华山复式岩体的 U、Th 含量明显高于基底太华群的 U、Th 含量, 那么具有更低的 U、Th 含量的幔源岩浆不可能作为华山复式岩体 U、Th 含量的制约因素

(图 6c)。实验模拟研究表明, 即使源岩的 U 含量很低, 其低程度部分熔融($<5\%$)也可以使熔体的 U 以数十倍富集(Robb, 2005; Kukkonen et al., 2009)。

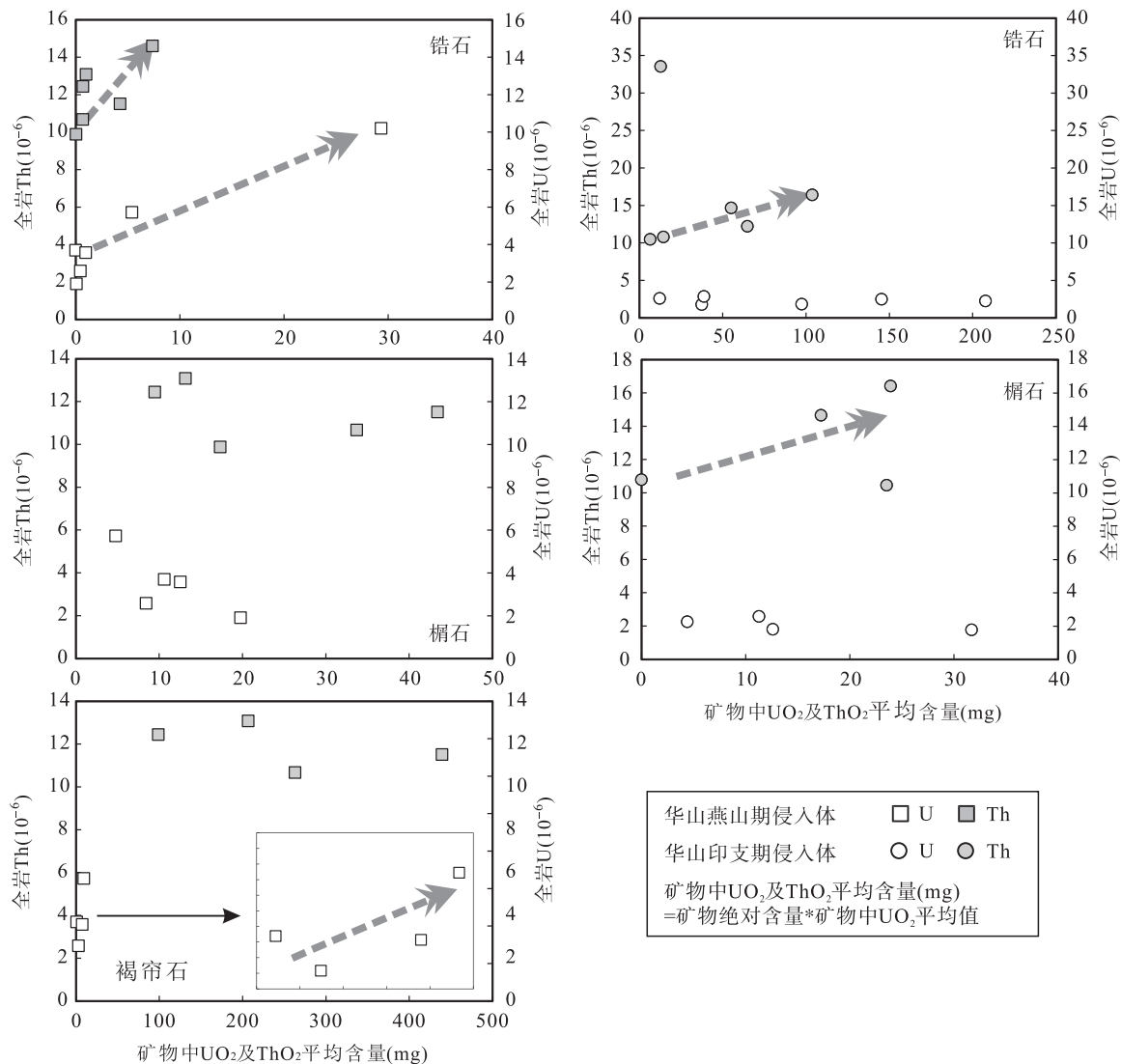
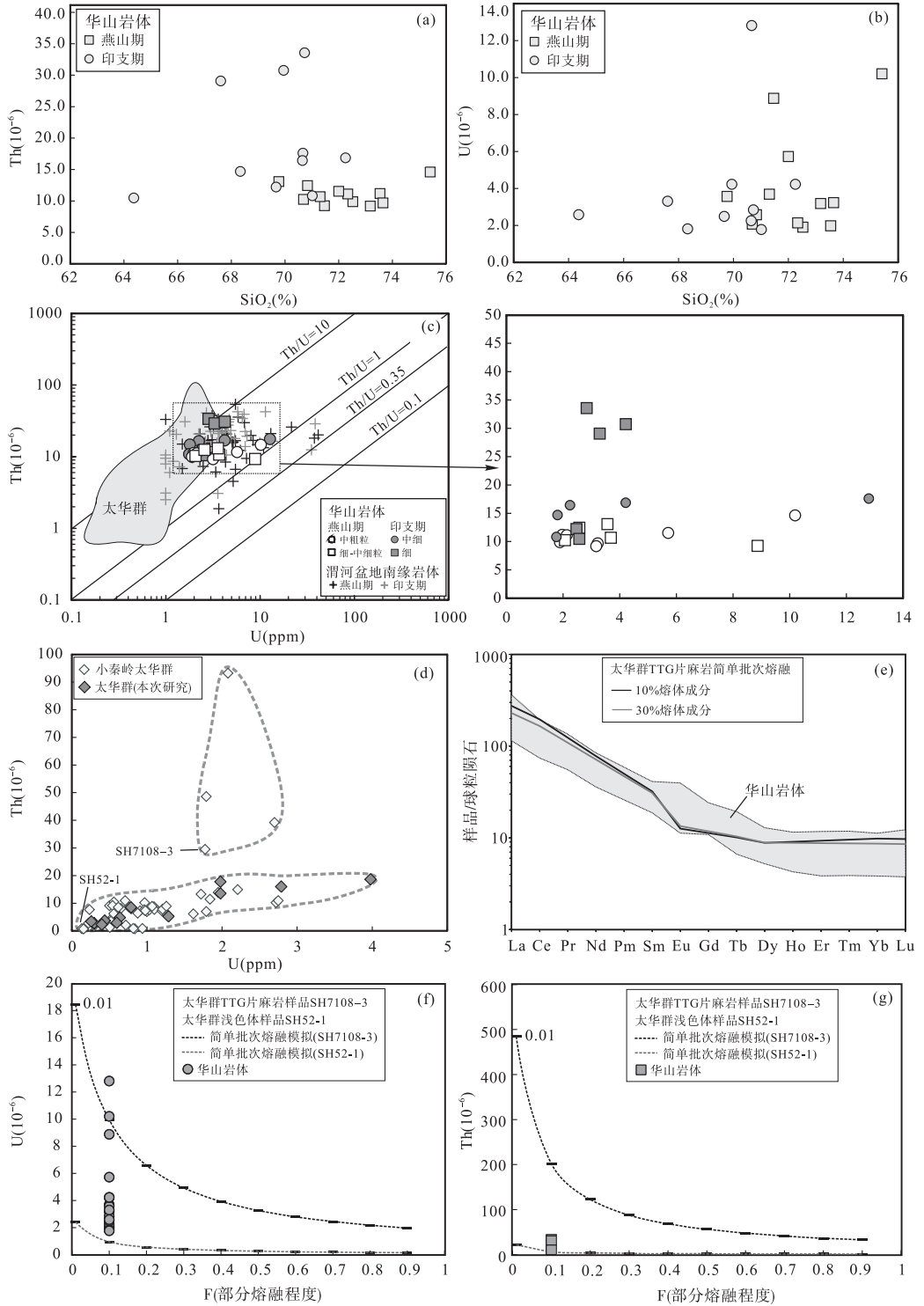


图5 华山燕山期和印支期样品全岩 U、Th 含量与副矿物(锆石、榍石、褐帘石)中 UO_2 、 ThO_2 平均含量的双变量图解

Fig. 5 Diagrams for whole-rock U and Th contents vs average UO_2 , ThO_2 contents in zircon, titanite and allanite from samples with Yanshanian and Indonian in Huashan complex

基底太华群是华山复式岩体的主要源区,其岩性主要包括 TTG 片麻岩、混合岩、花岗质片麻岩及表壳岩(第五春荣等,2018)。在本次太华群不同岩石样品放射性结果的基础上,结合小秦岭地区太华群深成侵入体不同岩性、不同样品全岩 Th、U 数据,得出太华群中 Th、U 含量总体偏低,主要集中于 Th($0.66 \times 10^{-6} \sim 17.8 \times 10^{-6}$)、U($0.13 \times 10^{-6} \sim 2.79 \times 10^{-6}$)范围内,还有少量花岗质片麻岩极富 Th($29.46 \times 10^{-6} \sim 93.2 \times 10^{-6}$)(图 6d)。首先,笔者选取了小秦岭地区太华群主要成分 TTG 片麻岩,以其平均成分作为端元,矿物组成为 40%斜长石+20%角闪石+15%黑云母+15%石英+10%钾长石(Jia et al.,2019;Wang

et al.,2021)。简单的批次熔融模拟结果显示(图 6e),其平均成分经 10%部分熔融就可以基本形成华山岩体的 REE 成分(郭波等,2009 及未发表地化数据)。其次,笔者选取了小秦岭太华群中 Th、U 含量的 2 个端元值进行微量元素 Th、U 熔融模拟(图 6d),即片麻岩样品(SH7103-8)、浅色体样品(SH52-1),它们的年龄在 2.5 Ga 左右,2 个样品的全岩 Th、U 含量分别为 U: 29.46×10^{-6} 、 1.78×10^{-6} ,Th: 0.79×10^{-6} 、 0.13×10^{-6} (Jia et al.,2019;Wang et al.,2021)。模拟结果显示,以上述具有不同 Th、U 含量的太华群样品为源区,其经历 10%部分熔融也可以形成与华山岩体中放射性 Th、U 元素丰度类似的熔体



Th、U 在斜长石、角闪石、黑云母、石英和钾长石中的分配系数参考 Nash et al., 1985 和 Luhr et al., 1984;

批次熔融模拟的公式参考 Shaw et al., 1984

图 6 (a)SiO₂ - Th、(b)SiO₂ - U、(c)Th - U 双变量图解、(d)基底太华群 Th 和 U 含量、(e)小秦岭太华群 TTG 片麻岩简单批次熔融模拟、(f)、(g)Th、U 元素的简单批次熔融模拟图

Fig. 6 (a)SiO₂ vs Th, (b)SiO₂ vs U, (c)Th vs U Diagrams; (d)Th and U contents in the Taihua complex; (e)Simple batch melting Modelling of TTG gneisses in Taihua complex, (f, g)Th and U

成分(图 6f、图 6g)。此外,熔体中 Th、U 含量还与源区 Th、U 初始含量具有正相关关系,即源区 (SH7103-8) Th、U 含量越高,不论熔融程度如何变化,熔体中 Th、U 含量都相对高(图 6f、图 6g)。因此,笔者认为太华群的成分及部分熔融程度是控制华山岩体 U、Th 含量的根本因素。

5 盆地南缘花岗岩中 U、Th 分布规律及启示

渭河盆地南缘分布有巨量花岗岩基,自西向东为宝鸡岩体、太白岩体、翠华山岩体、牧护关岩体、蓝田岩体、老牛山岩体、华山岩体,均为复式岩体。近些年,中国地质调查局西安地质调查中心氦气团队对渭河盆地南缘花岗岩开展了大量盆地南缘花岗岩放射性研究(韩伟等,2014;李玉宏等,2018)。放射性资料的综合研究显示,从这些岩体横向延伸方向来看(图 7),各岩体 Th 含量普遍高于平均上地壳丰

度(10.5×10^{-6} , Rudnick et al., 2003),且 Th 含量变化大,印支期侵入体 Th 含量明显高于燕山期侵入体,以宝鸡岩体和老牛山岩体为代表;除了翠华山岩体和蓝田岩体个别样品 U 含量达到 $20 \times 10^{-6} \sim 40 \times 10^{-6}$ 以外,其余样品 U 含量($< 7 \times 10^{-6}$, 均值 3.7×10^{-6})略高于平均上地壳(2.7×10^{-6} , Rudnick et al., 2003)。从已调查过的岩体纵向剖面上看(图 7),能得出与横向上相似的认识。综上所述,从区域上来看,渭河盆地南缘花岗岩中放射性元素含量变化不一,Th 含量变化大于 U 含量,但高于平均上地壳对应值。

根据 Brown(2010)提出的 U、Th 元素生氦公式,计算得出渭河盆地南缘花岗岩体的单位质量生氦量为 $4 \times 10^{-5} \sim 1 \times 10^{-3} \text{ cm}^3/\text{g} \cdot \text{a}$,普遍高于世界平均花岗岩的生氦量,个别达到了有机质页岩理论值(图 8)。渭河盆地南缘这些花岗岩基体积大,按照氦气弱源成藏理论,具有巨大的生氦潜力。根据放射性衰变,不同学者对渭河盆地内氦气资源量作

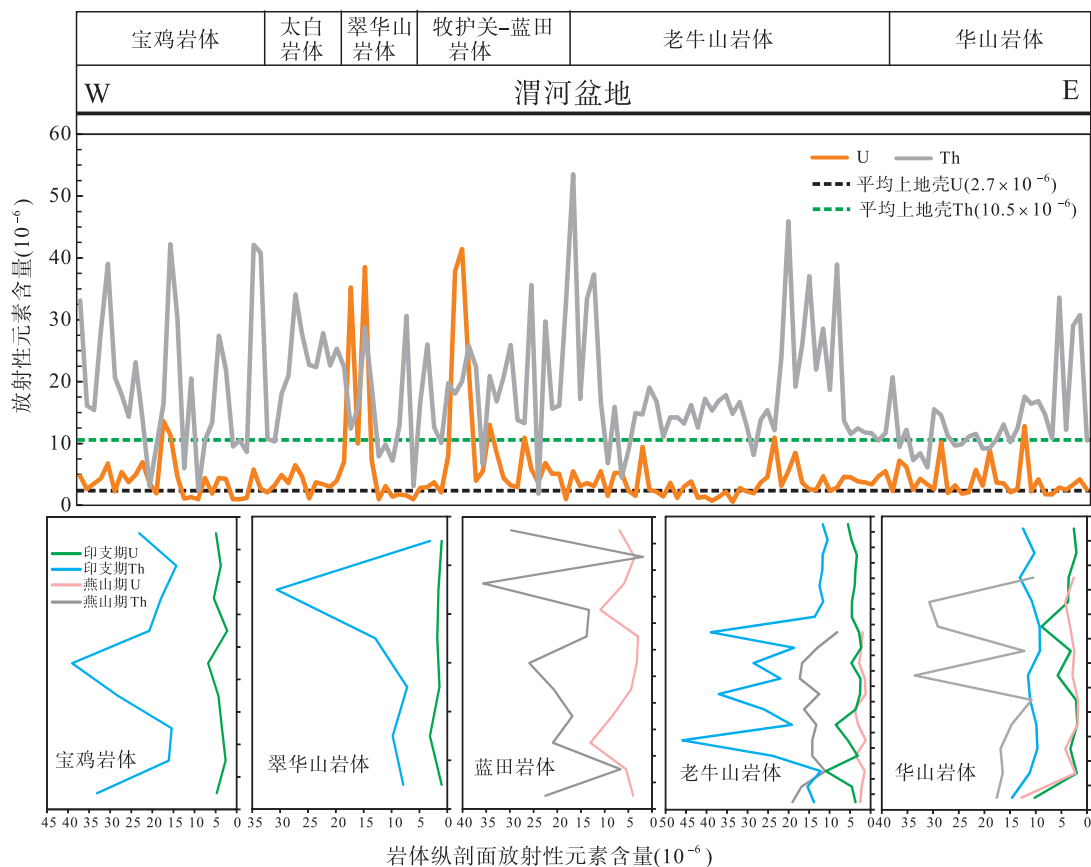


图 7 渭河盆地南缘花岗岩体横向与纵向放射性元素丰度变化图

Fig. 7 The horizontal, vertical Th and U variation of the granites from the southern margin of Weihe basin

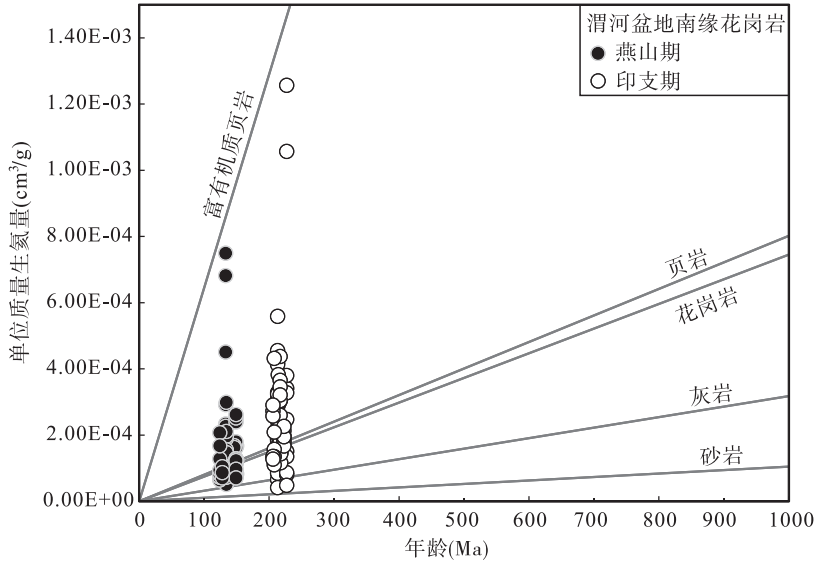


图8 渭河盆地南缘花岗岩单位质量生氦量图(据 Brown,2010 修改)

Fig. 8 He generation per unit mass of granites in the southern margin of Weihe basin

出了估算,但是差异巨大,从几亿 m^3 到上千亿 m^3 不等(张福礼等,2012;张雪,2015;张文等,2018;黄建军等,2021)。一方面,在计算花岗岩理论氦气资源量和释放资源量时,花岗岩体的体积是首先要解决的一个难点;另一方面,从渭河盆地油气井和地热井中氦气含量分布来看,盆地不同部位氦含量显示有很大差异,因而关于排氦时间、氦气运聚系数等参数亟需开展进一步研究。此外,在计算氦气资源量时往往只关注燕山期相对富 U 岩体的贡献,忽略了印支期相对富 Th 岩体。而以渭河盆地南缘花岗岩的单位质量生氦量中位数为标准,印支期岩体的值 (2.16×10^{-4}) 是燕山期 (1.29×10^{-4}) 的 1.7 倍左右。因此,在计算渭河盆地南缘花岗岩生成氦资源量的同时,印支期岩体的生氦潜力也值得进一步关注。

6 结论

(1) 华山复式岩体样品中放射性 U、Th 元素主要赋存于副矿物中,以锆石、榍石、磷灰石为主要矿物组合;除此之外,印支期侵入体还含有少量钍石,而燕山期侵入体则有褐帘石普遍出现及少量铀独立矿物(Nb-Ta-U 矿物)产出。这些副矿物多呈半自形-自形产出,主要存在于岩石主要矿物(石英、长石、黑云母、角闪石)中及颗粒间。

(2) 燕山期侵入体中 Th 含量主要受控于锆石, U 含量由锆石和褐帘石联合制约;而印支期侵入体中 Th、U 含量主要受控于锆石、榍石及少量钍石。基底太华群不均一成分及其部分熔融程度是样品中放射性 U、Th 元素含量的根本制约因素。

(3) 综合区域放射性资料,渭河盆地南缘花岗岩中 U、Th 含量均高于平均上地壳对应值。其中,燕山期和印支期岩体具有近似的 U 含量,而印支期岩体比燕山期岩体明显富集 Th。按照氦气弱源成藏理论,这些花岗岩体具有巨大的生氦潜力。其中,印支期岩体的生氦潜力值得进一步关注。

致谢:本次研究中的电子探针分析得到了中国地质调查局西安地质调查中心自然资源部岩浆作用成矿与找矿重点实验室电子探针实验室周宁超工程师的帮助;匿名评审专家和编辑老师提出了宝贵的建议和意见,在此一并感谢。

参考文献(References):

- 柴先平. 西安地热水伴生富氦天然气成因研究[D]. 西安: 长安大学,2007.
- CHAI Xianping. Study to the formation of Nature gas enriched Helium in geothermal water in Xi'an District[D]. Xi'an: Chang'an University, 2007.
- 戴金星,宋岩,戴春森,等. 中国东部无机成因气及其气藏形成条件[M]. 北京:科学出版社,1995.

- 第五春荣,刘祥,孙勇. 华北克拉通南缘太华杂岩组成及演化[J]. 岩石学报,2018,34(4):999-1018.
- DIWU Chunrong, LIU Xiang, SUN Yong. The composition and evolution of the Taihua Complex in the southern North China Craton[J]. Acta Petrologica Sinica,2018, 34(4): 999-1018.
- 董敏,王宗秀,董会,等. 关中盆地花岗岩石英脉流体包裹体与氦气成藏特征研究[J]. 西北地质,2017,50(3): 222-230.
- DONG Min, WANG Zongxiu, DONG Hui, et al. Fluid inclusions characteristics of quartz vein in granite and helium accumulation in Guanzhong Basi, Shaanxi Province [J]. Northwestern Geology, 2017, 50(3): 222-230.
- 董敏,王宗秀,董会,等. 应用拉曼光谱和裂变径迹法对关中盆地氦气成藏特征的实验研究[J]. 科学技术与工程, 2018,18(27):7-12.
- DONG Min, WANG Zongxiu, DONG Hui, et al. Experimental study on helium accumulation characteristics in Guanzhong Basin by Raman spectroscopy and fission track method [J]. Science Technology and Engineering, 2018, 18(27): 7-12.
- 高龙刚,陈佑纬,毕献武,等. 陕西华阳川铀钍矿床中铀矿物的年代学与矿物化学研究及其对铀成矿的启示[J]. 地质学报,2019,93(9):2273-2291.
- GAO Longgang, CHEN Youwei, BI Xianwu, et al. Chronology and mineral chemistry of the uranium minerals in Huayangchuan uranium-niobium deposit, Shaanxi Province and its implications for uranium mineralization[J]. Acta Geological Sinica,2019, 93(9): 2273-2291.
- 郭波,朱赖民,李犇,等. 华北陆块南缘华山和合峪花岗岩体锆石 U - Pb 年龄、Hf 同位素组成与成岩动力学背景 [J]. 岩石学报,2009,25(2):265-281.
- GUO Bo, ZHU Laimin, LI Ben, et al. Zircon U - Pb age and Hf isotope composition of the Huashan and Heyu granite plutons at the southern margin of North China Craton: Implications for geodynamic setting[J]. Acta Petrologica Sinica, 2009, 25(2): 265-281.
- 韩伟,李玉宏,卢进才,等. 陕西渭河盆地富氦天然气异常的影响因素[J]. 地质通报,2014,33(11):1836-1841.
- HAN Wei, LI Yuhong, LU Jincan, et al. The factors responsible for the unusual content of helium-rich natural gas in the Weihe Basin, Shaanxi Province[J]. Geological Bulletin of China, 2014, 33(11): 1836-1841.
- 黄建军,周阳,滕宏泉,等. 关中盆地西安凹陷地热水赋存特征及其资源量估算[J]. 西北地质,2021,54(1):196-203.
- HUANG Jianjun, ZHOU Yang, TENG Hongquan, et al. On the occurrence characteristics and the estimation of geothermal water in Xi'an Sag, Guanzhongbasin [J]. Northwestern Geology, 2021, 54(1): 196-203.
- 李玉宏,卢进才,李金超,等. 渭河盆地富氦天然气井分布特征与氦气成因[J]. 吉林大学学报(地球科学版),2011, 41(S1):47-53.
- LI Yuhong, LU Jincan, LI Jinchao, et al. Distribution of the Helium-Rich Wells and Helium Derivation in Weihe Basin[J]. Journal of Jilin University (Earth Science Edition), 2011, 41(S1): 47-53.
- 李玉宏,张文,王利,等. 亨利定律与壳源氦气弱源成藏——以渭河盆地为例[J]. 天然气地球科学,2017,28(4): 495-501.
- LI Yuhong, ZHANG Wen, WANG Li, et al. Henry's law and accumulation of crust-derived helium: A case from Weihebasin, China[J]. Natural Gas Geoscience, 2017, 28(4): 495-501.
- 李玉宏,周俊林,张文,等. 渭河盆地氦气成藏条件及资源前景[M]. 北京:地质出版社,2018,1-289.
- 李争,段奕. 阿尔及利亚三叠盆地成藏主控因素分析[J]. 天然气技术与经济,2009,3(5):10-13.
- LI Zheng, DUAN Yi. Main Reservoir-forming Controlling Factors of Triassic Basin, Algeria [J]. Natural Gas Technology, 2009, 3(5): 10-13.
- 刘建朝,李荣西,魏刚峰,等. 渭河盆地地热水水溶氦气成因与来源研究[J]. 地质科技情报,2009,28(6): 84-88.
- LIU Jianchao, LI Rongxi, WEI Gangfeng, et al. Origin and Source of Soluble Helium Gas in Geothermal Water, Weihe Basin[J]. Geological Science and Technology Information, 2009, 28(6): 84-88.
- 刘锐,陈觅,田向盛,等. 东秦岭蓝田和牧护关岩体地球化学、锆石 SIMS U - Pb 年龄及 Hf 同位素特征:岩石成因及构造意义[J]. 矿物学报,2014,34(4):469-480.
- LIU Rui, CHEN Mi, TIAN Xiangsheng, et al. Geochemical, Zircon SIMS U - Pb Geochronological and Hf Isotopic Study on Lantian and Muhuguan Plutons in Eastern Qinling, China: Petrogenesis and Tectonic Implications [J]. Acta Mineralogica Sinica, 2014, 34(4): 469-480.
- 卢进才,魏仙祥,李玉宏,等. 汾渭盆地富氦天然气成因及成藏条件初探[J]. 西北地质,2005,38(3):82-86.
- LU Jincan, WEI Xianyang, LI Yuhong, et al. Preliminary study about genesis and pool formation conditions of rich-helium type natural gas[J]. Northwestern Geology, 2005, 38(3): 82-86.
- 齐秋菊,王晓霞,柯昌辉,等. 华北地块南缘老牛山杂岩体时

- 代、成因及地质意义—锆石年龄、Hf 同位素和地球化学新证据[J]. 岩石学报, 2012, 28(1): 279-301.
- QI Qiuju, WANG Xiaoxia, KE Changhui, et al. Geochronology and origin of the Laoniushan complex in the southern margin of North China Block and their implications: New evidences from zircon dating, Hf isotopes and geochemistry[J]. Acta Petrologica Sinica, 2012, 28(1): 279-301.
- 徐永昌, 沈平, 陶明信, 等. 东部油气区天然气中幔源挥发份的地球化学——I. 氦资源的新类型: 沉积壳层幔源氦的工业储集[J]. 中国科学(D辑), 1996, 26(1): 1-8.
- XU Yongchang, SHEN Ping, TAO Mingxin, et al. Geochemistry of mantle-derived volatiles in natural gas from oil and gas regions, Eastern China: I A new type of helium; industrial storage of mantle-derived helium in sedimentary crust[J]. Science in China (Series D), 1996, 26(1): 1-8.
- 薛华锋, 朱兴国, 王润三, 等. 西安地热田伴生富氦天然气资源的发现及意义[J]. 西北大学学报(自然科学版), 2004, 34(6): 751-754.
- XUE Huafeng, ZHU Xingguo, WANG Runsan, et al. The discovery and significance of rich Helium natural gas resource in Xian. Journal of Northwest University (Natural Science Edition), 2004, 34(6): 751-754.
- 张福礼, 孙启邦, 王行运, 等. 渭河盆地水溶氦气资源评价[J]. 地质力学学报, 2012, 18(02): 195-202.
- ZHANG Fuli, SUN Qibang, WANG Xingyun, et al. Evaluation of water soluble helium resources in Weihe basin. Journal of Geomechanics, 2012, 18(02): 195-202.
- 张国伟, 张本仁, 袁学诚, 等. 秦岭造山带与大陆动力学[M]. 北京: 科学出版社, 2001.
- 张文. 关中和柴北缘地区战略性氦气资源成藏机理研究[D]. 北京: 中国矿业大学(北京), 2019.
- ZHANG Wen. Accumulation mechanism of helium, a strategic resource, in Guanzhong and North Qaidam Basin [D]. Beijing: China University of Mining & Technology-Beijing, 2019.
- 张文, 李玉宏, 王利, 等. 渭河盆地氦气成藏条件分析及资源量预测[J]. 天然气地球科学, 2018, 29(2): 236-244.
- ZHANG Wen, LI Yuhong, WANG Li, et al. The analysis of helium accumulation conditions and prediction of helium resource in Weihe Basin[J]. Natural Gas Geoscience, 2018, 29(2): 236-244.
- 张兴康, 叶会寿, 李正远, 等. 小秦岭华山复式岩基大夫峪岩体锆石 U - Pb 年龄、Hf 同位素和地球化学特征[J]. 矿床地质, 2015, 34(02): 235-260.
- ZHANG Xingkang, YE Huishou, LI Zhengyuan, et al. Zircon U - Pb ages, Hf isotopic composition and geochemistry of Dafuyu granitoid pluton from Huashan complex batholith in Xiaoqinling [J]. Mineral Deposits, 2015, 34(02): 235-260.
- 张晓宝, 徐永昌, 孙明良, 等. 黄骅坳陷含油储层包裹体中幔源氦的发现及其地质意义[J]. 中国科学: 地球科学, 2003, 33(07): 673-678.
- ZHANG Xiaobao, XU Yongchang, SUN Mingliang, et al. Discovery of mantle-derived helium in inclusions from oil-bearing reservoir in Huanghua Depression and its significance[J]. Science in China (Series D), 2003, 33(07): 673-678.
- 张雪. 渭河盆地天然气及氦气成藏条件与资源量预测[D]. 西安, 长安大学, 2015, 102-119.
- ZHANG Xue. Accumulation conditions and resource prediction of natural gas and helium gas in Weihe basin [D]. Xi'an: Chang'an University, 2015, 102-119.
- 张宗清, 张国伟, 刘敦一, 等. 秦岭造山带蛇绿岩, 花岗岩和碎屑沉积岩同位素年代学和地球化学[M]. 北京: 地质出版社, 2006.
- Ballentine C J, Dan N B. The origin of air-like noble gases in MORB and OIB [J]. Earth & Planetary Science Letters, 2000, 180(1-2): 39-48.
- Ballentine C J, Sherwood L B. Regional groundwater focusing of nitrogen and noble gases into the Hugoton-Panhandle giant gas field, USA [J]. Geochimica et Cosmochimica Acta, 2002, 66(14): 2483-2497.
- Brown A A. Formation of High Helium Gases: A Guide for Explorationists [C]. AAPG Convention, New Orleans, Louisiana, USA. 2010.
- Cherniak D J, Watson E B, Thomas J B. Diffusion of helium in zircon and apatite [J]. Chemical Geology, 2009, 268(1-2): 155-166.
- Danabalan D, Gluyas J G, Macpherson G G, et al. New High-Grade Helium Discoveries in Tanzania [C]. Yokohama, Japan: Goldschmidt Conference. 2016.
- Gao Shan, Luo Tingchuan, Zhang Benren, et al. Chemical composition of the continental crust as revealed by studies in east China [J]. Geochim. Cosmochim. Acta, 1998, 62: 1959-1975.
- Green T H. Experimental studies of trace-element partitioning applicable to igneous petrogenesis — Sedona 16 years later [J]. Chemical Geology, 1994, 117(1-4): 1-36.
- Hu Jian, Jiang Shaoyong, Zhao Haixiang, et al. Geochemis-

- try and petrogenesis of the Huashan granites and their implications for the Mesozoic tectonic settings in the Xiaqingling gold mineralization belt, NW China[J]. *Journal of Asian Earth Sciences*, 2012, 56: 276-289.
- Hussain N. Flux of ^4He from Carnmenellis granite: modelling of an HDR geothermal reservoir[J]. *Applied Geochemistry*, 1997, 12(1): 1-8.
- Jia Xiaoliang, Zhai Mingguo, Xiao Wenjiao, et al. Late Neoproterozoic to early Paleoproterozoic tectonic evolution of the southern North China Craton: Evidence from geochemistry, zircon geochronology and Hf isotopes of felsic gneisses from the Taihua complex[J]. *Precambrian Research*, 2019, 326: 222-239.
- Jiang Shaoyong. Controls on the mobility of high field strength elements (HFSE), U, and Th in an ancient submarine hydrothermal system of the Proterozoic Sullivan Pb - Zn - Ag deposit, British Columbia, Canada [J]. 2000, *Geochemical Journal*, 34: 341-348.
- Kukkonen I T, and Lauri L S. Modelling the thermal evolution of a collisional Precambrian orogen: High heat production migmatitic granites of southern Finland [J]. *Precambrian Research*, 2009, 168(3-4): 233-246.
- Luhr J F, Carmichael I S E, Varekamp J C. The 1982 eruptions of El Chichón Volcano, Chiapas, Mexico: Mineralogy and petrology of the anhydrite-bearing pumices [J]. *Journal of Volcanology and Geothermal Research*, 1984, 23: 69-108.
- Luo Yan, Ayers J C. Experimental measurements of zircon/melt trace-element partition coefficients[J]. *Geochimica Et Cosmochimica Acta*, 2009, 73(12): 3656-3679.
- Martel D J, O'Nions R K, Hilton D R, et al. The role of element distribution in production and release of radiogenic helium: the Carnmenellis Granite, southwest England [J]. *Chemical Geology*, 1990, 88(3): 207-221.
- Nash W P. & Crecraft H R. Partition coefficients for trace elements in silicic magmas[J]. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 1985, 49: 2309-2322.
- Nuttall W J, Richard H, Clarke, et al. Resources: stop squandering helium[J]. *Nature*, 2012, 485(7400).
- Robb L. Introduction to ore forming processes[M]. Blackwell Science Ltd, Oxford, 2005.
- Rudnick R and Gao S. Composition of the continental crust [J]. *The Crust*, 2003, 3: 1-64.
- Shaw D M. Trace element fractionation during anatexis[J]. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 1970, 34: 237-243.
- Wang Xue, Huang Xiaolong, Yang Fan. Geochronology and geochemistry of the Xiaqingling Taihua Complex in the southern Trans-North China Orogen: Implications for magmatism during the early Paleoproterozoic global tectono-magmatic shutdown[J]. *Lithos*, 2021: 402-403.
- Xue Yingyu, Siebel W, He Jianfeng, et al. Granitoid Petrogenesis and Tectonic Implications of the Late Triassic Baoji Pluton, North Qinling Orogen, China: Zircon U - Pb Ages and Geochemical and Sr - Nd - Pb - Hf Isotopic Compositions[J]. *The Journal of Geology*, 2018, 126 (1): 119-139.
- Zhang Jian, Yang Wei, Yi Haiyong, et al. Feasibility of high-helium natural gas exploration in the Presinian strata, the Sichuan Basin[J]. *Natural Gas Industry B*, 2015, 2(1): 88-94.
- Zhang Wen, Li Yuhong, Zhao Fenghua, et al. Granite is an Effective Helium Source Rock: Insights from the Helium Generation and Release Characteristics in Granites from the North Qinling Orogen, China[J]. *Acta Geologica Sinica (English edition)*, 2020, 94(1): 114-125.
- Zheng Hui, Chen Huayong, Wu Chao, et al. Genesis of the supergiant Huayangchuan carbonatite-hosted uranium-polymetallic deposit in the Qinling Orogen, Central China[J]. *Gondwana Research*, 2020, 86: 250-265.
- Zhu Mingtian, Zhang Lianchang, Wu Guan, et al. Fluid inclusions and He - Ar isotopes in pyrite from the Yinjiagou deposit in the southern margin of the North China Craton: A mantle connection for poly-metallic mineralization[J]. *Chemical Geology*, 2013, 351: 1-14.