



引文格式: 胡明卿, 张乔, 杨海星, 等. 渭河盆地主要氦源岩花岗岩的体积约束及生氦量估算: 以蓝田岩基为例[J]. 西北地质, 2025, 58(5): 24–32. DOI: 10.12401/j.nwg.2024133

Citation: HU Mingqing, ZHANG Qiao, YANG Haixing, et al. The Volume of Granites in Main Helium Source Rocks of Weihe Basin and the Estimation of Their Helium Production: A Case Study of the Lantian Batholith[J]. Northwestern Geology, 2025, 58(5): 24–32. DOI: 10.12401/j.nwg.2024133

渭河盆地主要氦源岩花岗岩的体积约束及生氦量估算: 以蓝田岩基为例

胡明卿^{1,2}, 张乔^{3,4,*}, 杨海星^{1,2}, 曹毅章⁵, 徐小虎^{1,2}, 马壮^{1,2}, 马永福⁶, 马元⁷

(1. 中联煤层气国家工程研究中心有限责任公司, 北京 100095; 2. 中石油煤层气有限责任公司, 北京 100028; 3. 中国地质调查局西安地质调查中心/西北地质科技创新中心, 陕西 西安 710119; 4. 中国地质调查局氦气调查研究中心, 陕西 西安 710119; 5. 青海省柴达木综合地质矿产勘查院, 青海 格尔木 816099; 6. 青海省海西州自然资源综合调查中心, 青海 德令哈 817099; 7. 青海省海西州盐湖资源保护利用中心, 青海 德令哈 817099)

摘要: 氦源岩评价是氦气资源评价的关键, 主要包含岩石类型、生氦元素铀和钍丰度、形成年龄及体积 4 个关键参数。花岗岩作为主要氦源岩, 其中前 3 个参数易于获取, 而花岗岩体积这一参数一直缺乏约束。渭河盆地具有良好的氦气资源潜力, 而且其南缘巨大的花岗岩基被认为是盆地内壳源氦的主要氦源, 为研究这一参数提供了良好的条件。本次研究选取蓝田岩基作为对象, 综合地质、地球物理资料, 将其几何形态限定为接近高长宽比和薄板的椭圆柱体。根据岩体长度和厚度的幂次定律, 计算得到蓝田岩基的厚度为 4.7 km、体积为 572 km³。放射性分析结果显示蓝田岩基的 U、Th 丰度平均值为 5.8×10^{-6} 、 19.0×10^{-6} 。通过放射性衰变原理, 计算得出蓝田岩基自形成以来能产生的氦气量为 2.71×10^8 m³。结合区域花岗岩地质特征, 笔者进一步估算出渭河盆地南缘花岗岩的生氦资源总量 (184×10^8 m³), 这一结果为渭河盆地氦气资源勘探突破、氦气资源评价体系建立提供了启示和依据。

关键词: 氦源岩; 花岗岩; 体积; 生氦量

中图分类号: P618.13

文献标志码: A

文章编号: 1009-6248(2025)05-0024-09

The Volume of Granites in Main Helium Source Rocks of Weihe Basin and the Estimation of Their Helium Production: A Case Study of the Lantian Batholith

HU Mingqing^{1,2}, ZHANG Qiao^{3,4,*}, YANG Haixing^{1,2}, CAO Yizhang⁵, XU Xiaohu^{1,2},
MA Zhuang^{1,2}, MA Yongfu⁶, MA Yuan⁷

(1. National Engineering Research Center of China United Coalbed Methane Co., Ltd., Beijing 100095, China; 2. PetroChina Coalbed

收稿日期: 2024-11-12; 修回日期: 2025-01-02; 责任编辑: 曹佰迪

基金项目: 中国石油煤层气有限责任公司科学研究与技术开发项目 (2023-KJ-22), 中国地质调查局项目“氦气资源调查评价与示范” (DD20230026), 陕西省自然科学基金基础研究计划 (2024JC-YBMS-216、2024JC-YBQN-0342、S2024-JC-YB-0817)、陕西省重点研发计划 (2024GH-YBXM-04), 2024 年度青海省“昆仑英才·高端创新创业人才”计划 A 类项目“柴达木盆地北缘氦气资源成藏机理及勘探开发”联合资助。

作者简介: 胡明卿 (1976–), 男, 博士, 高级工程师, 主要从事煤层气及新能源地质研究。E-mail: hu_mq@petrochina.com.cn。

* 通讯作者: 张乔 (1992–), 男, 硕士, 副研究员, 主要从事氦源岩及花岗岩研究。E-mail: hotrock2012zq@163.com。

- Methane Co., Ltd., Beijing 100028, China; 3. Xi'an Center of China Geology Survey / Geosciences Innovation Center of Northwest China, Xi'an 710119, Shaanxi, China; 4. Research Center for Helium, China Geology Survey, Xi'an 710119, Shaanxi, China; 5. Qaidam Comprehensive Geological and Mineral Exploration Institute of Qinghai Province, Golmud 816099, Qinghai, China; 6. Haixi State Natural Resources Comprehensive Survey Center of Qinghai Province, Delingha 817099, Qinghai, China; 7. Haixi State Salt Lake Resource Protection and Utilization Center of Qinghai Province, Delingha 817099, Qinghai, China)

Abstract: As the key of helium resource evaluation, the evaluation of helium source rocks mainly consist of rock type, contents of helium-derived elements uranium and thorium, formation age and volume. Granite is viewed as the main helium source rock and first three parameters are readily accessible. However, the volume of granite is too complicated to be constrained. The Weihe basin show great potential for helium resources, in which enormous granitic batholiths along its southern margin are considered as the main helium reservoir for crustal-derived helium, providing ideal conditions for this parameter. In this study, the Lantian batholith is selected and the shape of it is near to a flat elliptical column with high length-width ratio based on the published geological and geophysical data. Moreover, the thickness of Lantian batholith is calculated to be 4.7 km and the volume is 572 km^3 according to a power-law relationship. In addition, the results show that the average contents of helium-produced elements U and Th are 5.8×10^6 and 19×10^6 in Lantian batholith. Combined with the radioactive decay law, the calculated helium production for the Lantian batholith is about 0.27 billion cubic meters. In view of voluminous granitic batholiths at the south edge of Weihe basin, total helium production have been evaluated at 18.4 billion cubic meters, which will provide significant implications for the exploration breakthrough of helium in Weihe Basin and further establishment of the helium resource evaluation.

Keywords: Helium source rock; granite; volume; helium production

氦因其特殊的物理化学性质,广泛应用于高新技术产业和国防工业等领域,已经成为一种不可替代的稀缺资源(Anderson, 2018; 高宇等, 2025)。最新统计数据显示,全球氦气资源集中分布于美国、俄罗斯、阿尔及利亚、卡塔尔、波兰等国(常洋梅等, 2025)。中国氦气资源匮乏、产量低,长期依赖进口,对外依存度高达90%以上,无法满足国内日益增长的资源需求。初步调研显示,中国氦气分布广泛,分布层位众多,但目前尚未建立完善的氦气资源评价体系,国内资源量尚不明确(李玉宏等, 2018)。

氦气主要赋存在天然气之中,从富氦天然气中提取氦气的工业品位一般为0.1%。目前,国内外学者对氦气资源量的研究方法主要有两种:第一种方法是容积法,根据含氦气藏的圈闭范围、储量、气体组分等参数进行资源量估算(Pacheco et al., 2002; Danabalan et al., 2016; 张作祥等, 2018),此类方法适用于勘探程度较高的含氦天然气藏;第二种方法是成因法,该方法基于放射性衰变原理,从氦气的源方面进行资源量评价(Brown, 2010; 张文等, 2018),不考虑氦气生成之后到成藏过程中的损失,此类方法适用于工作程度相对较低的盆地或区带。在现阶段国内氦气成藏理论尚

未完全建立、成藏过程中关键参数缺少约束的现状下,成因法在早期氦气资源潜力评价上能发挥其优势。氦气有地幔、地壳和大气3种来源(Ballentine et al., 2000)。目前,工业利用的富氦天然气藏中的氦主要是地壳来源(^4He),是由岩石、矿物中的U、Th元素发生放射性衰变产生的,这些岩石被定义为氦源岩(Danabalan et al., 2022)。类比于油气资源中的烃源岩评价,氦源岩评价是氦气资源评价体系的关键。最新研究提出,岩石类型、U和Th元素丰度、形成年龄及体积是氦源岩评价的4个关键参数(尤兵等, 2022)。世界典型含氦天然气藏成藏条件调研显示,在这些气藏之下普遍分布有花岗岩,它们被认为是壳源氦的重要氦源岩(李玉宏等, 2022)。因此,花岗岩中这些参数的研究对于完善氦气成藏理论、量化花岗岩的生氦资源量具有重要的意义。

渭河盆地位于秦岭造山带与鄂尔多斯盆地之间(图1),近年来开展的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%)(卢进才等, 2005; 刘建朝等, 2009; 韩伟等, 2014; 李玉宏等, 2018),表明盆地具有巨大的氦资源潜力。综合地质、地球物理、钻井资料,盆地地热井中伴生氦气主要为

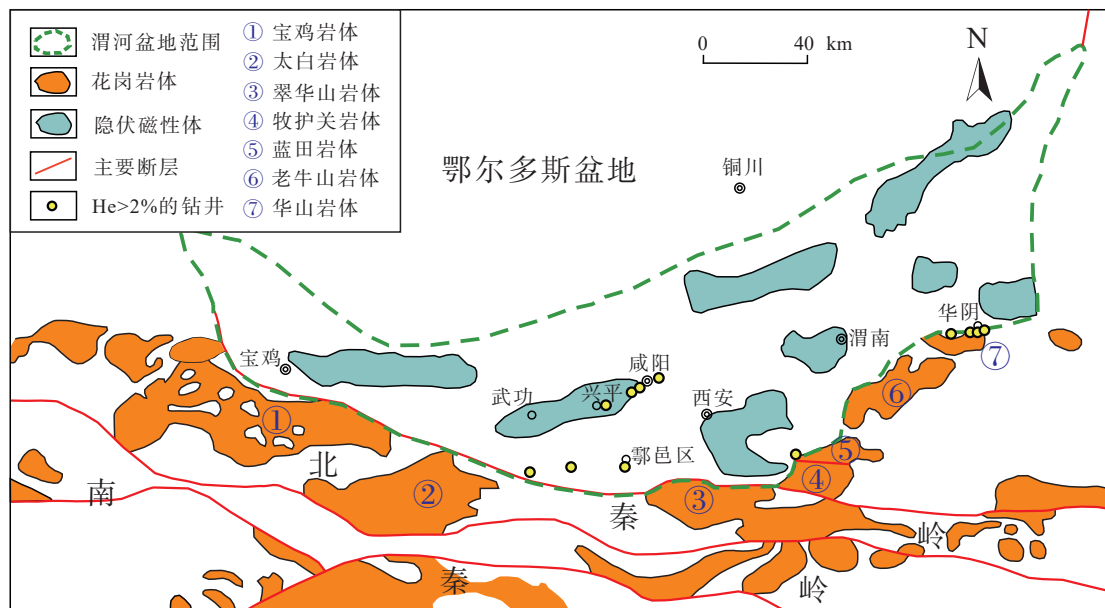


图1 渭河盆地南缘花岗岩体与富氦地热井分布图(修改自李玉宏等, 2018)

Fig. 1 Distribution of granites in southern Weihe basin with helium-enriched wells

壳源成因,它们主要来源于盆地南缘大面积分布的花岗质岩石以及隐伏磁性体,即盆地南缘一系列花岗岩基为主要氦源岩(李玉宏等, 2011)。目前,针对这些花岗岩的岩石类型、生氦元素丰度和年龄已经取得重要进展和认识(王晓霞等, 2011; 刘锐等, 2014; 薛颖瑜等, 2015; 张乔等, 2022)。但关于花岗岩体积这一参数,前人主要按长方体和正方体模型将其简化为出露面积与厚度的乘积,并将花岗岩厚度按统一值处理(张雪, 2015; 张文等, 2018),缺乏定量地约束,制约了其氦源岩有效性评价和资源量计算。事实上,花岗岩体的形态不一,随着侵位深度的降低,三维形态从规则的岩床到等轴的岩盖、楔状的侵入体和岩基(McCaffrey et al., 2002)。例如,科迪勒拉山系的海岸岩基(the Costal Batholith)被认为是一个具有大的长度比、类似于平板的岩基(Haederle et al., 2002)。本次研究选取蓝田岩基为研究对象,针对花岗岩体积这一参数开展了调研,结合已有研究成果约束了其体积,运用其放射性数据,估算了蓝田岩基的氦资源生成量,并进一步计算渭河盆地7大花岗岩基生氦资源量,为摸清我国氦气资源家底提供范例。

1 地质背景

渭河盆地位于鄂尔多斯盆地与秦岭造山带之间,其形成与发展与两大构造单元的演化密切相关。秦

岭造山带岩浆岩广泛分布,从太古代到中生代均有发育。盆地受造山带影响,其南缘有大量岩浆岩侵入,自西向东分布有宝鸡、太白、翠华山、牧护关、蓝田岩体、老牛山、华山等岩体,以岩基状产出(图1)。前人研究表明,这些岩基是由燕山期和印支期两期侵入体构成的复式岩体(张宗清等, 2006; 齐秋菊等, 2012; 刘锐等, 2014; 张兴康等, 2015; Xue et al., 2018)。

蓝田岩体位于蓝田县东南5 km,为EW向展布的复式岩基,夹于华胥-梁头源断裂和铁炉子-三要断裂之间,出露面积为154 km²,长为31 km,宽为2~9 km(图2)。该岩体与下元古界和太华群呈侵入接触或断层接触,根据岩性和接触关系可分两期侵入活动,第一期为大斑状二长花岗岩,分布在岩体南部,第二期为中细粒二长花岗岩,分布在北部和东部。年代学研究表明,大斑状二长花岗岩和中细粒二长花岗岩分别形成于154 Ma、147 Ma(丁丽雪等, 2010; 刘锐等, 2014)。

本次研究沿公王-张家坪路线对蓝田岩基识别出了巨斑状中粗粒黑云二长花岗岩和中粒黑云二长花岗岩两期侵入体(图3),但两者接触关系在该路线上未见。巨斑状黑云二长花岗岩位于岩体中部,具有似斑状结构、块状构造,斑晶为板柱状钾长石,长度为3~6 cm,占比为12%~20%,基质由钾长石(30%~40%)、斜长石(25%~30%)、石英(25%~30%)及少量黑云母(5%)组成,长石和石英粒径为3~6 mm。黑云二长花岗岩则分布在岩体边部,具有花岗结构、块

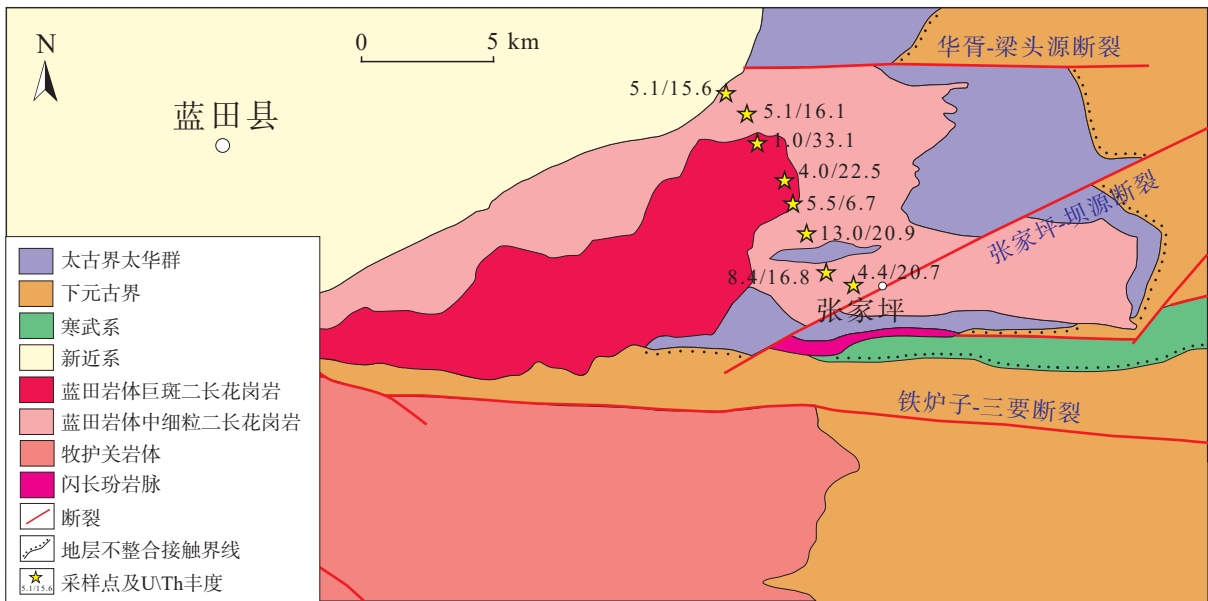
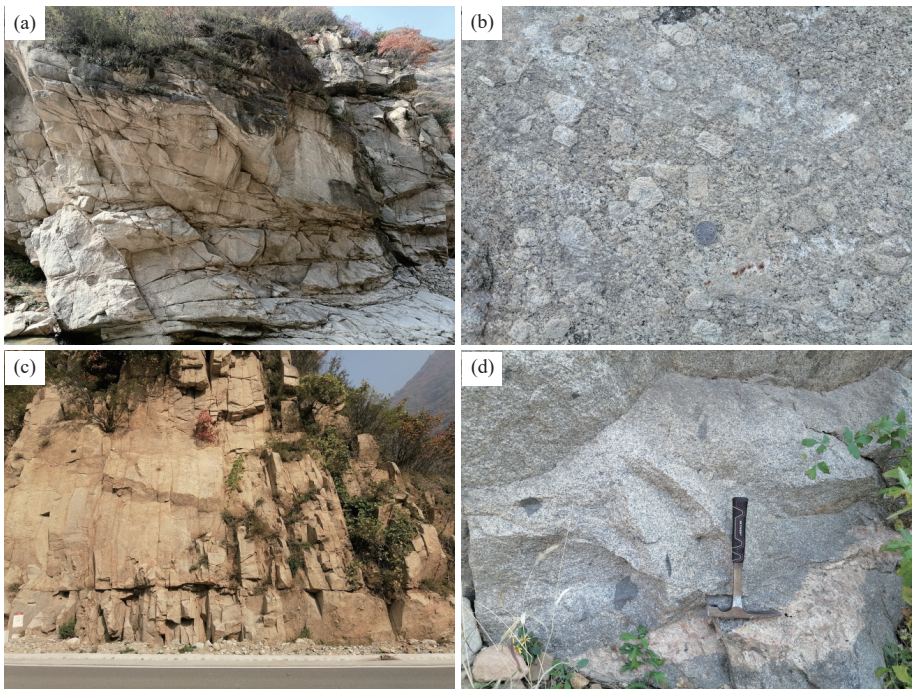


图2 蓝田岩基地质简图(修改自丁丽雪等, 2010)
Fig. 2 Geological sketch of Lantian batholith



a、b. 巨斑状黑云二长花岗岩; c、d. 黑云二长花岗岩

图3 蓝田岩基两期侵入体野外地质特征

Fig. 3 Field features of two plutons in Lantian batholith

状构造, 主要由钾长石(35%~40%)、斜长石(25%~30%)、石英(25%~30%)及少量黑云母(5%)组成, 长石和石英粒径为 2~3 mm。边部的黑云二长花岗岩中普遍发育暗色微粒包体(图 3)。笔者采集了 8 件蓝田岩基样品(图 2), 包括巨斑状二长花岗岩和中细粒二长花岗岩, 用于放射性元素分析。

2 数据准备及分析测试

基于已有资料, 文中设定蓝田岩基平面长度为 31 km, 平面宽度为 5 km, 年龄为 150 Ma, 岩体密度为花岗岩平均密度 2 500 kg/m³。根据前人研究明确渭河

盆地南缘花岗岩基生氦资源量的基础参数(表1)。

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,使用以氮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,在盐酸中使用分光光度法测定Th含量。铀、钍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。

表1 渭河盆地南缘花岗岩基生氦量计算参数

Tab. 1 Parameters of helium production in Granitic batholiths in southern Weihe Basin

参数	年龄t (Ma)*	平面长度L (km)	平面宽度W (km)	平均厚度T (km)	体积V (km ³)	生氦元素		生氦速率 (cm ³ /g·y)	生氦量P (10 ⁸ m ³)
						U(10 ⁻⁶)	Th(10 ⁻⁶)		
蓝田岩基	150	31	5	4.7	572	5.8	19	1.26E-12	2.71
宝鸡岩基	213	100	20	9.5	14 930	3.97	19.48	1.05E-12	83.7
太白岩基	214	60	30	7.0	9 890	3.97	21.63	1.12E-12	58.8
翠华山岩基	227	30	20	4.6	2 175	11.47	19.62	1.97E-12	24.3
牧护关岩基	151	20	10	3.6	568	7.59	21.73	1.56E-12	3.35
老牛山岩基	152	50	9	6.3	2 216	4.07	25.7	1.25E-12	10.5
华山岩基	134	20	6	3.6	341	4.72	8.68	8.29E-13	0.95
合计									184

注: *年龄引自Jiang等(2010)、丁丽雪等(2010)、齐秋菊等(2012)、吕星球等(2014)、薛颖瑜等(2015)。

3 岩体体积

花岗岩基常常由多期岩浆活动形成,其中酸性成分类似于大陆地壳平均成分,且其形成过程中伴随有大量金属矿产形成,因而其时空分布受到学界的关注(刘金兰等, 2014; Mahdy et al., 2015)。由于花岗质岩浆在上升侵位过程中易受构造作用、围岩、构造变形的影响,因而花岗岩体的最终几何形态往往不规则,一直是花岗岩基研究中的难点之一(Haederle et al., 2002; 李盈莹等, 2023)。

由于花岗岩侵位于地壳之中,人们无法肉眼观察到其完整3D形态。目前,通过地质方法观测花岗岩露头,可以获得花岗岩基的平面分布情况和分布规律,无法了解地表以下岩体的规模。地球物理方法基于花岗岩具有低密度、弱磁-高磁性特征,可以圈定出隐伏花岗岩体的平面分布情况(钟清等, 2007; 王亮等, 2009),同时利用多条剖面重磁电震数据反演花岗岩立体分布(Haederle et al., 2002; 刘金兰等, 2019)。重磁电剖面综合反演出花岗岩侵入体具有下尖上扁平的楔形几何形态(Améglie et al., 1999)。基于重力模拟结果,Haederle等(2002)提出科迪勒拉山系的海岸岩基是一个具有大的长宽比、类似于平板的岩基。此外,岩浆借助浮力驱动侵位上升过程中岩体形态还受不同深度裂隙类型控制(Sumita et al., 2011)。在地壳深

部,塑性裂隙发育,加之熔体作用,在侵位上部容易形成板状和圆柱状岩体(Brown, 2013)。这与地球物理结果也是相吻合的。由于地质和地球物理方法可以计算出花岗岩基的平面面积,那么花岗岩体体积这一参数关键在于如何确定花岗岩基的厚度。研究表明,大的花岗岩基是由小的花岗岩体累积生长而来,三维形态从规则的岩床到等轴的岩盖、楔状的侵入体和岩基,从花岗岩侵入体到大面积岩基,它们的水平长度L与平均厚度T遵循幂次定律(图4)(McCaffrey et al., 2002; Brown, 2013)。其中,圆柱状花岗侵入体水平长度L与平均厚度T的形成遵循以下幂次定律,即

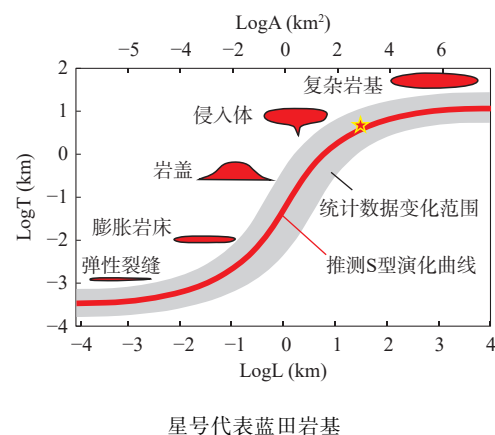


图4 不同深度下不同产状侵入体的厚度T、长度L与面积A之间关系(修改自Brown, 2013)

Fig. 4 Dynamic relationship among intrusion thickness, width and area (Modified after Brown, 2013)

渭河盆地南缘发育了一系列花岗岩基,它们多是由不同时代侵入体组成的复式岩基。为简化研究,对于多期次侵入体构成的岩基,取出露面积更大的侵入体时代计算生氦量。结合盆地南缘一系列花岗岩基的地质特征,根据椭球柱体模型和幂次定律,估算了各岩基的厚度,进一步计算出渭河盆地南缘 7 大花岗岩基的生氦速率,基本在 10^{-12} 数量级,得出其生氦资源总量达到 $184 \times 10^8 \text{ m}^3$,明显高于前人计算生氦资源量($6 \times 10^8 \sim 141 \times 10^8 \text{ m}^3$)。因此,计算结果表明渭河盆地南缘这些花岗岩基具有巨大生氦资源潜力。

氦气从花岗岩中释放属于初次运移,其缓慢生成、分子量小的特点促使其不能立即形成氦气藏,而是溶解在地下水中经历二次运移,在遇到天然气藏时脱溶进入气藏,形成富氦天然气藏(李玉宏等, 2017; Zhang et al., 2019; 秦胜飞等, 2022)。在计算氦气资源量时,需要考虑氦气在运移和聚集过程中的损失。花岗岩中氦气释放机理实验证明,岩体形成后只有少于 20% 氦保存在花岗岩中,超过 80% 氦发生了运移或散失(张文, 2019),而运移聚集系数仍然未知。此外,在地壳中不同沉积岩对氦气生成和成藏的贡献也得到了越来越多的学者关注(李济远等, 2022; 彭威龙等, 2022; Zhang et al., 2023; Nie et al., 2023),如铝土岩、页岩、高 U 砂岩等。因此,未来需要进一步丰富氦气成藏理论研究、加强氦源岩评价体系中关键参数的攻关,继而建立完善的氦气资源评价体系。

5 结论

(1) 蓝田岩基几何形态接近高长宽比和薄板的椭圆柱体,其平均厚度为 4.7 km,其体积为 572 km^3 。

(2) 蓝田岩基的 U、Th 丰度平均值为 5.8×10^{-6} 、 19.0×10^{-6} ,生氦速率为 $1.26 \times 10^{-12} \text{ cm}^3/\text{g} \cdot \text{y}$,自形成以来(150 Ma)可生成氦气总量为 $2.71 \times 10^8 \text{ m}^3$ 。

(3) 渭河盆地南缘大量花岗岩基的生氦资源量达到 $184 \times 10^8 \text{ m}^3$,氦资源潜力巨大,其他类型氦源岩如铝土岩、页岩的生氦潜力同样值得关注。

参考文献(References):

常洋梅,刘超,孙蓓蕾.鄂尔多斯盆地东缘石西区块氦源岩有效性评价及空间展布特征[J].煤田地质与勘探,2025,53(6): 129-142.

CHANG Yangmei, LIU Chao, SUN Beilei. Effectiveness assessment and spatial distribution characteristics of helium source rocks in the Shixi Block along the eastern margin of the Ordos Basin[J].

Coal Geology & Exploration, 2025, 53(6): 129-142.

丁丽雪,马昌前,李建威,等.华北克拉通南缘蓝田和牧护关花岗岩体: LA-ICP-MS 锆石 U-Pb 年龄及其构造意义[J].地球化学,2010,39(5): 401-413.

DING Lixue, MA Changqian, LI Jianwei, et al. LA-ICP-MS zircon U-Pb ages of the Lantian and Muhuguan granitoid plutons, southern margin of the North China craton: Implications for tectonic setting[J]. Geochimica, 2010, 39(5): 401-413.

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 Jincai, 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.

高宇,刘全有,朱东亚,等.稀有气体示踪地质流体及氦气富集研究进展[J].煤田地质与勘探,2025,53(6): 84-95.

GAO Yu, LIU Quanyou, ZHU Dongya, et al. Advances in research on noble gas as tracers of geofluids and helium enrichment[J]. Coal Geology & Exploration, 2025, 53(6): 84-95.

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 Jincai, 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.

韩元红,罗厚勇,薛宇泽,等.渭河盆地地热水伴生天然气成因及氦气富集机理[J].天然气地球科学,2022,33(2): 277-287.

HAN Yuanhong, LUO Houyong, XUE Yuze, et al. Genesis and helium enrichment mechanism of geothermal water-associated gas in Weihe Basin[J]. Natural Gas Geoscience, 2022, 33(2): 277-287.

李济远,李玉宏,胡少华,等.“山西式”氦气成藏模式及其意义[J].西安科技大学学报,2022,42(3): 529-536.

LI Jiyuan, LI Yuhong, HU Shaohua, et al. “Shanxi-type” helium accumulation model and its essentiality[J]. Journal of Xi'an University of Science and Technology, 2022, 42(3): 529-536.

李盈莹,王博,曹婷婷.花岗质岩浆侵位的构造物理模拟研究进展[J].高校地质学报,2023,29(4): 543-558.

LI Yingying, WANG Bo, CAO Tingting. Advances on the analogue modeling of the emplacement of granitic magma[J]. Geological Journal of China Universities, 2023, 29(4): 543-558.

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 Jincai, 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,王行运,韩伟. 陕西渭河盆地氦气资源赋存状态及其意义[J]. 地质通报, 2016, 35(2-3): 372-378.
- LI Yuhong, WANG Xingyun, HAN Wei. Mode of occurrence of helium in Weihe Basin, Shaanxi Province and its significance[J]. Geological Bulletin of China, 2016, 35(2-3): 372-378.
- 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 Weihe Basin, China[J]. Natural Gas Geoscience, 2017, 28(4): 495-501.
- 李玉宏,张文,周俊林,等. 花岗岩在氦气成藏中的双重作用: 氦源与储集[J]. 西北地质, 2022, 55(4): 95-102.
- LI Yuhong, ZHANG Wen, ZHOU Junlin, et al. Dual contribution of granites in helium accumulation: source and reservoir[J]. Northwestern Geology, 2022, 55(4): 95-102.
- 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.
- 刘金兰,赵斌,王万银,等. 利用重磁资料研究南岭于都-赣县矿集区花岗岩与断裂分布特征[J]. 地质学报, 2014, 88(4): 658-668.
- LIU Jinlan, ZHAO Bin, WANG Wanyin, et al. A study of the granite and faults distribution based on gravity and magnetic data obtained in Yudu-Ganxian ore concentration area of Nanling[J]. Acta Geologica Sinica, 2014, 88(4): 658-668.
- 刘金兰,赵斌,王万银,等. 南岭于都—赣县矿集区银坑示范区重磁资料探测花岗岩分布研究[J]. 物探与化探, 2019, 43(2): 223-233.
- LIU Jinlan, ZHAO Bin, WANG Wanyin, et al. A study of the distribution of granite detected by gravity and magnetic data in Yinkeng demonstration area of Nanling Yudu-Ganxian ore concentration area[J]. Geophysical and Geochemical Exploration, 2019, 43(2): 223-233.
- 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.
- 吕星球,王晓霞,柯昌辉,等. 北秦岭太白花岗岩体 LA-ICP-MS 锆石 U-Pb 测年及其地质意义[J]. 矿产地质, 2014, 33(1): 37-52.
- LV Xingqiu, WANG Xiaoxia, KE Changhui, et al. LA-ICP-MS zircon U-Pb dating of Taibai pluton in North Qinling Mountains and its geological significance[J]. Mineral Deposits, 2014, 33(1): 37-52.
- 彭威龙,刘全有,张英,等. 中国首个特大致密砂岩型(烃类)富氦气田——鄂尔多斯盆地东胜气田特征[J]. 中国科学: 地球科学, 2022, 52(6): 1078-1085.
- PENG Weilong, LIU Quanyou, ZHANG Ying, et al. The first extra-large helium-rich gas field identified in a tight sandstone of the Dongsheng Gas Field, Ordos Basin, China[J]. Science China: Earth Sciences, 2022, 52(6): 1078-1085.
- 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.
- 秦胜飞,李济远,梁传国,等. 中国中西部富氦气藏氦气富集机理——古老地层水脱氮富集[J]. 天然气地球科学, 2022, 33(8): 15.
- QIN Shengfei, LI Jiyuan, LIANG Chuanguo, et al. Helium enrichment mechanism of helium rich gas reservoirs in central and western China-degassing and accumulation from old formation water[J]. Natural Gas Geoscience, 2022, 33(8): 15.
- 王亮,张应文,刘盛光. 区域重磁资料圈定贵州境内侵入岩体及局部地质构造[J]. 物探与化探, 2009, 33(3): 245-250.
- WANG Liang, ZHANG Yingwen, LIU Shengguang. The application of regional gravity and magnetic data to delineation intrusive bodies and local geological structures in Guizhou Province[J]. Geophysical and Geochemical Exploration, 2009, 33(3): 245-250.
- 王晓霞,王涛,齐秋菊,等. 秦岭晚中生代花岗岩时空分布、成因演变及构造意义[J]. 岩石学报, 2011, 27(6): 1573-1593.
- WANG Xiaoxia, WANG Tao, QI Qiuju, et al. Temporal-spatial variations, origin and their tectonic significance of the Late Mesozoic granites in the Qinling, Central China[J]. Acta Petrologica Sinica, 2011, 27(6): 1573-1593.
- 薛颖瑜,李双庆,张贺,等. 宝鸡花岗岩体锆石 U-Pb 年龄、地球化学和 Hf 同位素组成 [A]. 中国矿物岩石地球化学学会第 15 届学术年会论文摘要集 [C]. 2015.
- XUE Yingyu, LI Shuangqing, ZHANG He, et al. Zircon U-Pb ages, geochemistry and Hf isotopic compositions of Baoji granites [A]. Abstracts of the 15th annual meeting of Chinese Society for Mineralogy [C]. 2015.
- 尤兵,陈践发,肖洪,等. 富氦天然气藏氦源岩特征及关键评价参数[J]. 天然气工业, 2022, 42(11): 141-154.
- YOU Bing, CHEN Jianfa, XIAO Hong, et al. Characteristics and key evaluation parameters of helium source rocks in helium-rich natural gas reservoirs[J]. Natural Gas Industry, 2022, 42(11): 141-154.
- 张梦婷,李文厚,李玉宏,等. 渭河盆地及周缘上古生界残留地层分布及油气意义[J]. 地质科学, 2019, 54(2): 423-433.
- ZHANG Mengting, LI Wenhui, LI Yuhong, et al. Residual stratigraphic distribution and hydrocarbon significance of Upper Paleozoic in Weihe Basin and its adjacent area[J]. China Journal of Geology, 2019, 54(2): 423-433.
- 张乔,周俊林,李玉宏,等. 渭河盆地南缘花岗岩中生代氦元素 (U, Th) 赋存状态及制约因素研究——以华山复式岩体为例[J]. 西北地质, 2022, 55(3): 241-256.
- ZHANG Qiao, ZHOU Junlin, LI Yuhong, et al. 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[J]. *Northwestern Geology*, 2022, 55(3): 241–256.
- 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(2): 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(2): 235–260.
- 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.
- 张作祥, 金大伟, 白凤有, 等. 天然气中氦资源评价方法探讨[J]. *科学发现*, 2018, 6(1): 1–5.
- ZHANG Zuoxiang, JIN Dawei, BAI Fengyou, et al. Discussion on Evaluation Method of Helium Resources in Natural Gas[J]. *Science Discovery*, 2018, 6(1): 1–5.
- 钟清, 孟小红, 刘士毅. 重力资料定位地质体边界问题的探讨[J]. *物探化探计算技术*, 2007, 29(S1): 35–38+13+14.
- ZHONG Qing, MENG Xiaohong, LIU Shiyi. A discussion of boundry mapping by using gravity data[J]. *Computing Techniques for Geophysical and Geochemical Exploration*, 2007, 29(S1): 35–38+13+14.
- 周俊林, 李玉宏, 魏建设, 等. 渭河盆地固市凹陷华州北地区氦气地质条件与富集模式[J]. *西北地质*, 2022, 55(4): 33–44.
- ZHOU Jinlin, LI Yuhong, WEI Jianshe, et al. Geological conditions and enrichment model of helium in North Huazhou area of Gushi Depression, Weihe Basin, China[J]. *Northwestern Geology*, 2022, 55(4): 33–44.
- Anderson S T. Economics, helium, and the U. S. Federal Helium Reserve: Summary and outlook[J]. *Nat Resour Res*, 2018, 27: 455–477.
- Améglio L, Vignerresse J L. Geophysical imaging of the shape of granitic intrusions at depth: a review[M]. Geological Society, London, Special Publications, 1999, 168(1): 39–54.
- 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.
- Brown A A. Formation of High Helium Gases: A Guide for Explorationists[C]. AAPG Convention, New Orleans, Louisiana, USA, 2010.
- Brown, M. Granite: From genesis to emplacement[J]. *GSA bulletin*, 2013, 125(7-8): 1079–1113.
- Danabalan D, Gluyas J G, Macpherson G G, et al. New High-Grade Helium Discoveries in Tanzania[C]. Yokohama, Japan: Goldschmidt Conference, 2016.
- Danabalan D, Gluyas J G, Macpherson C G, et al. The principles of helium exploration[J]. *Petroleum Geoscience*, 2022, 28(2), pet-geo2021-029.
- Haederle M, Atherton M P. Shape and intrusion style of the Coastal Batholith, Peru[J]. *Tectonophysics*, 2002, 345(1–4): 17–28.
- Jiang Y H, Jin G D, Liao S Y, et al. Geochemical and Sr–Nd–Hf isotopic constraints on the origin of Late Triassic granitoids from the Qinling orogen, central China: implications for a continental arc to continent–continent collision[J]. *Lithos*, 2010, 117(1–4): 183–197.
- Mahdy N M, El Kalioubi B A, Wohlgemuth-Ueberwasser C C, et al. Petrogenesis of U- and Mo-bearing A2-type granite of the Gattar batholith in the Arabian Nubian Shield, Northeastern Desert, Egypt: Evidence for the favorability of host rocks for the origin of associated ore deposits[J]. *Ore Geology Reviews*, 2015, 71: 57–81.
- McCaffrey K J W, Cruden A R. Dimensional data and growth models for intrusions, in Breikreuz, C., Mock, A., and Petford, N., eds., First International Workshop: Physical Geology of Subvolcanic Systems—Laccoliths, Sills and Dikes (LASI) [M]: Freiberg, Germany, Wissenschaftliche Mitteilung Institute für Geologie Technische Universität Bergakademie Freiberg, 2002, 37–39.
- Nie H K, Liu Q Y, Dang W, et al. Enrichment mechanism and resource potential of shale-type helium: A case study of Wufeng Formation–Longmaxi Formation in Sichuan Basin[J]. *Science China Earth Sciences*, 2023, 66(6): 1279–1288.
- Pacheco N. Helium, Mineral Commodity Summaries, Helium[M]. Government Printing Office, 2002: 78–79.
- Petford N, Cruden A R, McCaffrey K J W, et al. Granite magma formation, transport and emplacement in the Earth's crust[J]. *Nature*, 2000, 408(6813): 669–673.
- Sumita I, Ota Y. Experiments on buoyancy-driven crack around the brittle-ductile transition[J]. *Earth and Planetary Science Letters*, 2011, 304: 337–346.
- Xue Y Y, Siebel W, He J F, 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 W, Li Y H, Zhao F H, et al. Using noble gases to trace groundwater evolution and assess helium accumulation in Weihe Basin, central China[J]. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 2019, 251: 229–246.
- Zhang Q, Zhou J L, Li Y H, et al. Discovery of bauxite-type helium source rock in Jinzhong basin, central North China and its resource potential evaluation[J]. *China Geology*, 2023, 6(4): 753–755.