

• 特别专题：中国科协青年人才托举工程博士生专项计划学术沙龙 •

东天山印支期花岗岩浆活动与稀有金属成矿作用 ——以国宝山铷矿床为例

吴世保¹, 雷如雄^{1*}

1. 长安大学 地球科学与资源学院, 南二环中段长安大学 710000

高分异花岗岩与稀有金属矿化密切相关,然而控制稀有金属富集的机制及其具体过程仍未得到充分约束。位于中国东天山的国宝山铷(Rb)矿床是最大的与花岗岩相关的铷矿床之一,其保存了从黑云母花岗岩、白云母花岗岩到富铷的天河石花岗岩和伟晶岩的一系列渐变岩相,为研究花岗岩体系中铷的富集过程提供了绝佳的机会。国宝山大型铷矿床的 Rb_2O 资源量达 28.1 万 t, 平均品位为 0.12%, 主要赋存于含天河石花岗岩和天河石花岗岩岩相中。在本研究中,我们综合了年代学、全岩地球化学、Nd 同位素和锆石 Hf 同位素数据,以表征国宝山花岗岩岩体的演化过程,并揭示铷富集的机制。黑云母花岗岩的锆石 U-Pb 年龄为 $(244.8 \pm 1.8) \text{ Ma}$ (1σ , MSWD=1.1), 而天河石花岗岩的铀铁矿 U-Pb 年龄为 $(241.9 \pm 2.3) \text{ Ma}$ (1σ , MSWD=1.0)。含天河石花岗岩、天河石花岗岩和伟晶岩中正长石、云母和钠长石的原位 Rb-Sr 年龄分别为 $(249.1 \pm 7.3) \text{ Ma}$ (2σ , MSWD=1.6)、 $(245.5 \pm 16.8) \text{ Ma}$ (2σ , MSWD=0.63) 和 $(245.8 \pm 9.8) \text{ Ma}$ (2σ , MSWD=3.3)。这些年龄数据共同表明国宝山花岗岩岩体形成于三叠纪,并经历了长期的岩浆演化。国宝山花岗岩岩体具有高硅富碱和铝含量,以及低镁铁钙磷钛含量的特征,其铝饱和指数(A/CNK)为 1.01~1.14。该岩体富集 Rb, 但亏损 Ba、Sr、P 和 Eu, 稀土元素总量较低 ($83.1 \sim 221 \times 10^{-6}$),

并表现出显著的负 Eu 异常 ($\text{Eu}/\text{Eu}^* = 0.01 \sim 0.44$)。黑云母花岗岩富集轻稀土元素,而白云母花岗岩、含天河石花岗岩、天河石花岗岩和伟晶岩则亏损轻稀土元素,并表现出明显的四分组效应 ($\text{TE}_{1,3} = 1.05 \sim 1.50$)。这些地球化学特征,结合 Zr/Hf、Nb/Ta、Y/Ho 和 K/Rb 的非离子电荷-半径控制的比值,表明国宝山岩浆演化过程中存在熔-流体相互作用。黑云母花岗岩作为演化程度相对最低的岩石相,其岩相学和地球化学特征表明其为 I 型花岗岩。略微变化的 $\epsilon\text{Hf}(t)$ 值和一致的负 $\epsilon\text{Nd}(t)$ 值表明,国宝山花岗岩体的岩浆源区可能为中元古代地壳,仅有少量地幔物质的加入。这些岩石的同期年龄、一致的地球化学变化和矿物组成表明,它们是通过同一岩浆系统中斜长石、云母、石英和钾长石的分离结晶作用形成的,这一结论得到了 Rhyolite-MELTS 模拟的支持。基于白云母花岗岩、含天河石花岗岩、天河石花岗岩和伟晶岩的岩石学、矿物学变化特征以及地球化学特征,结合 Rhyolite-MELTS 与瑞利分馏模拟的结果,我们认为花岗质岩浆的高度分离结晶作用及其与富 F 流体的相互作用是铷富集的关键机制,而熔-流体相互作用对铷矿化的贡献更为关键。

关键词: 高分异花岗岩; 熔-流体相互作用; Rhyolite-MELTS; 国宝山铷矿床

基金项目:“战略性关键金属超常富集成矿动力学”重大研究计划重点支持项目(91962214)、新疆重点研发计划“塔里木-南天山结合带稀有稀土金属成矿潜力关键技术研究”项目(2022B03015)

第一作者简介:吴世保(1999-),博士研究生,研究方向:矿床学. Email: wsb@chd.edu.cn

*通信作者简介:雷如雄(1987-),教授,研究方向:矿床学. Email: ruxionglei@chd.edu.cn

• 特别专题：中国科协青年人才托举工程博士生专项计划学术沙龙 •

闪锌矿 S-Zn 同位素原位分析的参考物质研究

聂晓娟¹, 袁洪林^{1*}

1. 西北大学 地质学系, 西安 710069

本研究合成了一种基体匹配的合成闪锌矿标准物质, 用于 LA-MC-ICP-MS 原位硫同位素比测定。PAS 合成的闪锌矿表面光滑致密, 易于抛光和保存。对 PAS 合成的闪锌矿进行了电子探针分析和绘制了元素分布图, 表明其主要元素具有良好的均匀性。用 LA-MC-ICP-MS 分析 PAS 合成的闪锌矿, 在五个月内其长期测量精度优于 0.20‰ (2SD), 并使用 MSWD、F 检验和 H 指数来检查均一性。此外, 以 PAS 合成的闪锌矿为标准, 对天然闪锌矿 NBS123 和 SPH-1 进行了均匀性测试。所有结果表明, 不仅 $\delta^{34}\text{S}_{\text{V-CDT}}$ 值的再现性良好, 而且 PAS 合成的闪锌

矿的硫同位素组成的平均值在分析不确定度内与 GS-IRMS 测量的值一致, 表明 PAS 合成的闪锌矿可以作为基体匹配的闪锌矿硫同位素标样。

根据组合不确定度的计算, 我们建议将 $-5.44 \pm 0.18\text{‰}$ (2SD) 作为 PAS 合成闪锌矿的参考 $\delta^{34}\text{S}_{\text{V-CDT}}$ 值。PAS 合成的闪锌矿目前有大量可供分享, 可应世界各地实验室的要求, 如需请联系 (电子邮件: yhlslcd@126.com)。

关键词: 闪锌矿, 硫同位素, LA-MC-ICP-MS, 基体匹配, 标准物质

基金项目: 国家自然科学基金项目 (42130102, 42173033 和 41825007)

第一作者简介: 聂晓娟 (2000-), 博士研究生, 研究方向: 分析地球化学. Email: 740867698@qq.com

*通信作者简介: 袁洪林 (1974-), 教授, 研究方向: 分析地球化学. Email: yhlslcd@126.com

• 特别专题：中国科协青年人才托举工程博士生专项计划学术沙龙 •

冀东地区中元古代雾迷山组富锂岩系中锂的 细致赋存形式研究

徐飞¹, 温汉捷^{1*}

1. 长安大学 地球科学与资源学院, 西安 710054

锂作为一种战略性关键金属,在新兴能源领域发挥着重要作用,特别是在驱动新能源经济的锂离子电池方面。最近,在华北东缘中元古代雾迷山组白云岩中发现了富锂层位 ($\text{Li}_2\text{O}>0.3\%$),其地层分布广泛、厚度大和层位稳定,表明锂资源开发潜力巨大。本研究以冀东地区中元古代雾迷山组富锂样品为研究对象,采用场扫描电镜、飞行时间二次离子质谱、高分辨透射电镜和核磁共振等原位微区分析技术对雾迷山组锂的细致赋存形式进行探讨,旨在全面理解锂的超常富集机制。研究表明,冀东地区雾迷山组富锂样品主要由白云石和石英组成,其次是伊利石、伊蒙混层和绿泥石等黏土矿物,还有少量钾长石、钠长石、黑云母、氟磷灰石、方解石、重晶石、萤石和赤铁矿等。根据矿物的形貌特征和共生组合关系,钾长石、钠长石、黑云母和氟磷灰石等矿物与高于庄组凝灰岩中相似,表明这些矿物除陆源碎屑输入之外,还可能由火山活动输入。浸染状和脉状的重晶石和萤石切割

赤铁矿、石英、伊利石等现象,表明重晶石和萤石为后期热液成因矿物。原位微区分析和 $^7\text{Li-NMR}$ 表明,锂主要赋存于自生的伊利石和伊蒙混层的八面体结构中,而碎屑的伊利石和绿泥石、未蚀变的钾长石以及白云石中不富集锂。靠近重晶石、萤石和方解石脉的黏土矿物中锂和氟的明显富集,以及全岩样品锂与氟之间的强正相关性表明,后期富锂和氟的热液流体对锂的富集及其载体矿物的形成具有促进作用。根据黏土矿物的共生组合表明,富锂伊利石由钾长石热液蚀变而来。在持续的热液流体蚀变作用下,这些富锂伊利石进而转变为一系列的富锂伊蒙混层,其中包括富伊利石的伊蒙混层和富豪皂石的伊蒙混层。这些发现为这一有前景的锂资源的勘探、开发提供了有价值的见解。

关键词: 冀东地区; 雾迷山组; 富锂伊利石; 富锂伊蒙混层; 热液流体

基金项目: 国家自然科学基金 (92162214), 中国科学院战略性先导科技专项 (编号 XDA0430103)

第一作者简介: 徐飞 (1994-), 博士研究生, 研究方向: 沉积型锂资源的赋存状态和富集机制. Email: xfei1018@163.com

*通信作者简介: 温汉捷 (1971-), 教授, 研究方向: 三稀元素 (稀土、稀有、稀散) 地球化学及成矿机制. Email: wenhanjie@vip.gyig.ac.cn

• 特别专题：中国科协青年人才托举工程博士生专项计划学术沙龙 •

华北克拉通晚古生代含铝岩系关键元素 富集特征及其成因机制

王壮森¹, 李勇^{1*}

1. 中国矿业大学(北京)地球科学与测绘工程学院, 北京 100083

华北克拉通上石炭统本溪组含铝岩系是我国重要的铝土矿资源之一, 其关键元素(Li、B、REE等)的富集机制对于资源开发和成矿理论具有重要意义。本研究选取鄂尔多斯盆地东部(陕西府谷及山西河曲、保德、临县、兴县等地)剖面为研究对象, 系统分析了含铝岩系的岩矿组成、地球化学特征。结果表明, 含铝岩系主要由一水硬铝石、一水软铝石、高岭石、伊利石、绿泥石、赤铁矿、锐钛矿等矿物组成, 呈现致密块状、豆鲕状、多孔状及碎屑状等结构。基于矿物学特征, 提出基于铁矿物端元、铝的氢氧化物及钛矿物端元、黏土矿物及其他矿物端元含铝岩系的分类方案, 将其划分为铝土岩、泥质铝土岩、铁质铝土岩、泥岩、铝质泥岩、铁质泥岩、铁岩、泥质铁岩和铝质铁岩共 9 种类型。研究区含铝岩系主要为泥岩、铝质泥岩、泥质铝土岩和铁岩 4 种。通过系统对比华北地区野外露头及

岩心资料, 含铝岩系的剖面结构从下到上分为 5 段: 富铁层段、含铝层段、铝土矿层段、含铝层段和暗色泥岩段。通过微量元素、扫描电镜-能谱及探针微区激光联合分析揭示了关键元素(Li、B、REE)的赋存状态及富集机制。Li 主要赋存于锂绿泥石中, 通过类质同象/吸附作用赋存于黏土矿物表面, 特别是在上部含铝泥岩层段富集。B 主要吸附于伊利石, 在伊利石向高岭石的转化过程中部分释放; REE 主要赋存在黏土矿物、一水硬铝石和一水软铝石中; B 和 REE 主要富集于下部铝土矿层段和含铝泥岩层段。本研究不仅对关键元素的勘探与开发具有重要价值, 同时也可有助于揭示地球表层风化过程中元素迁移与富集的基本规律。

关键词: 华北克拉通、含铝岩系、锂、硼、稀土元素

基金项目: 中国石油科技创新基金项目(2021DQ02-1003)

第一作者简介: 王壮森(1995-), 博士研究生, 研究方向: 煤系矿产资源. Email: 18810361039@163.com

通讯作者简介: 李勇(1988-), 教授, 研究方向: 煤层气及煤系成矿学. Email: liyong@cumtb.edu.cn

• 特别专题：中国科协青年人才托举工程博士生专项计划学术沙龙 •

地幔深部碳封存形成高氧化异常熔体

董栩含¹, 王水炯^{1*}

1. 中国地质大学 (北京), 北京 100083

深部碳循环在调控地幔动力学过程及维系地球宜居环境方面扮演着至关重要的角色。前人通过金属同位素分析发现中国东部大地幔楔是一个巨大的碳库。研究表明, 西太平洋板块的持续西向俯冲并滞留地幔过渡带, 携入大量表生碳至大地幔楔, 触发了挥发份循环、改变了地幔氧化还原状态, 并显著影响了地表环境。本研究通过对中国东部典型新生代玄武岩进行全岩 $\text{Fe}^{3+}/\Sigma\text{Fe}$ 比值分析, 发现这些玄武岩具有极高的 $\text{Fe}^{3+}/\Sigma\text{Fe}$ 比值, 显著高于大洋玄武岩, 与岛弧玄武岩相近。然而, 在 U/Pb 与 Th/Ba 比值的相关性上, 它们却与典型的岛弧岩浆体系存在显著差异。本研究认为, 中国东部新生代玄武岩的高度氧化与地幔过渡带停滞的太平洋板块相关, 该板块在俯冲过程中优先失去流体流动性元素。这些玄武岩的 $\text{Fe}^{3+}/\Sigma\text{Fe}$ 比值与 $\text{CaO}/\text{Al}_2\text{O}_3$ 、 Zr/Nd 、 Ti/Ti^* , Hf/Hf^* , $\delta^{26}\text{Mg}$ 及 $\delta^{66}\text{Zn}$ 等地球化学参数之

间的显著相关性强烈暗示了碳酸盐熔体在高度氧化的玄武岩成因中的重要作用。通过第一性原理计算, 本研究揭示了金刚石因密度高于地幔熔体而自然沉降, 此机制显著促进地幔源区高氧逸度状态形成。经计算, 本研究估测中国东部地幔过渡带内潜在的碳储量达到约 2400 千兆吨 (Gt), 这一数值相当于工业革命前大气中碳储量的四倍。因此, 我们提出: 全球板内玄武岩存在一个共同高度氧化的地幔端元 (Highly Oxidized Mantle Endmember, HOME), 其形成和再循环碳深部封存密切相关, 形成了中国东部独特的高度氧化的新生代板内玄武岩。HOME 的形成和深部碳封存对地幔的热动力学演化以及表生气候的调控具有重要意义。

关键词: 深部碳循环; 板内玄武岩; 再循环碳酸盐; 高度氧化的地幔端元

基金项目:

国家重点研发计划 (2022YFF0801004)

国家重点研发计划 (2019YFA0708404)

国家自然科学基金 (41973010)

中央高校基本科研业务费专项资金 (2652023001)

第一作者简介: 董栩含 (1997-), 博士研究生, 研究方向: 同位素地球化学与岩石地球化学. E-mail: dxh@email.cugb.edu.cn

*通信作者简介: 王水炯 (1986-), 教授, 研究方向: 同位素地球化学与岩石地球化学. E-mail: wsj@cugb.edu.cn

• 特别专题：中国科协青年人才托举工程博士生专项计划学术沙龙 •

华北克拉通新太古晚期赞皇 BIF 成因： 地质和古环境意义

蒋康¹，王军鹏^{1*}，Timothy Kusky¹，王璐²

1. 中国地质大学（武汉）地球科学学院，武汉市 430074；

2. 中国地质大学（武汉）地质过程与矿产资源国家重点实验室，武汉市 430074

条带状铁建造（BIF）是一种海相化学沉积岩，由层状硅质条带和铁质条带组成，主要形成于太古代和古元古代。BIF 是早期地球地质、生物和大气海洋环境演化特定阶段的产物，与铁建造密切相关的铁矿床不仅是最重要的铁矿类型，而且其物源特征和沉积环境可为研究早前寒武纪古海洋的化学成分、氧化还原环境提供重要信息。本研究采用大比例尺地质填图、岩石学、主微量元素地球化学、锆石 U-Pb 年代学和 Sm-Nd 同位素等方法，对华北克拉通赞皇地块中一套新太古代 BIF 开展详细研究，并对整个华北地区太古宙至古元古代 BIF 进行了统计分析。该研究为揭示古海洋化学成分、氧化还原环境以及地质-环境协同演化与 BIF 形成的关系提供了约束。赞皇 BIF 主要由石英和磁铁矿组成，富铁条带中含有铁闪石、阳起石（铁阳起石）和石榴石，属于阿尔戈马型 BIF。与 BIF 伴生沉积岩的锆石 U-Pb 年龄表明，赞皇 BIF 形成于~2.51 Ga。赞皇 BIF 为纯化学沉积岩，其中 Al₂O₃、TiO₂ 含量很低，高场强元素 Zr、Hf、Th、U 含量较高。BIF 亏损轻稀土元素，La 和 Y 呈正异常，与现代海水的地球化学特征相似。而 Eu 正异常和含量相对较高的过渡金属元素表明高温热液流体是 BIF 沉积物质的主要来源。此外 BIF 低于海水的 Y/Ho 比值和高于海水的 Sm/Yb 比值表明沉积水体有 10%~20% 的淡水输入，

或者洋壳衍生流体等其他流体参与 BIF 沉积。赞皇 BIF 全岩 $\epsilon_{Nd}(t)$ 值 (-2.16~+2.1) 变化范围很大，表明壳源物质对海水 Nd 同位素组成的复杂贡献。赞皇 BIF 具有 Ce 无异常和低 (Pr/Yb)_{SN} 比值的特征，表明 BIF 的沉积盆地仍处于缺氧状态。赞皇 BIF 形成于岛弧构造环境，弧陆碰撞不仅为 BIF 沉积提供了合适的沉积盆地，伴随的岩浆和热液作用更是供给了丰富的物质来源。统计表明，华北地区太古宙-古元古代 BIF 的峰期沉积年龄为~2.54 Ga。大多数华北克拉通 BIF 为阿尔戈马型，少数古元古代 BIF 为苏比利尔型。<0.1%~1% 的现代海底高温热液和海水混合可以解释 BIF 的 REE+Y 配分特征，而 $\epsilon_{Nd}(t)$ 值表明海水中可能有陆源物质的贡献。BIF 的 Eu 异常值表明~2.7 Ga 和~2.55 Ga 是华北克拉通海底热液和岩浆活动的两个高峰，分别对应华北克拉通地壳生长和俯冲碰撞事件。Ce 异常和 Fe 同位素证据显示，在~2.5 Ga 之前，海洋整体缺氧但可能局部存在氧气绿洲，而在 GOE 期间逐渐转变氧化还原分层。华北克拉通 BIF 大多形成于与岛弧相关的构造环境，而古元古代的 BIF 则可能反映了裂谷—俯冲环境。

关键词：条带状铁建造；赞皇地块；新太古代；构造环境；华北克拉通

基金项目：国家自然科学基金面上项目（42372231）

第一作者简介：蒋康（1998-），博士研究生，研究方向：前寒武纪地质学。Email: kangjiang@cug.edu.cn

*通信作者简介：王军鹏（1986-），教授，研究方向：前寒武纪地质学。Email: wangjp@cug.edu.cn

· 特别专题：中国科协青年人才托举工程博士生专项计划学术沙龙 ·

页岩气成藏与保存过程中页岩裂缝开启与胶结作用时间差异性对比-以涪陵页岩气田五峰组—龙马溪组页岩为例

罗涛¹, 郭小文^{1*}

1. 中国地质大学(武汉)资源学院, 武汉 430074

中国南方海相页岩在多期次埋藏和隆起过程中具有高热演化和强烈变形的特点。在经历不同构造演化的页岩储层中, 与构造活动、成岩作用、油气生成和迁移过程相关的裂缝和脉体分布广泛且差异较大。在这项研究中, 我们利用横切关系、流体包裹体显微测温、激光拉曼光谱以及裂缝充填方解石脉的 U-Pb 定年, 结合埋藏史模拟, 阐明了五峰-龙马溪页岩储层的裂缝开启的时间和机制, 以及涪陵页岩气田的区域变化。页岩储层中的层理平行裂缝(BFs)充满了方解石和石英脉。根据最低均一化温度和 U-Pb 年代测定, 页岩裂缝开启时间估计发生在大约 191~122 Ma, 在此期间, 一些短的垂直(或高角度)裂缝(VFs)分别在 163.4 Ma 和 137 Ma 左右打开, 随后分别被方解石脉胶结。这些断裂内的方解石脉和石

英脉均含有高密度甲烷包裹体, 而页岩储层则处于高成熟演化阶段。这表明, 压裂主要是由深埋过程中产生的气体超压驱动的。在断层带褶皱附近的页岩储层中, 发育了多级断裂, 包括三期交切的裂缝(IFs)和一段长 VF。裂缝开启和胶结的时间与燕山构造隆起(约 83~69 Ma)相吻合, 强烈的构造运动可能导致构造抬升过程中页岩气的排出, 反映出页岩气保存条件遭到破坏。与此相反, 在构造平缓带没有观察到明显的裂缝开启或胶结作用过程。不同的断裂和胶结过程表明, 在构造抬升过程中, 随着裂缝数量的增加, 保存条件也在下降, 这与页岩气的富集有关。

关键词: 裂缝, 方解石 U-Pb 定年, 流体包裹体, 五峰-龙马溪页岩, 四川盆地

基金项目: 国家自然科学基金项目 (No. U20B6001; No. 92255302; No. 42172157)

第一作者简介: 罗涛 (1995-), 博士研究生, 研究方向: 流体演化与油气成藏. Email: cugluotao@126.com

*通信作者简介: 郭小文 (1980-), 教授, 研究方向: 油气成藏机理. Email: cuggxw@163.com

• 特别专题：中国科协青年人才托举工程博士生专项计划学术沙龙 •

华北克拉通冀东地区新太古代晚期 TTG 片麻岩年代学及地球化学研究

井佳浩¹, 刘潜^{1*}, 赵国春^{2,1}, 孙晨阳¹

1. 西北大学 大陆演化与早期生命全国重点实验室, 地质学系, 西安 711069;

2. 香港大学 地球科学系, 香港 999077

现有研究表明, 太古宙是大陆地壳形成与演化的重要时期, 至少 60%~80% 的现今大陆地壳形成于该阶段, 且新太古代早期 (~2.7 Ga) 是全球大陆地壳生长的峰期, 同时也是全球岩浆活动及锆石年龄峰期。相比于世界其他典型克拉通, 华北克拉通发育强烈的新太古代晚期构造岩浆活动 (~2.5 Ga)。关于该期次岩浆活动是否代表华北克拉通一次显著的地壳生长一直存在争议。另一方面, 英云闪长岩-奥长花岗岩-花岗闪长岩岩石组合 (Tonalite-Trondhjemite-Granodiorite, TTG) 是太古宙大陆地壳的重要组成部分, 因而其岩石成因几乎代表了早期陆壳形成方式, 从而成为另一亟待解决的科学问题。为此, 本文选择华北克拉通新太古代基底典型出露的冀东地区, 对研究区内广泛分布的 TTG 片麻岩进行详细的岩相学、锆石 U-Pb 年代学、全岩地球化学以及锆石 Hf 同位素的综合研究, 讨论其形成时代及岩石成因。

年代学研究表明, 冀东地区 TTG 片麻岩原岩结晶年龄为 2554~2547 Ma, 变质年龄介于 2510~2485 Ma, 与冀东地区 ~2.5 Ga 的区域变质作用时代一致。此外, 本文样品的岩浆锆石均具有正的且接近同时期亏损地幔的锆石 $\epsilon_{\text{Hf}}(t)$ 值 (+5.0~+7.5), 且模式年龄 (2673~2578 Ma) 与锆石结晶年龄相差不大 (<200 Ma), 指示 TTG 片麻岩原岩起源于新生地壳物质的部分熔融。结合研究区内新太古代壳岩中基性火山岩的广泛出露, 本文认为冀东地区新太古代晚期存在一次显著的地壳生长。

地球化学分析结果显示, 冀东地区 TTG 片麻岩具有较高的 SiO_2 (66.54%~75.31%)、 Al_2O_3 (14.21%~18.30%)、Sr (296×10^{-6} ~ 1113×10^{-6}) 含量和低的 Y (0.80×10^{-6} ~ 7.20×10^{-6})、Yb (0.06×10^{-6} ~ 0.58×10^{-6}) 含量, 以及较高的 Sr/Y (94.81~1420)、(La/Yb) N (16.20~89.09) 比值, 并相对富集轻稀土元素和大离子亲石元素, 与典型的埃达克质岩石地球化学特征类似。此外, 这些样品均具有较低的 MgO (0.14%~1.98%) 以及 Cr (2.67×10^{-6} ~ 51.4×10^{-6})、Co (1.45×10^{-6} ~ 12.3×10^{-6})、Ni (2.52×10^{-6} ~ 26.7×10^{-6}) 含量, 指示其为加厚下地壳部分熔融形成的埃达克质岩石。本文样品属于 Moyen et al (2011) 划分的高压型 TTG, 并具有较高的 Nb/Ta 和 Zr/Sm 比值, 指示源区残留相为金红石和石榴子石。同时, 所有样品具有显著的 Eu 正异常及较高的 Sr 含量, 进一步说明其源区无斜长石的残留。基于太古宙拉斑玄武质岩石的平均成分, 利用简单的批式部分熔融模型进行模拟, 结果显示 TTG 片麻岩最有可能是含金石榴辉岩低程度 (10-25%) 部分熔融的产物。综合上述证据, 本文认为冀东地区新太古代晚期 TTG 片麻岩原岩来源于新生的镁铁质加厚地壳的部分熔融, 石榴子石和金红石是源区主要的残留矿物, 无斜长石残留。

关键词: 华北克拉通; TTG 片麻岩; 地壳生长; 岩石成因

基金项目: 国家自然科学基金项目 (42272249)

第一作者简介: 井佳浩 (1996-), 博士研究生, 研究方向: 前寒武纪地质学. Email: jingjh@stumail.nwu.edu.cn

通信作者简介: 刘潜 (1988-), 教授, 研究方向: 岩石大地构造、超大陆古地理重建、大陆风化与古环境. Email: liuqian@nwu.edu.cn

• 特别专题：中国科协青年人才托举工程博士生专项计划学术沙龙 •

基于机器学习的磁性矿物识别与宏观磁学反演

裴召文¹, 常燎^{1*}

1. 北京大学 地球与空间科学学院, 北京市 100871

磁性矿物广泛存在于岩石、沉积物和陨石等自然样品中, 在地球各圈层及地外天体的研究中具有重要意义。磁学性质是磁性矿物学研究的核心, 但其表征面临两大挑战: 一是许多磁性矿物处于纳米尺度; 二是部分矿物在样品中含量极低。这些特性使得直接观测磁性变化和开展控制实验变得困难。因此, 当前研究主要依赖宏观全岩磁性测量和少量样品的高分辨率显微观测。然而, 全岩磁性参数解译存在主观性和多解性问题, 且缺乏定量化解译工具。机器学习算法的发展为解决上述问题提供了新途径。本研究开发了基于卷积神经网络的磁性矿物显微图像原位识别框架 MagNet, 可高效提取磁性

矿物的尺寸、形状和位置等信息, 并基于原位信息建立微磁模型, 定量计算其磁学性质。此外, 针对一阶反转曲线这一重要岩石磁学方法, 我们提出了基于卷积神经网络的磁性反演框架 FORCINN, 可直接从宏观磁学性质反演磁性矿物的尺寸和形状特征。通过机器学习方法, 本研究实现了磁性矿物的图像自动识别与宏观磁学参数的精确反演, 为磁性矿物学研究的定量化和智能化发展提供了重要支持。

关键词: 磁性矿物, 机器学习, 磁学性质, 图像识别, 磁学反演

第一作者简介: 裴召文 (1998-), 博士研究生, 研究方向: 磁性矿物学. Email: zwpei@pku.edu.cn

*通信作者简介: 常燎 (1981-), 研究员, 研究方向: 磁性矿物学. Email: liao.chang@pku.edu.cn

· 特别专题：中国科协青年人才托举工程博士生专项计划学术沙龙 ·

火山物质诱发的湖盆 S-Fe-P 元素循环扰动与 有机质异常富集——以鄂尔多斯盆地上 三叠统黑色页岩为例

李克¹，蕙克来^{1*}

1. 中国石油大学（华东）地球科学与技术学院，山东省青岛市 266580

黑色页岩是有机碳的主要储存库，记录了碳汇过程中元素循环的重要信息。然而，由于埋藏过程中的地质改造，全面理解湖相页岩的元素循环过程仍然具有挑战性。本研究综合地质-地球化学研究方法，阐明了火山物质对铁-硫-磷元素耦合机制的扰动及其对鄂尔多斯盆地上三叠统陆相页岩中有机碳保存的影响。岩石学分析表明，有机碳富集（TOC>6%）与火山物质的输入存在成因关联，尽管页岩的有机碳峰值区间在地层上滞后于凝灰岩沉积段。火山物质输入为湖盆提供了大量的铁、磷和硫元素。火山灰空落施肥促进了湖泊中藻类、瓣鳃类和大型鱼类在短时间内迅速繁盛，但难以维持百万年时间尺度的营养供应。然而，火山来源的磷可以通过铁氧化物吸附和生物吸收被迅

速封存至沉积物中。硫酸盐的输入调节了湖盆中铁氧化的还原途径，增强了细菌硫酸盐还原作用（BSR），同时抑制了异化铁还原作用（DIR），从而使水体氧化还原条件从贫氧转变为硫化环境。在此过程中，铁合磷中的 Fe(III) 被还原为 Fe(II)，随后被形成的黄铁矿移除。随后，缺氧底水条件促进了磷从富磷沉积物中重新释放，维持了长时间尺度的湖泊生产力，最终导致了有机质的异常保存。本研究揭示了火山物质扰动后，湖泊内营养元素动态循环在有机碳埋藏中的关键作用，为理解陆相湖盆碳汇机制提供了新的见解。

关键词：黑色页岩，火山活动，有机质富集，铁-硫-磷循环，鄂尔多斯盆地

基金项目：国家自然科学基金项目（42072161）

第一作者简介：李克（1996-），博士研究生，研究方向：深水细粒沉积与页岩油气。Email: likea0619@163.com

*通信作者简介：蕙克来（1988-），教授，研究方向：深水细粒沉积与页岩油气。Email: kelai06016202@163.com