

引用格式:江勇卫,杨文博,周斌,等. 2026. 扬子北缘白田坝组含锂细碎屑岩物源与沉积环境分析[J]. 沉积学报, 44(2): 506-521.

JIANG YongWei, YANG WenBo, ZHOU Bin, et al. 2026. Analysis of Provenance and Paleodepositional Environment of Li-Bearing Fine-Grained Clastic Rocks from the Baitianba Formation, Northern Margin of the Yangtze Block[J]. Acta Sedimentologica Sinica, 44(2): 506-521.

DOI: 10.14027/j.issn.1000-0550.2024.069

CSTR: 32268.14/j.cjxb.62-1038.2024.069

# 扬子北缘白田坝组含锂细碎屑岩物源与沉积环境分析

江勇卫<sup>1,2</sup>, 杨文博<sup>1,2</sup>, 周斌<sup>1,2</sup>, 武忠山<sup>1,2</sup>, 皇甫鹏斌<sup>2</sup>, 范鹏<sup>1,2</sup>, 刘亮亮<sup>2</sup>

1. 陕西省地质调查院, 西安 710004

2. 陕西省地质调查规划研究中心, 西安 710068

**摘要** 【目的】扬子陆块北缘二叠纪—侏罗纪多个层位中锂矿化体的发现,对沉积型锂资源调查研究与开发利用意义重大。本文旨在查明侏罗系白田坝组含锂(富锂)细碎屑岩源区母岩性质及构造背景,并初步探讨古环境对锂富集的控制作用。【方法】对该组地层典型岩性开展了详细的岩石学研究,并针对含锂(富锂)细碎屑岩进行了元素地球化学研究。【结果】主量元素氧化物判别函数和 $La_N/Yb_N-\Sigma REE$ 、 $K_2O/Rb$ 、 $La/Th-Hf$ 图解显示潜在物源区是一个出露火成岩、沉积岩和变质岩的混合源区;主量元素氧化物判别函数和 $La-Th$ 、 $Ti/Zr-La/Sc$ 、 $La-Th-Sc$ 、 $Th-Sc-Zr/10$ 、 $Th-Co-Zr/10$ 图解和稀土元素参数特征反映沉积期构造背景为活动陆缘,而源区部分母岩形成于大陆岛弧环境; $Ga$ 、 $Sr/Ba$ 、 $Sr/Cu$ 、 $C$ 值、化学蚀变指数(Chemical Index of Alteration, CIA)、 $U/Th$ 、 $Ni/Co$ 等古环境指标指示含锂(富锂)细碎屑岩沉积于温暖潮湿气候条件下的弱氧化—氧化陆相淡水环境,且 $A-CN-K$ 和 $Th/Sc-Zr/Sc$ 图解说明碎屑物在首次沉积时源区母岩已经经历了中等—强烈程度的风化作用。【结论】古盐度和古还原氧化条件对锂富集的控制是表象的,而温暖潮湿的气候条件有利于黏土矿物的形成,使含锂(富锂)细碎屑岩中黏土矿物含量增加,进而控制锂的富集。锂最初可能来自弧岩浆物质。

**关键词** 白田坝组;含锂(富锂)细碎屑岩;物源分析;古环境条件;锂富集

第一作者 江勇卫,男,1987年出生,硕士研究生,工程师,地质调查与矿产勘查,E-mail: duanqiu8708@163.com

通信作者 杨文博,男,高级工程师,E-mail: boabosiji@sina.com

中图分类号:P618.71 文献标志码:A 文章编号:1000-0550(2026)02-0506-16

## 0 引言

锂是全球绿色低碳转型发展的关键元素(Sovacool *et al.*, 2020),锂—铍—钽稀有资源已经成为重要的战略性矿产资源(许志琴等, 2020)。锂矿床主要划分为伟晶岩型、卤水型和黏土型三大类(Kesler *et al.*, 2012),我国锂矿资源丰富,其中盐湖卤水型锂矿储量巨大但开发利用技术不够成熟,目前开发利用的主要是硬岩型锂矿(王登红等, 2022),锂资源利用受环境和技术双重约束对外依存度依然很高(温汉捷等, 2020)。由于沉积型锂资源具有规模大、分布稳定的特点(于沅等, 2019;代鸿章等, 2023),一旦得到工业开发利用且环保问题能够解决,那么豫西—晋南及川滇黔地区与古生代沉积岩

及铝土矿、煤系地层相伴生的锂资源,将可能在数量上超过花岗岩型和花岗伟晶岩型锂矿(王登红等, 2022)。故加强对以含锂黏土为主的沉积型锂资源的调查研究与开发利用意义重大。

前人对四川盆地油气勘探主力层系侏罗系自流井组东岳庙段、大安寨段等陆相湖盆页岩的沉积环境、有机地球化学特征、储集性能、储集空间等进行了详细的研究(郭彤楼等, 2011;丁一等, 2013;郭旭升等, 2016;舒志国等, 2021;孙莎莎等, 2021;王濡岳等, 2023),而位于四川盆地东北缘(图1a)研究区内“同物异名”的白田坝组研究程度则相对较低。杨文博等(2023)在扬子陆块北缘陕西汉中地区二叠纪—侏罗纪多个层位中发现沉积型锂矿化体,潜在经济价值巨大,为区内白田坝组深入研究锚定了方向。

收稿日期:2024-03-07;修回日期:2024-05-15;录用日期:2024-07-18;网络出版日期:2024-07-18

基金项目:陕西省公益性地质调查项目(202308, 202112)

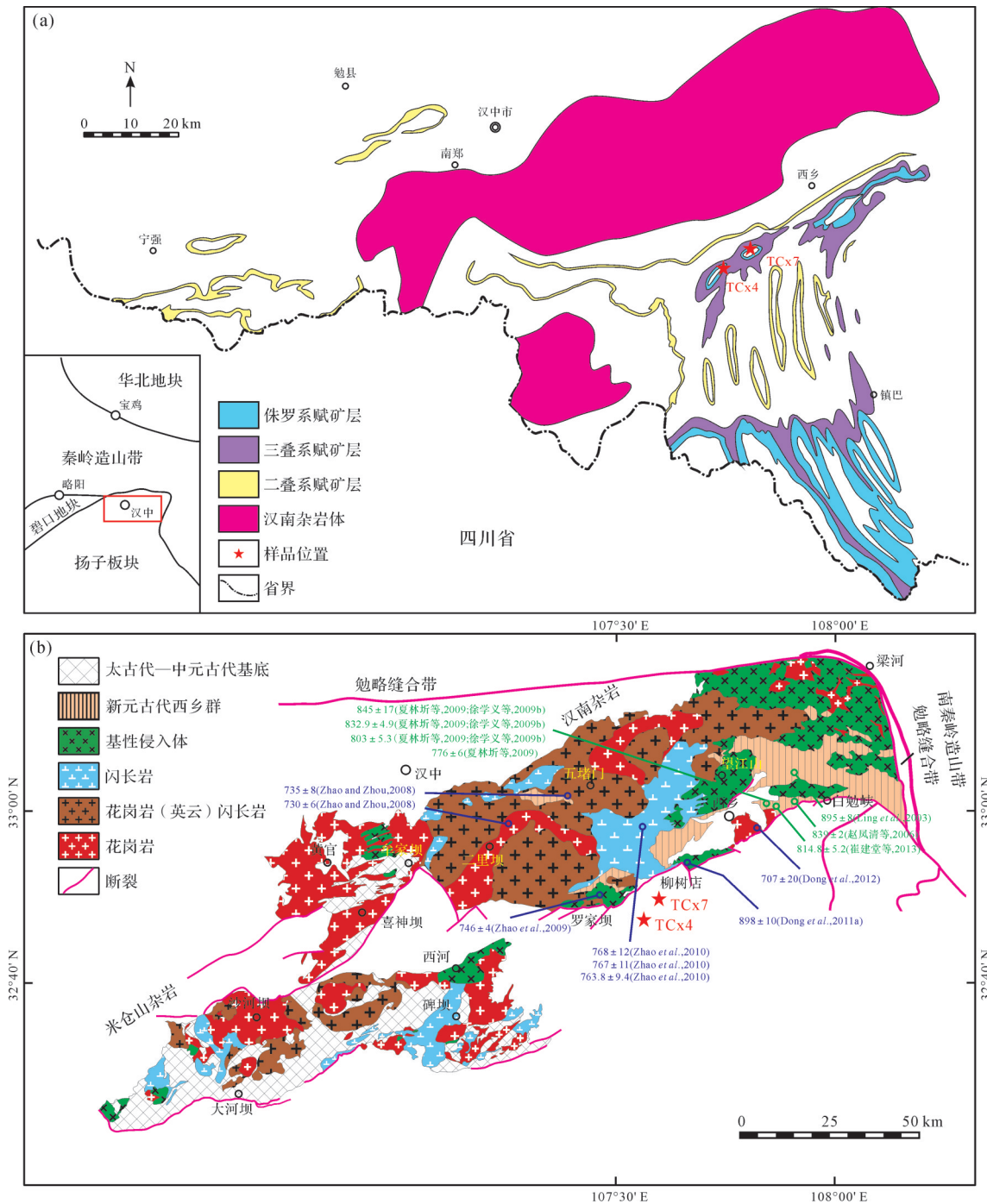


图1 扬子陆块北缘地质简图  
 (a)与沉积型锂矿有关地层(据杨文博等,2023);(b)汉南-米仓山杂岩分布(据Dong et al., 2012)

Fig.1 Simplified geological maps of the northern Yangtze Block

(a) strata related to sedimentary-type lithium deposits (after Yang et al., 2023); (b) complexes in Hannan and Micangshan massifs (after Dong et al., 2012)

本文针对区内侏罗系白田坝组典型岩性开展了详细的岩石学研究,并对含锂(富锂)细碎屑岩进行了元素地球化学分析,以期查明该组地层细碎屑岩源区母岩性质及构造背景,并初步探讨古环境条件对锂富集的控制作用。

## 1 地质背景

秦岭—大别造山带的南缘为一系列以逆冲推覆为主的断裂构造带,简称勉略构造带,勉略洋从初始扩张到俯冲消减直至最终关闭总体形成演化时限为

晚古生代至中生代初,晚三叠世后转入后造山板内构造演化时期(张国伟等,2004),研究区位于勉略构造带南侧(图1)。区内出露火山岩主要为新元古代中期(夏林圻等,1996,2009;Ling *et al.*,2003;赵凤清等,2006;徐学义等,2009a,2009b,2010;崔建堂等,2013)西乡群变质火山—沉积岩系。区内岩体主要形成于古元古代—新元古代,其中以新元古代晋宁期侵入岩体(Zhou *et al.*,2002;凌文黎等,2006;赵凤清等,2006;Zhao and Zhou,2008,2009;Zhao *et al.*,2010;Dong *et al.*,2011a,2011b,2012)规模最大,震旦纪以来未见明显岩浆活动(图1b)。但课题组最新研究成果表明上二叠统吴家坪组杂色泥岩中的岩浆成因锆石 $^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$ 加权平均年龄集中在(251.9±1.8)Ma和(265.2±1.8)Ma(未公开发表数据),意味着二叠纪研究区局部存在火山活动,或沉积期沉积了峨眉山大火成岩省远距离输送来的火山灰(尘)。

研究区内侏罗系白田坝组( $J_{1,2}b$ )分布于西乡麻柳—茶镇一带和镇巴县城—筒池坝一线以南,与下伏须家河组( $T_3x$ )呈平行不整合或不整合接触,可超覆于更老地层之上,与上覆千佛崖组( $J_{1,2}q$ )黄绿色泥岩整合过渡。本组岩性以泥岩、粉砂岩和粗粒的长石石英砂岩为主,夹薄煤层,底部常发育一层石英砾岩或含砾砂岩(刘刚,2007;张茜,2010;程立雪等,2011;何江等,2013;钱利军,2013;张拴厚等,2017),属河床—岸后沼泽相(张拴厚等,2017)。该组富锂细碎屑岩 $\text{Li}_2\text{O}$ 最高品位可达0.23%。

## 2 样品描述和分析方法

### 2.1 样品描述

通过地化综合剖面测制和槽探工程揭露,结合样品化学分析结果可初步判断,细碎屑岩中氧化锂含量更高,且总体呈现出随泥质成分增加锂含量增加的趋势(图2)。本文重点研究细碎屑岩,并将 $0.03 < \text{Li}_2\text{O}(\%) < 0.06$ 的细碎屑岩称为含锂细碎屑岩, $\text{Li}_2\text{O}(\%) > 0.06$ 者为富锂细碎屑岩。

含锂细碎屑岩以泥质粉细砂岩、粉细砂质泥岩为主,二者为渐变过渡关系;富锂细碎屑岩多为灰黑色泥质板岩(泥岩),局部碳质(有机质)含量较高。各岩性特征简述如下:(1)泥质粉细砂岩主要由泥质(约44%)、石英(约30%)、长石(约8%)、硅质岩屑(约8%,主要为燧石,偶见石英)、其他岩屑(约10%,主要为泥岩屑和千枚岩屑)和少量黑云母、褐铁矿、

金红石等组成,粉细砂结构(图3a)。(2)粉细砂质泥岩主要由泥质(约63%)、石英(约20%)、长石(约5%)、硅质岩屑(约2%)、其他岩屑(约7%,主要为泥岩屑和千枚岩屑)和少量黑云母、褐铁矿、水针铁矿等组成,粉细砂质泥质结构(图3b)。(3)泥质板岩主要由泥质(约99%)和少量晶质铀矿、沥青铀矿、生物残骸、石英等组成,可见晶质铀矿交代生物残骸和沥青铀矿交代晶质铀矿现象(图3c~f)。

TCx4底部见灰黄色块状砂砾岩,砾石含量在5%左右,以石英岩砾为主,见少量碳质硅质岩砾和灰岩砾,砾石大小介于0.2~3.0 cm,分选较差,次棱角一次圆状。TCx7底部见青灰色中厚层状中—中粗粒长石石英砂岩,表面多风化为土黄色;顶部出露灰黄色中层状细粒长石石英杂砂岩(图2)。

### 2.2 分析方法

依据“硅酸盐岩石化学分析方法 GB/T 14506”、“石灰石及白云石化学分析方法 GB/T 3286”“建材用石灰石、生石灰和熟石灰化学分析方法 GB/T 5762”和“区域地球化学样品分析方法 DZ/T 0279”灵活选择滴定管(酸式/50 mL),利用“YA172008172”型分光光度计、“日立 Z-2300”型火焰原子吸收分光光度计、“赛默飞 iCAP 7400”型电感耦合等离子体原子发射光谱仪测定主量元素氧化物含量,分析误差一般小于5%。

微量元素 La~Lu、Y、Sc、Zr、Th、Sr、Ba、Co、Ni、Hf、U、Ta、Li、Be、Cs、Cu、Pb、Bi 在 Thermo X SERIES II 型电感耦合等离子体质谱仪测定;Nb、Ga、V、Cr、Rb、Zn、Mn 在 Thermo iCAP 7400 型电感耦合等离子体原子发射光谱仪测定;Se、Ge 在北京海光仪器有限公司生产的“AFS-8520”型原子荧光分光光度计测定。除 Zr、Hf、U、Ta 采用“GB/T 14506.30—2010”方法测定外,其余微量元素均采用“DZ/T 0279”中对应部分的方法测定,分析误差一般小于5%。

## 3 岩石地球化学特征

### 3.1 主量元素特征

由表1知:含锂细碎屑岩 $\text{SiO}_2$ 含量介于56.04%~63.01%,平均为61.07%; $\text{TiO}_2$ 含量介于0.99%~1.50%,平均为1.27%; $\text{Al}_2\text{O}_3$ 含量介于15.75%~22.59%,平均为19.27%; $\text{Fe}_2\text{O}_3^T$ 介于3.39%~8.87%,平均为5.44%;MnO介于0.01%~0.07%,平均为0.03%;MgO介于0.85%~1.79%,平均为1.35%;CaO介于0.19%~0.65%,平均为0.43%; $\text{Na}_2\text{O}$ 介于0.18%~



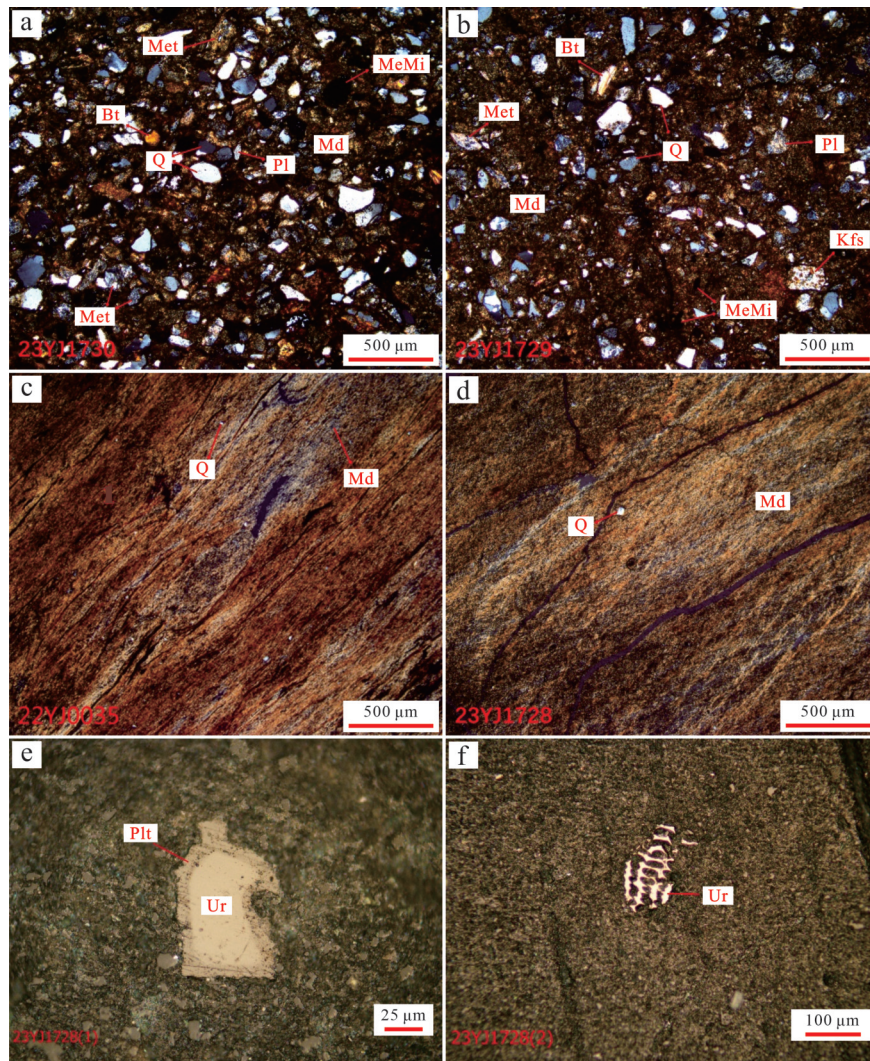


图3 典型岩性镜下鉴定特征

(a)TCx4-11-1,含锂泥质粉细砂岩(正交偏光);(b)TCx4-11-2,含锂粉细砂质泥岩(正交偏光);(c)TCx7-13,富锂泥质板岩(正交偏光);(d)TCx4-16,富锂泥质板岩(正交偏光);(e)TCx4-16,泥质板岩见晶质铀矿被沥青铀矿交代现象(反射光);(f)TCx4-16,泥质板岩见生物残骸被晶质铀矿交代现象(反射光);Q.石英;Pl.斜长石;Kfs.钾长石;Bt.黑云母;Met.岩屑;Md.泥质;MeMi.金属矿物;Ur.晶质铀矿;Plt.沥青铀矿;镜下鉴定委托“自然资源部西安矿产资源检测中心(陕西省地质矿产实验研究所有限公司)”完成

Fig.3 Photomicrographs of typical rock types

(a) TCx4-11-1, lithium-bearing argillaceous silt-fine class sandstone (+); (b) TCx4-11-2, silty-fine sandy mudstone (+); (c) TCx7-13, Li-rich argillaceous slate (+); (d) TCx4-16, lithium-rich argillite (+); (e) TCx4-16, argillaceous slate showing crystalline uraninite replaced by pitchblende (reflected light); (f) TCx4-16, argillaceous slate showing biological relics replaced by uraninite (reflected light); Q. quartz; Pl. plagioclase; Kfs. potassium feldspar; Bt. biotite; Met. lithic fragment; Md. argillaceous; MeMi. metallic minerals; Ur. crystalline uranite; Plt. pitchblende

岩样品较秦岭—大别造山带和扬子地台东部泥(页)岩总体更为亏损P和大离子亲石元素Sr、Ba、(Rb),富集高场强元素Nb、Zr、Hf、Ti;另外,富锂细碎屑岩还表现出U富集特征。

稀土元素总体呈现出轻稀土富集,重稀土亏损, Eu弱负异常特征(图4b)。富锂细碎屑岩较含锂细碎屑岩、秦岭—大别造山带和扬子地台东部泥(页)岩总体稀土元素单元含量和总量均较低,反映源区母岩特征,因为稀土元素表生条件下较稳定。

微量元素Ga、Ge、Se在含锂(富锂)细碎屑岩中富集(数据详见补充材料数据集),可能跟黏土矿物吸附有关。

## 4 讨论

### 4.1 风化作用

碎屑沉积物成分主要由物源区母岩性质决定,但表生过程和沉积成岩作用对其成分影响很大(Johnsson, 1993)。因此,碎屑岩的化学成分可以提

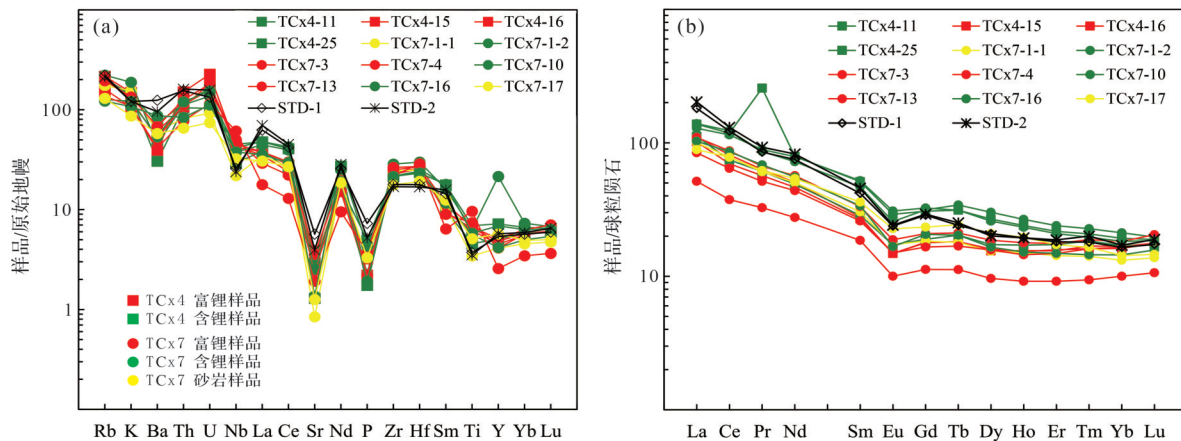


图4 样品微量和稀土元素标准化图

(a)微量元素原始地幔标准化蛛网图;(b)稀土元素球粒陨石标准化配分曲线;原始地幔和球粒陨石数据转引自Sun and McDonough, 1989;STD-1引自秦岭—大别造山带泥(页)岩总体值,STD-2引自扬子地台(东)泥(页)岩总体值,数据转引自迟清华和鄢明才,2007

Fig.4 Standardized diagrams of trace elements and rare earth elements in whole-rock samples

(a) primitive-mantle normalized trace elements; (b) chondrite-normalized REE patterns (data after Sun and McDonough, 1989); STD-1 is referenced from the average values of mudstone (shale) in the Qinling-Dabie Orogenic Belt, while STD-2 is derived from the average values of mudstone (shale) in the eastern Yangtze Platform (after Chi and Yan, 2007)

供物源区母岩风化蚀变作用的信息(McLennan, *et al.*, 1993; Milliman and Farnsworth, 2011; 张英利等, 2020)。

化学蚀变指数(Chemical Index of Alteration, CIA)用于定量评价长石的风化程度,反映长石转化为黏土矿物的风化程度(Nesbitt and Young, 1982)。其计算公式为:

$$CIA = [Al_2O_3 / (Al_2O_3 + CaO^* + Na_2O + K_2O)] \times 100 \quad (1)$$

成分变异指数(Index of Compositional Variability, ICV)用于表征矿物成分的成熟度(Cox *et al.*, 1995)。其计算公式为:

$$ICV = (Fe_2O_3^T + K_2O + Na_2O + CaO^* + MgO + TiO_2) / Al_2O_3 \quad (2)$$

上述两式中氧化物均以摩尔数为单位。CaO\*是指硅酸盐矿物中的CaO, McLennan (1993)给出了估算CaO\*的方法:  $CaO_{\text{剩余}} = CaO - P_2O_5 \times 10/3$ , 若  $CaO_{\text{剩余}} < Na_2O$ , 令  $CaO^* = CaO_{\text{剩余}}$ ; 反之, 令  $CaO^* = Na_2O$ 。CIA值越高, 指示长石的风化越强(Nesbitt and Young, 1984, 1989)。Fedo *et al.* (1995)指出: CIA=50~60, 反映弱风化程度; CIA=60~80, 为中等风化程度; CIA=80~100, 反映强烈风化。一般ICV<1说明样品成熟度高, 含有较高的高岭石、蒙脱石、绢云母等黏土矿物成分, 代表可能经历了再旋回作用或首次沉积时经历了强风化作用(Barshad, 1966; 徐小涛和邵龙义, 2018); ICV>1表明样品成熟度低, 属于构造活动背景下的首次沉积(van de Kamp and Leake, 1985)。

根据质量平衡原理, 长石淋溶实验和矿物稳定性的热力学计算, Nesbitt and Young (1984)提出大陆风化趋势预测的A-CN-K三角模型图(图5a)。大陆风化早期风化趋势线准平行于A-CN连线, 以斜长石的风化为标志; 中期风化趋势线平行于A-K连线, 以钾长石和伊利石风化为标志; 晚期阶段, 风化产物的组成落在A点附近(陈骏和王鹤年, 2004)。由投图结果(图5a)可知, 所采样品大致经历了大陆风化的早期、中期两个阶段, 风化程度中等→强烈。

因多数样品ICV<1(数据详见补充材料数据集), 而在Th/Sc-Zr/Sc图解(图5b)中, Zr/Sc和Th/Sc和谐变化且变化趋势与岩浆分异作用为主控因素时相符, 未出现Zr/Sc显著升高而Th/Sc微弱增加的趋势(McLennan *et al.*, 1993), 即样品未经受再旋回作用影响。综上, 侏罗系白田坝组细碎屑岩在首次沉积时物源区母岩已经经历了中等—强烈程度的风化作用。

#### 4.2 物源区岩石类型和大地构造背景

沉积物的化学成分与碎屑矿物构成之间存在着一定的关系, 在不同构造环境下具有不同的特征, 据此可以根据成分变化来判断物源区的性质和构造背景(解习农等, 2013)。

白田坝组含锂(富锂)细碎屑岩在主量元素氧化物含量判别函数图解(图6a)中多数位于石英质沉积物源区, 部分落入中性或铁镁质火成岩物源区。在La<sub>N</sub>/Yb<sub>N</sub>-ΣREE图解(图6b)中, 主要位于钙质泥岩和大陆拉斑玄武岩混合区, 个别样品落入钙质

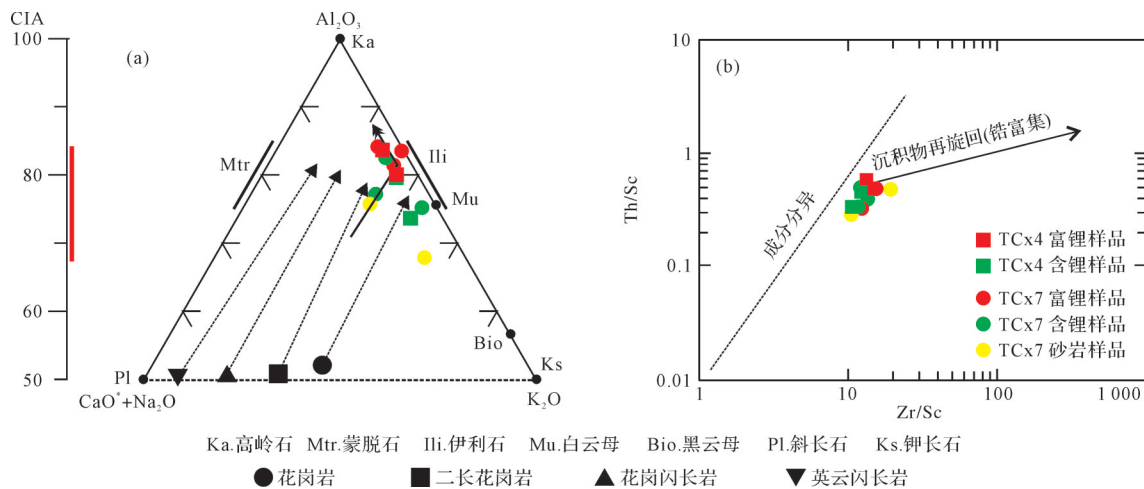


图5 白田坝组细碎屑岩化学风化趋势图

(a)  $Al_2O_3$ -( $CaO+Na_2O$ )- $K_2O$  (据 Nesbitt and Young, 1989) 与 CIA 值联合图解; (b) Th/Sc vs. Zr/Sc 图解 (据 McLennan *et al.*, 1993); CIA 值纵轴标红区域为样品 CIA 值分布范围

Fig.5 Chemical weathering trends of the fine-grained detrital rocks from Baitianba Formation

(a) Ternary plot of A-C-N-K with CIA values on ordinate axis (after Nesbitt and Young, 1989); (b) Th/Sc vs. Zr/Sc (after McLennan *et al.*, 1993); The red area on the vertical axis of the CIA value represents the distribution range of sample CIA values

泥岩区。在  $K_2O$ -Rb 图解 (图 6c) 中, 所有样品均落入粗虚线右侧中性+酸性区域, 大部分样品落入高级变质火山凝灰岩区。其中高级变质火山凝灰岩区边界线 (细虚线所示) 源自 van de Kamp (1968) 数据投点结果。在 La/Th-Hf 图解 (图 6d) 中样品落点位置分布趋势与古老沉积物组分增加的趋势一致。结合镜下鉴定结果 (图 3) 判断, 样品泥质成分较高, 并具高石英、高岩屑、低长石特征, 且岩屑以泥岩屑、千枚岩屑为主, 其源区是一个出露火成岩、沉积岩和变质岩的混合源区。

白田坝组含锂 (富锂) 细碎屑岩在主量元素氧化物判别函数图解 (图 7a) 中, 多数位于活动陆缘区, 少数落入被动陆缘区。在 La-Th、Ti/Zr-La/Sc、La-Th-Sc、Th-Sc-Zr/10 和 Th-Co-Zr/10 图解 (图 7b~f) 中, 绝大多数样品落入大陆岛弧分区或附近, 极个别样品落入大洋岛弧分区或附近, 样品投点位置表现出很好的一致性。一般认为, 在变质或交代作用过程中稀土元素是很稳定的, 滞留于原岩中的稀土元素在达到近岩浆或岩浆状态之前保持不变 (赵振华, 2016), 样品 REE 参数特征 (见前文) 均与大陆岛弧对应值一致 (表 1)。主量元素图解结果显示源区构造背景为活动陆缘 (少数点投入了被动陆缘), 微量元素判别图解和稀土元素参数特征表明构造背景为大陆岛弧, 可能是因为主量元素氧化物组成更多与沉积期构造古地理格局及相应的物源区风化剥蚀作用和搬运过程有关, 而活动性较弱的微量元

素特征更多继承自母岩 (柏道远等, 2021), 即沉积期构造背景为活动陆缘, 而源区母岩记录了其形成时的大陆岛弧背景信息。

#### 4.3 沉积区古环境分析

通过常量、微量及其比值等指标, 对白田坝组含锂 (富锂) 细碎屑岩沉积期古盐度、古气候和古还原氧化性进行分析, 结果表明细碎屑岩沉积期为温暖潮湿气候条件下的弱氧化—氧化陆相淡水环境 (表 2)。

黏土矿物对某些元素的吸附 (或类质同象) 作用会对其构成的指标产生影响, 出现指示意义“偏离”现象 (杨季华等, 2020), 借助黏土矿物演化过程特征参数硅铝比 A/S (氧化物含量质量比) 与各指标间相关性分析可初步判断其影响程度。因所有样品 A/S 值均未超过 0.45 (脱硅程度较低, 数据详见补充材料数据集), A/S 值增加可大致反映黏土矿物含量增加。Sr、Sr/Ba 与 A/S 值强正相关, Th/U 与 A/S 值中度负相关, 意味着样品黏土矿物含量高会导致 Sr、Sr/Ba 值偏高和 Th/U 值偏低, 但并未超出各指标跨环境指示临界值, 且 Sr、Sr/Ba 低值和 Th/U 高值指示陆相淡水环境;  $1000 \cdot Rb/K$  与 A/S 值弱正相关, 受影响较小, 指示意义相对可靠。所以, 沉积期为陆相淡水环境 (Ga 值另述), 这与河床—岸后沼泽相 (张拴厚等, 2017) 沉积环境一致。Sr/Cu、Mg/Ca、C 值与 A/S 值弱相关, 指示意义相对可靠; Rb/Sr 与 A/S 值高度负相关, 意味着样品黏土矿物含量高会导致

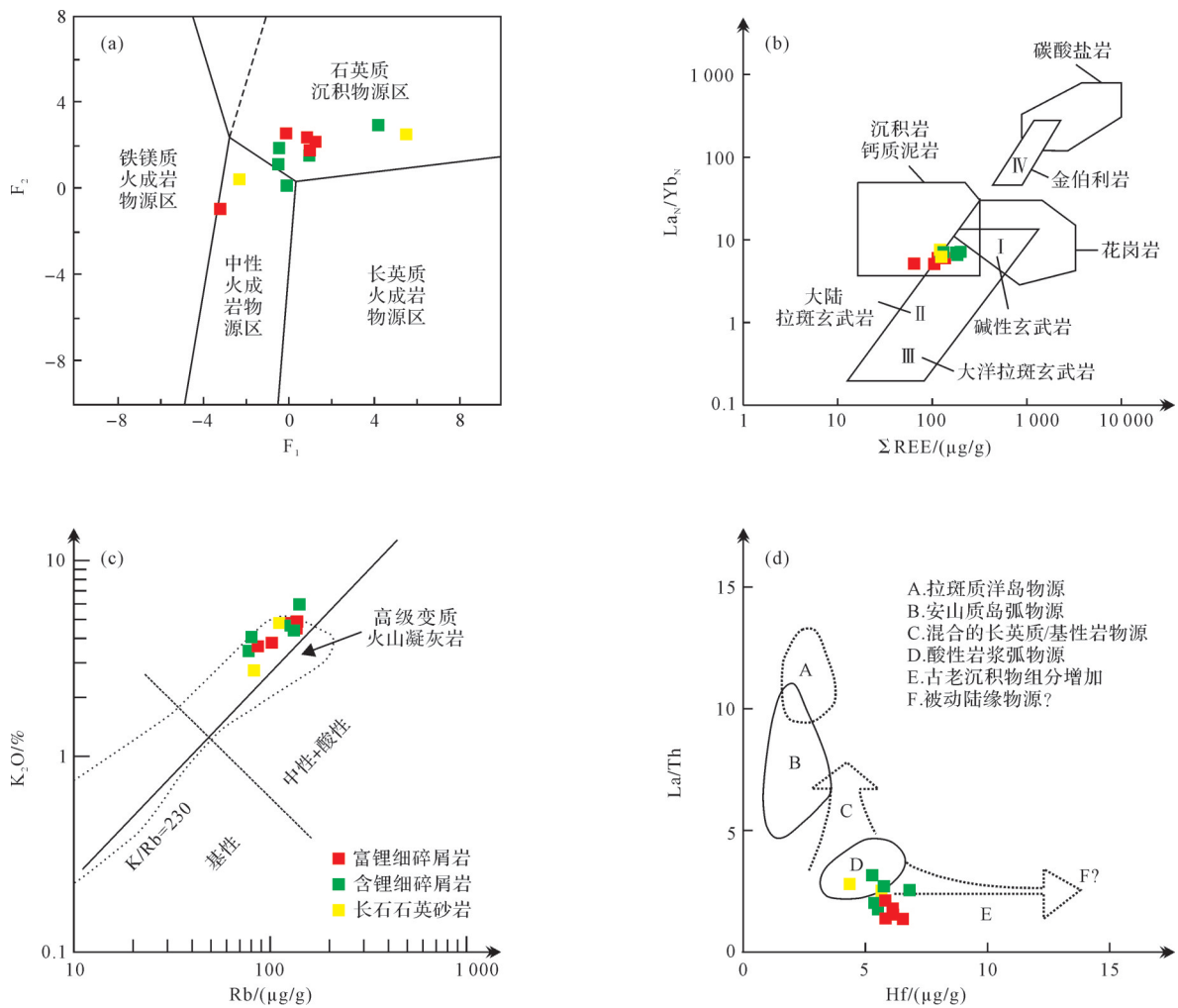


图6 白田坝组细碎屑岩物源区母岩性质判别图解

(a) 主量元素氧化物判别函数图解(据 Roser and Korsch, 1988); (b)  $La_N/Yb_N - \Sigma REE$  图解(据 Allègre and Minster, 1978); (c)  $K_2O - Rb$  图解; (d)  $La/Th - Hf$  图解(据 Floyd and Leveridge, 1987)

Fig.6 Discrimination binary diagrams of provenance characteristics for the fine-grained detrital rocks from Baitianba Formation, showing source and compositional discrimination

(a) classification plot of  $F_1$  vs.  $F_2$  (after Roser and Korsch, 1988); (b)  $La_N/Yb_N$  vs.  $\Sigma REE$  (after Allègre and Minster, 1978); (c)  $K_2O$  vs.  $Rb$ ; (d)  $La/Th$  vs.  $Hf$  (after Floyd and Leveridge, 1987)

Rb/Sr 值偏低, 而其高值指示湿润气候。所以, 古气候温暖湿润, CIA 值较高也可反映气候温暖湿润的特点。V/Cr 与 A/S 值弱正相关, 指示氧化环境;  $\delta U$ 、U/Th 与 A/S 值中度正相关, V/(V+Ni)、Ni/Co 与 A/S 值强正相关, 意味着样品黏土矿物含量高会导致  $\delta U$ 、U/Th、V/(V+Ni)、Ni/Co 值偏高, 各指标低值指示弱氧化—氧化环境。所以, 沉积水体为弱氧化—氧化环境。古环境条件指标与 A/S 相关性见表 4。

Sr、Sr/Ba、 $1000 \cdot Rb/K$  指标与锂含量呈中度正相关而 Th/U 与锂呈强负相关, 且 Sr、Sr/Ba、 $1000 \cdot Rb/K$  值增大或者 Th/U 值减小时环境盐度升高(表 2), 似暗示古盐度条件对锂富集具有一定控制作用, 具体

而言, 在陆相淡水环境沉积时, 环境盐度升高有利于锂元素的富集。但 Sr、Sr/Ba 与锂含量中度正相关而与 A/S 值强正相关, 且锂含量与 A/S 值极强正相关, 暗示 Sr、Sr/Ba、锂含量升高更可能是黏土矿物含量增加所致。Ga 与锂含量和 A/S 值均呈极强正相关且相关系数接近, 但 Ga 升高(锂富集)指示盐度降低(锂亏损), 表明锂的富集程度主要受黏土矿物含量控制。另外, 含锂(富锂)细碎屑岩较秦岭—大别造山带和扬子地台东部泥(页)岩总体更为亏损大离子亲石元素 Sr、Ba、Rb(相对富集 K), Sr/Ba 值相近而 A/S 值更高, 锂高度富集, 也可以佐证这一点(古环境条件指标与 A/S 和 Li 相关性见表 3)。

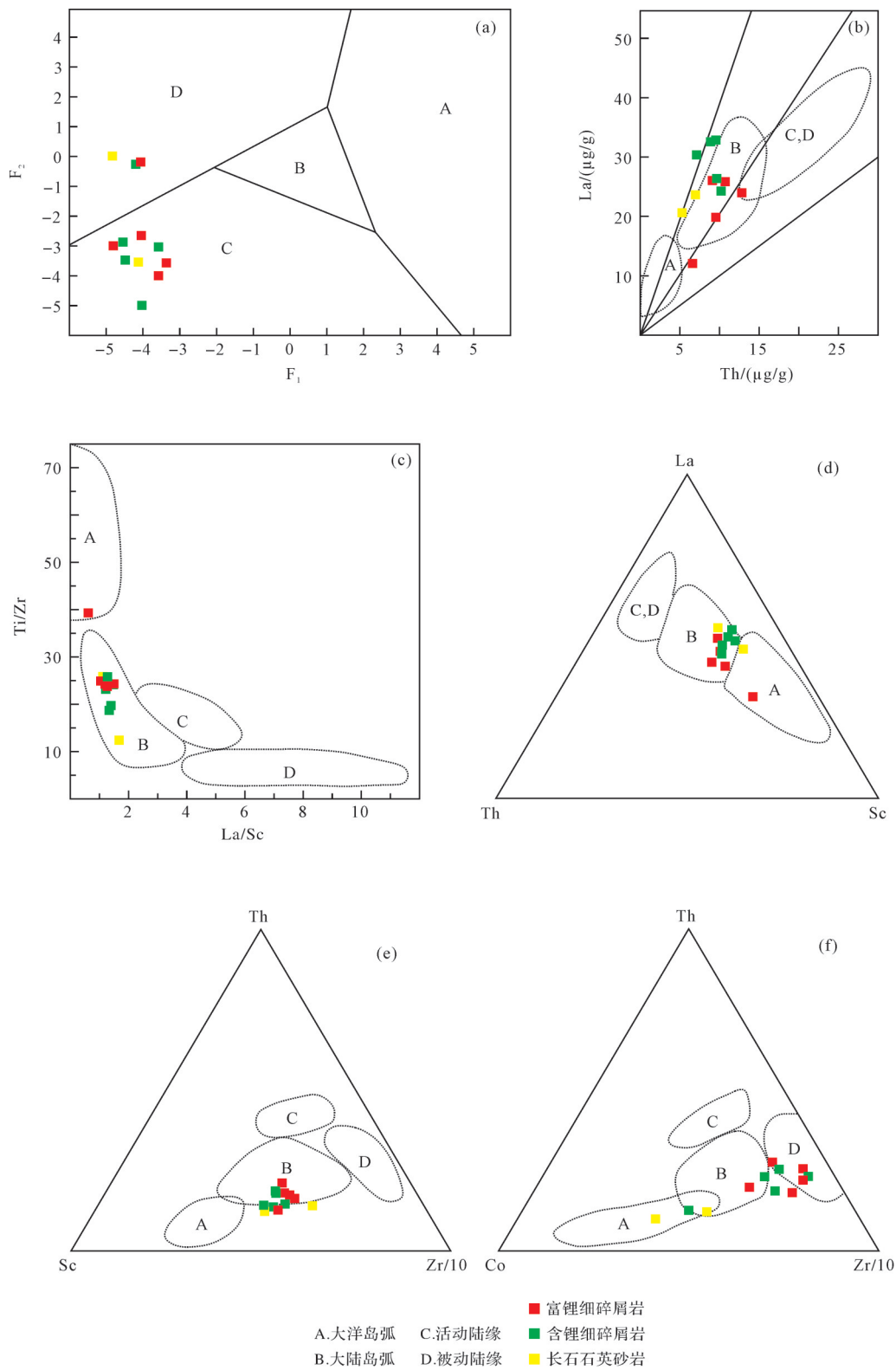


图7 白田坝组细碎屑岩物源区大地构造背景判别图解

(a) 主量元素氧化物判别函数图解(据 Bhatia, 1983); (b) La-Th 图解; (c) Ti/Zr-La/Sc 图解; (d) La-Th-Sc 图解; (e) Th-Sc-Zr/10 图解; (f) Th-Co-Zr/10 图解(据 Bhatia and Crook, 1986)

Fig.7 Discrimination diagrams of tectonic settings for fine-grained detrital rocks from Baitianba Formation  
 (a) classification plot of function1 ( $F_1$ ) and function 2 ( $F_2$ ) (after Bhatia, 1983); (b) La vs. Th; (c) Ti/Zr vs. La/Sc; (d) La-Th-Sc; (e) Th-Sc-Zr/10; (f) Th-Co-Zr/10 (after Bhatia and Crook, 1986)

表1 各种构造背景下杂砂岩的REE参数表(据Bhatia, 1985)

Table 1 Most discriminatory REE properties of graywackes for tectonic setting discrimination of sedimentary basins (after Bhatia, 1985)

构造背景	REE 参数						
	La	Ce	ΣREE	La/Yb	La <sub>N</sub> /Yb <sub>N</sub>	ΣLREE/ΣHREE	Eu/Eu*
大洋岛弧	8±1.7	19±3.7	58±10	4.2±1.3	2.8±0.9	3.8±0.9	1.04±0.11
大陆岛弧	27±4.5	59±8.2	146±20	11.0±3.6	7.5±2.5	7.7±1.7	0.79±0.13
安第斯型陆缘	37	78	186	12.5	8.5	9.1	0.60
被动大陆边缘	39	85	210	15.9	10.8	8.5	0.56

注: N 表示经球粒陨石标准校正换算; Eu\* 为球粒陨石标准值; 安第斯型和被动陆缘因数据不多未给出偏差。

$\delta U$ 、 $U/Th$ 、 $V/(V+Ni)$ 、 $V/Cr$ 、 $Ni/Co$  指标与锂含量呈正相关关系(表3),且各指标值增大时环境氧化性减弱(表2)。滇中盆地、滇西北、桂西、重庆黏土岩形成时的还原氧化条件与锂含量的变化亦呈现同样规律(贾永斌等,2023),似乎暗示还原氧化性对锂富集具有一定控制作用,即当沉积环境在氧化范围内变化时,环境含氧量的减少有利于锂元素的富集。但  $V/(V+Ni)$ 、 $Ni/Co$  与锂含量弱—中度正相关而与 A/S 值强正相关,暗示黏土矿物含量增加导致  $V/(V+Ni)$ 、 $Ni/Co$ 、锂含量(锂含量与 A/S 值极强正相关)升高可能性更大。在一定条件下黏土矿物对  $U^{6+}$  吸附能力亦很强(杜作勇等,2019),即沉积物中 U 元素的增加不一定是环境含氧量降低所致,进一步表明锂的富集程度主要受黏土矿物含量控制(古环境条件指标与 A/S 和 Li 相关性见表3)。

综上所述,古盐度和古还原氧化性对锂富集的控制作用只是表象的。大量的黏土矿物是在表生风化作用下形成的,沉积成岩过程中经常发生转变,控制黏土矿物形成和转化的因素中气候条件最为重要(陈涛等,2003),而温暖潮湿的气候条件有利于黏土矿物的形成,使细碎屑岩中黏土矿物含量增加。盐湖卤水型锂矿床形成于干旱的气候条件下,封闭盆地内的盐湖只有经过强烈蒸发使溶质浓缩为卤水下沉于盐湖底部才能形成锂矿床(Bradley *et al.*, 2013),那么温暖潮湿气候条件下的陆相淡水环境, Li 理应经由某种“载体”(如黏土矿物)固定才能从水体转移至沉积物中,或者 Li 本身来自该“载体”(如黏土矿物)且随之迁移沉积成矿。Chen *et al.* (2020) 认为洋陆俯冲过程中弧地壳加厚一方面抑制了地幔楔的熔融程度使初始

弧岩浆中富集 Li 等不相容元素,另一方面加厚地壳使得弧岩浆壳内分异进一步富集了 Li 等不相容元素,从而形成富锂地壳。白田坝组含锂(富锂)细碎屑岩源区母岩记录了其形成时的大陆岛弧背景信息,暗示 Li 最初可能来自弧岩浆物质。

## 5 结论

(1) 白田坝组含锂(富锂)细碎屑岩潜在物源区是一个出露火成岩、沉积岩和变质岩的混合源区。沉积期构造背景为活动陆缘,而源区母岩记录了其形成时的大陆岛弧背景信息,锂最初可能来自弧岩浆物质。

(2) 白田坝组含锂(富锂)细碎屑岩沉积期为温暖潮湿气候条件下的弱氧化—氧化陆相淡水环境,且碎屑物质在首次沉积时物源区母岩已经经历了中等—强烈程度的风化作用。古盐度和古还原氧化条件对锂富集的控制是表象的,而温暖潮湿的气候条件有利于黏土矿物的形成,使含锂(富锂)细碎屑岩中黏土矿物含量增加,进而控制锂的富集。

支撑本研究的科学数据已在中国科学院科学数据银行(Science Data Bank, ScienceDB)平台公开发布,访问地址为 <https://www.scidb.cn/en/s/jAnyUf> 和 <https://www.scidb.cn/en/anonymous/akFueVVm>。

致谢 野外工作得到项目组成员和司机李均的帮助; 文稿的完成得益于三名审稿专家细致的审阅,他们对文章细节的严格要求和文章论证的专业洞见,使我受益匪浅! 各位编辑老师对本文进行了悉心编辑,在此一并致谢。

表2 古环境条件分析一览表  
Table 2 Analysis of paleoenvironmental conditions

类型	指标	样品结果			结果	参考值及古环境条件(刘鑫等,2021;贾永斌等,2023)
		MIN	MAX	AVG		
	Sr	17.80	75.60	47.58	淡水环境	Sr>800, Ga<8, 咸水环境
	Ga	18.90	29.10	23.26		Sr<500, Ga>17, 淡水环境
古盐度条件	Sr/Ba	0.04	0.29	0.14	陆相 淡水环境	Sr/Ba>1, 海相咸水环境 0.6<Sr/Ba<1, 过渡相半咸水环境 Sr/Ba<0.6, 陆相淡水环境
	Th/U	2.37	4.10	3.09	陆相微咸水 — 半咸水环境	Th/U>7, 陆相淡水环境 2<Th/U<7, 陆相微咸水—半咸水环境 Th/U<2, 海相咸水环境
	1 000*Rb/K	0.66	1.06	0.86	陆相 淡水环境	1 000*Rb/K>6, 海相咸水环境 4<1 000*Rb/K<6, 微咸水环境 1 000*Rb/K<4, 陆相淡水环境
	Rb/Sr	1.50	6.24	2.73		低值: 干旱环境 高值: 湿润气候
古气候条件	Sr/Cu	0.26	1.94	0.92	温暖潮湿	Sr/Cu>10, 干旱气候 5<Sr/Cu<10, 半潮湿—半干旱气候 Sr/Cu<5, 温暖潮湿气候
	Mg/Ca	1.63	4.88	2.92		低值: 温暖、湿润、多雨 高值: 干旱、炎热、少雨
	C值 (关有志, 1992)	0.47	1.74	0.92	半潮湿—潮湿	C值>0.8, 潮湿 0.6<C值<0.8, 半潮湿 0.4<C值<0.6, 半干旱—半湿润 0.2<C值<0.4, 半干旱 C值<0.2, 干旱
	CIA	68.00	84.27	78.83	温暖潮湿	80<CIA<100, 炎热潮湿, 热带 60<CIA<80, 温暖潮湿 50<CIA<60, 寒冷、干旱
古氧化还原条件	$\delta U$ (刘鑫等, 2021)	0.85	1.12	0.99	正常水体	$\delta U>1$ , 还原环境 $\delta U<1$ , 正常水体环境
	U/Th	0.24	0.42	0.33	氧化环境	U/Th>1.25, 还原环境 0.75<U/Th<1.25, 弱氧化环境 U/Th<0.75, 氧化环境
	V/(V+Ni)	0.66	0.93	0.84	弱氧化— 还原环境	V/(V+Ni)>0.84, 还原环境 0.6<V/(V+Ni)<0.84, 弱氧化环境 V/(V+Ni)<0.6, 氧化环境
	V/Cr	1.30	2.16	1.63	氧化环境	V/Cr>4.25, 还原环境 2<V/Cr<4.25, 弱氧化环境 V/Cr<2, 氧化环境
	Ni/Co	1.84	7.40	4.26	弱氧化— 氧化环境	Ni/Co>7, 还原环境 5<Ni/Co<7, 弱氧化环境 Ni/Co<5, 氧化环境

表3 古环境条件指标与A/S值、Li相关系数表  
Table 3 Coefficients relating paleoenvironmental condition indicators to A/S ratios and Li content

	A/S	Sr	Ca	Sr/Ba	Th/U	1 000*Rb/K	Rb/Sr	Sr/Cu	Mg/Ca	C	CIA	$\delta U$	U/Th	V/(V+Ni)	V/Cr	Ni/Co	$\delta Eu$	$\delta Ce$	Th	U	V	Co	Ni	Cr	Li	
A/S	1.00																									
Sr	0.77	1.00																								
Ca	0.86	0.47	1.00																							
Sr/Ba	0.61	0.82	0.41	1.00																						
Th/U	-0.56	-0.19	-0.61	0.18	1.00																					
1 000*Rb/K	0.26	0.30	0.32	0.33	-0.12	1.00																				
Rb/Sr	-0.79	-0.78	-0.53	-0.66	0.24	-0.19	1.00																			
Sr/Cu	0.29	0.56	-0.04	0.38	-0.19	0.12	-0.12	1.00																		
Mg/Ca	0.02	0.48	-0.26	0.23	0.22	0.01	-0.22	0.33	1.00																	
C	-0.24	-0.40	0.09	-0.19	0	0.24	0.10	-0.67	-0.60	1.00																
CIA	0.91	0.62	0.79	0.54	-0.43	0.36	-0.85	0.03	-0.09	-0.04	1.00															
$\delta U$	0.57	0.22	0.61	-0.14	-1.00	0.15	-0.25	0.25	-0.24	0	0.45	1.00														
U/Th	0.58	0.24	0.59	-0.11	-0.99	0.18	-0.26	0.30	-0.25	-0.01	0.45	1.00	1.00													
V/(V+Ni)	0.74	0.84	0.59	0.76	-0.19	0.39	-0.68	0.37	0.33	-0.34	0.65	0.21	0.22	1.00												
V/Cr	0.38	0.39	0.23	-0.02	-0.36	0.14	-0.12	0.42	0.49	-0.67	0.24	0.34	0.32	0.39	1.00											
Ni/Co	0.80	0.50	0.70	0.47	-0.27	0.15	-0.52	0.11	-0.06	-0.30	0.76	0.28	0.28	0.60	0.33	1.00										
$\delta Eu$	-0.69	-0.59	-0.46	-0.44	0.40	0.32	0.49	-0.44	-0.06	0.38	-0.45	-0.41	-0.41	-0.42	-0.30	-0.46	1.00									
$\delta Ce$	-0.15	-0.15	-0.17	-0.53	-0.31	-0.42	0.05	-0.16	0.40	-0.12	-0.21	0.25	0.20	-0.35	0.32	-0.39	-0.12	1.00								
Th	0.64	0.69	0.65	0.54	-0.36	0.24	-0.43	0.27	0.03	0	0.43	0.37	0.37	0.68	0.34	0.37	-0.58	-0.14	1.00							
U	0.71	0.59	0.74	0.33	-0.72	0.28	-0.41	0.32	-0.11	0.05	0.50	0.73	0.73	0.56	0.38	0.37	-0.59	0	0.90	1.00						
V	0.91	0.88	0.71	0.60	-0.49	0.36	-0.80	0.41	0.34	-0.39	0.81	0.50	0.50	0.83	0.60	0.64	-0.57	0	0.66	0.69	1.00					
Co	-0.79	-0.72	-0.69	-0.69	0.26	-0.25	0.50	-0.39	-0.11	0.39	-0.63	-0.28	-0.29	-0.90	-0.40	-0.79	0.57	0.45	-0.69	-0.59	-0.74	1.00				
Ni	-0.58	-0.74	-0.48	-0.73	0.02	-0.40	0.50	-0.33	-0.36	0.33	-0.48	-0.04	-0.04	-0.97	-0.35	-0.53	0.30	0.43	-0.64	-0.45	-0.69	0.88	1.00			
Cr	0.72	0.65	0.65	0.77	-0.21	0.31	-0.81	0.05	-0.12	0.21	0.74	0.24	0.26	0.61	-0.29	0.46	-0.39	-0.37	0.47	0.45	0.59	-0.51	-0.48	1.00		
Li	0.83	0.48	0.85	0.36	-0.66	0.47	-0.52	0.17	-0.25	0.08	0.78	0.67	0.68	0.39	0.29	0.59	-0.46	-0.10	0.53	0.72	0.70	-0.47	-0.21	0.58	1.00	

## 参考文献 (References)

- 柏道远, 蒋启生, 李彬, 等. 2021. 湘东北冷家溪群沉积岩地球化学特征及其构造意义[J]. 地质科技通报, 40(1): 1-13, 26. [Bai Daoyuan, Jiang Qisheng, Li Bin, et al. 2021. Geochemistry and tectonic implication of the sedimentary rocks in Lengjiayi Group in northeastern Hunan[J]. Bulletin of Geological Science and Technology, 40(1): 1-13, 26.]
- 陈骏, 王鹤年. 2004. 地球化学[M]. 北京: 科学出版社: 1-418. [Chen Jun, Wang Henian. 2004. Geochemistry[M]. Beijing: Science Press: 2004: 1-418.]
- 陈涛, 王欢, 张祖青, 等. 2003. 粘土矿物对古气候指示作用浅析[J]. 岩石矿物学杂志, 22(4): 416-420. [Chen Tao, Wang Huan, Zhang Zuqing, et al. 2003. Clay minerals as indicators of paleoclimate [J]. Acta Petrologica et Mineralogica, 22(4): 416-420.]
- 程立雪, 陈洪德, 徐胜林, 等. 2011. 川西前陆盆地侏罗统白田坝组沉积特征[J]. 沉积与特提斯地质, 31(1): 28-34. [Cheng Lixue, Chen Hongde, Xu Shenglin, et al. 2011. Sedimentary characteristics of the Lower Jurassic Baitianba Formation in western Sichuan foreland [J]. Sedimentary Geology and Tethyan Geology, 31(1): 28-34.]
- 迟清华, 鄢明才. 2007. 应用地球化学元素丰度数据手册[M]. 北京: 地质出版社: 1-148. [Chi Qinghua, Yan Mingcai. 2007. Handbook of elemental abundance for applied geochemistry[M]. Beijing: Geological Publishing House: 1-148.]
- 崔建堂, 王峰, 段建国, 等. 2013. 南秦岭西乡群孙家河组锆石 SHRIMP U-Pb 年龄及其构造地质意义[J]. 沉积与特提斯地质, 33(4): 1-5. [Cui Jiantang, Wang Feng, Duan Jianguo, et al. 2013. The Sunjiahe Formation of the Xixiang Group, southern Qinling ranges: SHRIMP zircon U-Pb age and its tectonic implications[J]. Sedimentary Geology and Tethyan Geology, 33(4): 1-5.]
- 代鸿章, 王登红, 刘善宝, 等. 2023. 国外锂矿找矿新进展(2019~2021年)及对我国战略性矿产勘查的启示[J]. 地质学报, 97(2): 583-595. [Dai Hongzhang, Wang Denghong, Liu Shanbao, et al. 2023. New progress in lithium prospecting abroad (2019~2021) and its significance to China's strategic mining resources exploration[J]. Acta Geologica Sinica, 97(2): 583-595.]
- 丁一, 李智武, 冯逢, 等. 2013. 川中龙岗地区下侏罗统自流井组大安寨段湖相混合沉积及其致密油勘探意义[J]. 地质论评, 59(2): 389-400. [Ding Yi, Li Zhiwu, Feng Feng, et al. 2013. Mixing of lacustrine siliciclastic-carbonate sediments and its significance for tight oil exploration in the Daanzhai member, Ziliujing Formation, Lower Jurassic, in Longgang area, central Sichuan Basin[J]. Geological Review, 59(2): 389-400.]
- 杜作勇, 冷阳春, 卫纯纯, 等. 2019. 伊利石和高岭石对U(VI)的吸附[J]. 核化学与放射化学, 41(5): 503-508. [Du Zuoyong, Leng Yangchun, Wei Chunchun, et al. 2019. Adsorption of illite and kaolinite for U(VI)[J]. Journal of Nuclear and Radiochemistry, 41(5): 503-508.]
- 关有志. 1992. 科尔沁沙地的元素、粘土矿物与沉积环境[J]. 中国沙漠, 12(1): 9-15. [Guan Youzhi. 1992. The element, clay mineral and depositional environment in Horqin Sand Land[J]. Journal of Desert Research, 12(1): 9-15.]
- 郭彤楼, 李宇平, 魏志红. 2011. 四川盆地元坝地区自流井组页岩气成藏条件[J]. 天然气地球科学, 22(1): 1-7. [Guo Tonglou, Li Yuping, Wei Zhihong. 2011. Reservoir-forming conditions of shale gas in Ziliujing Formation of Yuanba area in Sichuan Basin [J]. Natural Gas Geoscience, 22(1): 1-7.]
- 郭旭升, 胡东风, 李宇平, 等. 2016. 海相和湖相页岩气富集机理分析与思考: 以四川盆地龙马溪组和自流井组大安寨段为例[J]. 地学前缘, 23(2): 18-28. [Guo Xusheng, Hu Dongfeng, Li Yuping, et al. 2016. Analyses and thoughts on accumulation mechanisms of marine and lacustrine shale gas: A case study in shales of Longmaxi Formation and Da'anzhai section of Ziliujing Formation in Sichuan Basin[J]. Earth Science Frontiers, 23(2): 18-28.]
- 何江, 胡欣, 张本健, 等. 2013. 四川盆地西北部下侏罗统白田坝组沉积体系[J]. 石油实验地质, 35(5): 515-522. [He Jiang, Hu Xin, Zhang Benjian, et al. 2013. Depositional system of Lower Jurassic Baitianba Formation in northwestern Sichuan Basin[J]. Petroleum Geology & Experiment, 35(5): 515-522.]
- 贾永斌, 于文修, 温汉捷, 等. 2023. 滇中盆地南缘富锂黏土岩地球化学特征及沉积环境初探[J]. 沉积学报, 2023, 41(1): 170-182. [Jia Yongbin, Yu Wenxiu, Wen Hanjie, et al. 2023. Geochemical characteristics and sedimentary environment of Li-rich clay rocks at the southern margin of the central Yunnan Basin[J]. Acta Sedimentologica Sinica, 41(1): 170-182.]
- 凌文黎, 高山, 程建萍, 等. 2006. 扬子陆核与陆缘新元古代岩浆事件对比及其构造意义: 来自黄陵和汉南侵入杂岩 ELA-ICPMS 锆石 U-Pb 同位素年代学的约束[J]. 岩石学报, 22(2): 387-396. [Ling Wenli, Gao Shan, Cheng Jianping, et al. 2006. Neoproterozoic magmatic events within the Yangtze continental interior and along its northern margin and their tectonic implication: Constraint from the ELA-ICPMS U-Pb geochronology of zircons from the Huangling and Hannan complexes[J]. Acta Petrologica Sinica, 22(2): 387-396.]
- 刘刚. 2007. 大巴山侏罗纪前陆层序地层学研究[D]. 北京: 中国地质科学院: 1-168. [Liu Gang. 2007. Study on Jurassic sequence stratigraphy in Dabashan foreland belt, central China[D]. Beijing: Chinese Academy of Geological Sciences: 1-168.]
- 刘鑫, 尚婷, 田景春, 等. 2021. 鄂尔多斯盆地镇北地区延长组长4+5段沉积期古环境条件及意义[J]. 地质学报, 95(11): 3501-3518. [Liu Xin, Shang Ting, Tian Jingchun, et al. 2021. Paleo-sedimentary environmental conditions and its significance of Chang 4+5 member of Triassic Yanchang Formation in the Zhenbei area, Ordos Basin, NW China[J]. Acta Geologica Sinica, 95(11): 3501-3518.]
- 钱利军. 2013. 川西北地区中、下侏罗统物质分布规律与沉积充填过程[D]. 成都: 成都理工大学: 1-121. [Qian Lijun. 2013. Regulation of sedimentary distribution and sedimentary filling process during Middle and Lower Jurassic in western and northern Sichuan, China[D]. Chengdu: Chengdu University of Technology: 1-121.]
- 舒志国, 周林, 李雄, 等. 2021. 四川盆地东部复兴地区侏罗系自流井组东岳庙段陆相页岩凝析气藏地质特征及勘探开发前景[J]. 石

- 油与天然气地质, 42(1): 212-223. [Shu Zhiguo, Zhou Lin, Li Xiong, et al. 2021. Geological characteristics of gas condensate reservoirs and their exploration and development prospect in the Jurassic continental shale of the Dongyuemiao member of Ziliujing Formation, Fuxing area, eastern Sichuan Basin[J]. *Oil & Gas Geology*, 42(1): 212-223.]
- 孙莎莎, 董大忠, 李育聪, 等. 2021. 四川盆地侏罗系自流井组大安寨段陆相页岩油气地质特征及成藏控制因素[J]. *石油与天然气地质*, 42(1): 124-135. [Sun Shasha, Dong Dazhong, Li Yucong, et al. 2021. Geological characteristics and controlling factors of hydrocarbon accumulation in terrestrial shale in the Da'anzhai member of the Jurassic Ziliujing Formation, Sichuan Basin[J]. *Oil & Gas Geology*, 42(1): 124-135.]
- 王登红, 代鸿章, 刘善宝, 等. 2022. 中国锂矿十年来勘查实践和理论研究的十个方面新进展新趋势[J]. *地质力学学报*, 28(5): 743-764. [Wang Denghong, Dai Hongzhang, Liu Shanbao, et al. 2022. New progress and trend in ten aspects of lithium exploration practice and theoretical research in China in the past decade[J]. *Journal of Geomechanics*, 28(5): 743-764.]
- 王濡岳, 胡宗全, 赖富强, 等. 2023. 川东北地区下侏罗统自流井组大安寨段陆相页岩脆性特征及其控制因素[J]. *石油与天然气地质*, 44(2): 366-378. [Wang Ruyue, Hu Zongquan, Lai Fuqiang, et al. 2023. Brittleness features and controlling factors of continental shale from Da'anzhai member of the Lower Jurassic Ziliujing Formation, northeastern Sichuan Basin[J]. *Oil & Gas Geology*, 44(2): 366-378.]
- 温汉捷, 罗重光, 杜胜江, 等. 2020. 碳酸盐黏土型锂资源的发现及意义[J]. *科学通报*, 65(1): 53-59. [Wen Hanjie, Luo Chongguang, Du Shengjiang, et al. 2020. Carbonate-hosted clay-type lithium deposit and its prospecting significance[J]. *Chinese Science Bulletin*, 65(1): 53-59.]
- 夏林圻, 夏祖春, 马中平, 等. 2009. 南秦岭中段西乡群火山岩岩石成因[J]. *西北地质*, 42(2): 1-37. [Xia Linqi, Xia Zuchun, Ma Zhongping, et al. 2009. Petrogenesis of volcanic rocks from Xixiang Group in middle part of South Qinling Mountains[J]. *Northwestern Geology*, 42(2): 1-37.]
- 夏林圻, 夏祖春, 徐学义. 1996. 南秦岭中—晚元古代火山岩性质与前寒武纪大陆裂解[J]. *中国科学: 地球科学*, 26(3): 237-243. [Xia Linqi, Xia Zuchun, Xu Xueyi. 1996. Properties of Middle-Late Proterozoic volcanic rocks in South Qinling and the Precambrian continental break-up[J]. *Science China Earth Sciences*, 26(3): 237-243.]
- 解习农, 任建业, 焦养泉, 等. 2013. 沉积盆地分析基础[M]. 武汉: 中国地质大学出版社有限责任公司: 1-408. [Xie Xinong, Ren Jianye, Jiao Yangquan, et al. 2013. Principles of sedimentary basin analysis [M]. Wuhan: China University of Geosciences Press: 1-408.]
- 徐小涛, 邵龙义. 2018. 利用泥质岩化学蚀变指数分析物源区风化程度时的限制因素[J]. *古地理学报*, 20(3): 515-522. [Xu Xiaotao, Shao Longyi. 2018. Limiting factors in utilization of chemical index of alteration of mudstones to quantify the degree of weathering in provenance[J]. *Journal of Palaeogeography*, 20(3): 515-522.]
- 徐学义, 陈隽璐, 李向民, 等. 2009a. 扬子台台北缘白勉峡组和三湾组火山岩形成构造环境及岩石成因的地球化学约束[J]. *地质学报*, 83(11): 1703-1718. [Xu Xueyi, Chen Junlu, Li Xiangmin, et al. 2009a. Geochemical constrains on the petrogenesis and tectonic setting discrimination of volcanic rocks from the Baimianxia and the Sanwan Formations[J]. *Acta Geologica Sinica*, 83(11): 1703-1718.]
- 徐学义, 陈隽璐, 李向民, 等. 2010. 西乡群三郎铺组和大石沟组火山岩 U-Pb 定年及岩石成因研究[J]. *岩石学报*, 26(2): 617-632. [Xu Xueyi, Chen Junlu, Li Xiangmin, et al. 2010. Geochemistry and petrogenesis of volcanic rocks from Sanlangpu Formation and Dashigou Formation[J]. *Acta Petrologica Sinica*, 26(2): 617-632.]
- 徐学义, 夏林圻, 陈隽璐, 等. 2009b. 扬子地块北缘西乡群孙家河组火山岩形成时代及元素地球化学研究[J]. *岩石学报*, 25(12): 3309-3326. [Xu Xueyi, Xia Linqi, Chen Junlu, et al. 2009b. Zircon U-Pb dating and geochemical study of volcanic rocks from Sunjiahe Formation of Xixiang Group in northern margin of Yangtze Plate[J]. *Acta Petrologica Sinica*, 25(12): 3309-3326.]
- 许志琴, 王汝成, 朱文斌, 等. 2020. 川西花岗—伟晶岩型锂矿科学钻探: 科学问题和科学意义[J]. *地质学报*, 94(8): 2177-2189. [Xu Zhiqin, Wang Rucheng, Zhu Wenbin, et al. 2020. Scientific drilling project of granite-pegmatite-type lithium deposit in western Sichuan: Scientific problems and significance[J]. *Acta Geologica Sinica*, 94(8): 2177-2189.]
- 杨季华, 罗重光, 杜胜江, 等. 2020. 高黏土含量沉积岩古环境指标适用性讨论[J]. *矿物学报*, 40(6): 723-733. [Yang Jihua, Luo Chongguang, Du Shengjiang, et al. 2020. Discussion on the applicability of paleoenvironmental index for sedimentary rocks with high clay content[J]. *Acta Mineralogica Sinica*, 40(6): 723-733.]
- 杨文博, 周斌, 范鹏, 等. 2023. 扬子陆块北缘陕西汉中地区二叠纪: 侏罗纪多个层位中发现沉积型锂矿化体[J]. *中国地质*, 50(2): 643-644. [Yang Wenbo, Zhou Bin, Fan Peng, et al. 2023. Discovery of the sedimentary-type lithium mineralized body in the Permian-Jurassic strata of Hanzhong area, Shaanxi province, northern margin of the Yangtze Block[J]. *Geology in China*, 50(2): 643-644.]
- 于泓, 王登红, 于扬, 等. 2019. 国内外主要沉积型锂矿分布及勘查开发现状[J]. *岩矿测试*, 38(3): 354-364. [Yu Feng, Wang Denghong, Yu Yang, et al. 2019. The distribution and exploration status of domestic and foreign sedimentary-type lithium deposits[J]. *Rock and Mineral Analysis*, 38(3): 354-364.]
- 张国伟, 程顺有, 郭安林, 等. 2004. 秦岭—大别中央造山系南缘勉略古缝合带的再认识: 兼论中国大陆主体的拼合[J]. *地质通报*, 23(9/10): 846-853. [Zhang Guowei, Cheng Shunyou, Guo Anlin, et al. 2004. Mianlue paleo-suture on the southern margin of the central orogenic system in Qinling-Dabie with a discussion of the assembly of the main part of the continent of China[J]. *Geological Bulletin of China*, 23(9/10): 846-853.]
- 张茜. 2010. 米仓山隆升时代的沉积学制约[D]. 西安: 西北大学: 1-58. [Zhang Qian. 2010. Sedimentary evidences constrain on the

- uplift of the Micang Shan[D]. Xi'an: Northwest University: 1-58.]
- 张拴厚, 韩芳林, 王根宝, 等. 2017. 陕西省区域地质志[M]. 北京: 地质出版社: 1-946. [Zhang Shuanhou, Han Fanglin, Wang Genbao, et al. 2017. Regional geology of Shaanxi province[M]. Beijing: Geological Publishing House, 2013: 1-946.]
- 张英利, 王宗起, 王坤明, 等. 2020. 北大巴山地区斑岩组砂岩地球化学特征对物源和构造环境的限定[J]. 地质学报, 94(4): 1192-1207. [Zhang Yingli, Wang Zongqi, Wang Kunming, et al. 2020. Sandstone geochemical constraints on the provenance and tectonic setting of the Banjiuguan Formation in the north Daba Mountain [J]. Acta Geologica Sinica, 94(4): 1192-1207.]
- 赵凤清, 赵文平, 左义成, 等. 2006. 陕南汉中地区新元古代岩浆岩U-Pb年代学[J]. 地质通报, 25(3): 383-388. [Zhao Fengqing, Zhao Wenping, Zuo Yicheng, et al. 2006. U-Pb geochronology of Neoproterozoic magmatic rocks in Hanzhong, southern Shaanxi, China [J]. Geological Bulletin of China, 25(3): 383-388.]
- 赵振华. 2016. 微量元素地球化学原理[M]. 2版. 北京: 科学出版社: 1-534. [Zhao Zhenhua. 2016. Principles of trace element geochemistry[M]. 2nd ed. Beijing: Science Press: 1-534.]
- Allègre C J, Minster J F. 1978. Quantitative models of trace element behavior in magmatic processes[J]. Earth and Planetary Science Letters, 38(1): 1-25.
- Barshad J. 1966. The effect of a variation of precipitation on the nature of clay mineral formation in soils from acid and basic igneous rocks [C]. Internat Clay Conference: 167-173.
- Bhatia M R. 1983. Plate tectonics and geochemical composition of sandstones[J]. The Journal of Geology, 91(6): 611-627.
- Bhatia M R. 1985. Rare earth element geochemistry of Australian Palaeozoic graywackes and mudrocks: Provenance and tectonic control [J]. Sedimentary Geology, 45(1/2): 97-113.
- Bhatia M R, Crook K A W. 1986. Trace element characteristics of graywackes and tectonic setting discrimination of sedimentary basins [J]. Contributions to Mineralogy and Petrology, 92(2): 181-193.
- Bradley D, Munk L, Jochens H, et al. 2013. A preliminary deposit model for lithium brines[R]. Reston, VA: U. S. Geological Survey.
- Chen C, Lee C T A, Tang M, et al. 2020. Lithium systematics in global arc magmas and the importance of crustal thickening for lithium enrichment[J]. Nature Communications, 11(1): 5313.
- Cox R, Lowe D R, Cullers R L. 1995. The influence of sediment re-cycling and basement composition on evolution of mudrock chemistry in the southwestern United States[J]. Geochimica et Cosmochimica Acta, 59(14): 2919-2940.
- Dong Y P, Liu X M, Santosh M, et al. 2011a. Neoproterozoic subduction tectonics of the northwestern Yangtze Block in South China: Constraints from zircon U-Pb geochronology and geochemistry of mafic intrusions in the Hannan Massif[J]. Precambrian Research, 189(1/2): 66-90.
- Dong Y P, Liu X M, Santosh M, et al. 2012. Neoproterozoic accretionary tectonics along the northwestern margin of the Yangtze Block, China: Constraints from zircon U-Pb geochronology and geochemistry[J]. Precambrian Research, 196/197: 247-274.
- Dong Y P, Zhang G W, Hauenberger C, et al. 2011b. Palaeozoic tectonics and evolutionary history of the Qinling orogen: Evidence from geochemistry and geochronology of ophiolite and related volcanic rocks[J]. Lithos, 122(1/2): 39-56.
- Fedo C M, Nesbitt H W, Young G M. 1995. Unraveling the effects of potassium metasomatism in sedimentary rocks and paleosols, with implications for paleoweathering conditions and provenance[J]. Geology, 23(10): 921-924.
- Floyd P A, Leveridge B E. 1987. Tectonic environment of the Devonian Gramscatho Basin, south Cornwall: Framework mode and geochemical evidence from turbiditic sandstones[J]. Journal of the Geological Society, 144(4): 531-542.
- Johnsson M J. 1993. The system controlling the composition of clastic sediments[M]//Johnsson M J, Basu A. Processes controlling the composition of clastic sediments. McLean: Geological Society of America: 1-20.
- Kesler S E, Gruber P W, Medina P A, et al. 2012. Global lithium resources: Relative importance of pegmatite, brine and other deposits [J]. Ore Geology Reviews, 48: 55-69.
- Ling W L, Gao S, Zhang B R, et al. 2003. Neoproterozoic tectonic evolution of the northwestern Yangtze Craton, South China: Implications for amalgamation and break-up of the Rodinia Supercontinent [J]. Precambrian Research, 122(1/2/3/4): 111-140.
- McLennan S M. 1993. Weathering and global denudation[J]. The Journal of Geology, 101(2): 295-303.
- McLennan S M, Hemming S, McDaniel D K, et al. 1993. Geochemical approaches to sedimentation, provenance, and tectonics[M]//Johnsson M J, Basu A. Processes controlling the composition of clastic sediments. McLean: Geological Society of America: 21-40.
- Milliman J D, Farnsworth K L. 2011. River discharge to the coastal ocean: A global synthesis[M]. Cambridge: Cambridge University Press: 1-384.
- Nesbitt H W, Young G M. 1982. Early Proterozoic climates and plate motions inferred from major element chemistry of lutites[J]. Nature, 299(5885): 715-717.
- Nesbitt H W, Young G M. 1984. Prediction of some weathering trends of plutonic and volcanic rocks based on thermodynamic and kinetic considerations[J]. Geochimica et Cosmochimica Acta, 48(7): 1523-1534.
- Nesbitt H W, Young G M. 1989. Formation and diagenesis of weathering profiles[J]. The Journal of Geology, 97(2): 129-147.
- Roser B P, Korsch R J. 1988. Provenance signatures of sandstone-mudstone suites determined using discriminant function analysis of major-element data[J]. Chemical Geology, 67(1/2): 119-139.
- Sovacool B K, Ali S H, Bazilian M, et al. 2020. Sustainable minerals and metals for a low-carbon future[J]. Science, 367(6473): 30-33.
- Sun S S, McDonough W F. 1989. Chemical and isotopic systematics of oceanic basalts: Implications for mantle composition and processes [J]. Geological Society, London, Special Publications, 42(1): 313-

- 345.
- van de Kamp P C. 1968. Geochemistry and origin of metasediments in the Haliburton-Madoc area, southeastern Ontario[J]. Canadian Journal of Earth Sciences, 5(6): 1337-1372.
- van de Kamp P C, Leake B E. 1985. Petrography and geochemistry of feldspathic and mafic sediments of the northeastern Pacific margin [J]. Earth and Environmental Science Transactions of the Royal Society of Edinburgh, 76(4): 411-449.
- Zhao J H, Zhou M F. 2008. Neoproterozoic adakitic plutons in the northern margin of the Yangtze Block, China: Partial melting of a thickened lower crust and implications for secular crustal evolution [J]. Lithos, 104(1/2/3/4): 231-248.
- Zhao J H, Zhou M F. 2009. Secular evolution of the Neoproterozoic lithospheric mantle underneath the northern margin of the Yangtze Block, South China[J]. Lithos, 107(3/4): 152-168.
- Zhao J H, Zhou M F, Zheng J P, et al. 2010. Neoproterozoic crustal growth and reworking of the northwestern Yangtze Block: Constraints from the Xixiang dioritic intrusion, South China[J]. Lithos, 120(3/4): 439-452.
- Zhou M F, Yan D P, Kennedy A K, et al. 2002. SHRIMP U-Pb zircon geochronological and geochemical evidence for Neoproterozoic arc-magmatism along the western margin of the Yangtze Block, South China[J]. Earth and Planetary Science Letters, 196(1/2): 51-67.

## Analysis of Provenance and Paleodepositional Environment of Li-Bearing Fine-Grained Clastic Rocks from the Baitianba Formation, Northern Margin of the Yangtze Block

JIANG YongWei<sup>1,2</sup>, YANG WenBo<sup>1,2</sup>, ZHOU Bin<sup>1,2</sup>, WU ZhongShan<sup>1,2</sup>, HUANGFU PengBin<sup>2</sup>, FAN Peng<sup>1,2</sup>, LIU LiangLiang<sup>2</sup>

1. Shaanxi Institute of Geological Survey, Xi'an 710004, China

2. Shaanxi Planning Research Center of Geological Survey, Xi'an 710068, China

**Abstract:** [Objective] The discovery of lithium-mineralized bodies in multiple layers in the Permian to the Jurassic at the northern margin of the Yangtze Block is of great significance to the investigation, development and utilization of sedimentary lithium resources. This study aims to ascertain the nature and tectonic setting of the parent rocks in the source area of the lithium-bearing (lithium-rich) fine clastic rocks of the Jurassic Baitianba Formation, and to preliminarily discuss the influence of paleoenvironmental conditions on lithium enrichment. [Methods] Detailed petrological investigations were conducted on the typical lithologies within the formation, along with elemental geochemical analyses focusing on the lithium-bearing (lithium-enriched) fine clastic rocks. [Results] The oxide discriminant function graph of the main elements and the  $La_N/Yb_N-\Sigma REE$ ,  $K_2O-Rb$  and  $La/Th-Hf$  diagrams indicate a mixed provenance of igneous, sedimentary and metamorphic rocks. The oxide discriminant function graph of the main elements, together with  $La-Th$ ,  $Ti/Zr-La/Sc$ ,  $La-Th-Sc$ ,  $Th-Sc-Zr/10$  and  $Th-Co-Zr/10$  diagrams, show that the tectonic background of the sedimentary period was an active continental margin, and some source rocks were formed in a continental island arc environment. Lithium probably originated from arc magma material.  $Ga$ ,  $Sr/Ba$ ,  $Sr/Cu$ ,  $C$ ,  $CIA$ ,  $U/Th$ ,  $Ni/Co$  and other paleoenvironmental indicators indicate that the lithium-bearing rocks were deposited in a weakly oxidizing freshwater environment in a warm, humid climate. The  $A-CN-K$  and  $Th/Sc-Zr/Sc$  diagrams show that the parent rocks underwent moderate to intense weathering when the debris was first deposited. [Conclusions] The comprehensive study found that lithium enrichment was only superficially influenced by ancient salinity and ancient reduction-oxidation conditions. Rather, the warm humid climate was conducive to the formation of clay minerals, which increased the clay-mineral content of Li-bearing (Li-rich) fine clastic rocks and determined the extent of lithium enrichment.

**Key words:** Baitianba Formation; lithium-bearing (lithium-rich) fine clastic rocks; provenance analysis; paleoenvironmental condition; lithium enrichment

**Foundation:** Shaanxi Province Public Welfare Geological Survey Project, No. 202308, 202112

**Corresponding author:** YANG WenBo, E-mail: boabosiji@sina.com