doi: 10.11720/wtyht.2026.1134
杨永千, 杨新新, 陈旺, 等. 豫西含铝岩系锂、铌钽金属分布特征及富集机制[J]. 物探与化探, 2026, 50(1): 21-33. https://doi.org/10.11720/wtyht.2026.1134
Yang Y Q, Yang X X, Chen W, et al. Distribution and enrichment mechanisms of lithium and niobium-tantalum in aluminum-bearing rock series within western Henan[J]. Geophysical and Geochemical Exploration, 2026, 50(1): 21-33. https://doi.org/10.11720/wtyht.2026.1134

# 豫西含铝岩系锂、铌钽金属分布特征及富集机制

杨永千[1,2], 杨新新[1,2], 陈旺[1,2], 高婉露[1,2], 陈鑫[1,2], 陈鹏[1,2], 李肖杨[1,2], 燕红丽[1,2]
(1. 河南省地质研究院, 河南 郑州 450016; 2. 河南省有色金属深部找矿勘查技术研究重点实验室, 河南 郑州 450016)

**摘 要:** 晚石炭世豫西地区发育大规模硬水铝石型喀斯特铝土矿床, 地层中富含稀有、稀散和稀土元素, 锂及铌钽在该地层中具有较高的丰度。本文选取豫西地区 6 个铝土矿床作为研究对象, 在翔实的矿床地质资料的基础上, 研究锂、铌钽与矿石主要化学成分的相关性, 借助 XRD、SEM 等手段, 研究锂及铌钽在含铝岩系中的分布特征及其富集机制。结果发现: 锂、铌钽与矿石主要化学成分在铝土矿及顶板黏土岩中具有正相关性, 在底板铁质黏土岩中相关性则迥异, 显示出含铝岩系地层物质来源的复杂性; 在顶板黏土岩、铝土矿及底板铁质黏土岩中, 锂与铌钽含量之间呈正相关性, 表明锂、铌钽在沉积时的富集规律近乎一致, 锂与铌钽具有相同或部分相同的成矿物源。本次研究填补了豫西含铝岩系锂、铌钽富集机制研究的空白, 指示研究区部分伴生锂、铌钽的地区具有形成工业矿床的可能, 研究区锂、铌钽资源潜力及经济价值巨大, 可开展进一步的矿产勘查工作。

**关键词:** 锂、铌钽; 分布特征; 富集机制; 相关性分析; 含铝岩系
**中图分类号:** P632;P31 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-8918(2026)01-0021-13

## 0 引言

锂、铌钽是中国战略性新兴产业发展的重要矿产。锂具有“白色石油”、“能源金属”的美誉[1], 铌钽则广泛用于电子、宇航、核能及机械等行业。锂矿床的内生矿床有花岗伟晶岩、花岗岩型两种, 外生矿床为盐湖型和地下卤水型; 铌钽矿床类型达 7 种之多, 国内矿床类型以花岗伟晶岩型、碱性长石花岗岩型、风化壳型及原生矿床为主。近年来, 随着中国新能源产业快速发展, 锂在新能源中占据着不可或缺的地位; 而铌钽随着航空航天及核能事业的快速发展, 也具有其独特的地位。随着对含铝岩系中伴生稀有稀散元素的研究[2], 沉积型(风化壳型)锂、铌钽资源被认为具有作为后备接替资源的潜力。近 10 年来, 专家学者对我国锂资源时空分布规律、成矿规律、成因机理等进行了大量研究, 取得了丰硕成果[3-7], 但是对于含铝岩系中铌钽元素的分布特征、富集机制缺乏相应的研究。

本次选取豫西野猪洼、关家底、贾家洼、清水河、渑池县小阳河、兴达二矿等铝土矿床含铝岩系作为研究对象, 在前人厚实的工作基础上, 开展了岩石学、矿物学研究, 分析锂、铌钽金在含铝岩系中的垂向变化、分布特征及富集机制, 以期对含铝岩系中锂、铌钽金属是否富集形成工业矿床进行讨论, 为铝土矿矿床综合勘查开发利用提供理论研究。

## 1 豫西含铝岩系特征

### 1.1 含铝岩系分布产出特征

豫西是河南省乃至我国重要的铝土矿成矿带及铝工业基地, 分布着一系列中大型铝土矿床, 主要集中于豫西北部区域(图 1)。含铝岩系为石炭系上统本溪组地层, 产于奥陶系中统马家沟组古侵蚀界面上, 二者之间呈假整合接触。

### 1.2 含铝岩系形成环境

针对豫西铝土矿床的形成, 前人从铝土矿矿体

**收稿日期:** 2025-04-14; **修回日期:** 2025-12-18
**基金项目:** 河南省地质研究院 2023 年度科技攻关项目(2023-903-XM006-KT03)
**第一作者:** 杨永千(1980-), 男, 高级工程师, 研究方向为成矿规律研究, 主要从事矿床勘查工作。Email: 908868701@qq.com

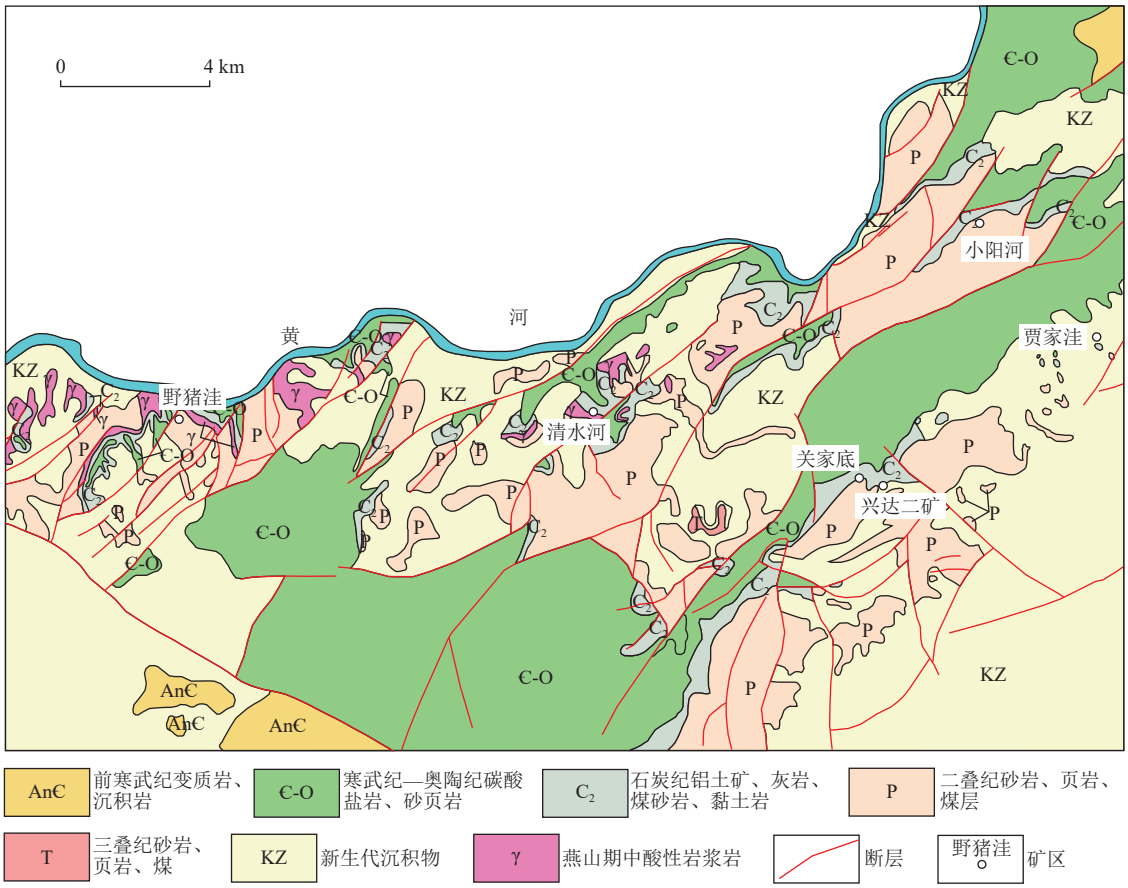



**图 1　豫西地质简图**

**Fig. 1　Geological sketch of western Henan**

形态、控矿要素、物质组成、物质来源、成矿环境和成矿过程等方面做了研究，其成果丰富了对豫西含铝岩系形成环境的认知[8-11]。加里东运动时期，古隆起（嵩箕、五台山、黛眉山）变质岩为含铝岩系铁质黏土岩提供了物质来源，晚石炭世北秦岭增生抬起与古亚洲洋俯冲导致华北克拉通成为陆内盆地，同时期华北克拉通位于低纬度，气候炎热潮湿，微生物活动强及火山活动导致盆地边缘的成矿原岩物质快速风化分解并迁移至古岩溶负地形内形成含铝岩系[10]，晚石炭世后期，华北克拉通被海水淹没并在本溪组之上形成了石炭系太原组海相沉积层[12]。

### 1.3　含铝岩系地质特征

豫西含铝岩系特征严格受喀斯特岩溶地貌控制。含铝岩系地层从上至下岩性依次为顶板（炭质）黏土岩+煤，中部为铝土矿，主要富集在喀斯特岩溶洼地，而在喀斯特岩溶隆起区铝土矿减薄或者歼灭，底板为铁质黏土岩。铁质黏土岩在岩溶洼地和隆起区域成分组成差异明显，洼地中一般为含菱铁矿和黄铁矿为主的灰白色黏土岩，隆起区通常为含赤铁矿、针铁矿、褐铁矿的红褐色黏土岩，局部可形成风化壳铁矿。含铝岩系顶板黏土岩和铝土矿一般呈渐变过渡关系。

含铝岩系整体呈似层状产出，底板铁质黏土岩形态受古地形影响，呈透镜状、似层状。顶板（炭质）黏土岩以隐晶质、泥质结构为主（图 2a、b），铝土矿以隐晶质、豆鲕状及砂状结构为主（图 2c、d），底板铁质黏土岩以隐晶质、泥质结构为主（图 2e）。矿石以隐晶质、鲕粒、泥质和碎屑结构为主 (图 2c、d)。铝土矿内部结构变化明显，底部通常为鲕状和碎屑结构，向顶部逐渐变为隐晶质和泥质结构 (图 2a、b)。铝土矿中广泛发育的碎屑结构揭示出复杂的搬运和沉积过程 (图 2c、d)。

## 2　样品采集和分析

### 2.1　样品采集

在前人矿床地质研究 (包括含矿岩系层序组成与划分) 的基础上，本次选取位于豫西三门峡湖滨区野猪洼、陕州区关家底、贾家洼、清水河、渑池县小阳河、兴达二矿的 6 个铝土矿床作为研究对象。野猪洼铝土矿样品采自矿区内两个钻孔共 12 个样，关家底采集 4 个样，贾家洼采集 5 个样，清水河采集

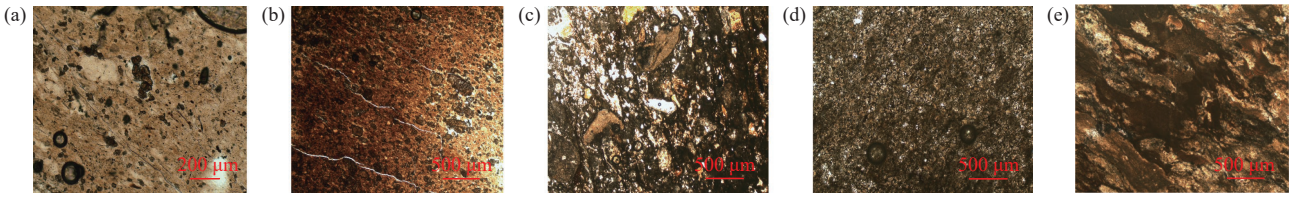



**图 2　含铝岩系典型岩石显微照片**

**Fig. 2　Typical rock micrograph of aluminiferous rock series**

3 个样, 兴达二矿采集 4 个样, 小阳河采集 7 个样, 皆采于露天采坑, 为系统连续取样。共采集样品 35 件。

### 2.2　分析方法

对豫西典型矿床中 35 件样品开展详细的矿物学和地球化学研究, 具体分析方法如下。

全岩 X 射线衍射分析 (XRD) 和扫描电镜—能谱分析 (SEM-EDS) 均在自然资源部郑州矿产资源监测中心(河南省岩石矿物测试中心)完成。XRD 仪器型号为日本理学 D/max-2500PC, 测试条件: Cu 靶, Kα 辐射; 狭缝系统: DS(发散狭缝: 1°); 波长: 1.540 Å; 工作电压(kV): 40 ; 工作电流(mA): 100; 起始角度(2$\theta$): 3°; 终止角度: 60°; 步长: 0.02°; 步速: 2 deg/min; 在温度 22 ℃、湿度 26% 的工作环境下测试。扫描电镜仪器型号为 ZEISS MERLIN COMPACT 热场发射扫描电子显微镜 (德国蔡司公司), 能谱仪仪器型号为 XFLASH 6I60 布鲁克 X 射线能谱仪, 仪器工作条件为: 加速电压 20 kV; 工作距离 5～9 mm; 放大倍数: 50～1 500; 信号接收器: 背散射探头; 光阑孔径: 60 μm; 能谱处理时间: 死时间 25%～30%; 采集时间 25 s(点分析), 50 s(面扫描); 计数率范围 10～40 Kcps; 在温度 21 ℃、湿度 23% 的条件下分析。

全岩常量、稀有稀散元素含量分析由河南省地质研究院地质实验测试研究所完成。其中,常量元素通过 X 荧光 (XRF) 方法测定, 分析仪器为 ZSX Primus Ⅱ 型 X-射线荧光光谱仪; 稀有稀散元素分析采用湿法消解—电感耦合等离子体质谱仪 ( 仪器为塞默飞世尔 ICAP RQ 型质谱仪) 完成。常量元素的分析精度≤0.1%, 稀有稀散元素分析精度≤$2\times10^{-3}$; 所有元素的精度不确定度均小于 10%。

## 3　分析结果

### 3.1　矿物组成与特征

利用显微镜、XRD、SEM 研究了豫西关家底、贾家洼、清水河、兴达二矿、小阳河和野猪洼含铝岩系的矿物组成与特征 (图 3)。含矿岩系识别的主要矿物包括硬水铝石、黄铁矿、菱铁矿、褐铁矿、锐钛矿、高岭石、伊利石和绿泥石, 碎屑矿物为锆石、石英、钾长石。单元层 (铝土矿、铁质黏土岩) 矿物组成基本一致 (图 3b、c、d、e)。

铝土矿层、铁质黏土岩层和顶部黏土岩层以隐晶质集合体为主 (图 3), 硬水铝石一般包裹黏土矿物, 为矿化过程中黏土矿物脱硅不彻底残留 (图 3b、c)。此外,铁质黏土岩中黄铁矿一般被菱铁矿包裹, 指示黄铁矿形成可能早于菱铁矿, 为还原环境下 $Fe^{2+}\rightarrow Fe^{3+}$转化过程中的残留 (图 3e)。

含矿岩系中含铁矿物主要包括黄铁矿、菱铁矿、褐铁矿。黄铁矿主要分布在铝土矿层中(本次取样样品黄铁矿经风化氧化成褐铁矿与菱铁矿), 次分布在底边铁质黏土岩中, 以单颗粒、集合体和草莓状形态产出, 普遍与硬水铝石、锐钛矿密切共生 (图 3b~e)。

豫西铝土矿含矿岩系中黏土矿物主要为高岭石、伊利石、绿泥石。绿泥石广泛分布于顶部黏土岩中, 高岭石、伊利石广泛分布于顶部黏土岩、铝土矿和铁质黏土岩中, 高岭石普遍围绕硬水铝石集合体分布, 与硬水铝石边缘呈现渐变过渡关系, 具有明显的溶蚀现象, 显示出二者成因演变关系 (图 3a)。伊利石主要分布在铁质黏土岩和铝土矿中, 主要以鳞片状集合体形式存在, 是黏土岩和矿石基质的主要组成成分 (图 3d、e)。

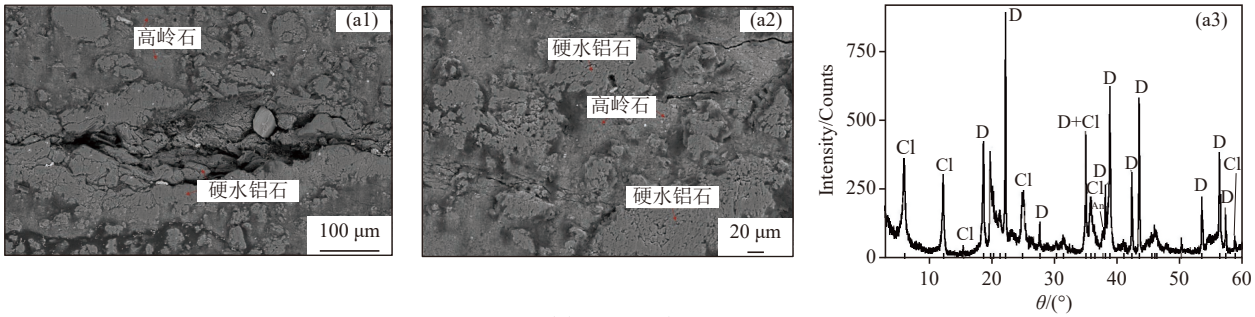
锐钛矿是含矿岩系中最主要的两种含钛矿物, 主要与硬水铝石、黄铁矿(氧化成褐铁矿)共生 (图 3b、c、e)。含矿岩系中另外一个普遍发育的碎屑矿物为锆石, 其同样呈现浑圆与不规则板状外表结构 (图 3b、c), 碎屑锆石 一致分散在含矿岩系各单元层中。

### 3.2　锂、铌钽分布特征

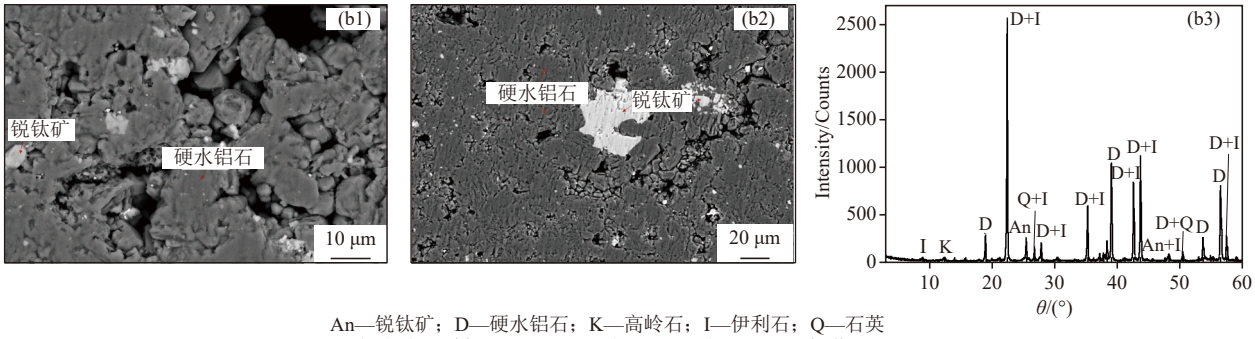
#### 3.2.1　锂、铌钽含量及分布特征

含铝岩系广泛分布有锂、铌钽, 只是在不同层位存在含量差异, 本次从 6 个矿区采集的 35 件样品包含了含铝岩系地层, 部分矿区采集了含铝岩系底板中奥陶统灰岩, 样品分析结果见表 1。

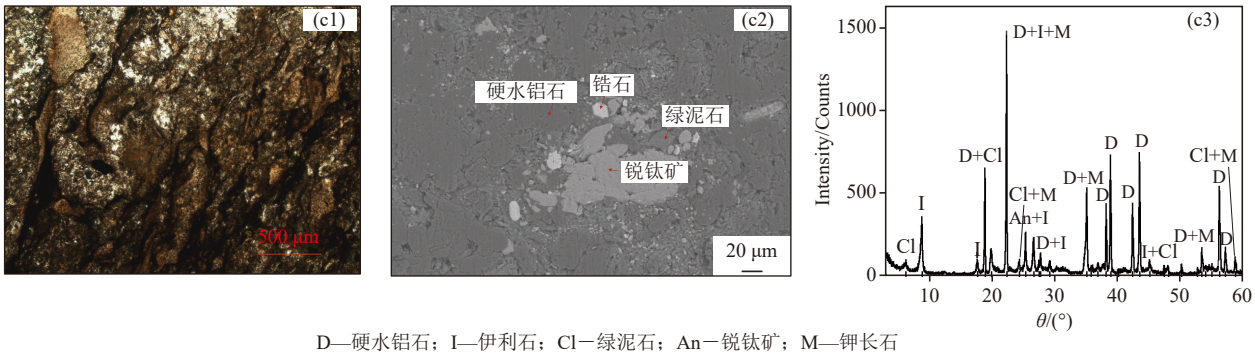
锂在含铝岩系皆有分布, 在含铝岩系顶板中含量一般为(47～16 821)$\times10^{-6}$, 平均含量为 3 574$\times10^{-6}$; 在铝土矿中含量一般为(77～2 845)$\times10^{-6}$, 平均含量为 1 387$\times10^{-6}$; 在含铝岩系底板中含量一般为(219～2 507)$\times10^{-6}$, 平均为 1 316$\times10^{-6}$。从含铝岩系中锂的



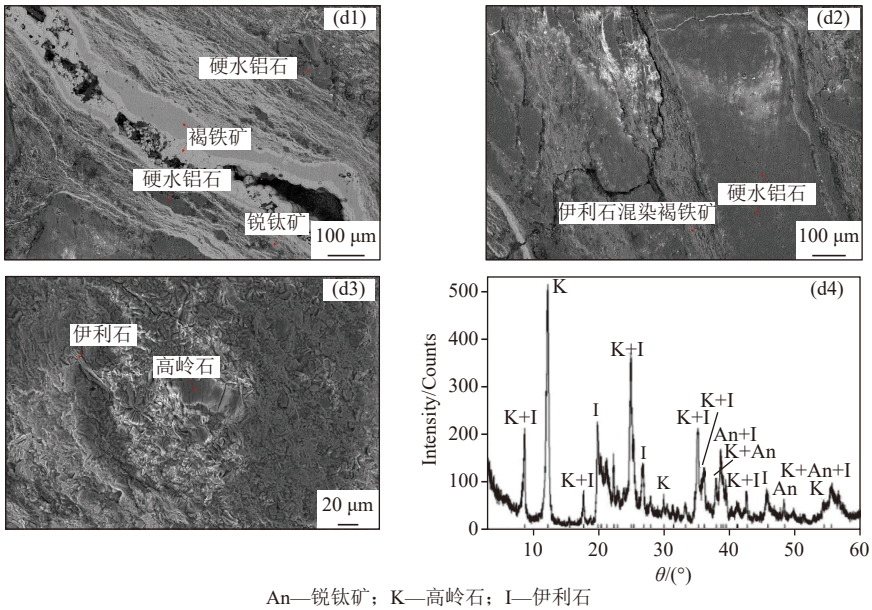

D—硬水铝石；Cl—绿泥石
(a) 顶板黏土岩Y15样品SEM（a1:175倍；a2:251倍）、XRD能谱(a3)




An—锐钛矿；D—硬水铝石；K—高岭石；I—伊利石；Q—石英
(b) 铝土矿Y16样品SEM（b1:122倍；b2:436倍）、XRD能谱(b3)



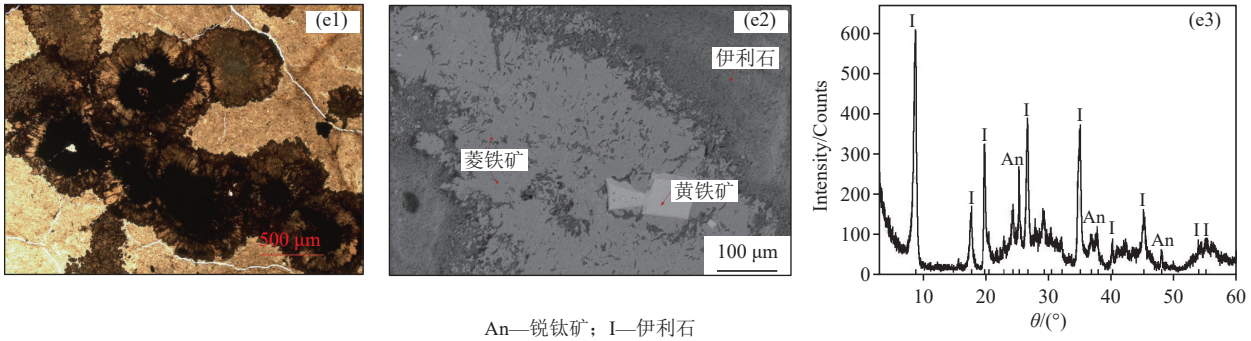

D—硬水铝石；I—伊利石；Cl—绿泥石；An—锐钛矿；M—钾长石
(c) 铝土矿Y50样品显微(c1)、SEM形貌(c2；303倍)、XRD能谱(c3)




An—锐钛矿；K—高岭石；I—伊利石
(d) 铁质黏土岩Y17样品SEM形貌(d1:111.倍；d2:103倍；d3:312倍)、XRD能谱(d4)

**图 3-1　含铝岩系铝土矿及顶底板岩石显微、SEM 形貌、XRD 能谱特征**

**Fig. 3-1　Microstructure, SEM morphology and XRD energy spectrum of bauxite and roof and floor rocks in aluminiferous rock series**




An—锐钛矿；I—伊利石
(e) 铁质黏土岩Y52样品显微(e1)、SEM形貌(e2；171倍)、XRD能谱(e3)

**图 3-2　含铝岩系铝土矿及顶底板岩石显微、SEM 形貌、XRD 能谱特征**

**Fig. 3-2　Microstructure, SEM morphology and XRD energy spectrum of bauxite and roof and floor rocks in aluminiferous rock series**

**表 1　含铝岩系岩石地球化学成分数据统计**

**Table 1　Geochemical data of aluminiferous rock series**

| 矿区 | 编号 | 层位 | 岩性 | $Al_2O_3$ | $SiO_2$ | $Fe_2O_3$ | $TiO_2$ | $Li_2O$ | $(Ta,Nb)_2O_5$ |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| 关家底 | Y09 | 顶板 | 黏土岩 | 22.52 | 53.86 | 4.33 | 1.04 | 591 | 118 |
| | Y10 | 顶板 | 碳质黏土岩 | 25.33 | 29.6 | 3.37 | 0.83 | 2 447 | 278 |
| | Y11 | 铝土矿 | 豆鲕状铝土矿 | 51.52 | 27.53 | 1.15 | 3.6 | 1 136 | 431 |
| | Y12 | 底板 | 铁质黏土岩 | 31.32 | 30.21 | 23.33 | 1.62 | 2 507 | 301 |
| 贾家洼 | Y14 | 顶板 | 黏土岩 | 39.43 | 41.13 | 0.64 | 0.74 | 8 537 | 342 |
| | Y15 | 顶板 | 碳质黏土岩 | 52.11 | 25.16 | 1.03 | 0.53 | 16 821 | 456 |
| | Y16 | 铝土矿 | 豆鲕状铝土矿 | 75.43 | 4.26 | 0.67 | 3.58 | 321 | 597 |
| | Y17 | 铝土矿 | 铁质黏土岩 | 33.63 | 34.68 | 11.04 | 1.92 | 1 371 | 427 |
| | Y18 | 铝土矿 | 砂状铝土矿 | 77.5 | 3.48 | 0.55 | 2.92 | 77 | 379 |
| 清水河 | Y19 | 底板 | 铁质黏土岩 | 26.27 | 30.34 | 27.06 | 1.25 | 1 024 | 142 |
| | Y20 | 铝土矿 | 黏土矿 | 42.74 | 36.21 | 2.11 | 2.52 | 2 177 | 606 |
| | Y21 | 顶板 | 碳质黏土岩 | 38.36 | 42.28 | 1.98 | 0.73 | 4 153 | 335 |
| 兴达二矿 | Y24 | 底板 | 铁质黏土岩 | 14.35 | 20.15 | 53.81 | 0.72 | 219 | 173 |
| | Y25 | 铝土矿 | 豆鲕状铝土矿 | 73.77 | 8.33 | 1.51 | 4.64 | 227 | 343 |
| | Y26 | 顶板 | 碳质黏土岩 | 16.29 | 63.51 | 5.99 | 0.76 | 437 | 81 |
| | Y59 | 顶板 | 黏土页岩 | 12.29 | 43.48 | 7.46 | 0.57 | 180 | 676 |
| 小阳河 | Y28 | 底板 | 铁质黏土岩 | 29.57 | 37.76 | 19.07 | 1.61 | 883 | 340 |
| | Y29 | 铝土矿 | 铝质黏土岩 | 43.51 | 40.35 | 1.09 | 2.56 | 2 254 | 1 408 |
| | Y30 | 铝土矿 | 豆鲕状铝土矿 | 54.42 | 28.18 | 1.65 | 3.05 | 1826 | 445 |
| | Y31 | 铝土矿 | 铁质黏土岩 | 38.85 | 43.6 | 3.07 | 2 | 2 246 | 1 146 |
| | Y32 | 铝土矿 | 豆鲕状铝土矿 | 63.4 | 19.23 | 0.98 | 3.27 | 1821 | 1 282 |
| | Y33 | 顶板 | 碳质黏土岩 | 40.96 | 36.16 | 1.13 | 0.72 | 4 886 | 172 |
| | Y34 | 顶板 | 粉砂质黏土岩 | 20.22 | 57.72 | 10.88 | 1.27 | 47 | 306 |
| 野猪洼 | Y40 | 顶板 | 煤层+黏土岩 | 15.74 | 20.51 | 4.94 | 0.71 | 840 | 42 |
| | Y41 | 铝土矿 | 鲕状铝土矿 | 56.2 | 14.77 | 3.71 | 5.34 | 990 | 709 |
| | Y42 | 铝土矿 | 蜂窝+鲕状铝土矿 | 60.37 | 5.5 | 10.35 | 5.25 | 270 | 557 |
| | Y43 | 铝土矿 | 铝土矿(含菱铁) | 51.99 | 8.49 | 13.65 | 4.01 | 544 | 543 |
| | Y44 | 底板 | 铁质页岩 | 24.88 | 29.68 | 18.24 | 1.25 | 2 053 | 217 |
| | Y45 | 底板 | 奥陶系灰岩 | 4.3 | 13.07 | 2.36 | 0.23 | 214 | 230 |
| | Y49 | 顶板 | 煤层 | 7.94 | 11.37 | 8.72 | 0.4 | 377 | 262 |
| | Y50 | 铝土矿 | 鲕状铝土矿 | 45.36 | 24.72 | 4.85 | 3.67 | 2 846 | 817 |
| | Y51 | 铝土矿 | 致密铝土矿 | 45.62 | 17.48 | 12.64 | 4.47 | 1 551 | 457 |
| | Y52 | 底板 | 黏土岩 | 35.42 | 38.99 | 4.24 | 2.35 | 1 594 | 234 |
| | Y53 | 底板 | 铁质黏土岩 | 27.4 | 35.25 | 13.45 | 1.24 | 930 | 245 |
| | Y54 | 底板 | 奥陶系灰岩 | 9.15 | 24.54 | 2.34 | 0.42 | 154 | 253 |

注: 常量元素含量单位为%; $Li_2O$、$(Nb, Ta)_2O_5$含量单位为$10^{-6}$。

分布特征来看，含铝岩系顶板中锂平均含量最高，铝土矿中锂含量次之，底板中锂含量最低。

铌钽在含铝岩系皆有分布，在含铝岩系顶板中含量一般为(42～676)×$10^{-6}$，平均含量为279×$10^{-6}$；在铝土矿中含量一般为(379～1 408)×$10^{-6}$，平均含量为700×$10^{-6}$；在含铝岩系底板中含量一般为(142～340)×$10^{-6}$，平均含量为236×$10^{-6}$。从含铝岩系中铌钽的分布特征来看，铝土矿中铌钽含量最高，底板中铌钽含量次之，顶板中铌钽含量最低。

3.2.2　锂、铌钽与主要化学成分相关性分析

从含铝岩系采集样品分析结果来看，含铝岩系顶板锂平均含量最高，铝土矿含量次之，底板含量最低，显示锂含量在含铝岩系中从上至下逐渐递减，直至底板灰岩中锂含量达到最低。锂主要赋存在绿泥石中，次为高岭石等其他黏土矿物[13]，$Al^{3+}$为绿泥石重要组分。从SEM、XRD分析来看，绿泥石含量在含铝岩系中从上至下逐渐较少，而在底部黏土矿物中伊利石含量占比逐渐增加。从图4可以看出，含铝岩系顶板中锂含量与$Al_2O_3$含量呈正相关，与$SiO_2$、$Fe_2O_3$、$TiO_2$呈弱负相关；含铝岩系铝土矿中锂含量与$Al_2O_3$、$Fe_2O_3$、$TiO_2$呈弱负相关，与$SiO_2$含量呈正相关；含铝岩系底板中锂含量与$Al_2O_3$、$SiO_2$、$TiO_2$呈弱正相关，与$Fe_2O_3$含量呈弱负相关。

铌钽在含铝岩系铝土矿中含量最高，这与针铁矿类矿物在含铝岩系铝土矿中最为富集密切相关，顶板铌钽含量次之，底板铌钽含量最低，铌钽含量从铝土矿向上、向底板递减。从含铝岩系主要化学成分与铌钽含量的相关性可以看出，铌钽含量在顶板中与$SiO_2$、$Fe_2O_3$、$TiO_2$相关性弱(图5a)，与$Al_2O_3$呈正相关性；在铝土矿中与$SiO_2$呈弱正相关性，与$Al_2O_3$、$Fe_2O_3$、$TiO_2$呈弱负相关性(图5b)；在底板中与$Al_2O_3$、$SiO_2$、$TiO_2$呈弱正相关性，与$Fe_2O_3$呈弱负相关性(图5c)。前人研究认为铝土矿与Nb、Ta成矿母岩相同，在铝土矿成矿时伴生形成锆石和锐钛矿，由成矿母岩中富Al和Ti矿物经风化—沉积转变而来[14-17]。

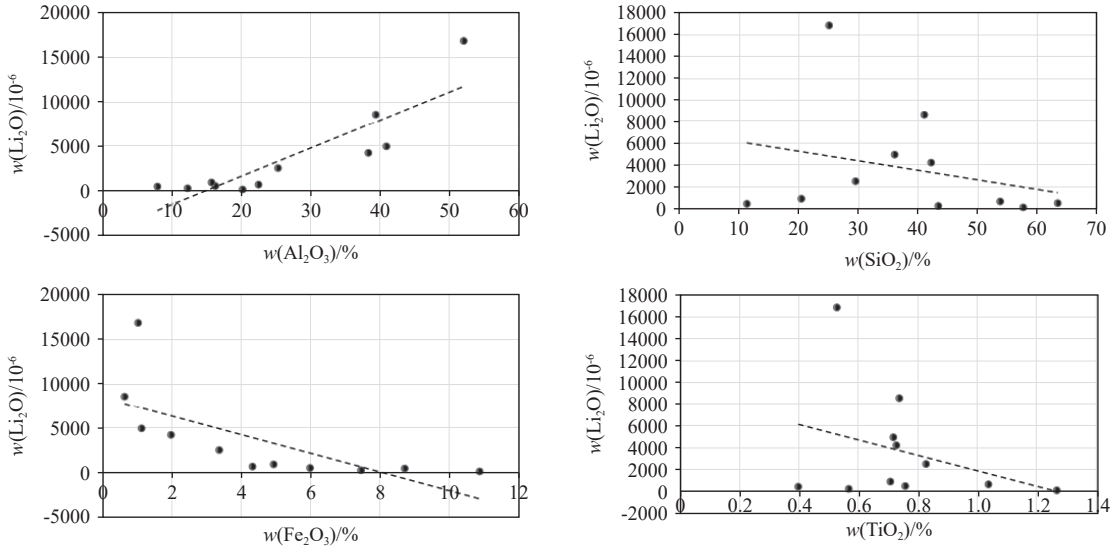
3.2.3　锂与铌钽相关性分析

锂、铌钽在含铝岩系顶板、铝土矿中与$Al_2O_3$、$SiO_2$呈正相关性，在底板铁质黏土中截然相反，锂与$Al_2O_3$、$SiO_2$、$TiO_2$呈弱负相关，与$Fe_2O_3$呈弱正相关；铌钽与$Al_2O_3$、$SiO_2$、$TiO_2$呈弱正相关性，与$Fe_2O_3$呈弱负相关性(图6)。通过锂、铌钽之间的相关性分析发现，锂、铌钽含量在顶板、底板中呈弱正相关，在铝土矿中呈正相关，这说明铝土矿层中锂、铌钽互为伴生元素，来自相同的成矿母岩，在顶板黏土岩和底板铁质黏土岩中，锂、铌钽可能具有部分相同的成矿母岩。

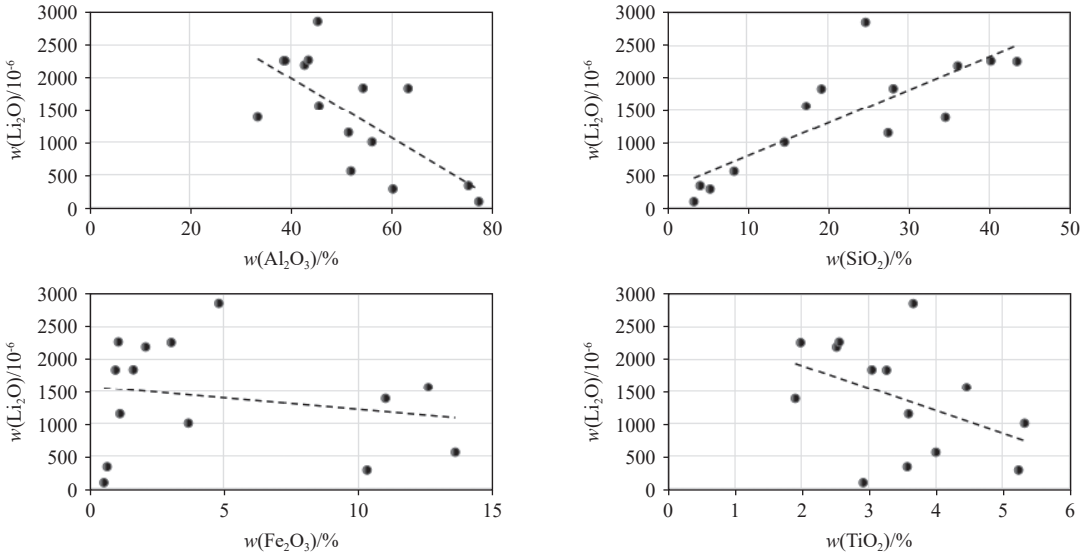
## 4　锂、铌钽富集机理分析

铝土矿矿床或含铝岩系地层的形成，除了有利的沉积环境外，丰富的物源供给以及有效的成矿物质分异也是必备条件，因此，对铝土矿成矿物质来源和物质组成的研究也极为重要。作为沉积岩中良好的物源指示矿物，碎屑锆石为铝土矿的成矿物质来源分析提供了可能[18]。碎屑锆石U-Pb年龄、Hf同位素和微量元素研究表明，山西断隆和华北地块南缘成矿带的成矿物质主要来自于南北两侧的造山带[19-21]。

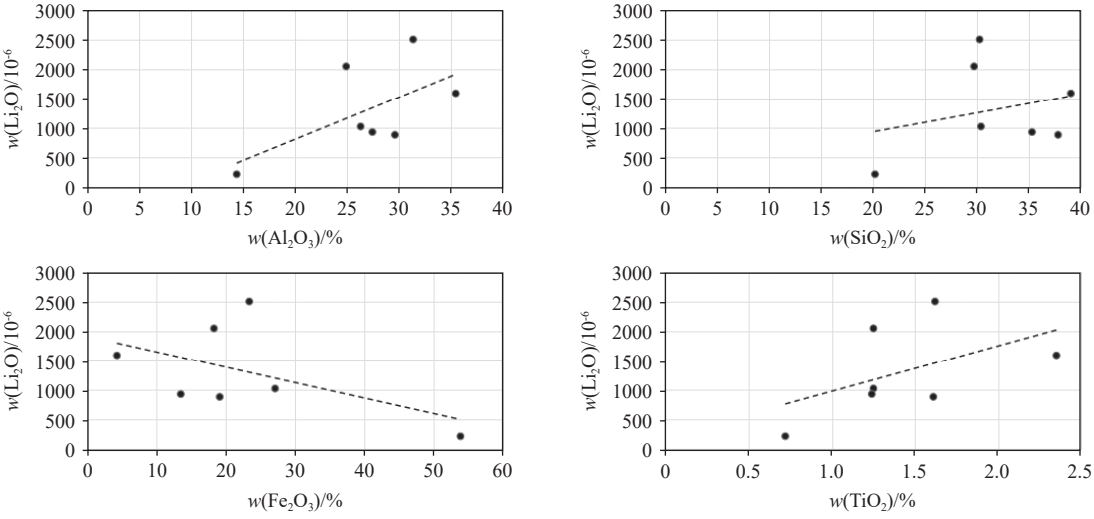
锂及铌钽作为含铝岩系的伴生有益元素，探讨其物源和富集过程不应脱离铝土矿本身的成矿作用。含铝岩系成矿物源主要来自于豫西盆地两侧山西断隆和华北地块南缘的秦岭造山带，山西断隆岩性为以碳酸盐岩夹薄层互层的沉积岩为主，秦岭造山带则是以硅酸盐组成为主的岩浆岩和变质岩。尽管碳酸盐岩中锂、铌钽元素含量均较小，但是通过近年来对含铝岩系岩石物质分析来看，碳酸盐岩为含铝岩系矿源层的组成之一。从本次对锂含量较高的岩矿样品做XRD、SEM分析时发现，含铝岩系顶板黏土岩中含绿泥石含量高(见图3)，锂含量也相应变高(Y14、Y15样中$Li_2O$含量分别为8 537×$10^{-6}$、16 821×$10^{-6}$)，这也佐证了锂大部分存在于锂绿泥石中，为锂绿泥石—鲕绿泥石的中间产物，同时也存在于高岭石等黏土矿物中[22]。当铝土矿中硬水铝石增加，黏土矿物减少时，氧化锂含量相应较少(Y50样中$Li_2O$含量分别为2 846×$10^{-6}$，见图7a)。底板含铁黏土岩中锂含量随着硬水铝石减少、黏土类矿物伊利石增加，锂含量相应进一步减少(Y52样中$Li_2O$含量分别为1 594×$10^{-6}$，见图7b)。故当碳酸盐岩中泥质增加时，其风化产物的REE和Li、Ga、Sc等微量元素含量将增高，并随水、次生矿物、有机质等介质进行迁移[23]。灰池子、桃坪花岗岩是东秦岭花岗伟晶岩的成矿母岩，岩石年龄为370~450 Ma[24]，东秦岭花岗伟晶岩具有明显分异作用，稀有金属矿化普遍明显，普遍具钠长石化、锂云母化等交代作用[25]，东秦岭稀有金属伟晶岩形成于晚造山和造山后段[26]。秦岭从400 Ma前北部上升为陆地，375 Ma前秦岭南部隆起并露出海面，230 Ma前秦岭整体抬升。晚古生代特别是晚石炭世的海陆交互环境下，秦岭造山带受剥蚀影响形成的岩石碎屑为晚石炭世含铝岩系地层的形成提供了丰富的物源，诸如含铝岩系岩石中发现的锆石、




(a) 顶板岩石 $Al_2O_3$、$SiO_2$、$Fe_2O_3$、$TiO_2$ 与 $Li_2O$ 含量相关图解




(b) 铝土矿 $Al_2O_3$、$SiO_2$、$Fe_2O_3$、$TiO_2$ 与 $Li_2O$ 含量相关图解




(c) 底板岩石 $Al_2O_3$、$SiO_2$、$Fe_2O_3$、$TiO_2$ 与 $Li_2O$ 含量相关图解

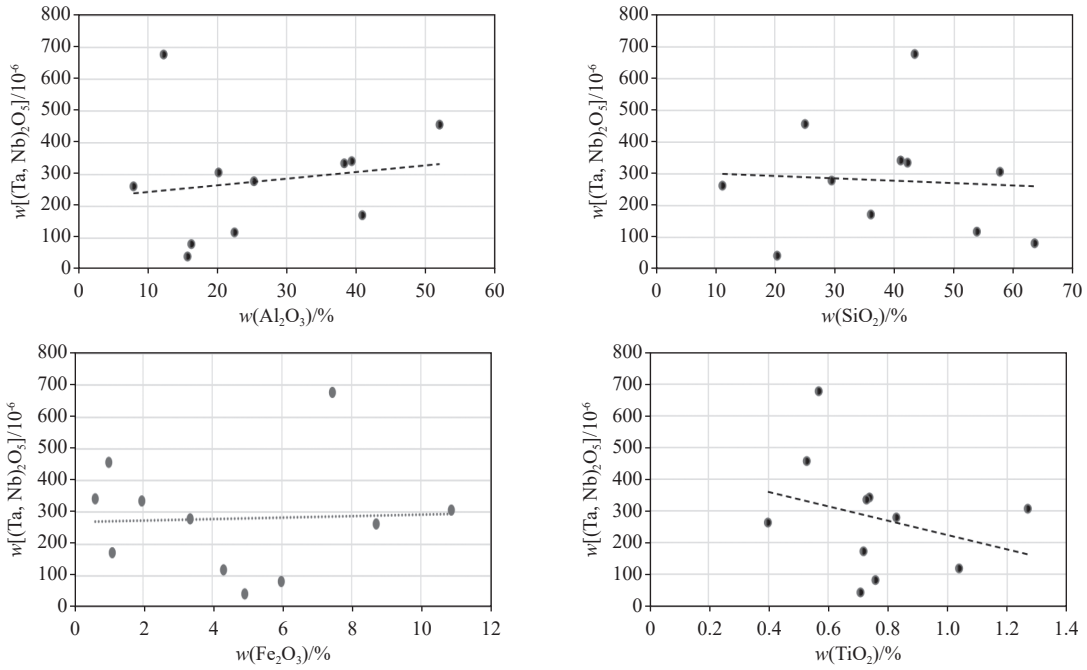
**图 4　不同层位含铝岩系中 $Al_2O_3$、$SiO_2$、$Fe_2O_3$、$TiO_2$ 与 $Li_2O$ 含量相关图解**

**Fig. 4　Correlation diagram of $Al_2O_3$, $SiO_2$, $Fe_2O_3$, $TiO_2$ and $Li_2O$ contents in different strata of aluminum-bearing rock series**

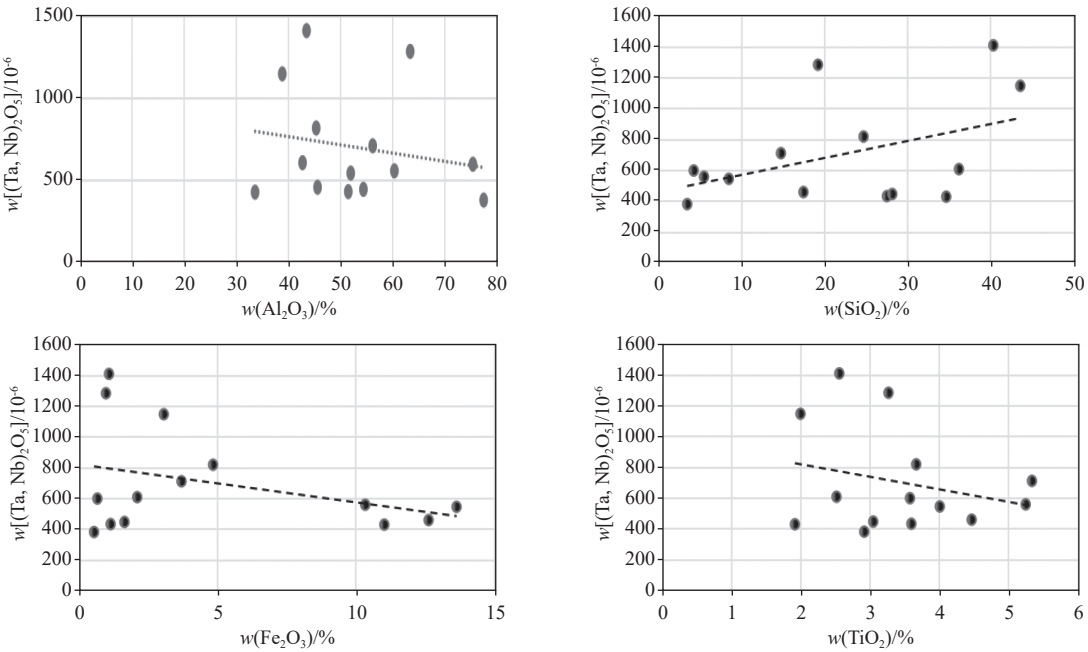
钾长石等矿物就是明显的证据(图 7c)。

通过分析微区原位主量元素与锂、铌钽的相关性,初步说明含矿岩系中锂主要受 $Al_2O_3$ 和 $SiO_2$ 含量的影响,而铌钽主要受 $Al_2O_3$、$SiO_2$ 和 $TiO_2$ 含量的影响;锂、铌钽共同点是在含铝岩系顶板黏土矿物中与 $Al_2O_3$ 含量呈正相关,在含铝岩系铝土矿硬质铝石中与 $SiO_2$ 含量呈正相关,但是随着 $Al_2O_3$ 含量增加而减少,在含铝岩系底板与 $Al_2O_3$、$SiO_2$ 和 $TiO_2$ 含量呈正相关。以上富集特征显示,锂、铌钽的富集与含矿岩系在低—中—高成熟度过程中,锂、铌钽含量随着风化程度的增强而呈现出先增高后降低的趋势相关。

锂及铌钽互为伴生元素,常产于花岗伟晶岩矿床中,在秦岭造山带隆起的过程中受风化剥蚀影响,



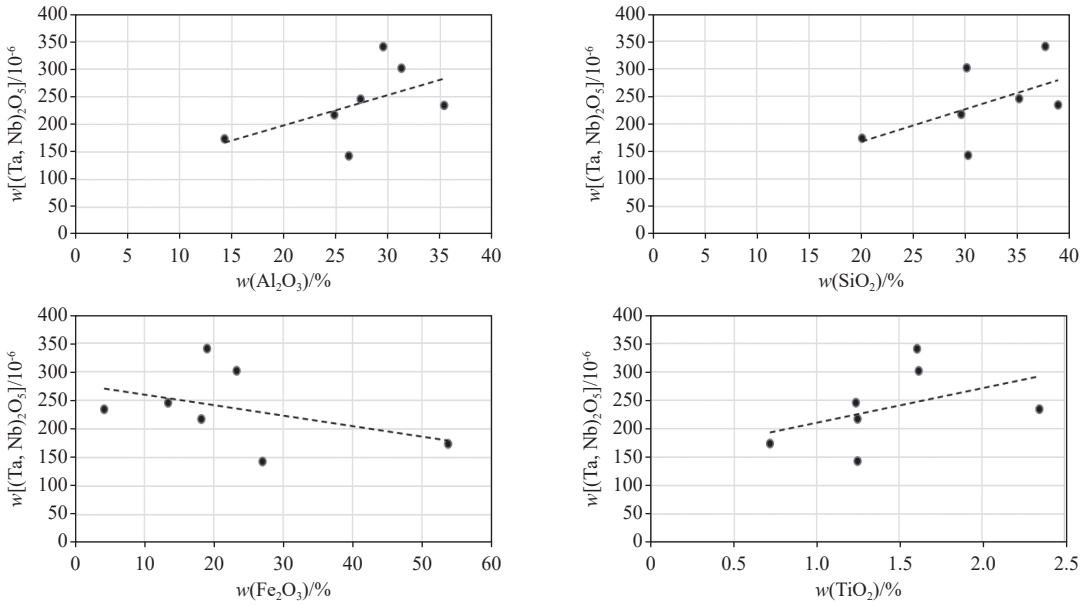

(a) 顶板岩石 $Al_2O_3$、$SiO_2$、$Fe_2O_3$、$TiO_2$ 与 (Ta，Nb)$_2O_5$ 含量相关图解




(b) 铝土矿 $Al_2O_3$、$SiO_2$、$Fe_2O_3$、$TiO_2$ 与 (Ta，Nb)$_2O_5$ 含量相关图解

**图 5-1　不同层位含铝岩系中 $Al_2O_3$、$SiO_2$、$Fe_2O_3$、$TiO_2$ 与 (Ta, Nb)$_2O_5$ 含量相关图解**

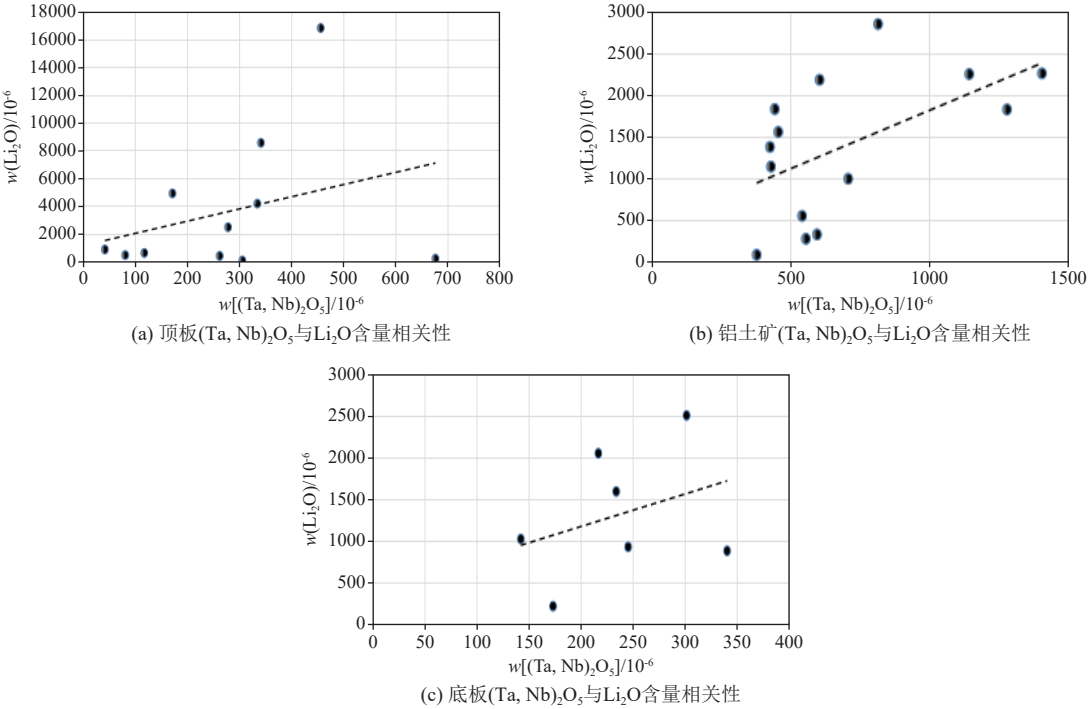
**Fig. 5-1　Correlation diagram of $Al_2O_3$, $SiO_2$, $Fe_2O_3$, $TiO_2$ and (Ta, Nb) $_2O_5$ contents in different strata of aluminum-bearing rock series**




(c) 底板岩石 $Al_2O_3$、$SiO_2$、$Fe_2O_3$、$TiO_2$ 与 (Ta，Nb)$_2O_5$ 含量相关性图解

**图 5-2　不同层位含铝岩系中 $Al_2O_3$、$SiO_2$、$Fe_2O_3$、$TiO_2$ 与 (Ta, Nb)$_2O_5$ 含量相关图解**

**Fig. 5-2　Correlation diagram of $Al_2O_3$, $SiO_2$, $Fe_2O_3$, $TiO_2$ and (Ta, Nb) $_2O_5$ contents in different strata of aluminum-bearing rock series**




(a) 顶板(Ta, Nb)$_2O_5$与$Li_2O$含量相关性

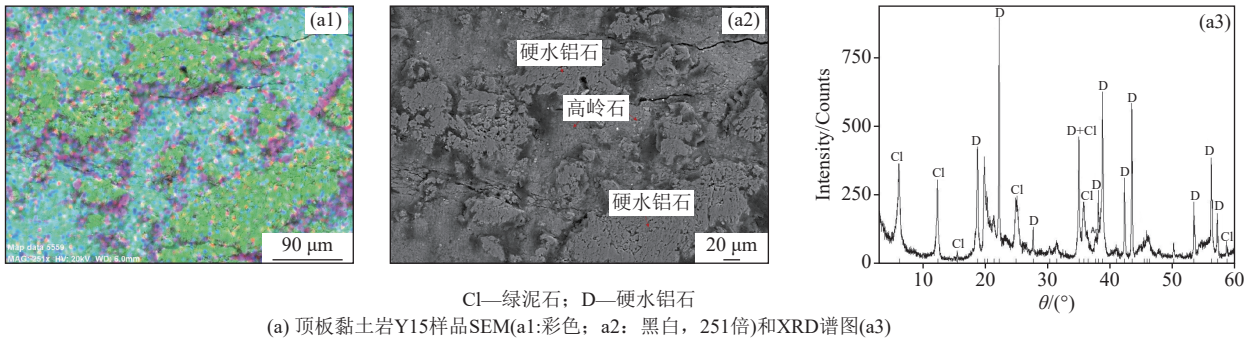
(b) 铝土矿(Ta, Nb)$_2O_5$与$Li_2O$含量相关性

(c) 底板(Ta, Nb)$_2O_5$与$Li_2O$含量相关性

**图 6　不同层位含铝岩系中 $Li_2O$ 与 (Ta,Nb)$_2O_5$ 含量相关性图解**

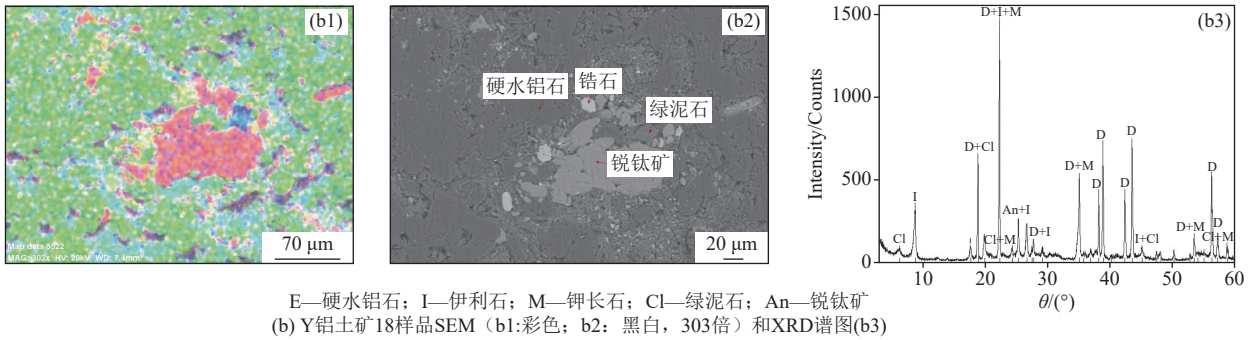
**Fig. 6　Graphical representation of the correlation between $Li_2O$ and (Ta, Nb) $_2O_5$ contents in different strata of aluminum-bearing rock series**

成矿物源长途搬运至盆地沉积。前人通过质量平衡方程和图解法研究表明, 贵州正道地区铝土矿成矿母岩在风化作用和地表水作用下, 向矿层转化的过程中, 不同种类的元素发生了富集、亏损乃至溶出[27]。在相同或类似的地质环境下, 豫西地区的含铝岩系岩石在风化作用及地表水作用下, 活泼的金属元素如锂、钾、钠、钙、镁从母岩中大量溶出, 部分铁、硅溶出, 惰性的铝、钛残留富集, 母岩总钙长石、钾长石水解形成富铝的黏土类矿物, 在初始阶段形成的黏土矿物因其离子吸附性和交换能力成为锂元素的



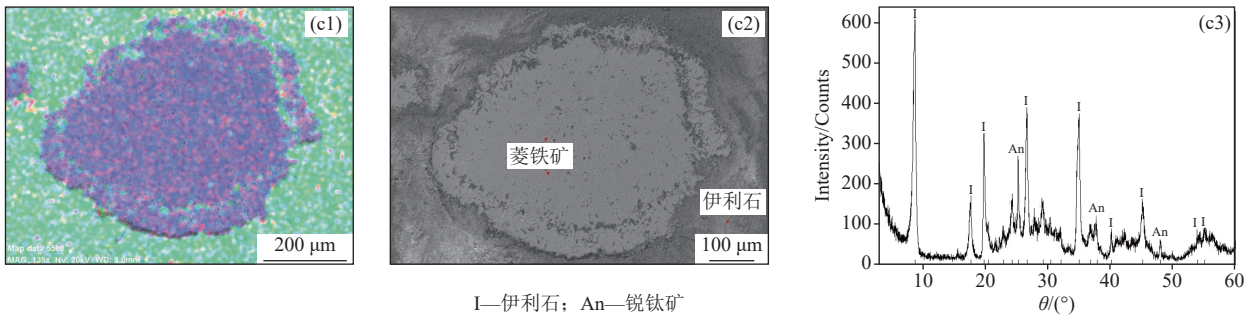

Cl—绿泥石；D—硬水铝石

(a) 顶板黏土岩Y15样品SEM(a1:彩色；a2：黑白，251倍)和XRD谱图(a3)




E—硬水铝石；I—伊利石；M—钾长石；Cl—绿泥石；An—锐钛矿

(b) Y铝土矿18样品SEM（b1:彩色；b2：黑白，303倍）和XRD谱图(b3)




I—伊利石；An—锐钛矿

(c) 铝土矿Y18样品SEM（c1:彩色；c2：黑白，135倍）和XRD谱图(c3)

**图 7　黏土岩和铝土矿 SEM 形貌、XRD 能谱特征**

**Fig. 7　SEM morphology and XRD energy spectrum of clay rock and bauxite**

载体，在铝土矿矿化过程中的去铁、脱硅、富铝作用不断加强，产生大量的三价铝和各类中间黏土矿物，其载体能力减弱，而具化学惰性特征的铌钽则在铝土矿矿化过程中富集。

## 5　资源潜力分析

通过对豫西三门峡湖滨区野猪洼、陕州区关家底、清水河、渑池县小阳河、渑池县贾家洼、兴达二矿 6 个铝土矿床含铝岩系锂、铌钽富集机理研究，锂、铌钽在铝土矿及其顶、底板中作为伴生矿产已经达到综合利用程度，目前对于含铝岩系顶板耐火黏土矿、中段铝土矿及底板铁质黏土岩的利用途径不同，耐火黏土矿可作为耐火材料原料利用，底板铁质黏土岩多作为炼钢中脱磷的使用原料[28]。目前对于风化沉积矿床中伴生锂、铌钽等元素尚无工业回收指标，仅铝土矿中锂能作为电解铝过程中的副产品进行综合利用，中铝集团已在氧化铝的生产工艺中直接提取碳酸锂。通过对 6 个研究区铝土矿中锂、铌钽品位的统计，贾家洼、小阳河及野猪洼等 3 个研究区的铝土矿伴生锂、铌钽达到了可利用规模(表 2)，未来对含铝岩系中锂、铌钽等关键金属的综合勘查在“三稀”金属找矿中具有举足轻重的作用。

**表 2　研究区铝土矿锂、铌钽含量及预测资源量**

**Table 2　Lithium, niobium, and tantalum content and resource quantity of bauxite in the study area**

| 矿种 | 找矿靶区 | 矿石量/万t | 平均品位/% | 金属量/t | 矿床规模 |
|---|---|---|---|---|---|
| $Li_2O$ | 贾家洼 | 524[29] | 0.857 | 44 907 | 中型 |
| | 小阳河 | 577[30] | 0.204 | 11 771 | 中型 |
| | 野猪洼 | 206[31] | 0.220 | 4 532 | 小型 |
| $(Ta, Nb)_2O_5$ | 贾家洼 | 524[29] | 0.053 | 2 777 | 大型 |
| | 小阳河 | 577[30] | 0.107 | 6 174 | 大型 |
| | 野猪洼 | 206[31] | 0.061 8 | 1 273 | 中型 |

## 6　结论

通过对豫西 6 个矿区含铝岩系地层中锂、铌钽分布特征和富集机理的研究, 得出以下几点认识:

1) 锂、铌钽等在含矿岩系中呈现整体聚集、局部富集的特征, 即锂富集于顶板黏土岩中, 在铝土矿及底板铁质黏土岩中富集程度依次减弱; 铌钽富集于铝土矿, 在底板及顶板岩石中富集程度依次减弱。

2) 锂在顶板黏土岩和铝土矿中的含量由黏土矿物中的 $Al_2O_3$ 含量约束, 这也佐证顶板黏土岩中随着 $Al_2O_3$ 含量增加, 锂含量升高; 而在铝土矿中随着 $Al_2O_3$ 含量升高, 锂含量降低; 这与硬水铝石中 $Al_2O_3$ 含量升高, 黏土矿物中 $Al_2O_3$ 含量降低有关。在底板铁质黏土中, 锂与 $Fe_2O_3$ 呈弱正相关, 与其他 3 种组分呈弱负相关。本次岩矿标本的 SEM 图像显示, 铁质黏土岩中 $Fe^{2+}$、$Fe^{3+}$离子(黄铁矿与褐铁矿)并存, 研究发现 $Fe^{2+}$并不直接促进 Li 富集, 而是在 $Fe^{2+}\rightarrow Fe^{3+}$的过程中促进了锂的富集, 锂与 $Fe_2O_3$ 呈弱正相关性, 可能与铁元素的赋存状态相关。

3) 铌钽在顶板黏土岩和铝土矿中的含量高低由黏土矿物中的 $Al_2O_3$ 含量约束, 体现了铌钽与含铝地层岩石的成熟度密切相关。铌钽属于高场强元素, 化学性质稳定, 不易迁移, 铝土矿是含铝岩系地层岩石中成熟度最高的, 在黏土矿物向硬水铝石矿化(脱硅、脱硫)过程中, 铌钽由于化学性质稳定, 在铝土矿中矿化富集程度高, 而顶板黏土岩、底板铁质黏土岩岩石成熟度较差, 矿化富集程度低。

4)锂、铌钽在含铝岩系顶板、铝土矿及底板岩石中呈正相关性, 从微区原位微量元素相关性分析来看, 锂、铌钽互为伴生元素, 其在含铝岩系地层沉积形成过程中矿化富集规律一致。

5)研究区含铝岩系中锂、铌钽资源具有较大潜力, 铝土矿勘查中应加强共伴生矿产系统评价, 促进含铝岩系中稀有金属如锂、铌钽等“三稀”金属的综合利用, 含铝岩系中锂、铌钽等共伴生矿产随着综合利用技术的进步提高会成为矿产资源开发利用中重要的一环。

**参考文献(References):**


[1] 王秋舒, 元春华. 全球锂矿供应形势及中国资源安全保障建议 [J]. 中国矿业, 2019, 28(5): 1−6.
Wang Q S, Yuan C H. The global supply situation of lithium ore and suggestions on resources security in China[J]. China Mining Maggazing, 2019, 28(5): 1−6.

[2] 金中国, 郑明泓, 刘玲, 等. 贵州铝土矿含矿岩系中锂的分布特征及富集机理 [J]. 地质学报, 2023, 97(1): 69−81.
Jin Z G, Zheng M H, Liu L, et al. Distribution characteristics and enrichment mechanism of lithium in bauxite series in Guizhou Province[J]. Acta Geologica Sinica, 2023, 97(1): 69−81.

[3] 王登红, 李沛刚, 屈文俊, 等. 贵州大竹园铝土矿中钨和锂的发现与综合评价 [J]. 中国科学: 地球科学, 2013, 43(1): 44-51.
Wang D H, Li P G, Qu W J, et al. Discovery and preliminary study of te high tunsten and ithm contens in the ahuyuan bauxie deposit. Guizhou, China[J]. Science China: Earth Sciences, 2013, 43(1): 44-51.

[4] 金中国, 周家喜, 黄智龙, 等. 黔北务—正一道地区典型铝土矿床伴生有益元素锂、镓和钪分布规律 [J]. 中国地质, 2015, 42(6): 1910−1918.
Jin Z G, Zhou J X, Huang Z L, et al. The distribution of associated elements Li, Sc and Ga in the typical bauxite deposits over the Wuchuan-Zheng'an-Daozhen bauxite ore district, northern Guizhou Province[J]. Geology in China, 2015, 42(6): 1910−1918.

[5] 李健康, 李鹏, 陈振宇. 锂铍等战略性金属矿产资源成矿规律与预测评价: 前言 [J]. 岩石学报, 2023, 39(7): 1881−1886.
Li J K, Li P, Chen Z Y. Metallogenic regularity, prediction and assessment of strategic metal mineral resources such as lithium and beryllium: Preface[J]. Acta Petrologica Sinica, 2023, 39(7): 1881−1886.

[6] 翟明国, 吴福元, 胡瑞忠, 等. 战略性关键金属矿产资源: 现状与问题 [J]. 中国科学基金, 2019, 33(2): 106−111.
Zhai M G, Wu F Y, Hu R Z, et al. Critical metal mineral resources: current research status and scientific issues[J]. Bulletin of National Natural Science Foundation of China, 2019, 33(2): 106−111.

[7] Wang Q F, Liu X F, Yan C H, et al Mineralogical and geochemical studies of boron-rich bauxite ore deposits in the Songqi region, SW Henan, China[J]. Ore Geology Reviews, 2012, 48: 258-270.

[8] Liu X F, Wang Q F, Feng Y W, et al. Genesis of the Guangou karstic bauxite deposit in western Henan, China[J]. Ore Geology Reviews, 2013, 55: 162-175.

[9] Liu X F, Wang Q F, Ma Y, et al. Provenance of iron, bauxite and clay deposits of the Carboniferous Benxi Formation in southern margin of North China Craton: An example from Da'an bauxite and clay deposit of Sanmenxia area, Henan Province[J]. Journal of Palaeogeography, 2020, 22(5): 965 -976.

[10] Liu X F, Wang Q F, Peng Y B, et al. Intensified and apace bauxitization over the paleo-karstic surface linked to volcanism[J]. GSA Bulletin, 2022.doi:org/10.1130/B36507.1.

[11] 孙雪飞, 刘学飞, 左鹏飞, 等. 华北南缘石炭纪仁村大型喀斯特型铝土矿物质来源与成矿过程研究 [J]. 岩石学报, 2023, 39(2): 600−620.
Sun X F, Liu X F, Zuo P F, et al. Source and metallogenic process of the Carboniferous Rencu large karstic bauxite deposit in the southern margin of North China Craton[J]. Acta Petrologica Sinic, 2023, 39(2): 600−620.

[12] Yang S J, Wang Q F, Liu X F, et al. Global spatio-temporal variations and metallogenicdiversity of karst bauxites and their tectonic, paleogeographic and paleoclimatic relationship with the Tethyan realm evolution[J]. Earth-Science Reviews, 2022, 233: 104184.

[13] 宋云华, 沈丽璞, 张乃娴, 等. 河南某黏土矿(岩)中黏土矿物及其稀土、锂等元素的初步研究 [J]. 中国科学：化学, 1987, 2：204−213.
Song Y H, Shen L P, Zhang N X, et al. Preliminary study on clay minerals and their rare earth, lithium, and other elements in a clay mine（rock）in Henan Province [J]. Science China：Chemistry, 1987, 2：204−213.

[14] Yu W, AlgeoT J, Yan J, et al. Climatic and hydrologic controls on upper Paleozoic bauxite deposits in South China[J]. Earth-Sci. Rev., 2019, 189：159−176.

[15] 王庆飞, 邓军, 刘学飞, 等, 铝土矿地质与成因研究进展 [J]. 地质与勘探, 2012, 48(3)：430-448.
Wang Q F, Deng J, Liu X F, et al. Review on research of bauxite geology and genesis in China [J]. Geology and Exploration, 2012, 48(3)：430-448.

[16] 凌坤跃, 温汉捷, 张正伟, 等. 白云岩风化剖面元素地球化学特征：对黔中九架炉组“三稀金属”富集机制的启示 [J]. 岩石学报, 2019, 35(11)：3385-3397.
Ling K Y, Wen H J, Zhang Z W, et al. Geochemical characteristics of dolomite weathering profiles and revelations to enrichment mechanism of trace elements in the Jiujialu Formation, central Guizhou Province. Aca Petrologica Sinica, 2019, 35(11)：3385-3397.

[17] Liu X, Wang Q, Feng Y, et al. Genesis of the Guangou karstic bauxite deposit in western Henan, China[J]. Ore Geol. Rev., 2013, 55：162−175.

[18] 余文超, 杜远生, 熊国林, 等. 中国铝土矿沉积中的碎屑锆石记录：对铝土矿物源模式与矿床分类的启示 [J] 古地理学报, 2020, 22(5)：947-964.
Yu W C, Du Y S, Xiong G L, et al. Detrital zircon records in bauxite deposits of China：Implication for the provenance model and ore deposits classification of bauxite[J]. Journal of Palaeogeography, 2020, 22(5)：947-964.

[19] 曹高社, 刘凌之, 邢舟, 等. 河南省巩义地区本溪组铝土矿成矿物质来源——来自碎屑锆石 LA-ICP-MS U-Pb 年龄的证据 [J]. 河南理工大学学报：自然科学版, 2018, 37(6)：55-65.
Cao G S, Liu L Z, Xing Z, et al. Material sources analysis of Karstic bauxite of Benxi formation in Gongyi area, Henan Province：Evidences from LA-CP-MS U-Pb dating of detrital zircons[J]. Journal of Henan Polytechnic University :Natural Science, 2018, 37(6)：55-65.

[20] 曹高社, 邢舟, 毕景豪, 等. 豫西偃龙地区本溪组铝土矿成矿物质来源分析 [J]. 地质学报, 2018, 92(7)：1507-1523.
Cao G S, Xing Z, Bi J H, et al. Material sources analysis of the Benxi Formation bauxite in the Yanshi-Longmen area, western Henan[J]. Acta Geologica Sinica, 2018, 92(7)：1507-1523.

[21] 王天顺, 付勇, 何伟, 等. 中国铝土矿碎屑锆石记录与物质来源分析 [J]. 矿物学报, 2021, 41(4/5)：558−569.
Wamg T S, Fu Y, He W, et al. Detrital zircon records and material source analysis of bauxite deposits in China：A review[J]. Acta Mineralogica Sinica, 2021, 41(4/5)：558−569.

[22] Dai S F, Ren D Y, Chou C L, et al. Geochemistry of trace elements in Chinese coals：A review of abundances, genetic types, impacts on human health, and industrial utilization[J]. International Journal of Coal Geology, 2012, 94：3−21.

[23] 钟海仁. 重庆南川铝土矿沉积物源及含矿岩系伴生锂赋存状态和富集机理研究. [D]. 北京：中国地质大学(北京), 2020.
Zhong H R. Provenance of bauxite, and occurrence state, enrichment mechanism of associated lithium in ore-bearing rocks of deposits in Nanchuan District, Chongqing[D]. Beijing：China University of Geosciences, 2020.

[24] 成都地质学院第九教研室. 东秦岭东段花岗伟晶岩区的同位素地质年龄 [J]. 地球化学, 1973,9(3)：165-172.
The Ninth Laboratory of Chengdu Institute of Geology. The isotopic dating of geological ages of granites and pegmatites in the eastern part of the eastern Tsinling[J]. Geochimica, 1973, 9(3)：165-172.

[25] 卢欣祥, 祝朝辉, 谷德敏, 等. 东秦岭花岗伟晶岩的基本地质矿化特征 [J]. 地质论评, 2010, 56(1)：21-30.
Lu X X, Zhu C H, Gu D M, et al. The main geological and metallogenic characteristics of granitic pegmatite in eastern Qinling belt [J]. Geological Review, 2010, 56(1)：21-30.

[26] 秦克章, 周起凤, 唐冬梅, 等. 东秦岭稀有金属伟晶岩的类型、内部结构、矿化及远景——兼与阿尔泰地区对比 [J]. 矿床地质, 2019, 38(5)：1505−1524.
Qin K Z, Zhou Q F, Zhou D M, et al. Types, internal structural patterns, mineralization and prospects of rareelement pegmatites in East Qinling Mountain in comparison with features of Chinese Altay[J]. Mineral Deposits, 2019, 38(5)：1505−1524.

[27] Jin Z G, Huang Z L, Liu L, et al. Study on metallogenic regularities of the Bauxitedeposits in Wuchuan-Zheng'an-Daozhen Area, Northern Guizhou[M]. Bejing：Geological Publishing House, 2013.

[28] 杨治争, 曹同友, 区铁, 等. 复吹转炉炉渣无氟助熔剂的特性与应用 [J]. 武汉工程职业技术学院学报, 2011, 23(3)：69−78.
Yang Z Z, Cao T Y, Ou T, et al. Characteristics and application of fluorine-free flux for slag in combined blowing converter[J]. Journal of Wuhan Engineering Institute, 2011, 23(3)：69−78.

[29] 程红卫, 画玉省, 刘晓凯. 河南省渑池县中国铝业股份有限公司中州分公司贾家洼西铝土矿资源储量核实报告 [R]. 河南鑫汇矿业有限公司, 2011.
Cheng H W, Hua Y S, Liu X K. Verification report on the resource reserves of Jiajiawa west bauxite mine of Zhongzhou Branch of Aluminum Corporation of China, Mianchi County, Henan Province [R]. Henan Xinhui Mining Co. , Ltd, 2011.

[30] 张雪超, 田恪强, 张永乐, 等. 河南省渑池义正诚矿业有限公司渑池小阳河铝(粘)土矿生产勘探报告 [R]. 河南鑫汇矿业有限公司, 2025.
Zhang X C, Tian G Q, Zhang Y L, et al. Production and exploration report of Xiaoyanghe aluminum (clay) ore mine in Mianchi, Henan Province, Mianchi Yizhengcheng Mining Co., Ltd.[R]. Henan Xinhui Mining Co. , Ltd., 2025.

[31] 唐华东, 高威, 潘岩, 等. 河南省三门峡市湖滨区野猪洼捞煤沟铝土矿生产勘探报告 [R]. 河南鑫地矿业投资有限公司, 2022.
Kang H D, Gao W, Pan Y, et al. Production and exploration report of bauxite in Laomeigou, Yezhuwa, Hubin District, Sanmenxia City, Henan Province[R]. Henan Xindi Mining Investment Co. , Ltd , 2022.

# Distribution and enrichment mechanisms of lithium and niobium-tantalum in aluminum-bearing rock series within western Henan

YANG Yong-Qian [1, 2], YANG Xin-Xin [1, 2], CHEN Wang [1, 2], GAO Wan-Lu [1, 2], CHEN Xin [1, 2], CHEN Peng [1, 2], LI Xiao-Yang [1, 2], YAN Hong-Li [1, 2]

(1. *Henan Academy of Geology*, *Zhengzhou* 450016, *China*; 2. *Henan Key Laboratory of Deep Prospecting and Exploration Technology for Non-ferrous Metals*, *Zhengzhou* 450016, *China*)

**Abstract:** The western Henan hosted large-scale diasporic karst bauxite deposits in the Late Carboniferous formations, characterized by abundant rare, dispersed, and rare earth elements, along with high abundances of lithium and niobium-tantalum. Focusing on six bauxite deposits in western Henan, this paper, based on their robust geological data, examines the correlations of lithium and niobium-tantalum with the primary chemical components of ores. Meanwhile, using X-ray diffraction (XRD) and scanning electron microscopy (SEM) methods, it investigated the distribution and enrichment mechanisms of lithium and niobium-tantalum in aluminum-bearing rock series. The results show that lithium and niobium-tantalum exhibited positive correlations with the primary chemical components in bauxites and roof clay rocks, with significantly different correlations observed in the floor ferrous clay rocks. This implies the complexity of provenances of the aluminum-bearing rock formations. In addition, in the roof clay rocks, bauxites, and floor ferrous clay rocks, the content of lithium was positively correlated with that of niobium-tantalum. This demonstrates that they share substantially identical enrichment mechanisms during deposition and the same or overlapping ore-forming provenances. This study demonstrates the possibility of associated lithium and niobium-tantalum in the study area evolving into industrial deposits, filling the gap in research on their enrichment mechanisms in the aluminum-bearing rock series, western Henan. The study area holds significant potential for lithium and niobium-tantalum resources, which will bring enormous economic benefits. Therefore, further mineral exploration should be carried out here.

**Key words:** lithium and niobium-tantalum; distribution characteristics; enrichment mechanism; correlation analysis; aluminum bearing rock series

(本文编辑: 蒋实)