doi: 10.11720/wtyht.2026.1352
张忠进, 邓飞, 车旭东, 等. 粤东北地区石人背盆地锂地球化学特征及其找矿指示意义[J]. 物探与化探, 2026, 50(3): 421-431. https://doi.org/10.11720/wtyht.2026.1352
Zhang Z J, Deng F, Che X D, et al. Lithium geochemistry and its implications for ore prospecting in the Shirenbei Basin, northeastern Guangdong[J]. Geophysical and Geochemical Exploration, 2026, 50(3): 421-431. https://doi.org/10.11720/wtyht.2026.1352

粤东北地区石人背盆地锂地球化学特征及其找矿指示意义

张忠进[1], 邓飞[1,2], 车旭东[3], 邵小阳[1], 卢琦园[1], 方杰[1], 吴克宁[1]
(1. 广东省地质局 佛山地质调查中心, 广东 佛山 528000; 2. 同济大学 土木工程学院, 上海 200092; 3. 南京大学 地球科学与工程学院, 江苏 南京 210023)

摘 要: 为查明粤东北石人背盆地沉积黏土型锂矿的地球化学特征及其找矿指示意义, 探讨区域成矿条件与找矿标志, 在 1∶20 万水系沉积物测量基础上, 基于矿床学、沉积学、矿物学与地球化学分析方法, 对 Li 地球化学特征及其与地层、岩性和沉积环境的关系进行了综合研究。研究区共圈定 Li 异常 2 处, 其中北部异常规模较大, Li 峰值高达 234.3×10^{-6}, 异常中心出露叶塘组(K_2yt); 综合异常由 Li、F、Na_2O 等 16 种元素(或氧化物)组成, 各异常之间套合良好。调查发现: 叶塘组(K_2yt)整体为湖相蒸发沉积建造, 沉积中心位于盆地北部, Li 高值区主要对应含钙质细碎屑岩发育区, 岩矿学分析表明全岩 Li_2O 含量与黏土矿物含量呈显著正相关关系; 叶塘组(K_2yt)的全岩 Li 地球化学背景值显著高于其他地质单元, 富集中心为叶塘组(K_2yt)第 4 层; 研究区圈定含矿层 3 层, 主要分布于叶塘组中上部, 总厚度达 226.14 m, 含矿岩系出露面积约 5.2 km^2, 显示出良好的找矿潜力。研究认为, 水系沉积物 Li 地球化学特征能够有效反映区域成矿背景, Li-F-Na_2O 组合异常可作为沉积黏土型锂矿的重要找矿标志; 成矿受古气候、蒸发沉积环境、岩相古地理格局、特定地层及其岩性建造等因素共同控制; 南岭成矿带东段及邻区武夷成矿带发育多处类似沉积盆地, 具备进一步找矿突破前景。

关键词: 石人背盆地; Li 地球化学特征; 黏土型锂矿; 叶塘组
中图分类号: P596; P632; P31 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-8918(2026)03-0421-11

0 引言

我国锂的进口依赖度已超过 75%, 随着新能源等产业的快速发展, 锂资源需求持续增长, 资源保障问题日益凸显[1]。锂矿床类型主要有卤水型、硬岩型及沉积黏土型[2], 其中沉积黏土型锂矿因其赋存层位浅、矿体规模大且分布稳定, 逐渐成为重要的找矿方向[3]。我国黏土型锂矿以碳酸盐黏土型为主[4], 而华南锂成矿带以硬岩型锂矿为主, 卤水型和黏土型锂矿相对较少[4-6]。

南岭地区南东段, Li 高背景区主要分布于中生代—新生代沉积盆地内[7](图 1), 前期研究已在石人背盆地发现火山黏土型锂矿[8], 表明该类沉积盆地具备形成沉积黏土型锂矿的地球化学基础[3]。然而, 已有研究主要集中于典型剖面和岩石学特征, 对区域尺度 Li 地球化学异常特征、矿体空间展布及其与沉积环境的耦合关系认识仍较为薄弱, 制约了找矿预测工作的深入开展。

基于此, 本文在前人 1∶20 万水系沉积物测量成果资料基础上, 结合矿床学、沉积学、矿物学及地球化学分析, 系统解析石人背盆地 Li 地球化学异常特征及其与地层、岩性和沉积环境的关系, 重点探讨成矿约束条件与找矿标志, 补充含矿岩系平面展布特征及多层含矿层信息, 并进一步揭示全岩 Li_2O 含量与岩性之间的内在联系。研究成果可为南岭东段及邻区武夷成矿带沉积黏土型锂矿找矿预测提供重要依据。

收稿日期: 2025-09-23; **修回日期:** 2026-03-31
基金项目: 广东省自然资源厅项目“广东和平地区 1∶5 万区域地质调查”(2022-11)
第一作者: 张忠进(1969-), 男, 高级工程师, 从事勘查地球化学和区域地质调查工作。Email: zzj2014zzj@126.com

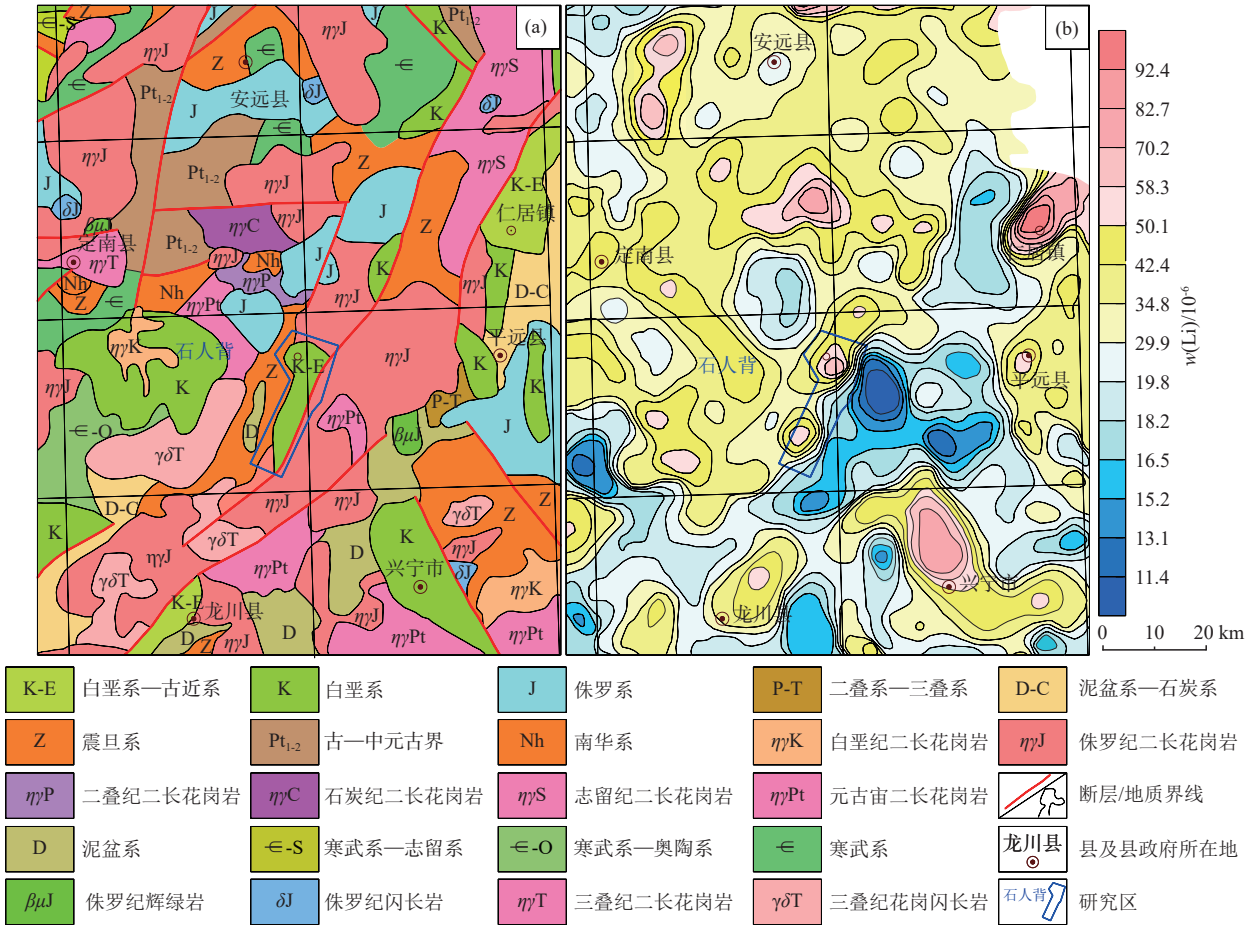


图 1　南岭地区南东段地质简图 (a) 与 Li 地球化学分布 (b)（据陈希清等[7] 修改）

Fig. 1　Simplified geological map of the southeastern segment of the Nanling region (a) and Li geochemical distribution (b)

（modified after Chen, et al.[7]）

1　区域地质概况

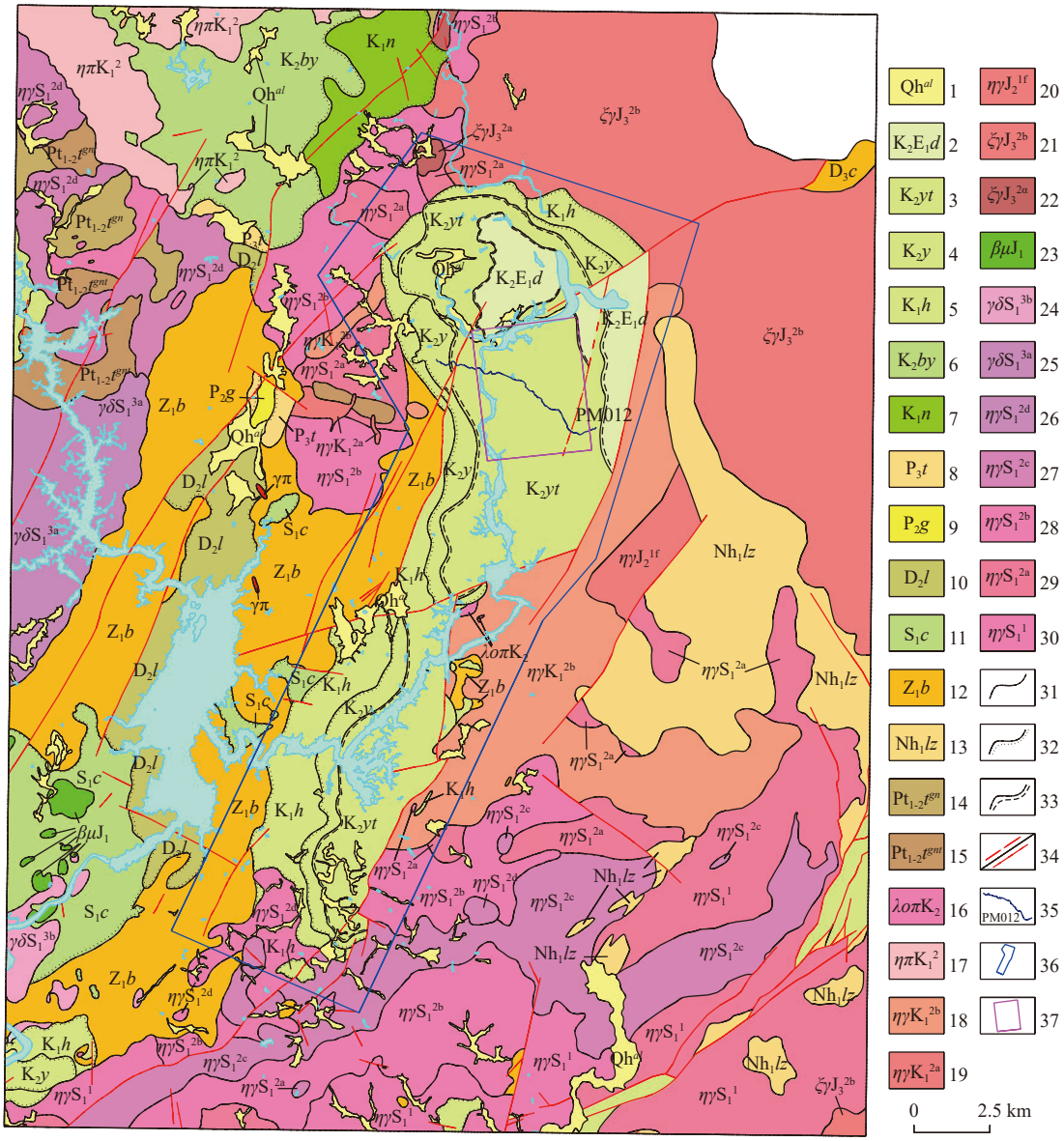
石人背盆地位于南岭成矿带南东段，区域上以 NE 向构造为主，辅以 NW 向、EW 向及 NNE 向构造，其相互切割、复合，构成了本区构造的基本格架。该区域发育众多中生代—新生代沉积盆地或火山盆地，沉积盆地绝大多数属于断褶或地堑型构造成因，形成和发育机制均与断裂构造带存在密切关系。区内地层发育，自中元古界至第四系均有出露，其中震旦系、泥盆系、侏罗系、白垩系出露面积较大，岩性以区域变质岩、碎屑岩为主，火山岩为次，局部为碳酸盐岩等。岩浆活动频繁，时代跨度大且分布面积广，从元古宙到中生代不同程度地保留了岩浆活动的印记，形成了各类侵入岩和喷出岩。侵入岩之中，志留纪二长花岗岩、侏罗纪二长花岗岩最为发育。火山岩也较为发育，有一定分布面积，主要为早志留世火山岩、早白垩世中—酸性火山岩和晚白垩世酸性火山岩[7, 9-10]。

2　矿区地质特征

石人背盆地位于广东省东北部，处于 NE 向河源断裂带与 EW 向贵东断裂带交汇处。河源断裂带总体走向 NE，局部 NNE 或 NEE，呈“S”形弯曲，一般倾向 SE，倾角主要在 30°～50°之间。河源断裂带与闽北的邵武断裂斜接，统称为崇安—河源深断裂带，该断裂带是一条多次活动的构造岩浆活动带，断裂带发育有片理化、硅化构造岩带，力学性质以压剪性为主，间有张性。EW 向贵东断裂带由一系列 EW 走向的逆冲断裂组成，挤压特征明显，均向南倾斜。

2.1　地层

石人背盆地内主要出露合水组（K_1h）、优胜组（K_2y）、叶塘组（K_2yt）和丹霞组（K_2E_1d）地层，整体呈环状分布。由于断层切割，盆地内南东部部分地层缺失（图 2）。盆地外围出露有南华系楼子坝组（Nh_1lz）、震旦系坝里组（Z_1b）和志留系茶山园组（S_1c）等地层。



1—冲积层; 2—丹霞组; 3—叶塘组; 4—优胜组; 5—合水组; 6—白云嶂组; 7—南山村组; 8—童子岩组; 9—孤峰组; 10—老虎头组; 11—茶园山组; 12—坝里组; 13—楼子坝组; 14—桃溪岩组片麻岩岩段; 15—桃溪岩组变粒岩岩段; 16—晚白垩世石英斑岩; 17—早白垩世含角闪石黑云母二长斑岩; 18—早白垩世粗中粒(斑状)(角闪石)黑云母二长花岗岩; 19—早白垩世细粒黑云母二长花岗岩; 20—中侏罗世细粒黑云母二长花岗岩; 21—晚侏罗世粗中粒(斑状)含角闪石黑云母正长花岗岩; 22—晚侏罗世细粒黑云母正长花岗岩; 23—早侏罗世辉绿岩; 24—早志留世中细粒(斑状)黑云母花岗闪长岩; 25—早志留世细粒黑云母花岗闪长岩; 26—早志留世细粒黑云母二长花岗岩; 27—早志留世细粒二云母二长花岗岩; 28—早志留世弱片麻状细粒黑云母二长花岗岩; 29—早志留世条纹条带状、片麻状细粒黑云母二长花岗岩细粒; 30—早志留世细粒、中粒(斑状)黑云母二长花岗岩; 31—地质界线; 32—角度不整合地质界线; 33—平行不整合地质界线; 34—实测断层/推测断层; 35—综合剖面; 36—石人背盆地; 37—找矿目标区

1—alluvial layer; 2—Danxia Formation; 3—Yetang Formation; 4—Yousheng Formation; 5—Heshui Formation; 6—Baiyunzhang Formation; 7—Nanshancun Formation; 8—Tongziyan Formation; 9—Gufeng Formation; 10—Laohutou Formation; 11—Chayuanshan Formation; 12—Bali Formation; 13—Louziba Formation; 14—gneiss member of Taoxi Rock Formation; 15—leptynite member of Taoxi Rock Formation; 16—late Cretaceous quartz porphyry; 17—early Cretaceous hornblende-bearing biotite monzonite porphyry; 18—early Cretaceous coarse-medium grained (porphyritic) hornblende-bearing biotite monzogranite; 19—early Cretaceous fine-grained biotite monzogranite; 20—middle Jurassic fine-grained biotite monzogranite; 21—late Jurassic coarse-medium grained (porphyritic) hornblende-bearing biotite syenogranite; 22—late Jurassic fine-grained biotite syenogranite; 23—early Jurassic diabase; 24—early Silurian medium-fine grained (porphyritic) biotite granodiorite; 25—early Silurian fine-grained biotite granodiorite; 26—early Silurian fine-grained biotite monzogranite; 27—early Silurian fine-grained two-mica monzogranite; 28—early Silurian weakly gneissic fine-grained biotite monzogranite; 29—early Silurian striped-banded, gneissic fine-grained biotite monzogranite; 30—early Silurian fine-grained, medium-grained (porphyritic) biotite monzogranite; 31—geological boundary; 32—angular unconformity boundary; 33—parallel unconformity boundary; 34—measured fault/Inferred fault; 35—comprehensive section; 36—Shirenbei Basin; 37—prospecting target area

图 2　石人背盆地及周边地质

Fig. 2　Geological map of Shirenbei Basin and its surrounding areas

合水组(K_1h)下部岩性以紫红色中层—块状复成分砾岩、砂砾岩、含砾砂岩为主,上部岩性以紫红色薄层状—中层状粉砂岩、泥岩为主,角度不整合或断层接触覆盖于早期地层或岩体之上;优胜组(K_2y)由石泡流纹岩、流纹质熔岩、流纹质(含角砾)晶屑熔结凝灰岩和流纹质凝灰岩等组成,与下伏合水组(K_1h)呈火山喷发不整合接触;研究区内叶塘组(K_2yt)原划分为 14 层,为简化表述与对比分析,将其归并为 6 层,第 1 层主要岩性为砂砾岩,第 2 层以砂岩为主,第 3 层以粉砂岩、钙质粉砂岩组合为主,第 4 层以泥岩、页岩建造为主,第 5 层岩性为泥岩与泥灰岩互层或夹层,第 6 层以粉砂岩为主,与下伏优胜组(K_2y)呈平行不整合接触;丹霞组(K_2E_1d)下部岩性以紫红色中层—块状复成分砾岩、砂砾岩为主,中部以紫红色中层状长石砂岩为主,上部为紫红色中层—块状砾岩、砂砾岩建造,与下伏叶塘组(K_2yt)呈平行不整合接触,未见顶。

2.2 岩浆岩

石人背盆地所在区域侵入岩活动频繁,盆地外围出露多期次花岗岩,分布面积大,主要有志留纪、侏罗纪、白垩纪花岗岩。盆地内出露有火山岩地层优胜组(K_2y),盆地西侧出露茶园山组(S_1c),盆地北西侧出露南山村组(K_1n)和白云嶂组(K_1by)。

2.3 构造

白垩纪末冈底斯—印度板块与欧亚板块碰撞,石人背盆地及其周边地区处于张性构造环境,在拉张的构造背景下发育而成断陷盆地,沉降中心在南东一侧。盆地边缘断裂发育,为 NE 向的河源深断裂带组成部分,是区域性的活动断裂。盆地南东侧被 NNE 向月弯山—将军塘断裂所切割,北西侧又被 NNE 向梅树塘—赤化断裂所切割,中部有 NEE 向长山排—岩镇断裂。石人背盆地为不完整向斜盆地,盆地南北两端为平缓的向斜,南东东侧因断层切割出现部分地层缺失而呈单斜构造,岩层总体倾向 NE—NEE,局部出现次级向斜—背斜,从而构成了复向斜构造,次级向斜—背斜构造为不对称褶皱。

2.4 矿(化)层特征

本次找矿目标区位于石人背盆地的中北部,自 SWW 向 NEE 依次出露叶塘组(K_2yt)第 1 层～第 6 层,顶部被丹霞组(K_2E_1d)覆盖。赋矿层位为叶塘组第 4 层、第 5 层,依据现有资料将这 2 个岩性层暂定为含矿岩系,含矿岩系的南西西侧因风化剥蚀而尖灭,南南东部因岩性侧变而出现尖灭,北东东侧和北北西端被其他岩层所覆盖。估算含矿岩系出露总面积约 5.2 km^2,最大延伸约 3.8 km,最宽处约 1.7 km。

本研究 Li_2O 边界品位选取 0.10%,最低工业品位选取 0.20%[11]。初步圈定含矿层 3 层,估算含矿层总厚度约 226.14 m,平均品位 0.134 3%,自下而上含矿层依次为:Ⅰ号含矿层,含矿层总厚度约 196.62 m,共有 19 件样品控制,平均品位 0.138 7%,其中有 3 件分析样 Li_2O 品位大于 0.2%,最高 0.211 8%,分布于叶塘组(K_2yt)第 4 层顶部;Ⅱ号含矿层,含矿层厚度约 14.76 m,共 6 件样品控制,Li_2O 最高品位 0.161 9%,平均品位 0.121 9%;Ⅲ号含矿层,含矿层厚度约 14.76 m,1 件样品控制,Li_2O 品位 0.125 0%。

Ⅰ号含矿层产于叶塘组第 4 层及第 5 层的下部,Ⅱ号含矿层、Ⅲ号含矿层产于叶塘组第 5 层中部,含矿层位于柱状图高度比例约 44.6%～76.3%处(图 3),即含矿层位于叶塘组(K_2yt)中上部。

据野外地质调查及薄片(表 1)和背散射电子(BSE)图像鉴定结果,均未发现蚀变、矿化,岩石是沉积成因,矿床也是沉积成因。以矿石品位划分,该矿区以低品位矿石为主,中部存在工业品位矿石。从薄片鉴定结果还可以看出,Li_2O 品位与泥质含量为正相关关系,岩石中含少量火山碎屑。

3 研究区 Li 地球化学特征

3.1 1∶20 万水系沉积物 Li 地球化学特征

石人背盆地分布于 1∶20 万兴宁幅—寻乌幅内[12],采样单元网格为 1 km×1 km,实际平均采样密度 1.06 个/km^2,水线附近采集淤泥、粉砂及细砂等,过 60 目尼龙筛;分析组合样的基本网格单元为 2 km×2 km,由每个采样网格单元取等质量子样组合而成,扫面工作质量评定为“优良”;分析 44 个元素或氧化物,Li 的分析方法为火焰原子吸收光谱法,分析合格率为 100%;组合分析样的基本网格单元几何中心为分析值的投影点。以统计结果为基础确定异常下限,其中岩浆岩区 Li 异常下限为 54×10^{-6},地层区为 62×10^{-6};将空间重叠度高或较高的异常归并为 1 个综合异常。该区域 Li 的背景值为 31.9×10^{-6},略高于广东省背景值(26.8×10^{-6})[13],变异系数为 0.422,与广东省相当(0.420)。

石人背盆地内 Li 异常共 2 处,北部的韭菜塘一带 Li 异常峰值高达 234.3×10^{-6}(图 3),面积约 24 km^2;南部的彭坑大桥一带 Li 异常峰值仅 74.1×10^{-6},面积约 15 km^2。石人背盆地一带仅圈出综合异常 1 处,分布于盆地北部,由 Li、F、Na_2O 等 16 种元素或氧化物异常组成,可细分为 2 个子区。南部异常子区主要分布于石人背盆地内,由 Li、F、Na_2O 及 Cu、

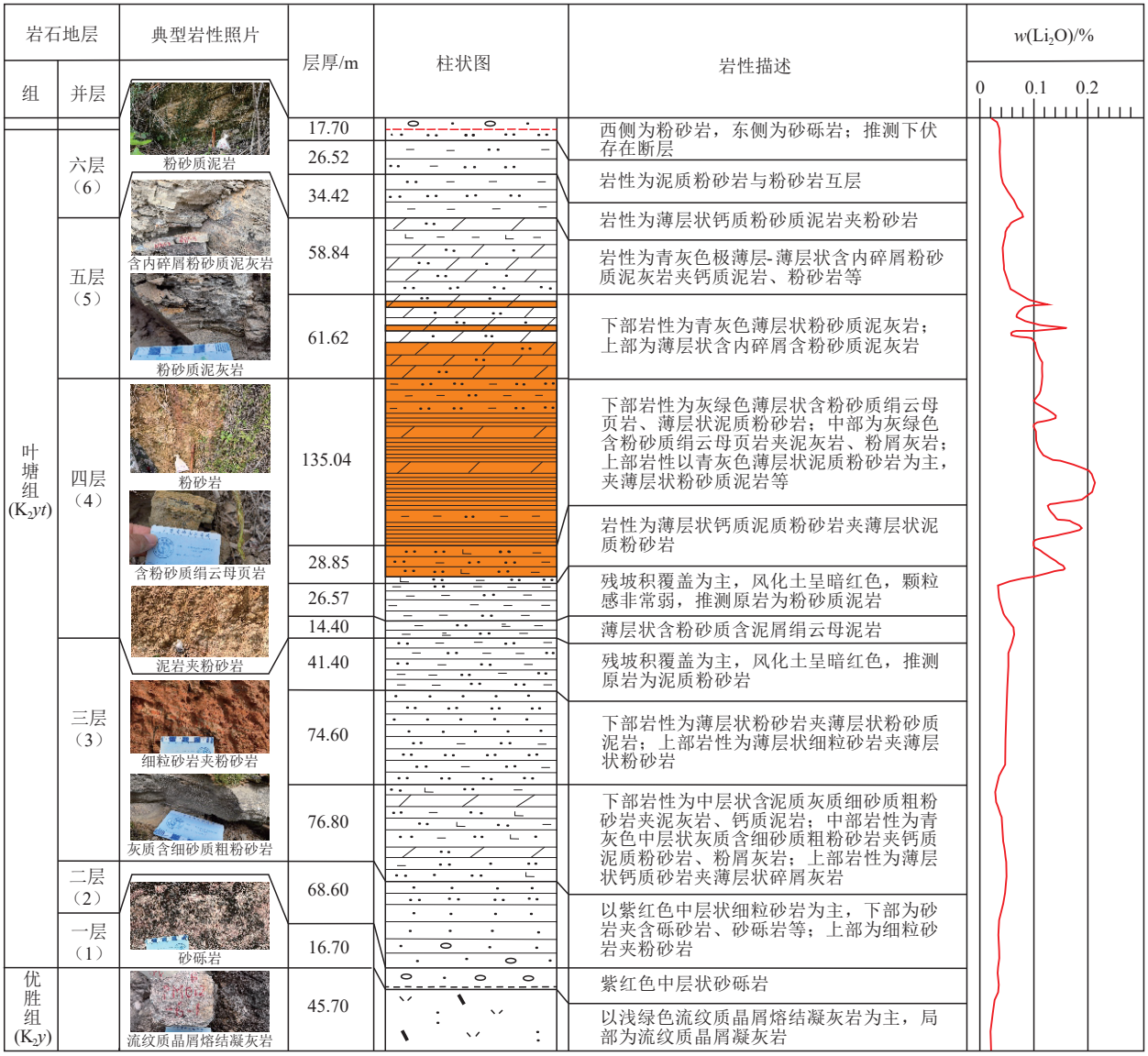


图 3　含矿层在叶塘组中所处层位(PM012)(据邵小阳等[8] 修改)

Fig. 3　The stratigraphic position of the ore-bearing layer in the Yetang Formation (PM012)

(modified after Shao, et al .[8])

表 1　PM012 剖面部分薄片鉴定结果

Table 1　Thin section identification results of profile PM012

样品编号	$w(Li_2O)$/%	鉴定结果	占比/%					
			石英	长石	火山碎屑	内碎屑	泥质	(泥)灰质
21-1	0.034 8	含泥质灰质细砂质粗粉砂岩	37	10	8		20	25
22-1	0.037 4	灰质含细砂质粗粉砂岩	50	8	7		5	30
33-1	0.132 3*	粉砂岩夹泥岩	18				62	
35-4	0.131 0*	含粉砂质绢云母页岩	12				80	
36-2	0.211 8*	含粉砂质绢云母页岩	25				66	
38-1	0.148 1*	粉砂质泥灰岩	38		3	6		56
41-1	0.107 0*	含内碎屑含粉砂质泥灰岩	15		3	10		67
42-1	0.100 4*	含内碎屑含粉砂质泥灰岩	19			10		67
44-1	0.054 3	含内碎屑粉砂质泥灰岩	30			14		52

注: “*”表示数据引自邵小阳等[8]; 占比为各类碎屑成分在碎屑总量中所占的体积分数; 38-1～44-1号样中泥灰质指泥质与灰质混合物(未细分)。

As、Hg、Cs 等组成，异常之间重叠度高，地质背景简单，主要出露叶塘组(K_2yt)。北部异常子区主要分布于盆地边缘处，由 Mo、Ag、S、Bi、U、Se、Mg 等异常组成，异常之间重叠度低，所处地质背景复杂，出露有合水组(K_1h)、优胜组(K_2y)、叶塘组(K_2yt)、丹霞组(K_2E_1d)和晚侏罗世第二阶段第二次粗中粒(斑状)含角闪石黑云母正长花岗岩($\xi\gamma J_3^{2b}$)。笔者对 1∶20 万水系沉积物测量综合异常初步解读，南部异常子区 Li、F、Na_2O 异常组合可能与蒸发沉积岩有关联，主要异常之间套合好，属于地质成因，Li 异常峰值高，有找矿潜力。

3.2 岩石 Li 地球化学特征

本项目组共采集全岩 Li_2O 分析样 320 件(含已报道的 58 件岩石样数据)，样品主要采集于盆地外围。综合剖面测量样品采集设计点间距为 50 m，连续捡块取全岩分析样，每件样品代表岩层厚度约 1 m，其余样品为简单随机采样[14]。石人背盆地及其周边区域 Li_2O 岩石背景值为 68×10^{-6}(表 2)，明显高于地壳的背景值(45.15×10^{-6})[15]，成矿地球化学条件较好。

表 2 石人背地区岩石 Li_2O 地球化学参数统计

Table 2 Statistical parameters of Li_2O geochemistry in rocks from the Shirenbei area

地质代号	主要岩性	最大值	最小值	平均值($\overline{X}$)	标准离差(S)	C_V	样本数
K_2E_1d	砂砾岩、含砾不等粒砂岩	0.0129	0.0034	0.0081	0.00375	0.461	6
K_2yt	泥岩、粉砂岩、细粒砂岩及泥灰岩	0.2118	0.0047	0.0781	0.05580	0.715	60
K_2y	流纹质熔结凝灰岩、流纹质凝灰熔岩	0.0353	0.0010	0.0137	0.00776	0.565	44
K_1h	复成分砾岩、砂砾岩、砂岩	0.0432	0.0038	0.0197	0.02078	1.055	3
K_1by	英安质、流纹质火山碎屑岩	0.0144	0.0017	0.0048	0.00202	0.424	75
K_1n	流纹质火山碎屑岩、粗面质火山碎屑岩	0.0134	0.0011	0.0055	0.00371	0.679	14
$Pt_{1\text{-}2}t^{gn}$	片麻岩	0.0168	0.0025	0.0086	0.00552	0.644	9
$Pt_{1\text{-}2}t^{gnt}$	变粒岩	0.0201	0.0101	0.0166	0.00566	0.340	3
$\eta\pi K_1^{2}$	二长斑岩	0.0138	0.0018	0.0053	0.00216	0.407	27
$\eta\gamma K_1^{2b}$	粗中粒斑状黑云母二长花岗岩	0.0045	0.0015	0.0032	0.00120	0.375	6
$\eta\gamma K_1^{2a}$	细粒黑云母二长花岗岩	0.0021	0.0015	0.0018	0.00043	0.243	2
$\xi\gamma J_3^{2b}$	粗中粒斑状黑云母正长花岗岩	0.0145	0.0026	0.0083	0.00429	0.517	15
$\xi\gamma J_3^{2a}$	细粒黑云母正长花岗岩	0.0066	0.0019	0.0042	0.00332	0.786	2
$\gamma\delta S_1^{3a}$	细粒黑云母花岗闪长岩	0.0179	0.0044	0.0103	0.00504	0.490	6
$\eta\gamma S_1^{2d}$	细粒黑云母二长花岗岩	0.0147	0.0015	0.0038	0.00219	0.572	15
$\eta\gamma S_1^{2b}$	弱片麻状细粒黑云母二长花岗岩	0.1056	0.0015	0.0088	0.00523	0.594	22
$\eta\gamma S_1^{2a}$	条纹条带状细粒黑云母二长花岗岩	0.0153	0.0066	0.0110	0.00614	0.560	2
	花岗质碎斑糜棱岩	0.0772	0.0048	0.0319	0.03950	1.24	3
	酸性岩脉类	0.0292	0.0010	0.0091	0.01060	1.162	6
全区		0.2118	0.0010	0.0068	0.00400	0.587	320

注：Li_2O含量单位为%；$\overline{X}$为无限次剔除$X\pm2.5S_0$范围之外数据后的算术均值，S为无限次剔除$X\pm2.5S_0$范围之外数据后的标准离差；变异系数(C_V)=标准离差(S)/平均值($\overline{X}$)；含已报道的58件岩石样分析数据。

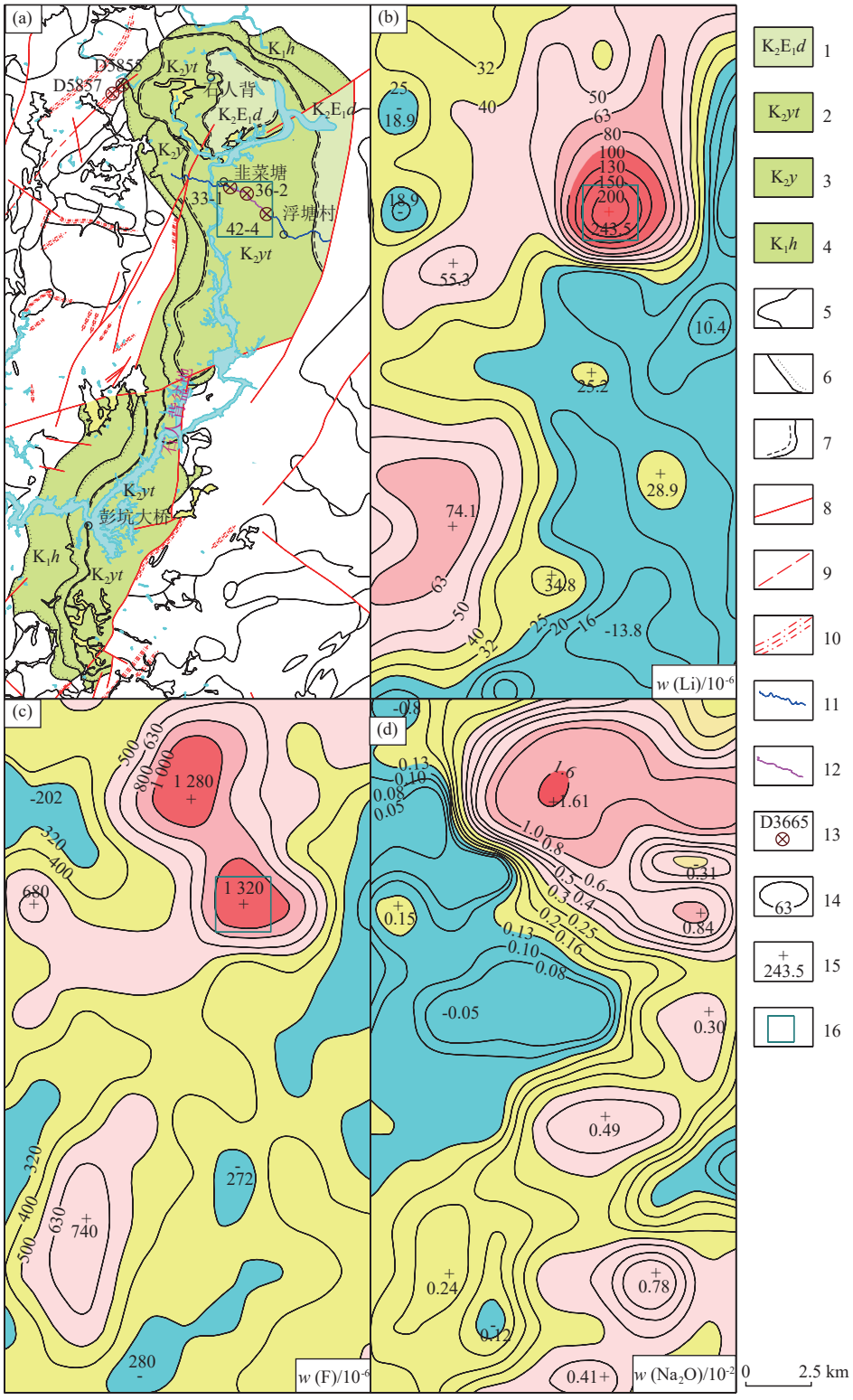
采集的全岩分析样涉及正式填图单位 17 个，非正式填图单位 2 个。其中，叶塘组(K_2yt)共采集了 60 件全岩 Li_2O 分析样，背景值达 0.0781%，变异系数为 0.715，易于成矿[16-17]。优胜组(K_2y)共采集了 44 件 Li_2O 分析样，背景值为 0.0137%，明显高于地壳的背景值，且属下伏层位，半环状分布于找矿目标区外围，可提供成矿物质。盆地北西侧的 D5857 点岩性为片麻状细粒黑云母二长花岗岩($\eta\gamma S_1^{2b}$)(图 4)，Li_2O 含量达 0.1056%，D5855 点岩性为花岗质糜棱岩，Li_2O 含量达 0.0772%，可以提供部分成矿物源。

叶塘组(K_2yt)岩石 Li_2O 地球化学特征总体近单峰式，浓集中心为第 4 层(表 3)。以泥岩为主的第 4 层和以泥岩与泥灰岩互层为主的第 5 层，平均 Li_2O 含量高于沉积黏土型锂矿的边界品位，具有显著的找矿指示意义。

4 讨论

4.1 从 1∶20 万水系沉积物成果提取找矿信息有效性讨论

研究区内 1∶20 万水系沉积物测量 Li 异常峰值为 243×10^{-6}，该分析组合样代表的网格单元面积为 4 km^2，此单元内岩石加权平均含量约 374.7×10^{-6}(表 4)，两者比值约 0.65，差异较小。截至目前，所有达到锂矿石边界品位的全岩分析样都分布于 1∶20 万水系沉积物测量 Li 峰值点所在的网格单元



1—丹霞组; 2—叶塘组; 3—优胜组; 4—合水组; 5—地质界线; 6—角度不整合地质界线; 7—平行不整合地质界线; 8—实测断层; 9—推测断层; 10—韧性剪切带; 11—Li_2O 含量<0.1% 的剖面段; 12—Li_2O 含量≥0.1% 的剖面段; 13—全岩分析采样点位及其编号; 14—等值线及线值; 15—峰值及其所在位置; 16—Li 峰值点所在的基本网格单元

1—Danxia Formation; 2—Yetang Formation; 3—Yousheng Formation; 4—Heshui Formation; 5—geological boundary; 6—angular unconformity; 7—parallel unconformity; 8—observed fault; 9—inferred fault; 10—ductile shear zone; 11—profile segments with $w(Li_2O)$<0.1%; 12—profile segments with $w(Li_2O)$≥0.1%; 13—representative whole-rock sampling points and sample numbers; 14—contours and contour values; 15—peak value and its location; 16—grid cell containing Li peak value (basic grid unit)

图 4　石人背盆地地质简图(a)与 Li(b)、F(c)和 Na_2O(d)地球化学等值线分布

Fig. 4　Simplified geological map of the Shirenbei Basin (a) and geochemical distributions of Li (b), F (c), and Na_2O (d)

表 3 叶塘组(K_2yt)岩石 Li_2O 地球化学参数统计

Table 3 Li_2O geochemical index of the Yetang Formation (K_2yt)

叶塘组	主要岩性	样品数	$w(Li_2O)$/%	$w(Li)$/%
1层	砂砾岩	3	0.009 4	0.004 4
2层	砂岩	7	0.039 0	0.018 1
3层	粉砂岩	11	0.038 8	0.018 1
4层	泥岩	15	0.134 1	0.062 4
5层	泥岩与泥灰岩互层或夹层	19	0.103 2	0.048 0
6层	粉砂岩	5	0.040 3	0.018 7

注: 含量为算术平均数; 含已报道的58件岩石样分析数据。

表 4 估算 Li 异常峰值点所在网格单元的岩石加权平均含量

Table 4 Weighted average Li content of rocks within grid cells containing Li anomaly peak values

叶塘组	主要岩性	Li岩石背景值 / 10^{-6}	出露面积/km^2	规模
1层	砂砾岩	43.7	0.000 6	0.026 0
2层	砂岩	181.4	0.245 9	44.606
3层	粉砂岩	180.5	1.821 0	328.627
4层	泥岩	623.7	1.427 9	890.581
5层	泥岩与泥灰岩互层	480.0	0.479 4	230.112
6层	粉砂岩	187.4	0.025 3	4.741
合计			4.000 1	1 498.693

注: 规模=岩石背景×面积; 估算全岩加权平均含量值=总规模÷总面积。

内, 两者空间对应关系显著(图 4a、b)。峰值点南侧 Li 呈低背景状, 该区主要出露叶塘组(K_2yt)第 1 层, 其岩石 Li 背景值仅 43.7×10^{-6}; 自峰值点向北, Li 含量下降缓慢, 该区域依次出露叶塘组第 4~6 层、丹霞组(K_2E_1d)、优胜组(K_2y)及合水组(K_1h), 这些地质体中 Li 的背景值高或较高。可见, 分布于盆地北部的 1∶20 万水系沉积物测量 Li 异常属显著矿致异常, Li 地球化学特征能很好地反映地质矿产背景; 基于 Li 异常提取沉积黏土型锂矿找矿信息, 具较好的有效性与实用性。

前人研究表明, 部分流纹质火山岩和高分异花岗岩富 Li、Na、F 等元素[3, 18], 在风化作用下, Li 从矿物晶格中析出, Li^+和 Ca^{2+}、K^+、Na^+等与卤族元素化合形成可溶盐, 随流水迁移至沉积区[19]。石人背盆地西侧同样出露流纹质火山岩, 北侧出露高分异花岗岩, 1∶20 万水系沉积物测量主要为 Li 和 F、Na_2O 异常, 这与 Li 等元素地球化学性质和地球化学行为有关, 可列为沉积黏土型锂矿找矿地球化学标志。

4.2 成矿条件与找矿标志初探

研究区锂矿产于石人背盆地内, 该盆地边缘发育复成分砾岩及含砾粗砂岩, 砾石排列杂乱, 分选性和磨圆度较差; 盆地沉积中心则以水平层理、平行层理及低角度斜层理为特征, 反映典型的内陆湖泊沉积环境。

研究表明, 华南地区白垩纪—古近纪总体处于温暖湿润气候背景, 但晚白垩世中期经历阶段性干旱气候[20]; 干旱条件下古湖盆水体强烈蒸发, 盐分逐渐浓缩, 从湖岸至湖盆中心依次沉积砂砾岩、砂岩、粉砂岩及泥岩(高灰泥岩)等蒸发沉积序列, 该类沉积体系通常富集 Li 等微量元素[21]。沉积黏土型锂矿中 Li 既可赋存于黏土矿物晶格中, 也可呈吸附态存在, 其富集受古气候、古盐度及氧化—还原条件等多因素控制[3,19,22–29]。相关实验研究显示, 在低固液比、高 Li^+浓度及偏碱性条件下, 高岭石、伊利石和蒙脱石对 Li^+具有较强吸附能力, 是有利的富集环境[30]。

石人背盆地沉积演化特征和 Li 富集成矿条件与上述认识基本一致: ①从古湖岸至古湖泊中心, 沉积岩中碎屑颗粒总体呈“由粗变细”的变化趋势, 短暂干旱气候背景下, 叶塘组(K_2yt)顶部碎屑颗粒渐变粗, 含钙质成分表现为先升后降(图 3), 整体属于蒸发沉积岩建造, 并伴随 Li 等元素明显富集; ②区域性富 Li 现象表明具备较充足的成矿物质来源; ③在强烈蒸发作用下, 古湖水渐向高 Li^+浓度、偏碱性方向演化, 在低水动力、还原的古地理沉积环境, 有利于富 Li 泥岩的形成; ④野外调查与薄片鉴定结果表明, 全岩 Li_2O 含量与黏土矿物含量呈正相关关系, 其中(含钙质)泥岩、(含钙质)粉砂质泥岩最有利于 Li 富集成矿; ⑤成矿在空间上受地层层位明显控制, 含矿层赋存于叶塘组第 4 层和第 5 层。

综合分析认为, Li 的富集成矿是其地球化学特性与蒸发沉积环境等多因素耦合作用的结果, 在演化过程中逐步富集, 并在局部形成工业矿体。此基础上初步总结出石人背盆地锂的控矿因素为: 古气候、地球化学、岩相古地理、岩性和地层等, 归纳本区沉积黏土型锂矿的找矿标志为: ①中生代—新生代沉积盆地; ②Li-F-Na_2O 组合地球化学异常; ③(含钙质粉砂质)泥岩及蒸发沉积岩建造; ④叶塘组中上部有利层位。

4.3 找矿远景预测

受工作精度限制, 本次研究宜采用简单模式进行找矿远景预测。锂矿石的边界品位取值 0.10%, 圈定含矿层; 含矿岩层形态相对简单, 有用组分分布相对均匀, 依此选用水平投影地质块段法预测锂矿资源量。计算公式为: P(资源量)=V(体积)×D(矿石体积质量, 取值 2.55 t/m^3)×C(质量分数, 本区 Li_2O 平均品位为 0.134 3%)。含矿岩系南西西侧因风化剥蚀而尖灭, 南南东部因岩性侧变而出现尖灭, 北东东

侧和北北西端被其他岩层所覆盖而未出露, 在现有资料基础上, 暂按规整锥状体对含矿层露头块段进行体积估算, 计算公式为: *V*(体积)=1/3 *S*(块段水平投影面积)×*H*(铅垂厚度),其中推测含矿层水平投影面积 *S* 约 3.7 km^2(*S*=含矿岩系出露总面积(5.2 km^2)×调整系数 *K*; *K*=含矿层总厚度(226.14 m)÷含矿岩系厚度(314.5 m)); 推测含矿层铅垂厚度约 230 m (*H*=含矿层总厚度(226.14 m)÷cos10°(估算岩层平均倾角约 10°)≈229.6 m, 取整)。依上述公式, 对含矿层露头块段进行找矿潜力预测(预测 Li_2O 资源量约 97.15 万 t, 折合金属锂约 45.15 万 t)。矿区的北东部至北部出露叶塘组(K_2yt)第 6 层和丹霞组(K_2E_1d), 出露总面积明显大于含矿岩系的出露面积; 依地层叠覆关系, 推测北东部至北部存在隐伏含矿岩层, 据此预测石人背盆地锂矿资源储量规模可达大型—特大型矿床。

此外, 南岭成矿带东段有众多的中生代—新生代沉积盆地[30-31], 选取 Li 异常区开展找矿工作意义重大。例如, 江西吉泰盆地梅岗综合异常, Li 异常面积约 46 km^2, 最大值达 367×10^{-6}[5], 成矿地球化学条件优于石人背盆地。

5　结论

1)基于前人 1∶20 万水系沉积物测量成果提取找矿信息, 并经野外调查验证, 确认研究区 Li 异常为矿致异常, 且找矿效果良好。Li-F-Na_2O 组合异常能够有效指示沉积(火山)黏土型锂矿化, 可作为重要的地球化学找矿标志。研究区及其周边区域涉及 17 个正式填图单位及 2 个非正式填图单位, 叶塘组(K_2yt)岩石 Li 地球化学背景值显著高于其他地质单元, 其浓集中心位于叶塘组第 4 层。1∶20 万水系沉积物测量 Li 异常浓集中心及岩石 Li 高值区, 与含矿岩系空间展布特征高度吻合, 表明 Li 地球化学特征对找矿具有显著指示意义。

2)研究区沉积黏土型锂矿成矿受多因素耦合控制, 包括干旱古气候条件、区域富 Li 的地球化学背景、岩相古地理条件、岩性及地层等。其中, 干旱古气候为关键控制因素, 其促进古湖水蒸发浓缩, 使水体向高 Li^+浓度和偏碱性方向演化, 并有利于黏土矿物富集, 从而为 Li 成矿提供有利条件。在低水动力、还原环境及富黏土矿物岩性条件的共同作用下, 最终形成稳定的含矿层系。据此, 归纳本区沉积(火山)黏土型锂矿的主要找矿标志为: 中生代—新生代沉积盆地、Li–F–Na_2O 异常组合以及(含钙质粉砂质)泥岩与蒸发沉积岩建造。

3)估算含矿岩系出露面积约 5.2 km^2, 石人背盆地初步圈定含矿层 3 层, 总厚度约 226 m, Li_2O 平均品位为 0.134 3%, 显示出有大型—特大型锂矿床的找矿潜力。区域对比表明, 南岭成矿带东段及邻区武夷成矿带发育多处与本区成矿条件相似的中生代—新生代沉积盆地, 具备良好的找矿前景。

致谢: 广东省地质局佛山地质调查中心李文辉教授级高工和李冲、罗锡宜高级工程师给予了悉心指导, 薄片鉴定由王英高级工程师完成, 在此一并致谢。

参考文献(References):

[1] 王辉, 张福强, 张德高, 等. 黏土型锂矿床勘查开发过程中的瓶颈问题和若干思考 [J]. 地质论评, 2023, 69(4): 1298−1312.
Wang H, Zhang F Q, Zhang D G, et al. The bottleneck problem and some thoughts on the process of exploration and development of clay-type lithium deposit[J]. Geological Review, 2023, 69(4): 1298−1312.

[2] 隰弯弯, 赵宇浩, 倪培, 等. 锂矿主要类型、特征、时空分布及找矿潜力分析 [J]. 沉积与特提斯地质, 2023, 43(1): 19−35.
Xi W W, Zhao Y H, Ni P, et al. Main types, characteristics, distributions, and prospecting potential of lithium deposits[J]. Sedimentary Geology and Tethyan Geology, 2023, 43(1): 19−35.

[3] 王微, 蒋少涌, 葛文, 等. 湖相沉积黏土型锂矿主要地质特征及成因 [J]. 矿物岩石地球化学通报, 2024, 43(1): 64−78.
Wang W, Jiang S Y, Ge W, et al. Geological characteristics and genetic mechanism of the lacustrine sedimentary clay type lithium deposit[J]. Bulletin of Mineralogy, Petrology and Geochemistry, 2024, 43(1): 64−78.

[4] 温汉捷, 罗重光, 杜胜江, 等. 碳酸盐黏土型锂资源的发现及意义 [J]. 科学通报, 2020, 65(1): 53−59.
Wen H J, Luo C G, Du S J, et al. Carbonate-hosted clay-type lithium deposit and its prospecting significance[J]. Chinese Science Bulletin, 2020, 65(1): 53−59.

[5] 李建康, 刘喜方, 王登红. 中国锂矿成矿规律概要 [J]. 地质学报, 2014, 88(12): 2269−2283.
Li J K, Liu X F, Wang D H. The metallogenetic regularity of lithium deposit in China[J]. Acta Geologica Sinica, 2014, 88(12): 2269−2283.

[6] 马厚明, 赖志坚, 鄢新华, 等. 江西吉泰盆地卤水锂矿床地球化学特征及远景分析 [J]. 地球学报, 2021, 42(5): 617−627.
Ma H M, Lai Z J, Yan X H, et al. Geochemical characteristics and prospect analysis of brine lithium deposits in jitai basin, Jiangxi Province[J]. Acta Geoscientia Sinica, 2021, 42(5): 617−627.

[7] 陈希清, 付建明. 南岭地区地球化学图集 [M]. 武汉: 中国地质大学出版社, 2012.
Chen X Q, Fu J M. Atlas of geochemistry in Nanling area[M]. Wuhan: China University of Geosciences Press, 2012.

[8] 邵小阳, 邓飞, 张忠进, 等. 东南沿海火山岩地区火山黏土型锂矿的发现 [J]. 高校地质学报, 2024, 30(4): 409−417.

Shao X Y, Deng F, Zhang Z J, et al. Discovery of volcanic clay-type lithium deposit in region of volcanic rocks along the southeastern coast of China[J]. Geological Journal of China Universities, 2024, 30(4): 409−417.

[9] 广东省地质调查院. 广东省及香港、澳门特别行政区区域地质志[R]. 2017.
Guangdong Institute of Geological Survey. Regional geology of Guangdong Province and Hong Kong and Macao Special Administrative Regions [R]. 2017.

[10] 江西省地质矿产勘查开发局. 中国区域地质志—江西志 [M]. 北京: 地质出版社, 2017.
Jiangxi Provincial Bureau of Geological and Mineral Exploration and Development. Regional geology of China—Jiangxi Province [M]. Beijing: Geological Publishing House, 2017.

[11] 湖北省地质调查院, 湖北省地质勘查基金管理中心, 湖北省地质实验测试中心.《湖北省沉积黏土型锂矿地质勘查规范（征求意见稿）》编制说明书 [R]. 2024.
Hubei Provincial Geological Survey Institute, Hubei Provincial Geological Exploration Fund Management Center, Hubei Provincial Geological Experiment and Testing Center. Preparation instructions for "Geological exploration specifications for sedimentary clay-type lithium deposits in Hubei Province（draft for comments）" [R]. 2024.

[12] 广东省地质勘查开发局区域调查大队. 1∶20 万兴宁幅—寻乌幅地球化学图说明书 [R]. 1997.
Regional Survey Brigade of Guangdong Provincial Bureau of Geological Exploration and Development. Instruction manual for the 1∶200, 000 Xingning-Xunwu geochemical map[R]. 1997.

[13] 广东省地矿局. 1∶50 万广东省地球化学图说明书 [R]. 1996.
Guangdong Provincial Bureau of Geology and Mineral Resources. Instruction manual for the 1∶500, 000 geochemical map of Guangdong Province [R]. 1996.

[14] 严己宽, 玉强忠. 地球化学勘查固体样品采集的野外质量评价指标 [J]. 物探与化探, 2018, 42(6): 1112−1115.
Yan J K, Yu Q Z. The field quality evaluation index of solid sampling in geochemical exploration[J]. Geophysical and Geochemical Exploration, 2018, 42(6): 1112−1115.

[15] Rudnick R L, Gao S. Composition of the continental crust[M]. Amsterdam: Elsevier, 2003: 1−64.

[16] 夏祥标, 郑来林. 普迟亚地区水系沉积物测量地球化学特征及找矿方向 [J]. 物探与化探, 2009, 33(6): 626−629, 634.
Xia X B, Zheng L L. Geochemical characteristics and ore search prospects of puchiya area in Tibet based on stream sediment survey[J]. Geophysical and Geochemical Exploration, 2009, 33(6): 626−629, 634.

[17] 肖瑞卿, 赵春, 付小方, 等. 四川甘孜甲基卡锂矿地质—地球化学特征和找矿标志 [J]. 物探与化探, 2018, 42(6): 1156−1165.
Xiao R Q, Zhao C, Fu X F, et al. A geological-geochemical prospecting model of the Jiajika lithium deposit int Garze, Sichuan[J]. Geophysical and Geochemical Exploration, 2018, 42(6): 1156−1165.

[18] 吴福元, 刘小驰, 纪伟强, 等. 高分异花岗岩的识别与研究 [J]. 中国科学: 地球科学, 2017, 47(7): 745−765.
Wu F Y, Liu X C, Ji W Q, et al. Highly fractionated granites: Recognition and research[J]. Scientia Sinica: Terrae, 2017, 47(7): 745−765.

[19] 薛颖瑜, 刘海洋, 孙卫东. 锂的地球化学性质与富集机理 [J]. 大地构造与成矿学, 2021, 45(6): 1202−1215.
Xue Y Y, Liu H Y, Sun W D. The geochemical properties and enrichment mechanism of lithium[J]. Geotectonica et Metallogenia, 2021, 45(6): 1202−1215.

[20] 徐先兵. 南岭地区白垩纪至古近纪陆相盆地及其对气候变化与构造域转换的制约 [J]. 华南地质, 2022, 38(4): 569−582.
Xu X B. Constraint of Cretaceous to Paleogene terrestrial basins in the Nanling area on climate changes and tectonic transition[J]. South China Geology, 2022, 38(4): 569−582.

[21] 朱筱敏. 沉积岩石学(4 版)[M]. 北京: 石油工业出版社, 2008: 214-217.
Zhu X M. Sedimentary petrology(4^{th} ed)[M]. Beijing: Petroleum Industry Press, 2008: 214-217.

[22] 于洋, 王登红, 于扬, 等. 国内外主要沉积型锂矿分布及勘查开发现状 [J]. 岩矿测试, 2019, 38(3): 354−364.
Yu F, Wang D H, Yu Y, et al. The distribution and exploration status of domestic and foreign sedimentary-type lithium deposits[J]. Rock and Mineral Analysis, 2019, 38(3): 354−364.

[23] 厉岩, 胡文斌, 王晨晔, 等. 黏土型锂矿中锂的赋存形态与分布规律研究 [J]. 光谱学与光谱分析, 2025, 45(4): 1137−1142.
Li Y, Hu W B, Wang C Y, et al. Study on the occurrence forms and distribution patterns of lithium in clay-type lithium ore[J]. Spectroscopy and Spectral Analysis, 2025, 45(4): 1137−1142.

[24] 汪齐连, 赵志琦, 刘丛强. 锂同位素在环境地球化学研究中的新进展 [J]. 矿物学报, 2006, 26(2): 196−202.
Wang Q L, Zhao Z Q, Liu C Q. New progress in lithium isotope environmental geochemistry[J]. Acta Mineralogica Sinica, 2006, 26(2): 196−202.

[25] Sun H, Xiao Y L, Gao Y J, et al. Rapid enhancement of chemical weathering recorded by extremely light seawater lithium isotopes at the Permian–Triassic boundary[J]. Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America, 2018, 115(15): 3782−3787.

[26] 朱丽, 杨永琼, 顾汉念, 等. 黏土型锂矿中锂的浸出试验 [J]. 有色金属: 冶炼部分, 2020(11): 35−40.
Zhu L, Yang Y Q, Gu H N, et al. Study on leaching of lithium from clay-type lithium deposit[J]. Nonferrous Metals: Extractive Metallurgy, 2020(11): 35−40.

[27] 朱丽, 顾汉念, 杨永琼, 等. 黏土型锂矿资源提锂工艺研究进展 [J]. 轻金属, 2020(12): 8−13.
Zhu L, Gu H N, Yang Y Q, et al. Research progress of lithium extraction from clay-type lithium ore resources[J]. Light Metals, 2020(12): 8−13.

[28] 凌坤跃, 温汉捷, 张起钻, 等. 广西平果上二叠统合山组关键金属锂和铌的超常富集与成因 [J]. 中国科学: 地球科学, 2021, 51(6): 853−873.
Ling K Y, Wen H J, Zhang Q Z, et al. Super-enrichment of lithium and niobium in the upper Permian Heshan Formation in Pingguo, Guangxi, China[J]. Scientia Sinica: Terrae, 2021, 51(6): 853−873.

[29] 贾永斌, 于文修, 温汉捷, 等. 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 Y B, Yu W X, Wen H J, et al. Geochemical characteristics and sedimentary environment of Li-rich clay rocks at the southern margin of the central Yunnan Basin[J]. Acta Sedimentologica Sinica, 2023, 41(1): 170−182.

[30] 赵越, 马万平, 杨洋, 等. 黏土矿物对 Li^+的吸附实验研究——对黏土型锂矿成矿启示 [J]. 矿物学报, 2022, 42(2): 141−153.
Zhao Y, Ma W P, Yang Y, et al. Experimental study on the adsorption of Li^+ by clay minerals—Implications for the mineralization of clay-type lithium deposit[J]. Acta Mineralogica Sinica, 2022, 42(2): 141−153.

[31] 刘成林, 余小灿, 赵艳军, 等. 华南陆块液体钾、锂资源的区域成矿背景与成矿作用初探 [J]. 矿床地质, 2016, 35(6): 1119−1143.
Liu C L, Yu X C, Zhao Y J, et al. A tentative discussion on regional metallogenic background and mineralization mechanism of subterranean brines rich in potassium and lithium in South China Block[J]. Mineral Deposits, 2016, 35(6): 1119−1143.

Lithium geochemistry and its implications for ore prospecting in the Shirenbei Basin, northeastern Guangdong

ZHANG Zhong-Jin [1], DENG Fei [1, 2], CHE Xu-Dong [3], SHAO Xiao-Yang [1], LU Qi-Yuan [1], FANG Jie [1], WU Ke-Ning [1]
(1. *Foshan Geological Survey Center*, *Guangdong Province Geological Bureau*, *Foshan* 528000, *China*; 2. *College of Civil Engineering*, *Tongji University*, *Shanghai* 200092, *China*; 3. *School of Earth Sciences and Engineering*, *Nanjing University*, *Nanjing* 210023, *China*)

Abstract: This study aims to determine the geochemical characteristics of sedimentary clay-type lithium (Li) deposits and their implications for ore prospecting in the Shirenbei Basin, northeastern Guangdong, China, as well as exploring the regional metallogenic conditions and ore-prospecting indicators. Based on a 1∶200,000 stream sediment geochemical survey, this study conducted a comprehensive analysis of the geochemical characteristics of Li and their relationships with strata, lithologies, and sedimentary environments using methods of economic geology, sedimentology, mineralogy, and geochemistry. Two Li anomalies were delineated in the study area. Among them, the Li anomaly in the north exhibits a larger scale and a peak anomaly value of 234.3×10^{-6}, with the Yetang Formation (K_2yt) exposed in the anomaly center. The composite anomaly consists of 16 elements (or oxides), including Li, fluorine (F), and sodium oxide (Na_2O), with distinct overlapping relationships observed among them. Investigations reveal that the Yetang Formation is a lacustrine evaporative sedimentary suite, with its sedimentary center located in the northern part of the basin. Zones with high Li content correspond primarily to zones containing calcareous, fine-grained clastics. Rock and mineral analyses indicate a significant positive correlation between whole-rock Li_2O content and clay mineral content. The Yetang Formation exhibits significantly higher geochemical background values of whole-rock Li content than other geological units, with the Li enrichment center identified in the fourth layer of the formation. Three ore-bearing layers were delineated in the study area. They are primarily distributed in the middle and upper parts of the Yetang Formation, with a total thickness of 226.14 m. The ore-bearing rock series show an exposed area of approximately 5.2 km^2, demonstrating great potential for ore prospecting. The results of this study suggest that the Li geochemistry in stream sediments can effectively reflect the regional metallogenic background and that the Li-F-Na_2O anomaly combination serves as a significant ore-prospecting indicator for clay-type lithium deposits. Lithium mineralization is jointly controlled by factors including paleoclimate, evaporative sedimentary environment, lithofacies paleogeographic framework, specific stratigraphic units, and lithologic suites. Additionally, multiple similar sedimentary basins occur in the eastern segment of the Nanling metallogenic belt and its adjacent Wuyi metallogenic belt, holding prospects for further breakthroughs in ore prospecting.

Key words: Shirenbei Basin; geochemical characteristics of lithium (Li); clay-type lithium deposit; Yetang Formation

（本文编辑: 蒋实）