

老挝万象钾盐矿床盐背斜成因与 判别标识初步研究

石国成¹, 朱登贤^{2,3,4}, 张西营^{2,3,4*}, 李彦强¹

(1. 青海省核工业放射性地质勘查院, 青海 西宁 810016;

2. 中国科学院青海盐湖研究所, 中国科学院盐湖资源综合高效利用重点实验室, 青海 西宁 810008;

3. 青海省盐湖地质与环境重点实验室, 青海 西宁 810008; 4. 中国科学院大学, 北京 100049)

摘要:识别盐构造对于研究盐体改造作用、钾盐成矿预测以及钾盐矿山的安全开采利用等方面具有重要作用。本文以老挝万象钾盐矿区为主要研究对象, 分析了区域盐背斜成因并尝试构建识别标志。研究表明, 重力异常分布可以指示和圈定盐背斜构造位置和分布特征, 研究区盐背斜的形成与古河道切割具有密切的成因联系, 盐背斜构造在地形地貌上具有明显的响应特征。上述研究结果对于深入认识该区域钾盐矿床的成因与后期改造作用过程具有重要意义。

关键词:钾盐矿床; 盐背斜; 判别标识; 地貌特征; 老挝万象

中图分类号: P619.21⁺1; P542

文献标识码: A

文章编号: 1008-858X(2022)02-0128-11

老挝万象盆地是呵叻高原北部沙空那空盆地的一个次级盆地, 储藏的钾盐资源极为丰富, 前人对成盐物源、成矿时代、沉积环境和后期改造等方面开展了诸多研究^[1-4]。一般认为该钾盐矿床是形成于晚白垩世的海相钾盐矿床, 且在成盐后期受到改造作用^[5]。万象盆地钾盐矿床成矿后受到了后期构造运动的强烈改造, 李善平等^[6]研究认为, 万象通芒矿区盐构造的成因受多重作用影响, 差异负载是其初始形成的动力来源。Zhang等^[7]通过该地区钻孔剖面硼酸盐矿物硼同位素组成研究, 认为成盐后期受到了陆相水的影响。惠争卜等^[8]研究认为, 万象钾盐矿受层控作用明显, 而盐背斜是钾盐矿体(层)成矿期后的主要控矿构造。梁光河等^[9]研究了万象盆地萨塔尼钾盐矿的构造变形, 认为后期构造运动使得钾盐矿体发生了塑性柔流和脆性滑移。在三维地震勘探和盐构造变形特征分析的基础上, 梁光河等^[10]总结了3种钾盐矿改造模型: 蒸发岩侏罗山式褶皱变形模式、应力作用下的差异负载富集模式和围

绕硬质盐丘旋转的富集模式。

综上, 识别盐构造(特别是盐背斜构造)对研究后期改造作用及成矿预测等方面具有重要作用。同时, 背斜构造区地层因受力而易破碎, 在采矿过程中是透水事故易发之处, 因此, 盐背斜构造的成因研究和准确识别对于钾盐矿山的开发利用也非常重要。本文以老挝万象赛塔尼县那探矿区和巴恩姆县宝来矿区为例, 利用前期地质勘探资料, 结合区域地形地貌特征和重力异常特征, 分析区域盐背斜成因并尝试初步构建识别标志。本研究对于盐背斜成因研究和钾盐矿的安全开采利用等具有重要理论意义和实际价值。

1 地质背景

老挝万象平原大地构造位于藏滇印支地槽褶皱系南段印支中间地块沙空那空凹陷的南缘(图1)。万象平原中新生界地层主要为中二叠统~第四系, 其中上白垩统塔贡组(K_2tg)为含钾盐

收稿日期: 2022-02-20; 修回日期: 2022-03-10

基金项目: 第二次青藏高原综合科学考察研究项目(2019QZKK0805); 国家自然科学基金面上项目(42072101)

作者简介: 石国成(1981-), 男, 高级工程师, 主要从事钾盐矿床相关研究。Email: 546737865@qq.com

通讯作者: 张西营(1977-), 男, 研究员, 主要从事盐湖资源与盐类矿床研究。Email: xyzhchina@isl.ac.cn

层位。塔贡组(K_2tg)为万象平原内含盐地层,乳白、白、灰、淡红等色盐层与棕红、紫红色中—厚层状粉砂质泥岩、泥质粉砂岩组成3个沉积旋回。

钾盐矿主要赋存在下部旋回,中部旋回次之,塔贡组厚200~850 m。白垩系下统班塔拉组(K_1bt^2)为塔贡组含盐系地层底板。

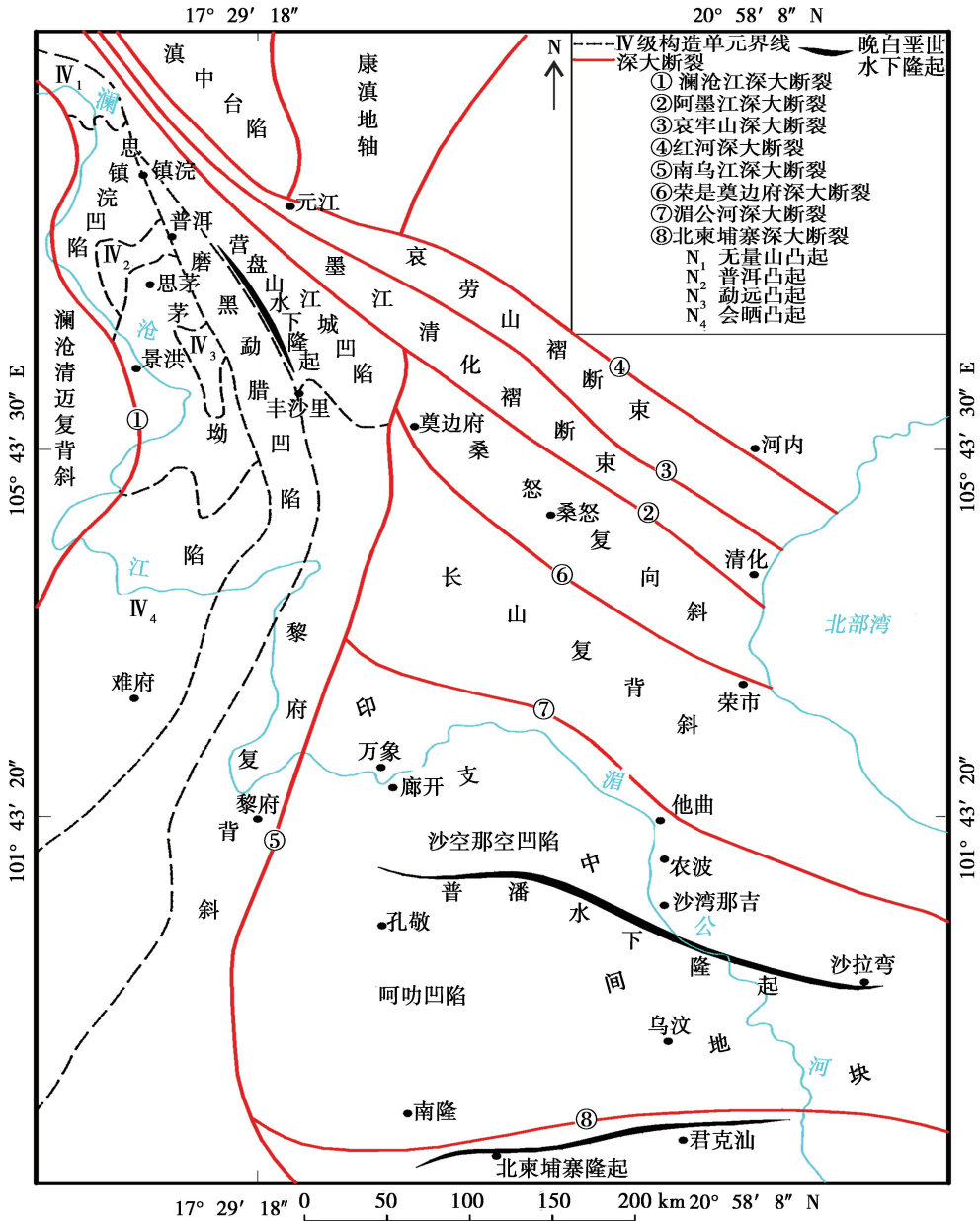


图1 呵叻高原及邻区构造分区略图^[11]

Fig. 1 The tectonic subregion sketch of Khorat Plateau and its neighboring area^[11]

研究区位于万象平原东部,以赛塔尼县那探矿区(图2中研究北区,面积76 km²)和巴恩姆县宝来矿区(图2中研究南区,面积130 km²)为研究区来分析盐构造特征。其中,那探矿区经过钻探揭露以后发现,塔贡组3个沉积旋回中,在盐背斜核部仅有第一沉积旋回中的盐岩层和部分泥岩

层有所保留,第二、第三旋回地层均不存在;在背斜两翼除第三沉积旋回盐岩缺失外,其余含盐系地层塔贡组均按正常序列沉积。这些沉积特征表明,盐背斜的形成对局部区域内的地层及矿层的影响较大,也是盐层上部钾盐矿层有所变化的重要影响因素。

表 1 那探矿区推断靶区特征

Table 1 List of characteristics of the inferred target area in the Natan mining area				
异常编号	走向	场值/ $(\times 10^{-5} \text{ m} \cdot \text{s}^{-2})$	规模	延伸范围/m
D1	120°	-1.0~-4.4	长约 4.0 km,宽 2.0 km	50~250
D2	北东东 100°	-2.0~-4.2	长约 4.0 km,宽 1.8~2.5 km	100~300
D3	近南北向	-1.0~-3.6	长约 5.0 km,宽 1.0~1.8 km	100~350
D4	近南北向	-2.0~-3.2	长约 2.0 km,宽 1.0 km	100~350
D5	近南北向	-1.0~-2.8	长约 3.0 km,宽 1.5~2.0 km	150~300
D6	向北西	-1.0~-2.4	长约 3.0 km,宽 1.5 km	100~350
G1	北北西向 50°	最高场值 1.8	长约 5.0 km,宽大于 4.0 km	200~600
G2	异常方向性不明显	最高场值 1.2	长约 2.0 km,宽大于 1.5 km	200~500
G3	10°	最高场值 1.6	长约 3.0 km,宽大于 1.0 km	150~600

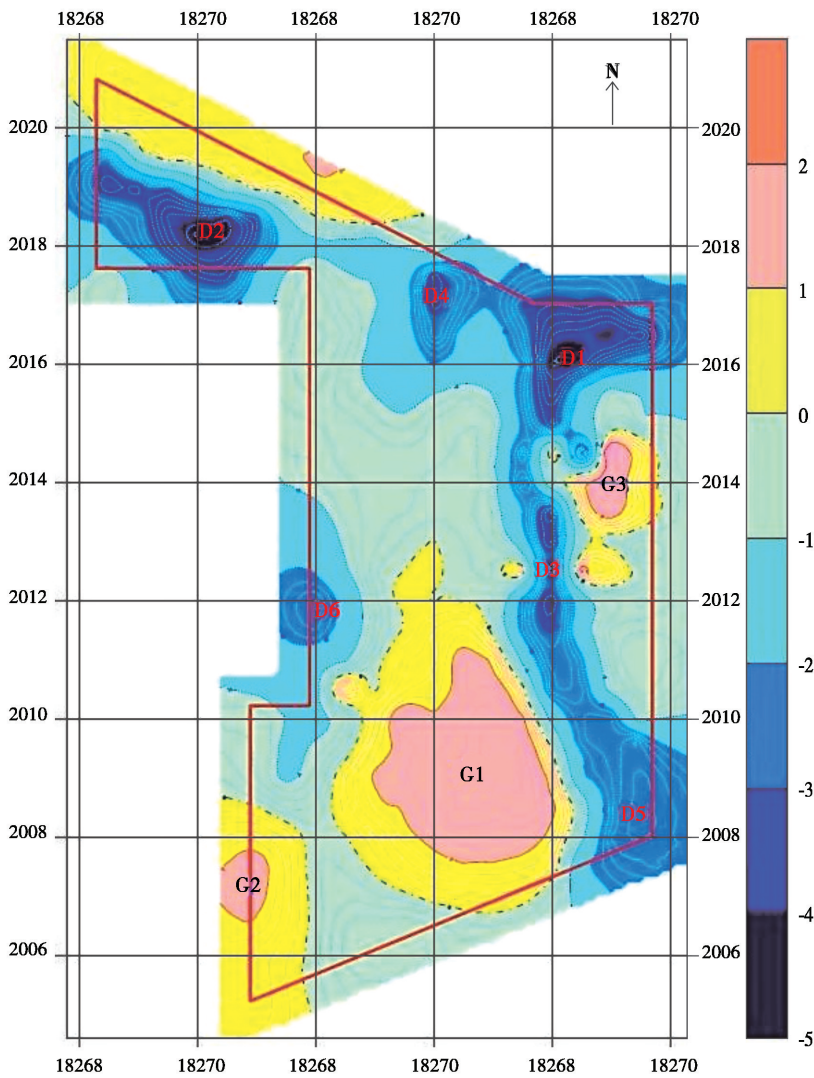


图 3 那探矿区重力异常图

Fig. 3 Gravity anomaly map of the Natan mining area

2)宝来矿区 浅部呈条带状重力低圈闭与块状重力高圈闭相间的格局,多条条带状重力低圈闭将工区分成几个异常特征明显不同的区域。在中东部规模较大的北北东向条带状重力低异常圈闭,上延 1 500 m 后才逐渐消失,说明此处低密度体埋藏较深。中南部北北东向的椭圆状重力低圈闭,上延 1 200 m 后逐渐消失,说明此处低密度体埋藏稍深。中部狭长梯度带状重力低圈闭,上延 800 m 后消失,说明此处低密度体埋藏稍浅。中东部的长轴状重力低圈闭,向上延拓 500 m 后逐渐消失,说明此处低密度体埋藏较浅。东北角

附近穹窿状重力低圈闭,上延 800 m 后仍有显示,在区内埋藏相对较浅,但在区外可能存有规模较大的负异常圈闭。西部重力低圈闭,异常强度较弱,埋藏较浅。深部基底的主体大致为北北东走向的斜坡状,呈西北高东南低的梯度带格局。

1/5 万的重力测量在宝来矿区圈出 5 个重力负异常和 5 个重力正异常。分别用 D1~D5 和 G1~G5 表示,异常特征见表 2 和图 4。根据重力异常特征该区负重力异常 D2、D3、D4、D5 是相连的,并且异常连续自然呈分枝状,但总体呈明显的带状特征。

表 2 宝来矿区推断靶区特征

Table 2 Features of inferred target area in the Baolai mining area

异常编号	位置	走向	场值/($\times 10^{-5} \text{ m} \cdot \text{s}^{-2}$)	规模
D1	东南部	近南北向	-1.0~-3.6	长约 4.0 km,宽 2.0~2.5 km
D2	斜穿中部	大致为北东向	-1.0~-3.8	长 12.0~15 km,宽约 0.8~2.0 km
D3	中南部	北北东向	-1.0~-3.0	长约 5 km,宽 1.2~2.0 km
D4	中东部	北北西向	-1.0~-2	长约 4.0 km,宽 1.0 km
D5	东部	近南北向	0.0~-0.8	长约 2.0~3.0 km,宽 2.0~2.5 km
G1	中部	北东向	0.0~1.6	长约 8 km,宽 2.0~4.0 km
G2	中西部	方向性不明显	0.4~1.6	长约 3.0 km,宽大于 2.0 km
G3	西端	异常方向性不明显	0.2~1.4	长约 2.0 km,宽约 2.0 km
G4	中南部	异常向西南出矿区范围,且未封闭	最高场值 1.6	长约 3.0 km,宽 1.0~2.0 km
G5	中东部	方向性不明显	0.8~1.0	长约 3.0 km,宽约 1.2 km

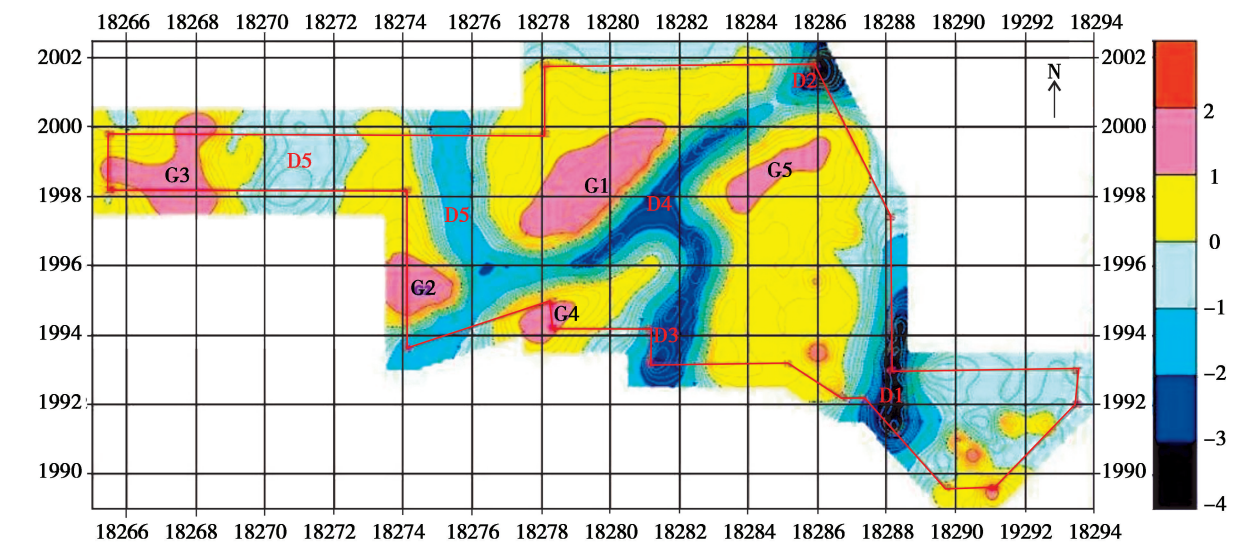


图 4 宝来矿区重力异常图

Fig. 4 Gravity anomaly map of the Baolai mining area

2.2 钻孔剖面与沉积特征

在研究区主要针对那探矿区的 1/5 万重力异常成果,对盐背斜的核部和东侧翼部进行了钻探工程的施工验证。经过钻探验证,1/5 万重力异常圈定的低密度异常中心即为盐背斜的核心部位,随着异常曲线值的增高,盐背斜两翼盐类矿物埋深逐渐加深。在此基础上分别在南、北两个矿区圈定了盐背斜构造。那探矿区盐背斜自北西部延伸至矿区北东部,走向 120°,从北东部垂直延伸到南部,总体长约 16.0 km,轴部宽度 1.3 ~ 4.5 km不等,背斜轴部自起至终起伏较大,主轴线高差最大超过 200 m,轴部宽的地段盐背斜起伏较轴部窄的部位小(图 3)。宝来矿区背斜从矿区仅有的面积来看,不规则,呈枝状分布,但其总体分布较那探矿区稳定,主要轴线基本呈南南西向,其余为近南北向,总体长约 21.0 km,轴部宽度 1.7 ~ 2.5 km,较北部规矩,根据重力

分布特征推测,该背斜轴部盐层埋深无大的变化。

那探矿区施工钻孔中 WZ1 钻孔第四系地层厚度为 112.29 m,远远大于周边所有钻孔(表 3); WZ2 钻孔第四系厚度为 15.41 m,基本接近于盐背斜边部,WZ4 距离盐背斜较远,第四系厚度为 7.12 m。WZ1 钻孔中第二、三沉积中的中、上泥岩层和中上、盐岩层均已剥蚀,其中下泥层厚 7.81 m 基本被剥蚀殆尽,故而在下盐岩层塑性流变的过程中,随着河流的切合上部地层被强烈剥蚀,下盐岩层上部的钾盐矿被溶蚀殆尽。WZ2 和 WZ4 钻孔中,除了上盐层没有沉积外(区域内地部分地区该层均缺失),其余地层均正常存在,从而保存了下盐层顶部的钾盐矿层。根据图 5 中钻孔分布和图 6 剖面可以得出,该盐背斜构造特征明显,充分反映了盐背斜自身特征和形成特征,在 WZ1 钻孔内揭露的巨厚第四系沉积层也表明其盐背斜轴部就位于古河道发育的位置。

表 3 那探矿区钻孔地层特征表

Table 3 The characteristics of the borehole formation in the Natan mining area

孔号				WZ4	WZ2	WZ1
一、二级阶地(Q)		埋深/m		0.00~7.12	0.00~15.41	0.00~112.29
		厚度/m		7.12	15.41	112.29
		高程/m	顶板	169.00	161.00	169.00
			底板	161.88	145.59	56.71
塔贡组上段(第三沉积旋回)	上泥岩层	埋深/m		7.12~227.71	15.41~136.81	
		厚度/m		220.59	121.40	0.00
		高程/m	顶板	161.88	145.59	
			底板	-58.71	24.19	
	上盐岩层	0.00	0.00	0.00	0.00	
塔贡组中段(第二沉积旋回)	中泥岩层	埋深/m		227.71~342.38	136.81~431.16	
		厚度/m		114.67	294.35	0.00
		高程/m	顶板	-58.71	24.19	
			底板	-173.38	-270.16	
	中盐岩层	埋深/m		342.38~387.24	431.16~471.96	
		厚度/m		44.86	40.80	0.00
		高程/m	顶板	-173.38	-270.16	
			底板	-218.24	-310.96	

续表 3

塔贡组下段 (第一沉积旋回)	下泥岩层	埋深/m		387.24~471.40	471.96~568.54	112.29~120.10
		厚度/m		85.16	96.58	7.81
		高程/m	顶板	-218.24	-310.96	56.71
			底板	-303.40	-407.54	48.90
	下盐岩层 矿体	埋深/m		471.40~546.83	568.54~618.65	
		厚度/m		75.43	50.11	0.00
		高程/m	顶板	-303.40	-407.54	
			底板	-378.83	-457.65	
	下盐岩层	埋深/m		546.83~554.05	618.65~631.90	120.10~639.20
		厚度/m		7.22	13.25	>519.1
		高程/m	顶板	-378.83	-457.65	48.90
			底板			-470.2

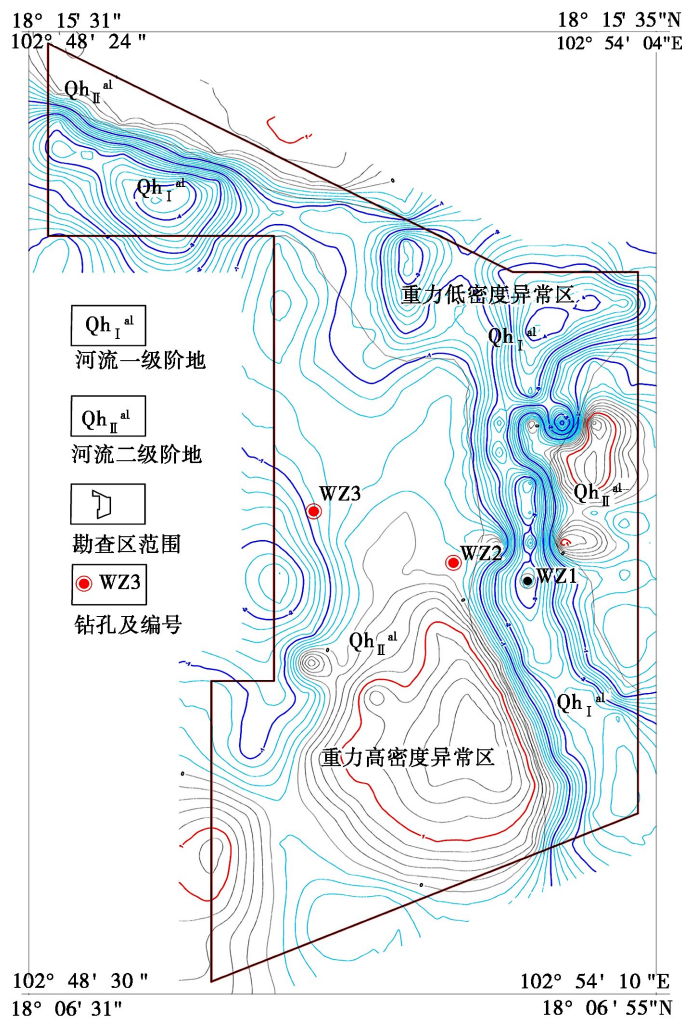


图 5 那探矿区重力异常圈定的盐背斜图

Fig. 5 The salt anticline delineated by the gravity anomaly in the Natan mining area

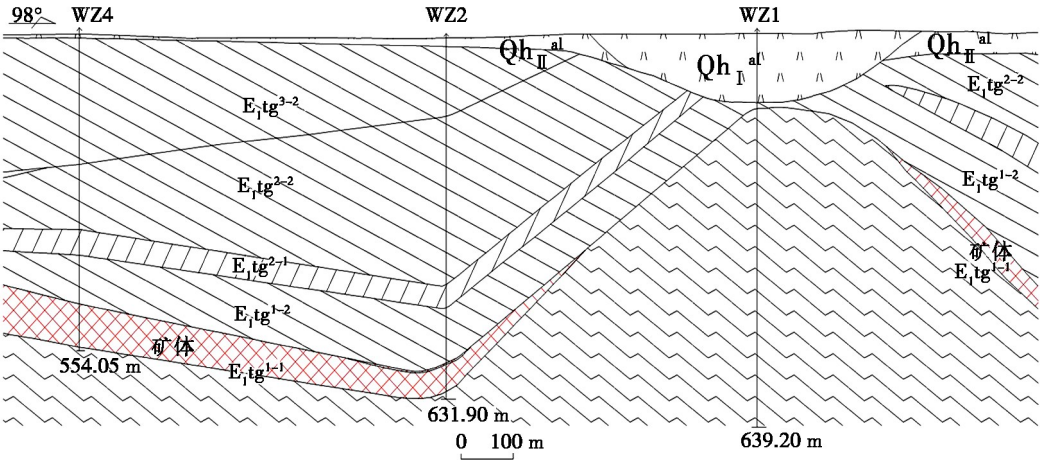


图 6 那探矿区钻孔剖面图及盐背斜(WZ1 孔)

Fig. 6 Drilling profile and salt anticline in Natan mining area (WZ1 hole)

2.3 地表第四系沉积特征与盐背斜

研究区第四系地表主要是农田和植被覆盖区,河流、湖泊发育。成因类型以河流沉积为主,湖泊沉积(Qh_I)较少,河流沉积可进一步划分为河漫滩沉积(Qh^{al})、河流一级阶地沉积(Qh_{Ial})、河流二级阶地沉积(Qp_{IIal})。河流沉积的形成和发展与该区域的南俄河(Nam Ngum)及其支流有关。

河流二级阶地多分布于森林覆盖区域,阶地呈残留顶盖状出露,出露高程较河流一级阶地高,地貌上已明显丘陵化。二级阶地物质组分具下粗上细的二元结构:下部为紫红、灰白、褐黄色砂砾石层,砾石成分以浑圆状石英为主,铁质结核基本不存在,或很少;上部为淡红色、褐红色、棕红色铁锰质黏土,偶夹砂砾石,铁锰结核呈不规则椭圆状,粒径0.3~2.0 cm不等,填隙物为粉砂泥质。

河流一级阶地多分布于农田水塘(牛轭湖)区域,地貌平坦。重力异常及钻探工程分析表明,在研究区的河流一级阶地多分布在盐背斜核心部位,其走向和宽度等基本与盐背斜分布特征相吻合。在那探矿区地表其形状呈“7”字型,与该区盐背斜走向套合一致,见图7;在宝来矿区呈“枝状”分布,与该区盐背斜走向特征基本一致,见图8。综合分析表明,河流一级阶地的地表分布和盐背斜走向套合有一定的规律性:在地势上一般低于二级阶地3.00~15.00 m,物质成分上具有下

粗上细的二元结构。

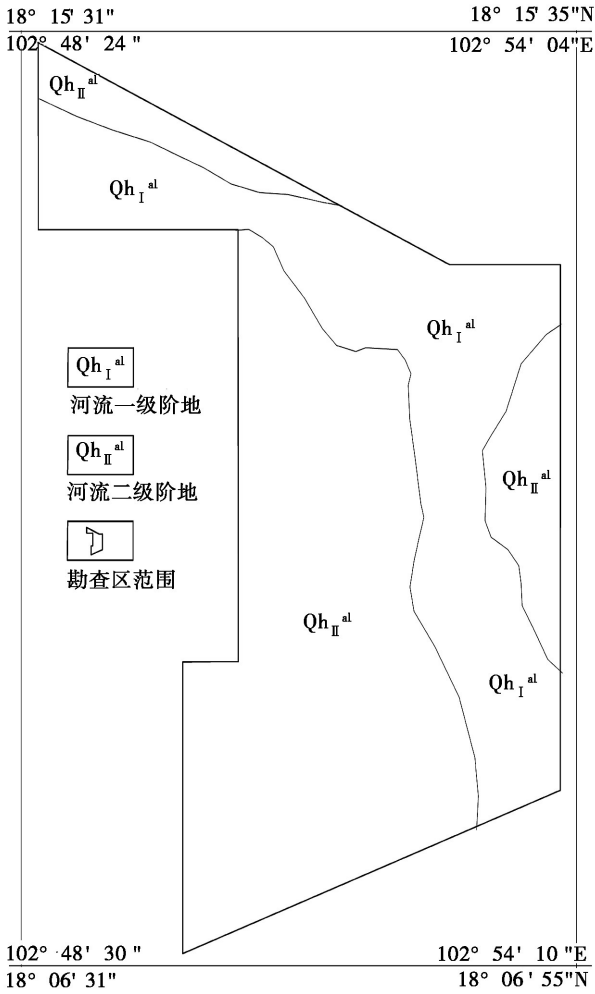


图 7 那探矿区第四系地质图

Fig. 7 Quaternary geological map of the Natan mining area

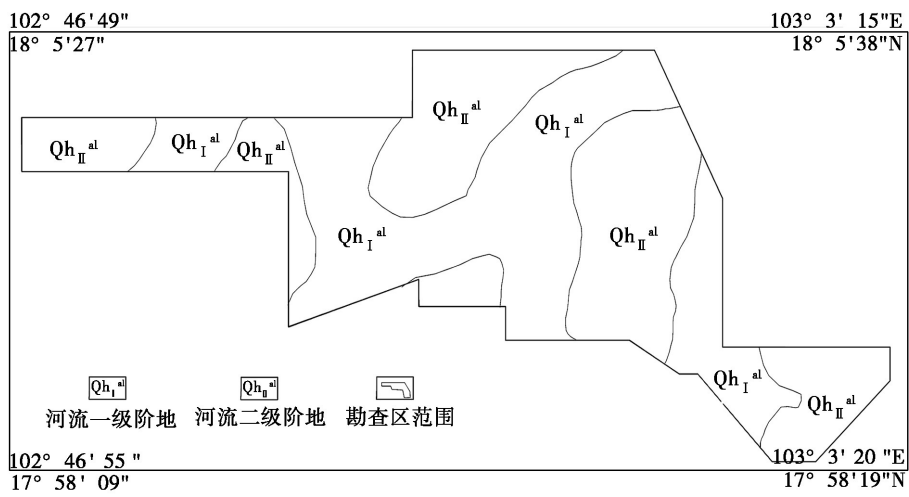


图 8 宝来矿区第四系地质图

Fig. 8 Quaternary geological map of southern area

湖泊沉积主要分布在地势低洼湖泊区域,湖泊地貌上近圆形分布,为勘查区海拔最低的第四系沉积物,局部地段仍为大面积积水。在物质成分上主要沉积物为泥沙。上部为浅灰、灰白色粉质黏土,下部浅灰、褐灰色中—细粒砂。砂层分选性较好,砾石层呈透镜状产出,粉质黏土颜色较深,有机质含量较高。

河漫滩沉积出露于那探矿区南娥河(Nam Ngum)两岸。河漫滩沉积主要随河流形状呈弧形、S形。南娥河(Nam Ngum)贯穿北研究区东西,河床一般宽100~300 m。沉积物以砾石、砾、砂为主,厚度1 m左右。

经过实地调查,对卫星影像图片中的相关地物进行了识别和分析。颜色发白发亮的区域一般为农田水塘(牛軋湖)区域和湖泊分布区域,在农田水塘(牛軋湖)区域其地表呈现的为河流一级阶地沉积(Qh_{Ial}),在湖泊分布区域呈现的为湖相沉积(Qh_I)。分析表明,无论是那探矿区的“7”字型盐背斜特征还是宝来矿区的“枝状”盐背斜特征,在卫星影像图片中展现的盐背斜和重力测量成果中展现的盐背斜走向一致,宽度和位置稍有位移,但特征完全相同(图9和图10)。

3 研究区盐背斜成因

根据区域上塔贡组沉积特征为3个沉积旋回,目前按照WZ1、WZ2和WZ4钻孔数据看,盐

背斜核心部位的WZ1上部第四系沉积厚度远远超过了WZ2和WZ4,并且在WZ1中缺失了第二、第三沉积旋回。据此认为,在该区域塔贡组含盐系地层沉积过程中,由于受到河流侵蚀,导致该部位盐体上部负荷减轻,在两侧地层压强高于负荷较轻部位时,盐体发生塑性流变,致使两侧盐体逐渐向负荷减轻部位流变。在流变过程中,背斜轴部逐渐抬高,拖曳两翼地层逐渐发生形变从而随轴部变形缓升。在核心部位逐渐抬升的过程中,河流势必加大对底部的切割力度,周而复始,盐背斜逐渐形成。

在盐背斜形成过程中,由于钾盐矿物光卤石矿在盐体上部或顶部,且光卤石矿物比重比值石盐小得多,因此一般在盐背斜部位钾盐矿比较富集。从WZ1钻孔岩性地层变化可以看出,第一沉积旋回泥岩厚度仅为7.81 m,上部就是河床,由于在盐背斜形成的过程中难免会有小构造裂隙产生,再者由于盐类矿物凸起明显覆盖层太薄,所以导致在WZ1盐背斜部位的钾盐矿层已经被溶蚀殆尽。这也充分证明古河道的切割造成盐层上部地层压差,从而导致盐类矿物塑性流变,最终形成盐背斜。

4 结 论

研究区盐类矿物所形成的“盐背斜”与古河道切割密切相关。



图 9 那探矿区卫星影像图

Fig. 9 Satellite image of the Natan mining area



图 10 宝来矿区卫星影像图

Fig. 10 Satellite image of the Baolai mining area

通过重力异常分布特征分析和钻探工程辅助解译,认为低密度异常区很可能指示了盐背斜构造区。

古河道中第四系沉积物不被后期破坏侵蚀的情况下,可以根据地表地质填图和卫星影像图片研读古河道,并据此判断盐背斜分布特征及其

位置。

参考文献：

[1] 朱延浙, 吴军, 严城民, 等. 老挝万象平原含钾地层的岩相古地理[J]. 盐湖研究, 2008, 16(2): 1-6.

[2] Tan H B, Ma H Z, Li B K, *et al.* Strontium and Boron Isotopic Constraint on the Marine Origin of the Khammuane Potash Deposits in Southeastern Laos [J]. Chinese Science Bulletin, 2010, 55(3): 1-8.

[3] 张大文, 颜茂都. 云南思茅盆地与老挝万象盆地含钾盐地层的磁性地层年代及对比[C]//2014 年中国地球科学联合学术年会——专题 42: 古地磁—构造研究新进展论文集, 2014: 15-16.

[4] 赵雪, 陈忠, 石国成, 等. 老挝万象海夏峰钾盐矿床水不溶矿物及其对沉积环境的约束[J]. 中国地质, 2019, 49: 1-15.

[5] 唐启亮, 张西营, 苗卫良, 等. 老挝万象盆地钾盐矿床成盐晚期沉积环境: 来自硼酸盐矿物的证据[J]. 地球科学,

2022, 47(1): 149-158.

[6] 李善平, 马海州, 山发寿, 等. 老挝万象盆地通芒地区盐构造特征及成因机制[J]. 盐湖研究, 2009, 17(2): 5-12.

[7] Zhang X Y, Ma H Z, Ma Y Q, *et al.* Origin of the Late Cretaceous Potash-bearing Evaporites in the Vientiane Basin of Laos: $\delta^{11}\text{B}$ Evidence from Borates [J]. Journal of Asian Earth Sciences, 2013, 62: 812-818.

[8] 惠争卜, 宋宪生, 韩登宇, 等. 老挝万象盆地含盐岩系沉积特征与钾盐富集规律[J]. 地质论评, 2019, 65(S1): 259-260.

[9] 梁光河, 徐兴旺, 刘兴江, 等. 老挝万象盆地萨塔尼钾盐矿的构造变形与深部矿预测[J]. 大地构造与成矿学, 2019, 43(5): 934-942.

[10] 梁光河, 徐兴旺. 老挝万象凹陷钾盐矿床变形改造富集模式[J]. 地球科学, 2022, 47(1): 136-148.

[11] 石国成, 路耀祖, 徐新, 等. 试探盐背斜与固体钾盐矿的关系: 以老挝农波盆地钾盐矿为例[J]. 青海大学学报(自然科学版), 2010, 28(6): 69-72.

A Preliminary Study on the Origin and Identification of the Salt Anticline in the Vientiane Potash Deposit in Laos

SHI Guo-cheng¹, ZHU Deng-xian^{2,3,4}, ZHANG Xi-ying^{2,3,4}, LI Yan-qiang¹

- (1. Qinghai Nuclear Industry Radiological Geological Exploration Institute, Xining, 810016, China;
2. Key Laboratory of Comprehensive and Highly Efficient Utilization of Salt Lake Resources, Qinghai Institute of Salt Lakes, Chinese Academy of Sciences, Xining, 810008, China;
3. Qinghai Provincial Key Laboratory of Geology and Environment of Salt Lakes, Xining, 810008, China;
4. University of Chinese Academy of Sciences, Beijing, 100049, China;)

Abstract: Identifying salt structures plays an important role in the study of salt reformation, potassium salt mineralization prediction, and safe mining and utilization of potassium salt mines. This paper takes the Vientiane potash mining area in Laos as the main research object, analyzes the origin of the regional salt anticline and tries to construct an identification mark. The research shows that the distribution of gravity anomalies can indicate and delineate the location and distribution characteristics of salt anticlines. The formation of salt anticlines in the study area is closely related to the cutting of paleochannels, and the salt anticlines have obvious topographical response characteristics. The above research results are of great significance for in-depth understanding of the genesis and later reformation process of potash deposits in this area.

Key words: Potash deposit; Salt anticline; Identification mark; Landform features; Vientiane, Laos