

doi: 10.19388/j.zgdzdc.2019.06.11

引用格式: 刘璿,郑绵平,于常青,等. 云南江城地区盐盆地重力勘探与深部找钾启示[J]. 中国地质调查,2019,6(6): 88-97.

云南省江城地区盐盆地重力勘探与深部找钾启示

刘璿^{1,2}, 郑绵平², 于常青³, 张震², 高磊⁴

(1. 兰州城市学院, 兰州 730070; 2. 中国地质科学院矿产资源研究所, 北京 100037;
3. 中国地质科学院地质研究所, 北京 100037; 4. 中国煤炭地质总局
华盛水文地质勘察工程公司, 邯郸 056000)

摘要: 云南省江城勐野井钾盐矿是目前我国发现的唯一固体钾盐矿。该地区地质构造复杂, 近几年通过野外地质、地球物理及钻井勘探, 认为钾盐来自深部侏罗系, 并沿断裂构造带挤压塑流到表层, 可能在深部还存在大面积的“盐源”。为实现找矿突破, 亟须了解控制盐矿形成的构造及围岩的三维结构特征。通过对江城地区高精度重力数据位场分离、边缘检测、3D物性反演的地球物理处理与解释, 获得了勐野井地区江城湖盆的基底变化、断裂展布等地质信息, 确定了研究区构造格架、地下密度体的三维分布与岩盐矿的关系, 推断在勐野井矿区西北深部可能还有侏罗系盐岩甚至钾盐的存在, 该地区将是未来找矿工作的重点。研究成果为江城地区下一步钾盐矿勘查提供了线索和依据。

关键词: 江城; 勐野井钾盐; 重力勘探; 位场分离; 边缘检测; 3D物性反演

中图分类号: P631.1; P622.2; P619.211 **文献标志码:** A **文章编号:** 2095-8706(2019)06-0088-10

0 引言

勐野井钾盐矿位于云南省普洱市江城县内, 地处江城凹陷的中部, 是目前我国发现的唯一固体性钾盐矿。自20世纪60年代, 前人围绕该矿床开展过大量的地质研究工作, 主要集中在盐岩的成因来源、成矿时代以及古环境等方面。钾盐的来源假说有: 来源于地幔的“火成盐体”塑状盐流^[1]; 海相成因, 古海水为盐岩矿的物源^[2-4]; 多源学说认为钾盐的来源以古海水为主, 其他补给物源有深部热液补给^[5-6], 富钾火山岩、火山沉积岩风化补给^[7-8], 陆源水体的补给^[9-10]和深部中生代侏罗纪源盐层补给^[11]。勐野井钾盐矿的成盐时代和地层研究争论较多, 主要集中在古近系^[12-13]、白垩系^[1,14]和侏罗系^[15]。对成盐环境和古气候的研究认为该地区成盐环境具有炎热、干旱的热带、亚热

带特征, 可能还经历一段湿润气候, 并在沉积早期遭受外力破坏, 有多个沉积旋回^[16-19]。

与地质及地球化学研究相比, 围绕勐野井钾盐矿的地球物理勘探工作相对薄弱。1965年, 云南物探队开展1:10万重力普查工作, 有效圈定了含盐远景区, 并且矿体分布与重力异常有很好的对应^[20]; 在勐野井矿区和安宁盆地曾利用平均重力差值异常法寻找盐类矿床^[21]; 利用重力、电测深、自然伽马能谱, 结合地质、岩泉水化学资料综合研究找矿^[22]。在邻近的云南勐腊磨憨地区利用剩余重力异常剖面反演, 推断盐岩体成因及埋深规模^[23]。中国兰坪—思茅盆地与老挝万象、泰国呵叻盆地钾盐形成在同一条特提斯带上^[4,24-26], 而且这些地方钾盐开采及研究成果较多, 与中国的江城勐野井钾盐矿在成盐时代及古气候方面具有可对比性。老挝钾盐矿区的地球物理重力数据经过了细致的处理和解释^[27-29], 为进一步勘探圈定了靶区。

收稿日期: 2019-10-24; 修订日期: 2019-11-13。

基金项目: 中国地质调查局“油钾兼探实施方案和调查评价部署(编号: 1212011085524)”“滇西南中生代盐盆地钾盐资源调查评价(编号: 1212011085517)”“NSFC-云南联合重点基金项目(编号: U0833601)”“地质云系统集成与共享服务(编号: DD20190398)”项目联合资助。

第一作者简介: 刘璿(1985—), 男, 博士, 讲师, 主要从事地球物理方法在金属与非金属矿产找矿勘探中的应用及盐构造方面的研究工作。

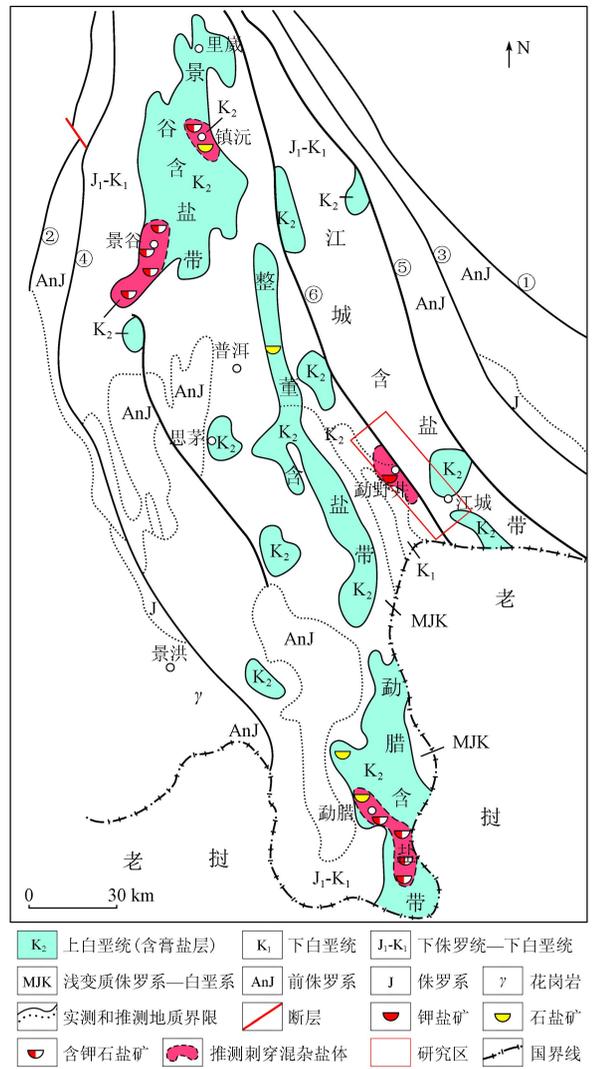
万方数据 liuying_131@163.com。

近年来,郑绵平院士团队在江城地区开展 1:5 万高精度重力测量、音频大地电磁测深 (AMT)、2D 反射地震、大地电磁频谱测深 (MES) 等地球物理方法的应用,丰富了研究区的地球物理资料,提出了深部侏罗系盐岩底辟浅部贯入的“二层楼成矿模式”,拓展了该地区深部找盐前景,为寻找新的矿床提出了指导思想。总体来看,该地区积累了一些地球物理资料,但缺少进一步的处理和解释研究。江城地区地质构造复杂,要想实现新的找矿目标,亟须开展相关的矿床学和地球物理学研究,了解在此沉积和挤压地质背景下矿床的控矿因素和成矿规律,以及盐岩矿和周边围岩的三维结构特征,为找矿提供基础信息。因此,本文在前人研究的基础上,对重力数据进行位场分离、多尺度边缘检测、三维反演等处理及研究,刻画了盐岩体及地下构造的三维分布特征,探讨成矿背景,预测了找矿的有利地段。

1 区域地质概况

思茅盆地位于欧亚板块、印度板块和特提斯三大构造域交汇部位,属于特提斯—三江构造带,盆地东邻金沙江—哀牢山深大断裂带,西接澜沧江深大断裂,北部与兰坪盆地相连,向南出国境入老挝、泰国,与万象、呵叻盆地相接,主体为中、新生代地槽式凹陷盆地,其在演化过程中曾出现多次干旱气候成盐时期,发育巨厚的中、新生代红色碎屑岩和含盐盆地。新近纪晚期印度板块俯冲到欧亚板块下,发生强烈的喜马拉雅造山运动,伴随青藏高原的隆起,滇西地区地壳发生区域性大面积隆升、挤压、剥蚀、沉积作用,它使全区地层遭受水平挤压形成褶皱、倒转、变质和逆掩断层。由于受构造运动的破坏,思茅盆地大部分含盐系已被剥蚀,只留下零星分布的构造残片。在受构造变动影响较小的地区(如镇远、景谷、勐腊等)含盐系得以保存下来,岩层完整并平缓,后期的保存条件也较好(图 1)。江城凹陷勐野井钾盐矿位于思茅盆地东部的逆冲推覆构造带附近,在喜马拉雅运动之后遭受强烈的上升剥蚀,由于受到“飞来峰”的覆盖与保护,零星分布的古新统“小盐盆”得以保存^[30-32]。

江城地区发育的地层主要为碎屑沉积岩,在保母山、营盘山以西有少量的变质岩,地层从二叠系(P)至第四系(Q)均有出露。该地区地层时代



①哀牢山—金沙江深大断裂; ②澜沧江深大断裂; ③安定断裂; ④民乐断裂; ⑤阿墨江断裂; ⑥把边江断裂

图 1 思茅盆地构造分布及含盐盆地分布略图^[15]

Fig. 1 Tectonics and salt basin distribution of Simao Basin^[15]

从老至新有上二叠统(P₂)、上三叠统(T₃)、下侏罗统漾江组(J_{1y})、中侏罗统和平乡组(J_{2hp})、上侏罗统坝注路组(J_{3b})、下白垩统(K₁)、古近系(E)、新近系(N)及在盆地零星出现的第四系(Q)。其中上二叠统(P₂)、上三叠统(T₃)、下侏罗统漾江组(J_{1y})在研究区零星分布,下白垩统底部向上为景星组(K_{1j})、曼岗组(K_{1m})、扒沙河组(K_{1p}),其与上覆勐野井组(K_{1me})为平行不整合关系;古近系等黑组(E_{1d})零星出现在研究区南部;白垩系勐野井组(K_{1me})为主要的赋盐地层。研究区具有明显的盆地和向斜构造特征,测区内断层发育,走向呈SN、NW、近EW和NE向。由于断裂及构造挤压作用,

下伏地层具有 $0.47 \sim 0.54 \text{ g/cm}^3$ 的密度差。侏罗系密度大于白垩系,含盐层综合密度小于非含盐地层,盐岩体显示为低密度特征,可在地层中形成局部低重力响应,这为重力勘探提供了物性基础。因此有一定规模的盐矿,用重力勘探效果较好。

3 布格重力场特征

研究区内断裂、褶皱以及飞来峰等构造发育,地层支离破碎,重力异常显示较为凌乱,最高与最低布格重力异常差值达 30 mGal (图3)。总体来看,研究区布格重力异常呈东南高西北低,从东南向西北重力负异常逐渐增强。从布格重力等值线分析,盆地斜向形态较为清晰,随着地层从新到老分布,重力正异常有增大的趋势。异常区的东部为正异常最大值,该地区有二叠系、三叠系出露,说明随着地层从老到新,密度逐渐变小。重力异常表明沿着测区 NW—SN 向有大的构造断裂,为测区的主断裂构造 F1(把边江断裂);次级断裂呈 NE—SW 向,与区域构造格局一致。勐野井钾盐矿位于 F1 主断裂西侧与 F2 断裂的交汇处,重力异常呈“泪滴状”。测区西北部的负异常未能完全闭合,其规模与强度均大于勐野井,呈带状分布,与主控断裂及后期小断裂相重合,构造较为复杂。

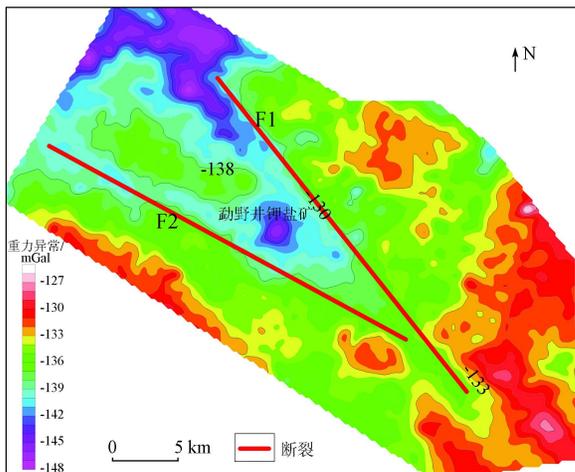


图3 江城地区布格重力异常

Fig. 3 Bouguer gravity anomaly map of Jiangcheng area

3.1 位场分离

根据观测重力值计算得到的布格重力异常,包含了从深部莫霍面至表层沉积盖层地质因素引起的各类异常,是所有密度不均匀体重力响应的叠加总和。只有消除深源异常才能突出浅层沉积

盖层及局部岩性变化引起的重力异常。但将单个地质体引起的重力异常从叠加异常中分离出来比较困难^[35-39]。为了深入地研究成矿区区域构造、盆地断裂、矿体的分布特征,需要研究浅部及深部不同的重力场特征。关于位场分离的技术和算法较多,如平均场法、解析延拓法、趋势分析法、插值切割法、维纳滤波法等。研究区位于山区,构造复杂,地表出露多套地层,结合地质任务,通过多种方法的对比,本文采用了相对小尺度滤波或小幅度上延来提取区域场,从布格重力异常中减去区域异常得到剩余重力异常,该方法所求剩余重力异常能很好地与已知地质体吻合并反映成矿体和断裂带及基底与盆地凹陷等构造特征。

在野外测取的布格重力异常场 $g(x, y)$ 包含 2 方面的内容: 深部信息和浅部信息,或是区域场 (g_{reg}) 和局部场 (g_{res})。而我们更多地关注局部场 (剩余场) 的特征。

$$g(x, y) = g_{\text{res}}(x, y) + g_{\text{reg}}(x, y), \quad (1)$$

式中 x, y 为测点坐标。

解析延拓法分离重力异常的算法和理论非常成熟。一般将延拓在一定高度所求的异常作为区域异常。对初始数据进行不同高度的延拓试验,当增加高度,异常形态不再变化或变化不大时,确定为最佳高度,所求即为区域场。将区域场从布格异常中减去,即为局部场或剩余场。对研究区重力数据进行处理,采用向上延拓高度 $1\ 000 \text{ m}$ 、 $2\ 000 \text{ m}$ 、 $3\ 000 \text{ m}$ 的区域场进行对比,发现当延拓至 $3\ 000 \text{ m}$ 时,异常形态基本不再变化,所以将延拓至 $3\ 000 \text{ m}$ 的高度作为区域场(背景场),从而求取局部场(剩余场)(图4)。

区域异常为研究区的深部构造或基底的反映。从区域异常分析,延拓高度从 $1\ 000 \text{ m}$ 上升到 $2\ 000 \text{ m}$, 负异常呈 NW 向串珠状展布,并在中心处呈 NS 向收拢的椭圆形小盆地。当向上延拓至 $3\ 000 \text{ m}$, 盆地中心异常较为平缓,负异常呈“几”字形向 SE 方向收缩,中部形成一个凹陷区,西北部表现为大面积负异常,指示江城湖盆的中心在西北部(重力异常未能完全圈闭),沉积厚度也较大,勐野井钾盐矿处于湖盆的边部。根据地层分析,在低异常区均出露白垩系勐野井组,结合区内的物性特征,勐野井组地层的密度远小于周围其他地层的密度,所以推断低异常区应为白垩系勐野井组地层增厚的响应。

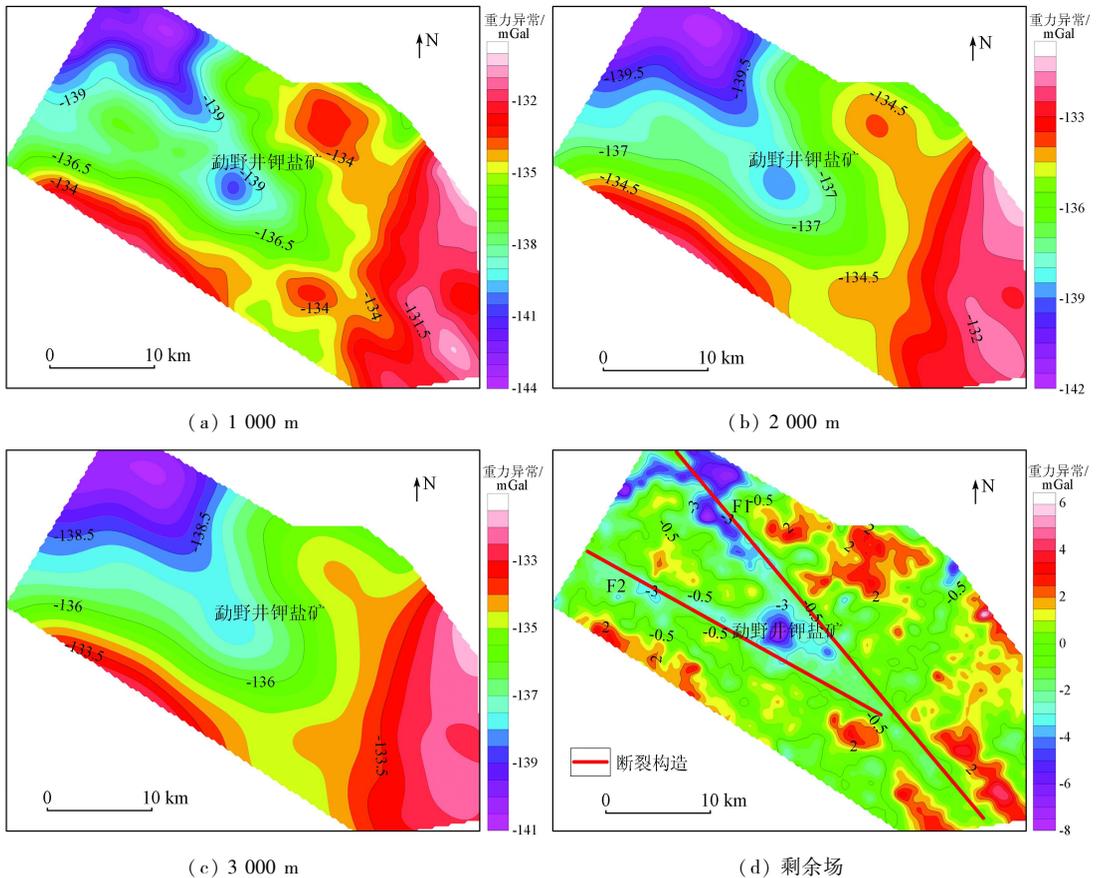


图4 向上延拓不同高度的区域场和剩余场

Fig. 4 Regional and residual fields at different heights of upward continuation

剩余重力异常消除了深部区域重力响应的影 响,主要揭示浅层地层分布、构造格局、断裂等地质信息,可以定性分析研究区内沉积层及岩性不均匀体的分布。从异常图分析可知,研究区内沿构造走向的重力异常梯级带发育明显,整体呈向西倾斜的“Y”字型。一支沿 NWW 方向发育(F2 断层),另一支继续沿 NW 方向发育至工区西北角(F1 断层)。勐野井处于 2 组断裂的交汇地带,说明勐野井盐盆地受构造控制。断裂交叉地带由于构造的薄弱,也可能成为深部盐岩塑性流动的上升通道。盐岩层最厚区域也是重力负异常最大的地方,负异常等值线图与矿区等厚图有很好的对应关系。由于逆冲、推覆等构造运动,断裂带和破碎地质体之间填充较低的密度体,也可以引起负重力异常响应。

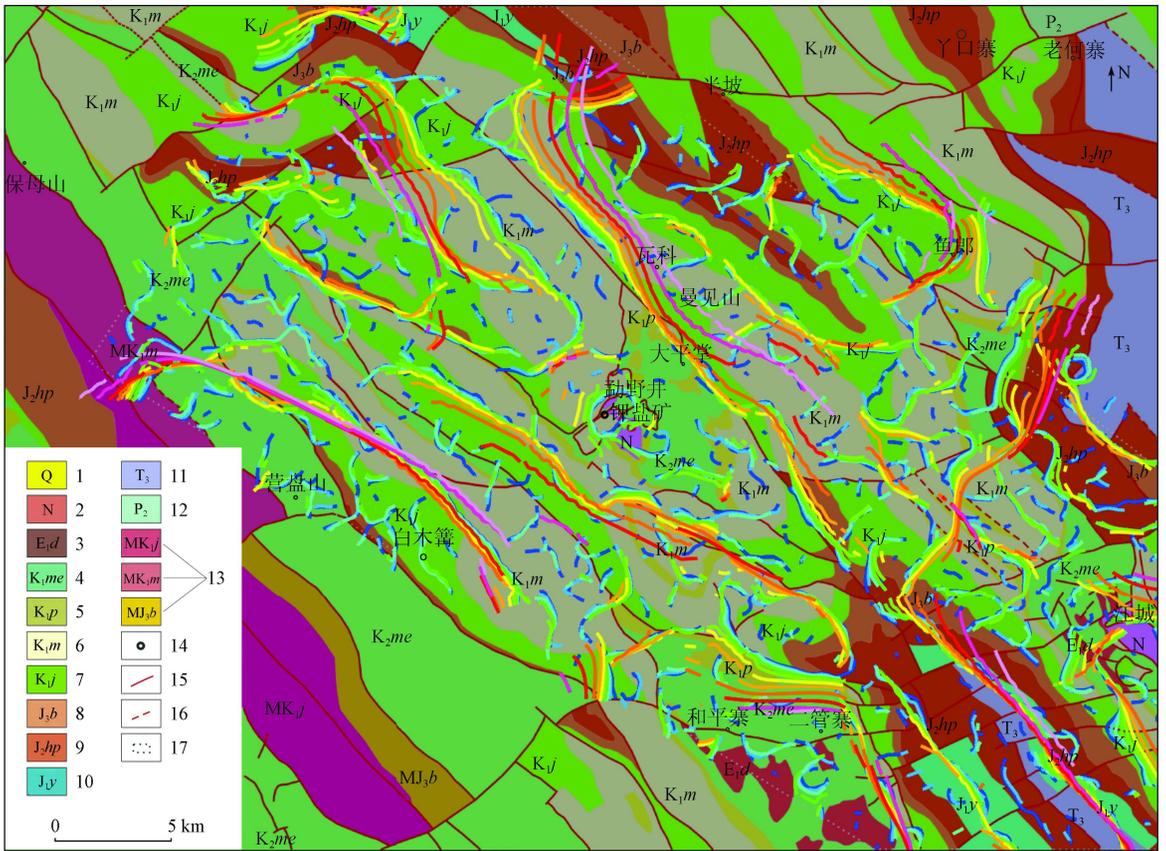
3.2 多尺度边缘检测

多尺度边缘检测技术是从图像分形学研究的基础上发展起来的,在澳大利亚“玻璃地球”项目中发挥了重大作用^[41]。该方法的基本原理是:由一

系列上延到不同高度重力场数据的水平导数极大值点组成的线条,处理过程中约束位场梯度的位置和强度,其结果可以解释地质构造的三维分布。在同一图幅内,将不同延拓高度检测结果用不同颜色、大小的线型叠加到一起,获得该构造的发育深度及倾向特征。线束颜色越深、组合越密集表示边界构造切割深度越大,产状较陡,倾角较大;反之,表示构造较浅,倾向较缓。多尺度边缘检测技术具有对异常边界识别准确、虚假边界少的特点。该方法在重磁法金属矿勘探和地震油气勘探以及盐构造等研究领域取得了广泛的应用和显著成果^[41-42]。

根据前述解释原则,对研究区重力数据进行多尺度边缘检测,其结果反映了以下信息(图 5)。

(1) 提供了丰富的断裂构造与边界信息。图中线束颜色越深(红色),代表研究区的深大断裂,而较浅的颜色则代表后期次生断裂。深色线束大多为 NW—SE 走向,浅色线束痕迹表现为环状。这与研究区断裂和构造走向基本一致。



注: 叠层边缘检测线条颜色从蓝色—红色变化表示延拓高度从600 m到4 000 m检测结果。

1. 第四系; 2. 新近系; 3. 古近系等黑组; 4. 上白垩统勐野井组; 5. 下白垩统扒沙河组; 6. 下白垩统曼岗组; 7. 下白垩统景星组; 8. 上侏罗统坝筑路组; 9. 中侏罗统和平乡组; 10. 下侏罗统漾江组; 11. 上三叠统; 12. 上二叠统; 13. 变质岩; 14. 地名; 15. 实测断层; 16. 推测断层; 17. 重力测量区

图5 江城地区布格重力异常多尺度边缘检测与地质图叠加立体图

Fig. 5 Overlay chart of geological map and multi-scale edge detection of gravity anomaly in Jiangcheng area

(2) 深色线束(红色)组合大多较宽,说明深部的断裂倾角及产状较平缓;浅色(蓝色)的环形和不规则线束组合较为密集,表明边界和小构造切割较浅,产状较陡,环形线束为地质块体的边界,并且沿着构造断裂分布。就江城湖盆而言,其东西两侧的深大断裂(东侧为哀牢山断裂,西侧为营盘山断裂)控制了该凹陷。在喜马拉雅运动以来,印度板块俯冲欧亚板块,青藏高原隆升,该地区处于强大的NE—SW向应力挤压下,随盆地隆起的山脉发生叠瓦式逆冲推覆,形成小的地质块体及“飞来峰”构造,深部岩盐随挤压温度和压力的作用,沿断层或薄弱地层塑性流动上升至地表。一方面由于外部环境的影响,原盐岩体被破坏;另一方面推覆体也作为新的盖层,使部分岩盐沉积在老地层之下得以保护。

(3) 勐野井钾盐矿区的环形线束有效地圈定了矿区范围,与矿体边界具有很好的对应。其西北部颜色较深,东南部颜色较浅,说明在西北部矿体埋藏深度较大,而东南部较小,这与实际矿区钻探相

吻合。在勐野井的西北有线条颜色加深并向西北部放大的趋势,说明在勐野井钾盐矿西北深部还有盐岩的存在,结合岩盐构造的塑性流动特性及郑绵平院士提出的“二层楼”找矿模式,可能该部位为勐野井盐矿的“盐源”。

3.3 三维物性反演

重力三维反演主要分为形态反演和物性反演。形态反演是用二维棱柱体或多面体模拟地质体,被模拟地质体的密度不发生变化,通过正反演或人机交互实现模型体形态的变化,以达到逼近地质体的目的。物性反演是将地下半空间剖分成长方体的小网格单元体,用不同的物性(密度或磁化率)填充单元体,在反演过程中,单元体的形态不再变化,物性发生变化,通过反演所得物性变化圈定地下体形态^[43-44]。三维物性反演模型易于操作,反演方法受限制条件少,在剖分单元格足够小的情况下,可以模拟任意地质体,因此物性反演已经成为重磁3D反演研究的主要方向。已有多位学者和技术人

员通过正反演模拟,并加入地质、钻井等约束条件,使反演结果接近于真实地质构造^[45-50],证明该方法在实际勘探中具有可用性。反演过程如下。

(1)对原始数据进行场分离。采用解析延拓法求取的剩余重力异常作为反演的原始数据(图4(d))。

(2)估计数据的误差范围。考虑到研究区重力数据采集的精度、地形改正以及后期处理的误差,反演数据的估计误差设为 ± 0.05 mGal。

(3)网格剖分。研究区重力数据提取网度为 $500\text{ m} \times 500\text{ m}$,为将网格单元剖分更小,更能合理地组合地质体的形态,将地下半空间剖分为 $300\text{ m} \times$

300 m 的网格。由于数据采集区为不规则形状,反演模型为规则体,无数据部分以空网格填充,为减少边缘效应,四周扩边 $3\ 000\text{ m}$ 。考虑到随着深度的加大,反演分辨率降低以及计算机存储能力、计算效率等因素,在垂向上将地下体剖分为 25 m 、 50 m 、 100 m 、 200 m 不同厚度的小单元体,反演深度为 $5\ 000\text{ m}$,共 $1\ 755\ 600$ 个网格单元。

(4)设定反演参数,执行反演。采用GCV反演算法,通过多次迭代,重力反演拟合差为 $5\ 820$,达到收敛要求,可以满足研究精度,得到反演模型及不同深度密度差切片(图6)。

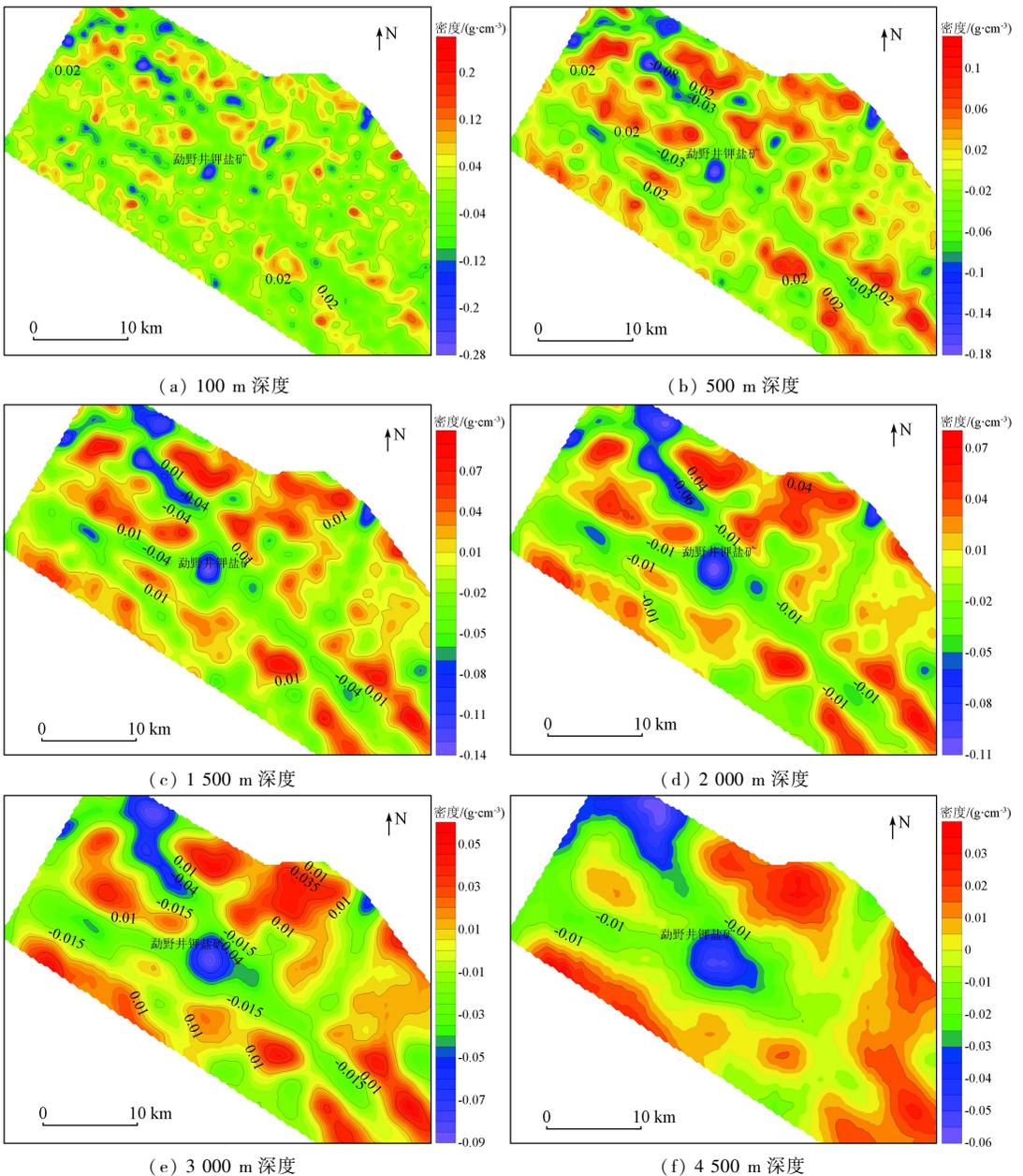


图6 不同深度3D重力反演密度切片

万方数据

Fig. 6 3D gravity inversion section of different depth in the study area

从反演的切片图显示,反演密度差为 0.6 g/cm^3 ,这与本地实测密度最高的侏罗系岩石与岩盐的密度差一致,证明反演结果是可靠的。由于研究区断裂发育,逆冲推覆以及飞来峰等造成地表破碎,地层较为松散,以第四系及断裂构造为主,表层至 100 m 深度密度体分布较为杂乱(图 6(a)),断裂等构造信息均不明显。自 500 m 以下(图 6(b)),地下密度界限开始清晰,密度差达 0.3 g/cm^3 ,该深度地层主要为曼岗组(K_1m)、景星组(K_{1j})以及盐岩,低密度呈带状分布为构造断裂的表现;在勐野井矿区位置,反演密度差与实测地层密度差相近,勐野井钾盐矿在断裂交汇部位,与该地区的构造挤压有关。反演深度 1 500 m(图 6(c)),该深度的地层主要为和平乡组。反演深度 2 000 m(图 6(d)),勐野井矿区低密度区域的面积较之图 6(c)有明显的扩大,与该地区地层对比,预测可能有深部盐岩赋存,而且面积较之上部更大。反演 3 000 m 深度(图 6(e))以下,密度差变化不大,勐野井地区的低密度体面积向西北部扩大,该处可能为勐野井矿区的“盐源”,这印证了郑绵平院士所提出的“二层楼”找矿模式;在研究区的西北部半坡一带,有大面积的低密度体,根据该地区的地层研究,应该为勐野井组地层在该地区增厚的表现,而通过钻探揭示在深部 2 200 m 处有含盐迹象,因此在深部也有可能找到盐岩甚至钾盐矿。

4 讨论

钾盐矿床的形成需要比一般沉积矿更加严格和完备的条件,它是在特定古气候、古地理、地质构造等环境下的产物。此外盐岩具有特殊的力学性质,在地层及构造变动中易发生塑性变形。滇西南在中、新生代以干旱气候为特征,逐渐形成厚层盐类沉积。由于深断裂的控制,在喜马拉雅期构造运动下,青藏高原抬升,滇西南地貌发生巨大变化,使得盆地形成受次一级古断裂控制的含盐带或小盐盆地,在盆地边缘和次级盆地中沉积了钾盐矿。江城盆地勐野井钾盐矿床是在多级盆地成盐背景下形成的,在成盐后构造运动中,岩层发生断裂和挤压,深部原盐在挤压构造作用下,经断层挤压向浅部塑性流动,贯入至浅部地层中保存成矿。在勐野井钾盐矿的勘探中发现盐层和泥砾层都不稳定,且与正常的海水蒸发的沉淀不同,缺少白云岩以及钾、钠、镁的硫酸盐的沉积,盐类中卤化物占绝对优势,岩层褶皱、揉皱现象明显,钾盐层剖面呈马尾丝

状展布,盐岩体呈现不规则状,说明盐岩体内部经历不均匀的塑性流动。

5 结论

通过对江城地区及勐野井钾盐矿区的重力数据进行位场分离、边缘检测、三维反演的处理,其结果反映了地下岩体、构造、矿体等丰富的地质信息,为成矿背景和找矿预测提供了直接或间接的思路,得到了以下结论和认识。

(1)通过对布格重力进行位场分离分析,向上延拓不同高度区域场,展示了江城湖盆基底的形态与随深度的变化。区域场负异常可能为该地区低密度地层勐野井组或者岩层增厚的显示,正异常为老地层的指示;剩余场负异常为浅部断裂构造或低密度的重力场响应。勐野井钾盐矿处在 2 组断层的交汇位置,钾盐矿受断裂构造的控制,盐岩由于其特有的物理性质,在挤压条件下发生塑性流动,沿构造带薄弱处挤压上涌,在地表受后来推覆构造或“飞来峰”的保护而保留成矿。

(2)利用多尺度边缘检测技术分析,确定了研究区深部和浅部的构造格架,圈定深部断裂、地质块体、矿区的边界和范围。深色线束勾画出研究区的深部构造,浅色线束为浅部矿体或地质体的显示,勐野井矿区的环形线束有向西扩大的趋势,可能在深部有新的盐岩体的存在。

(3)三维重力反演显示了研究区从表层到深部的密度分布。高密度体为各深度完整岩层的显示,低密度体为岩盐或断层构造。反演结果显示在勐野井矿区的深部,低密度体的范围和规模进一步扩大,可能在其深部还有大范围盐岩体的存在。在测区西北部,密度低为勐野井组地层增厚的体现,在本区该地层为主要的含盐地层,因此有可能存在盐岩体甚至钾盐矿。

(4)由于江城地区构造复杂及盐岩所特有的物理性质,建议采用综合地球物理方法以及盐构造等多学科结合研究,尽量减少地球物理的多解性,使研究区地下结构“透明化、玻璃化”,了解地下盐岩体的构造特征,寻找深部源盐层,为进一步圈定找矿靶区开拓思路。

致谢: 在本文数据处理中得到中国地质科学院矿产资源研究所严加永博士的指导及提供的软

硬件支持,在撰写和修改稿件期间得到了审稿专家认真、细致的审阅及修改建议,还有编辑部老师的热心帮助,谨此一并表示感谢。

参考文献:

[1] 吴天柱. 云南勐野井钾盐矿床的成因[J]. 化工地质, 1981(1): 1-8.

[2] 邓尔新. 云南省江城、勐腊一带钾矿床和盐溶岩类的特征、形成条件以及找矿问题[J]. 地球化学, 1982(2): 143-154.

[3] 帅开业. 云南中、新生代地质构造演化与蒸发岩建造[J]. 现代地质, 1987, 1(2): 207-229.

[4] 韩元红, 马海州, 袁小龙, 等. 兰坪—思茅盆地与呵叻高原钾盐矿床综合对比[J]. 盐湖研究, 2011, 19(3): 1-7, 25.

[5] 曲懿华. 试论盐系中泥砾岩成因[J]. 化工矿产地质, 1997, 19(3): 162-166.

[6] 高翔, 方勤方, 姚薇, 等. 云南兰坪—思茅盆地勐野井钾盐矿床物质组分对成因的指示[J]. 地球学报, 2013, 34(5): 529-536.

[7] 许效松, 吴嘉陵. 云南勐野井钾盐矿床特征, 微量元素地球化学及成因探讨[J]. 中国地质科学院院报, 1983(1): 17-36, 117-118.

[8] 颜仰基, 袁敬阁, 康承林, 等. 云南思茅拗陷勐野井组盐类矿床的成钾条件[J]. 中国地质科学院院报成都地质矿产研究所分刊, 1981, 2(1): 29-47.

[9] 张从伟, 高东林, 马海州, 等. 兰坪—思茅盆地钾盐矿床的物质来源探讨[J]. 盐湖研究, 2010, 18(4): 12-18.

[10] 郑智杰, 尹宏伟, 张震, 等. 云南江城勐野井盐类矿床 Sr 同位素特征及成盐物质来源分析[J]. 南京大学学报: 自然科学, 2012, 48(6): 719-727.

[11] 杨尖絮, 尹宏伟, 张震, 等. 滇西兰坪—思茅盆地成钾地质条件分析[J]. 大地构造与成矿学, 2013, 37(4): 633-640.

[12] 范承钧. 滇西区域地质特征[J]. 云南地质, 1982, 1(4): 323-336.

[13] 岳维好, 高建国, 李云灿, 等. 云南省勐野井式钾盐矿床找矿模型及预测[J]. 地质与勘探, 2011, 47(5): 809-822.

[14] 苗卫良, 马海州, 张西营, 等. 云南思茅盆地勐野井组碎屑岩矿物学、地球化学特征及古盐湖沉积环境演化[J]. 地质学报, 2015, 89(11): 2096-2107.

[15] 郑绵平, 张震, 尹宏伟, 等. 云南江城勐野井钾盐成矿新认识[J]. 地球学报, 2014, 35(1): 11-24.

[16] 袁秦, 秦占杰, 魏海成, 等. 云南江城勐野井组钾盐成矿时代及其古环境研究[J]. 地球学报, 2013, 34(5): 631-637.

[17] 方勤方, 高翔, 彭强, 等. 云南兰坪—思茅盆地勐野井矿区钾石盐的特征及其沉积环境[J]. 地质学报, 2015, 89(11): 2108-2133.

[18] 董娟, 高翔, 方勤方, 等. 云南勐野井钾盐矿床石盐包裹体特征及其古环境意义[J]. 岩石矿物学杂志, 2015, 34(2): 227-236.

[19] 袁桃, 吴驰华, 伊海生, 等. 云南思茅盆地景谷地区下白垩统曼岗组风成砂岩沉积学特征及其古气候意义[J]. 地质学报,

2015, 89(11): 2062-2074.

[20] 曾华霖. 重力场与重力勘探[M]. 北京: 地质出版社, 2005: 248-250.

[21] 王炳玉. 平均重力差值异常法在寻找盐类矿床中的应用[J]. 云南地质, 1985, 4(4): 404-408.

[22] 王宝禄. 云南勐野井岩盐(钾)矿区物探成果再解释的地质效果[J]. 物探与化探, 1989, 13(4): 290-299.

[23] 宋旭锋, 曹涛, 付彦平, 等. 高精度重力法精确圈定磨憨地下盐体范围[J]. 云南地质, 2012, 31(2): 233-237.

[24] 王少华. 老挝万象平原重力异常及其地质体特征[J]. 化工矿产地质, 2012, 34(1): 39-46.

[25] 李善平, 马海州, 陈有顺, 等. 老挝万象盆地钾盐矿床微量元素地球化学特征及矿床的成因[J]. 地质通报, 2010, 29(5): 760-770.

[26] 曲懿华. 兰坪—思茅盆地与泰国呵叻盆地含钾卤水同源性研究——兼论该区找钾有利层位和地区[J]. 化工矿产地质, 1997, 19(2): 81-84.

[27] 高铁. 重力数据处理方法在钾盐矿寻找中的应用[D]. 长春: 吉林大学, 2012: 1-67.

[28] 肖锋. 重力数据处理方法的研究及其在钾盐矿勘探中的应用[D]. 长春: 吉林大学, 2009: 1-90.

[29] 张虹. 高精度重力资料在老挝甘蒙地区的应用研究[D]. 长春: 吉林大学, 2013: 1-45.

[30] 曲一华, 袁品泉, 帅开业, 等. 兰坪—思茅盆地钾盐成矿规律及预测[M]. 北京: 地质出版社, 1998: 1-137.

[31] 焦健. 思茅盆地侏罗纪区域成盐找钾研究[D]. 北京: 中国矿业大学(北京), 2013: 1-80.

[32] 朱创业, 夏文杰, 伊海生, 等. 兰坪—思茅中生代盆地性质及构造演化[J]. 成都理工学院学报, 1997, 24(4): 23-30.

[33] 刘璿, 郑绵平, 张震, 等. 滇西南思茅盆地盐构造研究及找钾初探[J]. 地质论评, 2017, 63(3): 568-580.

[34] 余一欣, 周心怀, 彭文绪, 等. 盐构造研究进展述评[J]. 大地构造与成矿学, 2011, 35(2): 169-182.

[35] Li Y G, Oldenburg D W. Separation of regional and residual magnetic field data[J]. Geophysics, 1998, 63(2): 431-439.

[36] Li Y G, Oldenburg D W. 3-D inversion of magnetic data[J]. Geophysics, 1996, 61(2): 394-408.

[37] Nabighian M N, Ander M E, Grauch V J S, et al. Historical development of the gravity method in exploration[J]. Geophysics, 2005, 70(6): 63ND-89ND.

[38] Nabighian M N, Grauch V J S, Hansen R O, et al. The historical development of the magnetic method in exploration[J]. Geophysics, 2005, 70(6): 33ND-61ND.

[39] 刘彦, 严加永, 吴明安, 等. 基于重力异常分离方法寻找深部隐伏铁矿——以安徽泥河铁矿为例[J]. 地球物理学报, 2012, 55(12): 4181-4193.

[40] 管焯. 云南三江地区地壳三维构造格架与矿集区关系研究[D]. 北京: 中国地质科学院, 2005: 1-99.

[41] 严加永, 吕庆田, 孟贵祥, 等. 基于重磁多尺度边缘检测的长江中下游成矿带构造格架研究[J]. 地质学报, 2011, 85(5): 900-914.

- [42] 周晶,张延庆,李建华.边缘检测技术探测盐丘[J].天然气工业,2007,27(S):379-380.
- [43] Li Y G, Oldenburg D W. 3-D inversion of gravity data[J]. *Geophysics*, 1998, 63(1):109-119.
- [44] 严加永,吕庆田,陈向斌,等.基于重磁反演的三维岩性填图试验——以安徽庐枞矿集区为例[J].岩石学报,2014,30(4):1041-1053.
- [45] William N C. Geologically - constrained UBC - GIF gravity and magnetic inversions with examples from the Agnew - Wiluna greenstone belt, Western Australia[D]. Canada: The University of British Columbia, 2008:1-92.
- [46] 郭冬,严加永,吕庆田,等.地质信息约束下的三维密度填图技术研究及应用[J].地质学报,2014,88(4):763-776.
- [47] 刘璎,孟贵祥,严加永,等.重磁3D物性反演技术在金属矿勘探中的应用[J].地质与勘探,2011,47(3):448-455.
- [48] 路利春,姜鸿,吴荣高,等.重力方法在祁连山地区构造特征与岩体解释中的应用[J].中国地质调查,2018,5(3):95-103.
- [49] 徐剑春,吴成平,李文勇,等.苏北盆地岩石密度界面划分及特征[J].中国地质调查,2017,4(4):74-79.
- [50] 李家斌,朱大友,屈念念,等.高精度重力方法在“大塘坡式”锰矿找矿中的应用[J].中国地质调查,2016,3(2):15-20.

Salt basin gravity exploration and enlightenment of deep potassium ore prospecting in Jiangcheng area of Yunnan Province

LIU Ying^{1,2}, ZHENG Mianping², YU Changqing³, ZHANG Zhen², GAO Lei⁴

(1. Lanzhou City University, Lanzhou 730070, China; 2. Institute of Mineral Resources, Chinese Academy of Geological Sciences, Beijing 100037, China; 3. Institute of Geology, Chinese Academy of Geological Sciences, Beijing 100037, China; 4. The Company of Huasheng Hydrological Geological Survey, China National Administration of Coal Geology, Handan 056000, China)

Abstract: Mengyejing salt mine in Jiangcheng of Yunnan Province is the only solid potash deposit founded in China. The geological structure is relatively complex in this area. Through geological, geophysical and drilling exploration, the authors thought potash beds were squeezed up to the surface layer, along with the faults from the deep Jurassic potassic rocks, and there may be salt sources or more large ores under the deposit. In order to realize the ore exploration breakthrough, the deep structure and characteristics and 3D structure model of salt rocks need studying. The basement changes and fault distribution of the Jiangcheng basin were obtained using potential field separation, multi-scale edge detection and 3D physical inversion to process and interpret the high precision gravity data. And other information such as the structural framework, 3D distribution of density of underground body and the relationship with salt mine distribution was also obtained. The authors deduce that there may be salt mine and potassic salt ores below the deep northwestern Mengyejing ore field, so this area should be the key area for the following exploration of potassic salt. These results will provide clues and direction for Jiangcheng potassic prospecting in future.

Keywords: Jiangcheng; Mengyejing potash salt; gravity exploration; potential field separation; multi-scale edge detection; 3D physical inversion

(责任编辑:常艳)