



引文格式: 黄钊, 张小兵, 李忠, 等. 音频大地电磁法探测滇中陆良盆地及邻区的地质结构特征[J]. 西北地质, 2025, 58(3): 75-85. DOI: 10.12401/j.nwg.2024073

Citation: HUANG Zhao, ZHANG Xiaobing, LI Zhong, et al. Geological Structure Characteristics of the Luliang Basin and Adjacent Areas in Central Yunnan Detected by Audio Magnetotelluric Method[J]. Northwestern Geology, 2025, 58(3): 75-85. DOI: 10.12401/j.nwg.2024073

音频大地电磁法探测滇中陆良盆地及邻区的地质结构特征

黄钊^{1,2,3}, 张小兵^{1,2,3}, 李忠^{1,2,3,*}, 吴中海^{4,5}, 吴清华^{1,2,3}, 杨功^{1,2,3}, 汪金明^{1,2,3}, 黄亮^{1,2,3}

(1. 云南省地质调查院/云南省地质科学研究所, 云南 昆明 650216; 2. 自然资源部三江成矿作用及资源勘查利用重点实验室, 云南 昆明 650051; 3. 云南省三江成矿作用及资源勘查利用重点实验室, 云南 昆明 650051; 4. 中国地质科学院地质力学研究所, 北京 100081; 5. 自然资源部活动构造与地质安全重点实验室, 北京 100081)

摘要: 陆良盆地是云南面积最大的新生代(新近纪)盆地, 构造活动活跃。采用音频大地电磁测深对盆地及邻区进行探测分析, 有效确定了研究区地下的电性、地质及结构特征。判识断裂 20(F_1 - F_{20}) 条, 其中曲靖-陆良断裂带(F_{15} - F_{18}) 对盆地形态特征影响极大; 在盆地地段, 判识 7 条隐伏断裂, 并可能在第四纪期间仍具有一定活动性, 主边界断裂为盆地东缘断裂, 具有显著的正断层活动特征。盆地充填地层从地表到深部可依次划分为第四系和新近系茨营组(N_2c^{1-4}) 一段至四段共 5 层, 在剖面上显示其深度超过 1 000 m, 整个盆地中心深度超过 1 600 m。确定了盆地结构形态特征, 证实了陆良盆地为新生代近 SN 向的箕状断陷盆地, 基底为泥盆系、石炭系和二叠系。实例表明音频大地电磁测深对盆地探测是有效的地球物理方法。

关键词: 云南陆良; 盆地; 音频大地电磁法; 电性; 断裂

中图分类号: P631.2

文献标志码: A

文章编号: 1009-6248(2025)03-0075-11

Geological Structure Characteristics of the Luliang Basin and Adjacent Areas in Central Yunnan Detected by Audio Magnetotelluric Method

HUANG Zhao^{1,2,3}, ZHANG Xiaobing^{1,2,3}, LI Zhong^{1,2,3,*}, WU Zhonghai^{4,5}, WU Qinghua^{1,2,3},
YANG Gong^{1,2,3}, WANG Jinming^{1,2,3}, HUANG Liang^{1,2,3}

(1. Yunnan Institute of Geological Survey / Yunnan Academy of Geological Sciences, Kunming 650216, Yunnan, China; 2. Key Laboratory of Sanjiang Metallogeny and Resources Exploration and Utilization, MNR, Kunming 650051, Yunnan, China; 3. Yunnan Key Laboratory of Sanjiang Metallogeny and Resources Exploration and Utilization, Kunming 650051, Yunnan, China; 4. Institute of Geomechanics, Chinese Academy of Geological Sciences, Beijing 100081; 5. Key Laboratory of Activity Structure and Geological Safety, Beijing 100081)

收稿日期: 2022-11-09; 修回日期: 2023-09-14; 责任编辑: 曹佰迪

基金项目: 云南省地质勘查基金项目“云南省 1:5 万马鸣村幅纳章幅越州幅陆良县幅 4 幅区域地质调查”(D201901), 国家自然科学基金资助项目“滇缅接壤区特提斯洋的扩张方式及时空演化: 古-中生代岩浆和沉积作用约束”(92055207), 国家自然科学基金云南联合基金项目“金沙江石鼓-攀枝花段活断层作用及其触发巨型滑坡—堵江灾害链时空特征研究”(U2002211)联合资助。

作者简介: 黄钊(1984-), 男, 硕士, 高级工程师, 从事地球物理与地球化学研究工作。E-mail: 151230199@qq.com。

* 通讯作者: 李忠(1982-), 男, 硕士, 高级工程师, 从事地球物理与地球化学研究工作。E-mail: 278618901@qq.com。

my of Geological Sciences, Beijing, 100081, China; 5. Key Laboratory of Active Tectonics and Geological Safety, Ministry of Natural Resources, Beijing 100081, China)

Abstract: The Luliang Basin with active tectonics is the largest Cenozoic (Neogene) basin in Yunnan Province. The audio magnetotelluric sounding was effectively used to detect and analyze the underground spatial electrical properties and structural characteristics of the basin and its adjacent areas. Twenty faults (F_1 - F_{20}) were identified, including the Qujing-Luliang fault belt (F_{15} - F_{18}) that has a great impact on the basin morphology; seven concealed faults in the basin section that probably continue active during the Quaternary period; and the main boundary faults at the eastern edge of the basin characterized by significant normal fault movement. The profile shows that its depth is more than 1 000 m, and the depth of the whole basin center is more than 1 600 m. The strata in the basin from surface to deep has been divided into five layers comprised of the Quaternary and the first to the fourth Members of Neogene Ciyang Formation (N_2c^{1-4}). The structural and morphological characteristics of the basin suggest that the Luliang basin is a Cenozoic SW trending dustpan fault basin, with Devonian, Carboniferous and Permian basement. The example shows that audio magnetotelluric sounding is an effective geophysical method for basin exploration.

Keywords: Luliang Yunnan Province; basin; audio-frequency magnetotelluric method; electrical; Fracture

云南地区受区域走滑断裂运动影响,形成众多的新生代(新近纪、古近纪)小型盆地(李卿, 2010),其中面积最大为陆良盆地,达 772 km²。陆良盆地是陆良县城所在地,同时也是滇中城市群重要组成部分。陆良盆地明显受小江断裂带、曲靖-陆良断裂带和师宗-弥勒断裂带的控制,盆地形成演化的主要原因是在喜山运动时期 3 条区域大断裂产生强烈走滑活动(侯宇光等, 2006)。小江断裂带是国内著名的强震带(李忠等, 2021)及第四纪具有非常强烈的左旋走滑活动性,曲靖-陆良断裂带分布 3~4 级地震,师宗-弥勒断裂带分布小于 6 级地震。一些地震活动性很低的活断层(曲靖-陆良断裂、师宗-弥勒断裂)往往被人低估地震危险性,最后造成不必要的灾难,为了预防小江断裂、曲靖-陆良断裂和师宗-弥勒断裂引起的地震对盆地及邻区的人民群众生命和财产造成伤害,并把损失降到最低,因此,有必要对陆良盆地及邻区地质构造进行研究,特别是深部地质构造情况,为当地经济建设和规划村镇建设提供地下丰富的地质资料,同时为研究区域大地构造及新构造运动具有科学意义。前人对陆良盆地形成与演化(刘树根, 1997)、茨营组地震相研究(吕儒明等, 2005)、茨营组流体判别标准分析(季风玲, 2009)、茨营组水下扇沉积特征(崔建等, 2008)、茨营组沉积相和气藏特征分析(胡雅杰, 2012)等方面做了大量调查研究工作,显示出查清陆良盆地的地质和构造特征重要性;但只对陆良盆地进行研究,均没有对盆地邻区(东、西侧地区)进行研究,故均没有系

统研究盆地与邻区结构关系等。

针对盆地分析的主要工作手段有遥感解译(荆林海等, 2001)、地面调查(秦帮策等, 2021; 李智等, 2022)、工程地质(王伟平等, 2022)、航空重磁(周道卿等, 2020)、二维地震(胡雅杰, 2012)和测井(侯宇光等, 2006)等。音频大地电磁测深以探测精度高、分辨率好、快速、轻便等优点不仅在矿产勘查(肖朝阳等, 2011; 李忠等, 2017)、地质工程勘查(张建成, 2015; 李忠等, 2021)和水文调查(赵俊等, 2017)等领域广泛使用,同时在盆地探测中也得到了广泛而成功的应用。黄元有等(2017)利用音频大地电磁测深对楚雄盆地进行探测,查清了盆地电性结构、各构造单元地质结构和断裂特征;王桥等(2020)在四川盆地新区采用音频大地电磁测深,获得区内深部电性特征,推断区内上三叠统须家河组具有良好的页岩气资源前景。基于此,文中结合野外地质工作的基础上,利用音频大地电磁法对陆良盆地及邻区进行探测和解析,查明盆地及邻区深部构造特征及盆地结构形态,系统研究了盆地与邻区结构关系,为深入研究盆地结构与稳定性提供科学依据,同时为研究区域大地构造及新构造运动具有科学意义。

1 研究区地质背景

研究区位于马长湖凹陷与召夸凸起交界处(图 1b),位于扬子板块西南缘,临近华南板块。研究

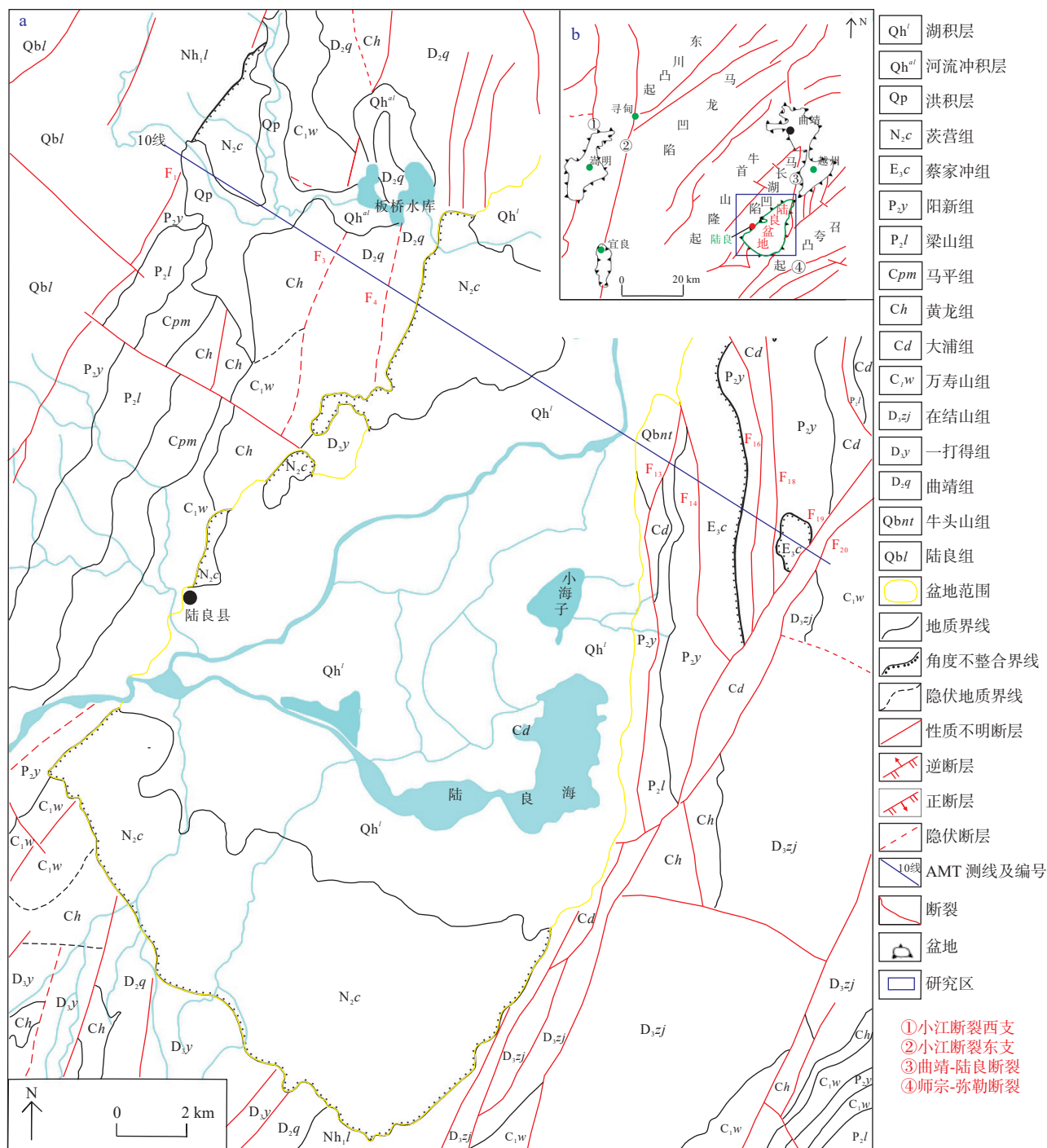


图1 研究区地质(a)及区域构造图(b)(据胡雅杰, 2012 修改)

Fig. 1 (a)Geological and (b) regional Tectonic map of the research area

区西邻小江断裂带, 东南临师宗-弥勒断裂带和穿越曲靖-陆良断裂带; 盆地东侧地区断裂(F₁₃-F₂₀)发育, 西侧地区发育数个断裂。研究区内出露地层由老至新有青白口纪陆良组(Qbl)以砂泥岩夹砾岩为主, 牛头山组(Qbnt)以砂岩为主; 中泥盆统曲靖组(D₂q)以灰岩为主, 上泥盆统一打得组(D₃y)以灰岩为主, 在结山组(D₃zj)

以灰岩为主; 下石炭统万寿山组(C₁w)粉砂岩、夹少量硅质岩, 大浦组(C_d)以灰岩为主, 黄龙组(Ch)以白云岩为主, 马平组(C_{pm})以灰岩为主; 上二统系梁山组(P₂l)煤层、砂岩, 阳新组(P₂y)以灰岩为主; 渐新世蔡家冲组(E₃c)砾岩、砂岩、泥岩; 上新世茨营组(N₂c)砾岩、砂、黏土、褐煤; 第四系(Q)砾石、砂、黏土(图1a)。

2 岩石地层电性参数特征

对研究区露头岩石采用小四极装置测定,总测定 309 组。研究区岩石电阻率数值(表 1)从大到小依次为白云岩>灰岩>页岩、砂岩>砂岩>砂石、砾石>表层黏土(N_{2c})>砾岩>表层黏土(Q)。其中,白云岩

电阻率平均值为 1 326 Ω·m,灰岩电阻率平均值为 1 072 Ω·m,均为曲靖组(D_{2q})、大浦组(Cd)和阳新组(P_{2y}),与茨营组(N_{2c})和第四系(Q)存在明显电性差异。因此,茨营组(N_{2c})与下伏古生界地层(P、C、D)灰岩(1 000 Ω·m 以上)之间电阻率差异明显,具备采用 AMT 探测茨营组(N_{2c})厚度及基岩起伏情况的物性前提。

表 1 岩石电性电阻率统计表

Tab. 1 Statistical table of electrical resistivity of rocks

岩性	测定组数	地层	电阻率 ρ_s (Ω·m)	
			变化范围	平均值
表层黏土	33	Q	10~132	24
表层黏土	48	N _{2c}	30~233	85
砂石、砾石	12	N _{2c}	134~265	161
砾岩	36	N _{2c} 、E _{3c}	4~200	39
砂岩	64	Nh _{1l} 、C _{1w} 、Pt _{1nt}	17~436	125
页岩、砂岩	22	E _{3c}	179~365	287
灰岩	64	D _{2q} 、P _{2y}	570~2 016	1 072
白云岩	30	Cd	702~2 452	1 326

3 数据采集、处理、判识断裂依据和定性分析

3.1 数据采集

野外施工使用仪器为电磁测深仪 EH4。工作频率: 10 Hz~100 kHz。布极主要采用“十”型装置。一条 AMT 剖面(10 线)布设于研究区北部(图 1a),剖面长 22.2 km,剖面布设方位 120°。测深点点距为 200 m,在断裂地段点距为 100 m。

3.2 数据质量及处理

测深点总数为 118 个,检查点为 12 个,检查率为 10.2%,检查点的视电阻率和相位的均方相对误差均小于 7%,各项数据均满足规范要求。数据处理过程(图 2):①野外数据采集(EH4)。②采用软件(IMAGEM)删除时间序列中存在明显噪声数据。③重新计算阻抗(视电阻率、相位等)数据。④采用音频大地电磁测深预处理软件进行处理。⑤利用反演软件(SCS-2D)进行二维反演。⑥构建电性断面图(图 3)和地质解释推断图(图 4)(李忠等, 2021)。

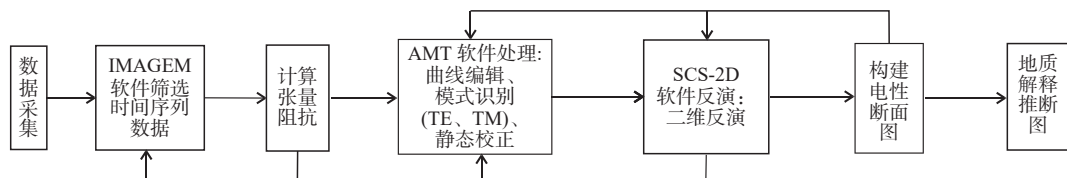


图 2 AMT 资料处理流程图

Fig. 2 Flow chart of the AMT data processing

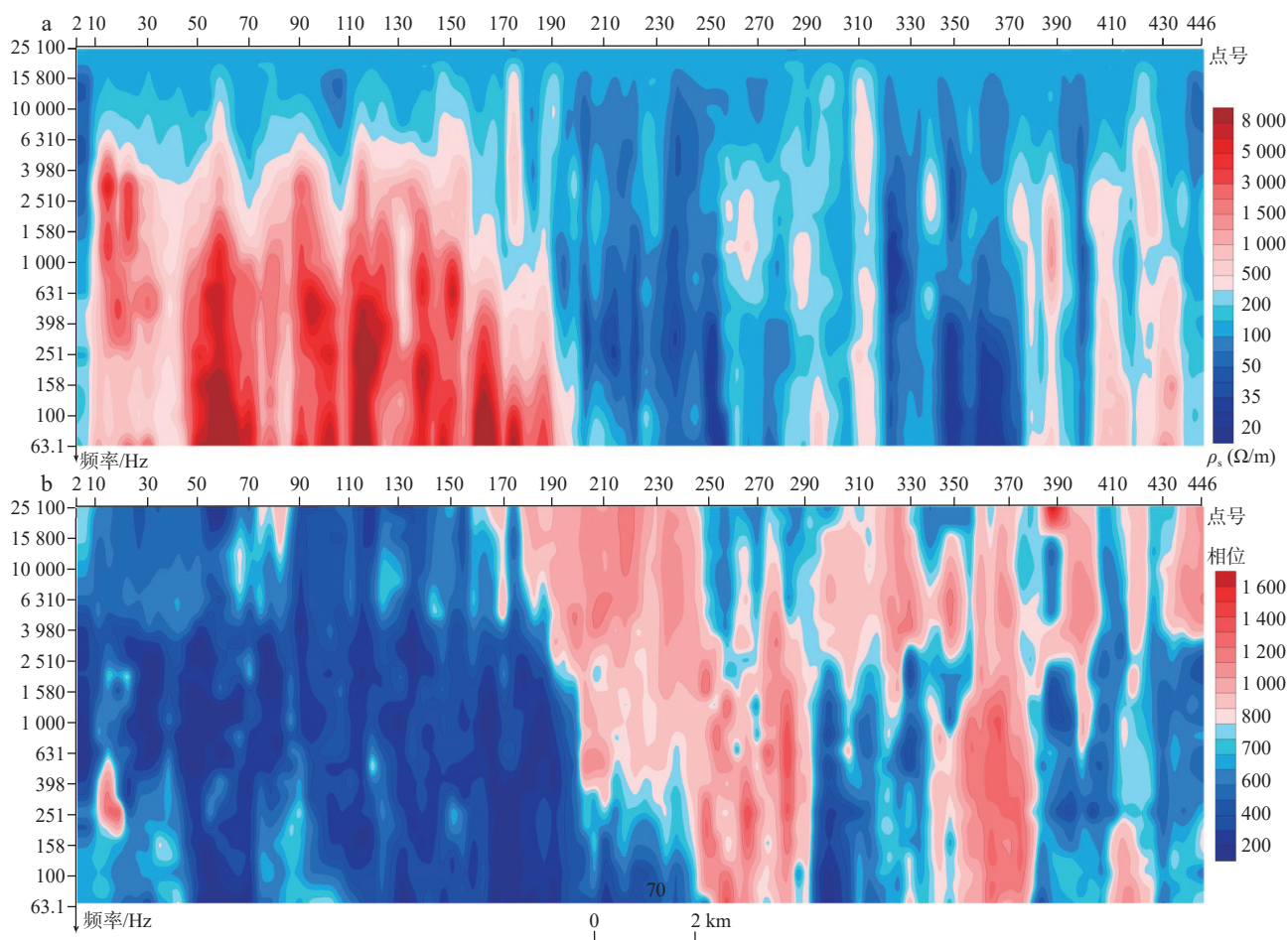
3.3 判识断裂依据

①反演剖面电阻率等值线陡立、扭曲带,这种陡立、扭曲带的形态也往往反映断裂深部发育形态。②电性有明显的错动或厚度有明显的变化。③根据视电阻率平面分布趋势、相邻剖面断裂两侧电性层发

育形态的比较进而确定断裂的平面展布趋势。

3.4 定性分析

依据剖面视电阻率及相位-频率拟断面图形态特征,定性分析研究区地下电性的分布特征,并初步建立地下介质模型,为二维反演(SCS-2D)的初始地电模



a.视电阻率-频率测深拟断面图; b.相位-频率测深拟断面图

图3 10线视电阻率及相位-频率测深拟断面图

Fig. 3 Apparent resistivity and phase-frequency sounding pseudo-section diagram of line 10

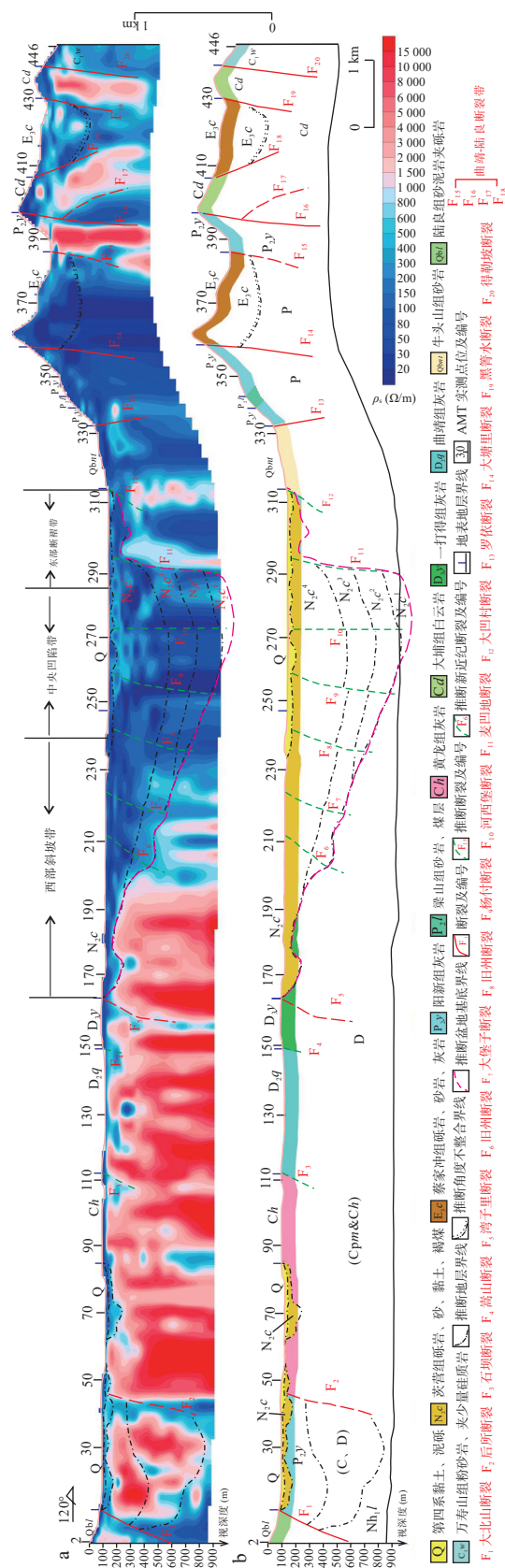
型建立提供依据(李忠等, 2021)。从视电阻率和相位断面图(图3)可知, 整体断面图具有很明显的分段(层)特征, 视电阻率断面图与相位断面图对应关系正好相反; 剖面西段频率大约在 5 010 Hz 分层较明显, 西段浅部低阻对应茭营组(N_2c)砾岩、砂、黏土, 中深部高阻对应晚古生代(P、C、D)地层以灰岩为主; 中段低阻对应茭营组(N_2c)砾岩、砂、黏土; 东段高低阻相间分布, 高阻对应岩性以碳酸盐岩为主, 低阻对应岩性以碎屑岩为主。特别是在视电阻率突变处, 相位上的突变对应的很好, 说明数据的可靠, 并真实反映了剖面电性构造的特点。

4 电阻率反演成果

从反演结果图上(图4)可知, AMT剖面穿越20条断裂: 其中隐伏断裂13条; 一级构造两条: 曲靖—陆良断裂带(F_{15} — F_{18})和得勒坡断裂(F_{20}); 在盆地地段

内7条隐伏断裂。整条剖面自西向东整体呈高阻—低阻—高低阻相间电性特征。结合物性(电性)测定结果(表1)综合分析解译。

在剖面西段(2-166点号), 在地表出露第四系(Q)地段, 表层低阻层推断第四系(Q)和统茭营组(N_2c)河湖相半固结黏土、泥砾、砂、砾岩层, 平均厚度约80 m, 局部超过100 m; 其与频率—视电阻和相位拟断面图(图3)所反映吻合, 拟断面图分界频率为5 010 Hz, 根据勘探深度公式, 其计算深度约80 m在6-46点号间, 两翼低阻带推断受断裂大北山断裂(F_1)和后所断裂(F_2)构造运动影响, 使岩石破碎, 充填水, 从而呈低阻; 中深部呈团状高阻体推断地层为(P、C、D)灰岩; 底部低阻层推断陆良组(Q_{bl})砂岩, 并与西侧陆良组相连。在42-86点号间, 中深部高阻体推断马平组(CP_m)或黄龙组(Ch)灰岩。在地表出露黄龙组、曲靖组(D_{2q})和一打得组(D_{3y})地段, 岩性以灰岩、白云岩为主; 中深部高阻推断石炭系和泥盆系的灰岩和白云岩。



a.AMT 剖面反演结果图；b.地质及物探推断断面图

图4 测线10物探综合解释推断图

Fig. 4 Physical exploration comprehensive interpretation inferred map of line 10

在剖面中段(166-314点号), 地表出露茨营组和第四系; 在盆地西段(166-258号点), 自西往东逐渐向深部延伸电性分界线, 推断为茨营组与基底基岩(碳酸盐岩)分界面, 在相位-频率拟断面图(图3)反映更明显。中深部相间低阻带推断首先受旧州断裂(F_6)、大堡子断裂(F_7)和旧州断裂(F_8)构造运动影响, 使岩石破碎, 其次盆地是湖相沉积产物, 在盆地形成过程中, 盆地下伏碳酸盐岩经过水长时期侵蚀, 在较破碎地方侵蚀更厉害、更深和面积更宽; 低阻带深部推断局部含茨营组砂、砾石和砾岩等。在294点号处中深部存在产状较陡的电性分界线, 推断该分界线为麦凹地断裂(F_{11}), 即盆地中深部东缘分界线, 上伏地层为茨营组, 下伏地层为万寿山组(C_{1w})砂岩; 在274点号处中深部存在产状近似直立相对低阻带, 推断受河西堡断裂(F_{10})构造运动影响。在盆地东段(294-314号点), 浅部明显存在近似水平电性分界线, 推断该分界线为盆地茨营组与基底基岩(万寿山组砂岩)分界面, 深度约80 m。该地段两侧中深部存在两个对称且较陡中阻体, 推断受麦凹地断裂(F_{11})和大凹村断裂(F_{12})构造运动, 使岩石产生硅化, 故呈中阻。

在剖面东段(314-446点号), 表浅层低阻推断以碎屑岩为主, 高阻推断以灰岩为主, 中深部推断以灰岩为主。在382-446点号间, 该段电性高低阻相间分布, 推断曲靖-陆良断裂带(F_{15} - F_{18})、黑箐水断裂(F_{19})和得勒坡断裂(F_{20})构造运动, 是造成在两高阻间夹面积较大低阻体和两侧电性地层完全不同的原因, 特别曲靖-陆良断裂带(F_{15} - F_{18})控制盆地东缘走向。

5 讨论

5.1 陆良盆地及邻区的主要断裂体系及特征

大北山断裂(F_1)主体形成于喜马拉雅早期阶段, 在喜马拉雅晚期局部位置具一定活动性, 断裂两侧产状多相抵及局部较为紊乱, 少量位置还发育有直立带和岩石碎裂化, 具压性, 断裂倾向南西, 倾角主体为65°, 主要表现为一NW—SE碰撞形成的逆冲推覆断裂; 控制陆良盆地西缘走向。断裂处于剖面10点号附近, 在剖面显示向西倾斜且深度较深, 表现为西侧中低阻与东侧高阻的分界线, 推断陆良组与阳新组分界线。

麦凹地断裂(F_{11})为隐伏断裂, 为盆地东侧具生长断层特点的控盆断层。处于剖面304点号附近, 在剖

面显示向西倾斜且深度较深, 产状较陡; 在剖面中深部表现为西侧低阻与东侧中高阻的分界线, 推断万寿组与茨营组分界线, 是控制盆地东缘中深部边界。

曲靖-陆良断裂带(F_{15} - F_{18})为SN向走滑深大断裂(李卿, 2010; 曾普胜等, 2015), 为压扭性冲断层和第四纪左旋活动, 其程度为中等, 构造带宽达数千米, 倾角约65°, 沿线地层破碎陡立。北接宣威断裂带, 南被师宗-弥勒断裂带限制(侯宇光等, 2012); 控制陆良盆地东缘走向。

中国云南地区在喜马拉雅运动时期经过板块间的强烈俯冲-碰撞作用下, 研究区首先是小江断裂带、师宗-弥勒断裂带和曲靖-陆良断裂带发生了强烈反转、逆冲和走滑活动(李卿, 2010), 引起早期主要断裂(F_1 、 F_2 、 F_{13} 、 F_{14} 、 F_{19} 、 F_{20})复活, 并参与区域构造运动, 盆地邻区地层局部抬升; 在区域性旋转-走滑构造应力作用下, 在盆地中形成了NNE向为主的正断层(F_6 - F_{12})经后期挤压扭动改造发生褶皱变形, 与之伴生的派生局部发育小型逆断层(侯宇光等, 2012)。

5.2 陆良盆地的结构形态及其形成演化

5.2.1 盆地的结构形态特点

根据物探综合解释推断图(图4)所示, 剖面自西向东划定西部斜坡带-中央凹陷带-东部断褶带3部分; 西部斜坡带分布于盆地的西部(缓斜)部位(166-258点号), 地层超覆在基底老地层上, 并逐渐向上抬升; 中央凹陷带分布于盆地中央(258-282点号), 是盆地沉降中心; 东部断褶带位于盆地主控断裂一侧的近南北向狭长地带(282-314点号)。盆地由地表至底部整体呈簸箕状展布; 盆地西侧厚度自西向东逐渐增加, 盆地东侧厚度自东向西浅部逐渐增加, 至中深部急速下降; 盆地水平长度约7.6 km; 判别7条新近纪隐伏断裂(F_6 - F_{12}), 推断除河西堡断裂(F_{10})外, 其他断裂为基底断裂; 推断盆地中心位置位于河西堡断裂(F_{10}), 在剖面上的盆地中心深度超过1 000 m。结合地震和测井资料(胡雅杰, 2012; 表2), 从地表到深部依次划分茨营组(N_2c^{1-4})一段至四段共4层, 茨营组一段相对较薄。

整个盆地划为东部断褶带、中央凹陷带、西部斜坡带、北部斜坡带、南部破碎带5个部分(图5)。东部断褶带分布盆地东部, 地形陡峭, 由于受边界曲靖-陆良断裂构造活动影响大, 使地层顺断层垂直抬升; 中央凹陷带分布盆地中部, 是盆地沉降中心, 其深度超过1 600 m; 西部斜坡带发育了一系列近SN向正断裂和局部小型逆断层; 北部斜坡带为斜坡的面貌, 为单

表 2 钻孔测井及地震数据对应茨营组各段的深度统计表

Tab. 2 Depth statistics for each section of the ciying formation corresponding to logging and seismic data

钻孔	深度 (m)	地层	钻孔	深度 (m)	地层	钻孔	深度 (m)	地层
陆 14 井	0~290	N ₂ c ⁴	陆 11 井	0~400	N ₂ c ⁴	陆 15 井	0~490	N ₂ c ⁴
	290~470	N ₂ c ³		400~710	N ₂ c ³		490~860	N ₂ c ³
	470~660	N ₂ c ²		710~860	N ₂ c ²		860~990	N ₂ c ²
陆 2 井				860~970	N ₂ c ¹		990~1 110	N ₂ c ¹
	0~370	N ₂ c ⁴	陆 9 井	0~500	N ₂ c ⁴	陆 10 井	0~475	N ₂ c ⁴
	370~600	N ₂ c ³		500~880	N ₂ c ³		475~780	N ₂ c ³
	600~1 260	N ₂ c ²		880~1 450	N ₂ c ²		780~1 085	N ₂ c ²
	1 260~1 300	N ₂ c ¹		1 450~1 630	N ₂ c ¹		1 085~1 170	N ₂ c ¹

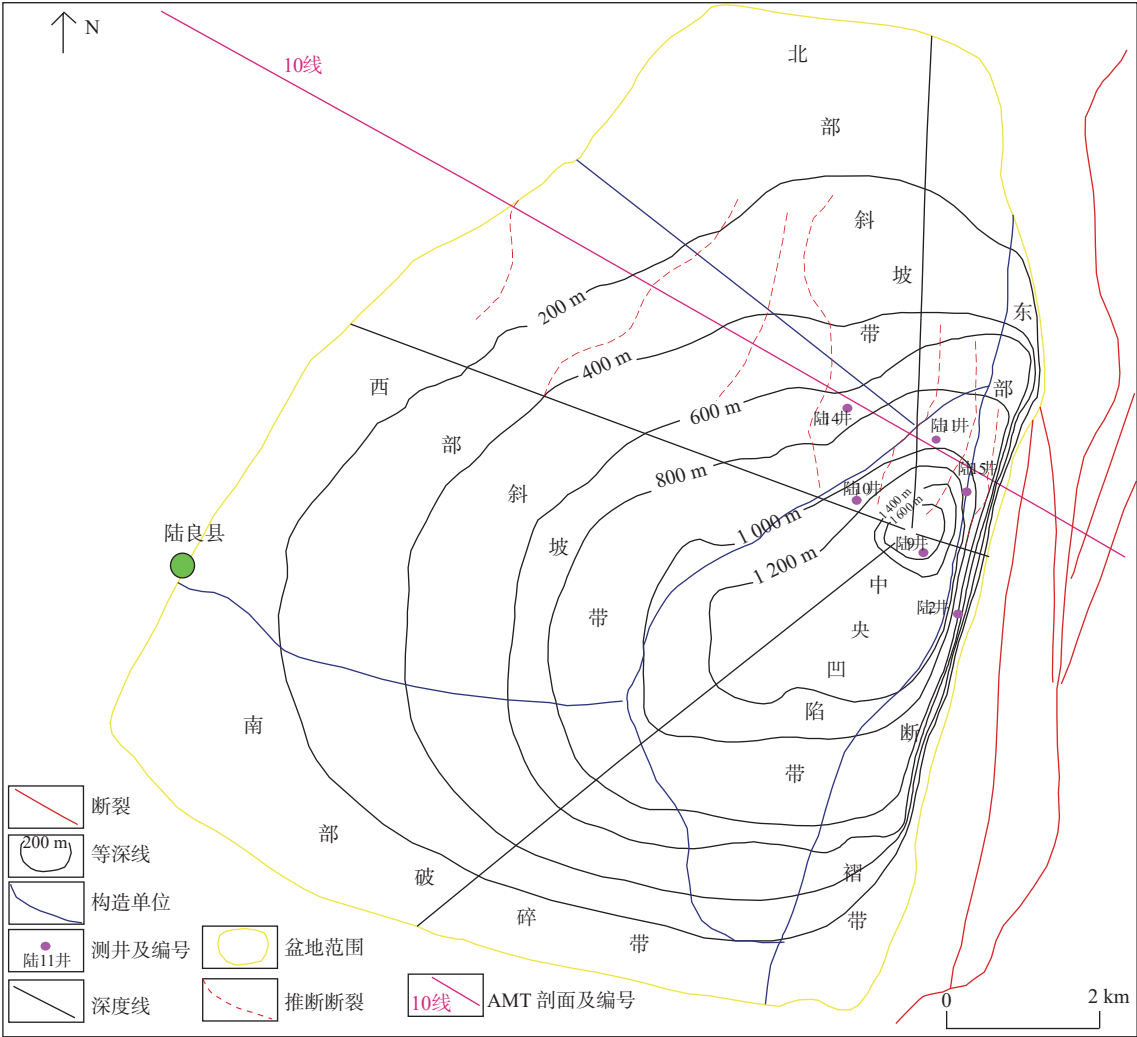


图5 盆地构造单位划分及平面深度等值线图(据胡雅杰, 2012 修改)

Fig. 5 Basin tectonic unit delineation and plane depth contour map

斜构造;南部破碎带受构造运动影响较大,发育有小型正断层,地层破碎。西部、北部和南部地区均是等深线较稀疏,深度缓慢下降。根据此次工作,结合地质、遥感、地形地貌等资料,推断盆地平面形态呈长轴

NNE 向的箕状形,陆良盆地为一新生代近 SN 向的东断西超断陷盆地,基底为泥盆系、石炭系或二叠系。

5.2.2 陆良盆地的形成演化

陆良盆地的演化过程经历了初始断陷阶段、强烈

断陷阶段、坳陷阶段和萎缩充填阶段(图6), 推断盆地目前仍处于萎缩充填阶段。

(1)初始断陷阶段。早上新世地壳运动逐渐活跃, 断裂活动增强, 引起小江断裂带左行走滑, 进一步发生师宗-弥勒断裂带和曲靖-陆良断裂带左行滑动, 曲靖-陆良断裂带左行滑动引起的弱拉张作用下缓慢沉降(第一旋回), 产生两条较浅断层并沉积茨营组一段(N_2c^1), 进入初始断陷阶段。盆地范围较小, 沉积厚度很薄。盆地南部发育较好。

(2)强烈断陷阶段。区域断裂活动持续增强, 特别曲靖-陆良断裂带左行滑动引起的强烈拉张作用下较快沉降(第二旋回), 产生数条断层并沉积茨营组二段(N_2c^2), 进入强烈断陷阶段。盆地由南部向北、西部均不断扩张, 盆地范围快速扩大, 沉积厚度增厚。

(3)坳陷阶段。坳陷时期的构造格局继承了扩张发育阶段的构造格局特征, 断层不断增多变深, 局部产生较小的次级逆冲断层, 沉积地层为茨营组三、四段(N_2c^{3-4})。盆地范围进一步扩大, 是盆地面积最大时期, 推断曲靖、越州和陆良盆地为统一盆地(侯宇光等, 2012)。

(4)萎缩充填阶段。进入第四纪, 小江断裂带、曲靖-陆良断裂带和师宗-弥勒断裂带的构造活动加强, 造成区域上强烈隆升, 并产生更多次级的逆冲断层;

盆地在遭受构造抬升-剥蚀作用之后, 盆地面积缩小, 沉积地层为第四系(Q)。

根据物探综合解释推断图(图4)和形成演化示意图(图6), 盆地西界为较平缓且起伏的分界面。基底为泥盆系灰岩, 推断在盆地形成过程中, 茨营组四段(N_2c^4)超覆在茨营组三段(N_2c^3)之上, 茨营组三段(N_2c^3)超覆在茨营组二段(N_2c^2)之上。盆地东界为很陡的分界面, 基底为石炭系砂岩。盆地东侧存在数条断裂(带), 中深部分界面为麦凹地断裂(F_{11})。特别是曲靖-陆良断裂带(F_{15} - F_{18})为深大断裂控制盆地东缘走向, 其第四纪构造活动较强。由于受大断裂的影响和喜山期以来的区域性挤压扭动构造应力作用, 在盆地东边界产生近似直立下降运动, 最终形成了新生代东断西超断陷盆地。

5.3 音频大地电磁测深的意义

音频大地电磁测深结果(图4)表明很好地反映了盆地(纵向)的形态, 整体呈东陡西缓的特征, 呈箕形状展布; 大体查清了盆地深度; 判识了20条断裂, 特别是盆地中的新近纪隐伏断裂和区域断裂曲靖-陆良断裂带的特征; 断裂对盆地的演化形成起着重要作用。为深入研究盆地结构与稳定性提供科学依据, 同时为研究区域大地构造及新构造运动具有科学意义。

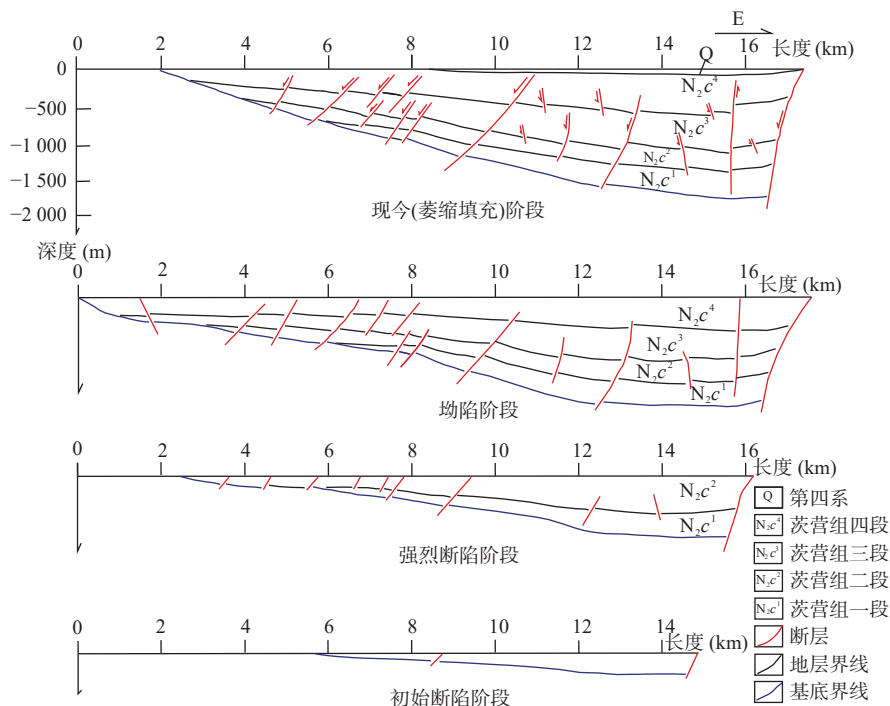


图6 陆良盆地的形成演化示意图(据刘树根, 1997 修改)

Fig. 6 Schematic diagram of the formation and evolution of the Luliang Basin

6 结论

(1) 确定了陆良盆地结构形态特征; 在剖面上(横截面)自地表至底部整体呈簸箕状展布; 在平面上表现为呈长轴 NNE 向的箕状形。盆地西界基底由浅部逐渐向深部延伸起伏变化; 东界基底在浅部表现近视水平起伏变化, 至中深部表现为近直立。

(2) 论述了陆良盆地及邻区的主要断裂体系。判识断裂 20(F_1 - F_{20}) 条, 其中隐伏断裂 13 条; 一级构造两条(曲靖-陆良断裂带 F_{15} - F_{18} 、得勒坡断裂 F_{20})。在盆地地段, 判识新近纪隐伏断裂 7(F_6 - F_{12}) 条, 除河西堡断裂(F_{10}) 外, 其他断裂为基底断裂; 河西堡断裂(F_{10}) 在剖面上的盆地中心, 深度超过 1 000 m, 整个盆地中心深度超 1 600 m。

(3) 在剖面西部第四系(Q)覆盖地段, 从地表至底部划分推断为第四系(Q)和上新统茨营组(N_2c)河湖相半固结黏土、泥砾、砂、砾岩层—灰岩层二层。在剖面断裂 F_1 与 F_2 间, 自上而下划分为第四系(Q)、茨营组(N_2c)、阳新组(P_2y)、石炭系和泥盆系及陆良组(Qb)共 5 层地层。

(4) 陆良盆地形成演化过程分为初始断陷阶段、强烈断陷阶段、坳陷阶段和萎缩充填阶段 4 个阶段。

(5) 陆良盆地及邻区探测地质结构结果说明, AMT 方法探测深度大, 对构造断裂、盆地基底等反映直观的特点, 能够有效探测盆地(纵向)的形态; 根据断裂构造带的电性特征, 可以有效地确定断裂构造的形态。音频大地电磁测深对盆地探测是有效的地球物理方法。

参考文献(References):

- 崔建, 李建明, 居亚娟, 等. 云南陆良盆地茨营组水下扇沉积特征[J]. 石油地质与工程, 2008, 22(2): 4-7.
- CUI Jian, LI Jianming, JU Yajuan, et al. Sedimentary characteristics of nearshore subaqueous fan of Neogene Ciyang Formation in Luliang basin. Yunnan[J]. *Petroleum Geology and Engineering*, 2008, 22(2): 4-7.
- 侯宇光, 何生, 唐大卿. 滇东北新生代盆地构造反转与生物气藏的形成[J]. 中南大学学报(自然科学版), 2012, 43(6): 2238-2246.
- HOU Yuguang, HE Sheng, TANG Daqing. Tectonic reverse of Cenozoic basins and its relationship with the biogas accumulation in north-east of Yunnan Province[J]. *Journal of Central South University (Science and Technology)*, 2012, 43(6): 2238-2246.
- 侯宇光, 何生, 唐大卿. 云南曲靖盆地构造演化及其对生物气藏条件的控制[J]. 现代地质, 2006, 20(4): 597-604.
- HOU Yuguang, HE Sheng, TANG Daqing. Tectonic Evolution and Its Effect on the Accumulation Elements of biogas in Qujing Basin, Yunnan[J]. *Geoscience*, 2006, 20(4): 597-604.
- 胡雅杰. 陆良盆地茨营组沉积相和气藏特征分析[D]. 2012, 北京: 中国地质大学.
- HU Yajie. Analysis of Sedimentary Facies and Characteristics of Gas Reservoir in Ciyang Formation in LuLiang Basin[D]. Beijing: China University of Geosciences, 2012.
- 黄元有, 信太岭, 陈强, 等. EH-4 低频模式在楚雄盆地页岩气地质调查中的试验[J]. 云南大学学报, 2017, 39(S2): 30-38.
- HUANG Yuanyou, XIN Tailing, CHEN Qiang, et al. Test effect of the EH-4 low frequency model for shale gas geological survey at the Chuxiong Basin, Yunnan[J]. *Journal of Yunnan University*, 2017, 39(S2): 30-38.
- 季凤玲. 陆良盆地茨营组流体判别标准分析[J]. 天然气技术, 2009, 3(6): 18-20.
- JI Fengling. Fluid Distinguishing Criterion Analysis of Ciyang Formation, Luliang Area[J]. *Natural Gas Technology*, 2009, 3(6): 18-20.
- 荆林海, 沈远超. 胶莱盆地北缘遥感信息提取及解译分析[J]. 地质学报, 2001, 35(1): 91-94.
- JING Linhai, SHEN Yuanchao. Extraction and Interpretation for the Northern Margin of the Jiaolai Basin with Remote Sensing[J]. *Geology and Exploration*, 2001, 35(1): 91-94.
- 李卿. 云南曲靖盆地储层地震预测[D]. 成都: 成都理工大学, 2010.
- LI Qing. Reservoir seismic prediction in Qujing Basin, Yunnan[D]. Chengdu: Chengdu University of Technology, 2010.
- 李智, 张志业, 李双建, 等. 南襄盆地地质结构与形成演化[J]. 西北地质, 2022, 55(2): 116-117.
- LI Zhi, ZHANG Zhiye, LI Shuangjian, et al. Geology Architecture and Tectonic Evolution of Nanxiang Basin[J]. *Northwestern Geology*, 2022, 55(2): 116-117.
- 李忠, 肖高强, 许晶. EH-4 电导率成像技术和化探综合方法在镇康放羊山铅锌铁矿区勘查中的应用[J]. 云南大学学报, 2017, 39(S2): 105-109.
- LI Zhong, XIAO Gaoqiang, XU Jing. EH-4 conductivity imaging and geochemical comprehensive method in Fangyang hill of Zhenkang exploration the application of lead and zinc iron mining area[J]. *Journal of Yunnan University*, 2017, 39(S2): 105-109.
- 李忠, 吴中海, 王金明, 等. 利用 EH4 音频大地电磁测深仪探测巧家巨型古滑坡及其结构面特征[J]. 地质力学学报, 2021, 27(2): 317-325.
- LI Zhong, WU Zhonghai, WANG Jingming, et al. Using EH4 audio magnetotelluric sounder to detect the gigantic Qiaojia paleo-landslide: Identification of structural surface characteristics[J].

- Journal of Geomechanics, 2021, 27(2): 317–325.
- 刘树根, 戴苏兰, 赵永胜, 等. 云南盆地的形成与演化[J]. 成都理工学院学报, 1997, 24(4): 9–22.
- LIU Shugen, DAI Sulan, ZHAO Yongsheng, et al. The Formation and Evolution of Luliang Basin in Yunnan Province[J]. Journal of Chengdu University of Technology, 1997, 24(4): 9–22.
- 吕儒明, 陈宗太, 伍佳明, 等. 陆良盆地陆9块上第三系茨营组地震相研究[J]. 石油天然气学报, 2005, 27(5): 566–568.
- LV Ruming, CHEN Zongtai, WU Jiaming, et al. Study on Seismic Facies of the Upper Tertiary Ciyang Formation in Lu 9 Block, Luliang Basin[J]. Journal of Oil and Gas Technology, 2005, 27(5): 566–568.
- 秦帮策, 方维萱, 张建国, 等. 汾河裂谷晋中盆地内第四纪沉积序列与沉积环境恢复[J]. 地质力学学报, 2021, 27(6): 1035–1050.
- QIN Bangce, FANG Weixuan, ZHANG Jianguo, et al. Quaternary sedimentary sequence and sedimentary environment restoration in the Jinzhong Basin, Fenhe rift valley[J]. Journal of Geomechanics, 2021, 27(6): 1035–1050.
- 王桥, 杨剑, 夏时斌, 等. 四川盆地新区新层系页岩气的音频大地电磁探测—以川西南乐山地区须家河组为例[J]. 地质学报, 2020, 96(2): 699–711.
- WANG Qiao, YANG Jian, XIA Shibin, et al. Audio magnetotelluric detection of shale gas in the new horizon of the area of Sichuan basin: a case study of the Xujiahe Formation in the Leshan area, southwest Sichuan[J]. Acta Geologica Sinica, 2020, 96(2): 699–711.
- 王伟平, 姚永坚, 蔡周荣, 等. 中建南盆地后扩张期 T5 和 T3 不整合面的发育特征及对南海科学钻探的意义[J]. 地质学报, 2022, 96(8): 2822–2832.
- WANG Weiping, YAO Yongjian, CAI Zhourong, et al. Characteristics of unconformity T5 and T3 in the Zhongjiangnan basin and their significance for scientific drilling in the South China Sea during the post-spreading period[J]. Acta Geologica Sinica, 2022, 96(8): 2822–2832.
- 肖朝阳, 黄强太, 张绍阶, 等. EH4 电磁成像系统在金矿勘探中的应用—以黄金洞金矿为例[J]. 大地构造与成矿学, 2011, 35(2): 242–248.
- XIAO Zhaoyang, HUANG Qiangtai, ZHANG Shaojie, et al. Application of EH4 Electromagnetic Image System in Mineral Resource Exploration—An Example from the Huangjindong Gold Ore Deposit[J]. Geotectonica et Metallogenia, 2011, 35(2): 242–248.
- 曾普胜, 李华, 朱晓华, 等. 云南曲靖盆地蔡家冲粗面英安质泥灰岩—扬子克拉通内曲靖深大断裂新生代强烈活动的证据[J]. 地质通报, 2015, 34(10): 1826–1836.
- ZENG Pusheng, LI Hua, ZHU Xiaohua, et al. Trachytic dacitic tuffs in Caijiachong Qujing basin, Yunnan province: Evidence for a strong activity of the Qujing deep fault within the Yangtze Craton[J]. Geological Bulletin of China, 2015, 34(10): 1826–1836.
- 张建成, 王通. EH4 电磁法在深埋滑坡变形体探测中的应用[J]. 工程勘察, 2015, 43(2): 94–98.
- ZHANG Jiancheng, WANG Tong. Application of EH4 conductivity imaging system in exploration of deep buried landslide deformation[J]. Geotechnical Investigation & Surveying, 2015, 43(2): 94–98.
- 赵俊, 向龙洲, 李忠, 等. 综合物探在水文地质调查中的应用及适用性分析[J]. 云南大学学报, 2017, 39(S2): 110–115.
- ZHAO Jun, XIANG Longzhou, LI Zhong, et al. Application and applicability analysis of comprehensive geophysical prospecting in hydrogeological survey[J]. Journal of Yunnan University, 2017, 39(S2): 110–115.
- 周道卿, 曹宝宝, 赵睿, 等. 羌塘盆地高精度航空重磁调查对盆地基底性质与构造格局的启示[J]. 地质学报, 2020, 95(11): 3178–3191.
- ZHOU Daoqing, CAO Baobao, ZHAO Rui, et al. High-precision airborne gravity and magnetic survey analysis of the Qiangtang basin: implications for basin basement properties and tectonic framework[J]. Acta Geologica Sinica, 2020, 95(11): 3178–3191.