doi: 10.11720/wtyht.2026.2500
孙健, 罗卫锋, 张家政, 等. 陕南安康地区页岩气广域电磁法探测及有利区分析[J]. 物探与化探, 2026, 50(1): 53-64. https://doi.org/10.11720/wtyht.2026.2500
Sun J, Luo W F, Zhang J Z, et al. WFEM-based exploration and favorable-zone analysis of shale gas in the Ankang area, southern Shaanxi Province[J]. Geophysical and Geochemical Exploration, 2026, 50(1): 53-64. https://doi.org/10.11720/wtyht.2026.2500

陕南安康地区页岩气广域电磁法探测及有利区分析

孙健[1,4], 罗卫锋[2,3], 张家政[2,3], 周志[2,3], 周惠[2,3], 康海霞[2,3], 王立波[1], 杨南坤[1], 罗林涛[2,3]

(1. 陕西地矿第一地质队有限公司, 陕西 安康 725000; 2. 中国地质调查局 油气资源调查中心, 北京 100083; 3. 中国地质调查局 非常规工程技术中心, 北京 100083; 4. 中国地质大学(武汉), 湖北 武汉 430074)

摘 要: 陕南安康地区具备页岩气成藏的地质条件和资源潜力, 但是经历多期构造作用, 页岩储层存在一定程度的破坏, 如何寻找局部页岩气富集有利区带成为安康地区页岩气探测亟须解决的关键问题。为此, 本文以安康地区下寒武统牛蹄塘组、鲁家坪组作为重点调查层系, 开展了广域电磁法探测研究, 采用综合信息建模与反演成像技术, 查明了该研究区的地层电性结构、断裂构造及目标层底界面展布特征, 结合页岩有机地球化学特征确定了页岩气勘探的有利区及远景区。研究成果对安康地区进一步开展页岩气勘探工作具有重要的指导意义, 给国内其他类似页岩气的地球物理勘探提供参考和借鉴。

关键词: 页岩气; 广域电磁法; 牛蹄塘组; 鲁家坪组; 安康

中图分类号: P631; P31 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-8918(2026)01-0053-12

0 引言

中国富有机质海相泥页岩分布广泛, 有机碳含量较高, 具备成烃物质基础, 是页岩气勘探的有利区带[1-3]。通过近 20 年的探索攻关与实践历程, 经历了评价选区、开发试验、示范区建设、海相页岩气规模开发这 4 个阶段, 国内页岩气开发取得了重大成就[2,4], 建成了川南、涪陵等中深层页岩气大气田, 实现了海相页岩气规模效益开发。但是面对未来的挑战和发展趋势, 中国需要继续加大深层页岩气的勘探开发力度, 积极探索新目标[3], 进一步扩大勘探场面, 力争实现油气勘探的新突破。

陕南安康地区位于四川盆地与秦岭造山带构造的耦合部位, 属于页岩气调查空白区。中国地质调查局油气资源调查中心、陕西地矿集团有限公司等单位在安康地区对下寒武统牛蹄塘组、鲁家坪组富有机质含碳质页岩、板岩物性特征、有机地化特征、生烃能力及成藏条件等方面开展研究分析, 认为安康地区具有页岩气成藏的地质条件, 从而具备潜在的页岩气资源[5-9]。但是安康地区历经多期构造作用, 断裂发育, 地层改造强度大, 页岩储层存在一定程度的破坏, 如何寻找局部页岩气富集有利区带, 是陕南安康地区海相页岩气勘探突破的关键。广域电磁法具有勘探深度大、分辨精度高等特点, 在页岩气勘探方面得到广泛的应用[10-13]。为此, 在陕南安康地区部署广域电磁法探测, 以城口—房县断裂带周缘地区下寒武统牛蹄塘组、鲁家坪组为重点调查层系, 研究页岩地层的电性结构特征, 全面了解研究区断裂及目标地层的分布特征, 为优选页岩气保存条件

收稿日期: 2024-12-26; **修回日期:** 2025-02-20
基金项目: 中国地质调查局项目(DD20190108、DD20179623); 陕西地矿集团有限公司科研专项资金项目(KY202222)
第一作者: 孙健(1983-), 男, 正高级工程师, 从事区域地质调查与矿产勘查工作。Email: 290564897@qq.com
通讯作者: 罗卫锋(1973-), 男, 正高级工程师, 主要从事非地震资料处理解释及方法研究工作。Email: luoweifeng_08@163.com

的有利区提供重要的地质和地球物理信息。

1　研究区地质地球物理特征

1.1　地质概况

研究区横跨北大巴山和扬子两个地层区，以城口—房县断裂带为界，其北侧属北大巴山地层区，南侧为扬子地层区。北大巴山地层区主要出露新生界第四系全新统，奥陶系上统斑鸠关组、中统权河口组、下统高桥组，寒武—奥陶系石瓮子组、娄山关组，寒武系上统黑水河组、中统八卦庙组、毛坝关组，下统箭竹坝组、鲁家坪组。扬子地层区主要出露新元古界震旦系上统灯影组、南华系上统南沱组，下古生界寒武系中统覃家庙组、下统天河板组和牛蹄塘组。下寒武统牛蹄塘组上部为薄层状灰岩，下部为碳质页岩、灰质页岩夹透镜状石煤，鲁家坪组以碳质板岩、灰质泥质板岩、灰岩为主(图 1)。

1.2　地球物理特征

对研究区实测物性标本、地热井电测井资料进行分析统计，主要岩性的电阻率数据见图 2。其中炭质板岩、碳质页岩呈现低阻特征，电阻率一般在 100 Ω·m 左右，泥质板岩、页岩电阻率明显增大，电阻率一般为 300～500 Ω·m，灰岩和白云岩呈现中高阻特征，电阻率在 5 000～12 000 Ω·m 之间。

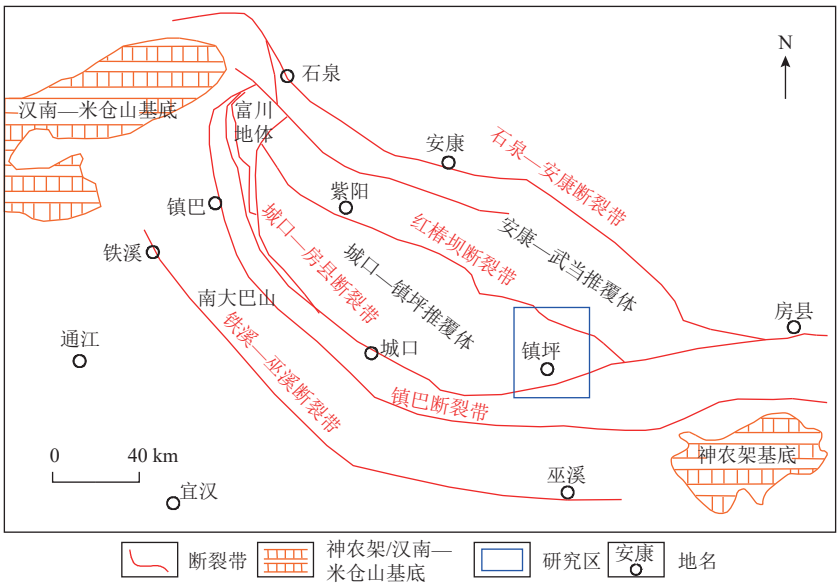


图 1　大巴山构造简图

Fig. 1　Dabashan structural diagram

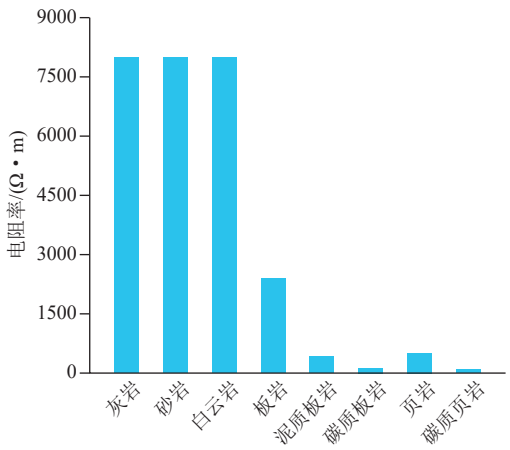


图 2　研究区主要岩石电性特征

Fig. 2　Electrical characteristics of main rocks in the study area

各地层物性参数值统计见表 1、表 2，由统计表可以看出，研究区地层电阻率具有一定的规律：

1)北大巴山地区奥陶系权河口组、高桥组岩性以泥质板岩、泥板岩、灰质板岩及灰岩为主，整体为中—高阻层；寒武系黑水河组、八卦庙组为中阻层，主要岩性为泥板岩、灰岩、泥灰岩、石灰岩；毛坝关组、箭竹坝组和鲁家坪组主要岩性为碳质板岩、灰质泥质板岩、灰岩、砂岩、泥灰岩、碳质砂岩等，整体为低阻层；震旦系灯影组发育白云岩、灰岩夹硅质岩、碳质板岩，为中—高阻层；深部高阻层为前震旦系地层，青白口系耀岭河组主要岩性为凝灰质砂岩、钠长岩。

2)扬子地区寒武系清虚洞组、天河板组为中—高阻层，主要岩性为白云岩、灰岩，石牌组、牛蹄塘组为低阻层，主要岩性为灰岩、页岩、泥质砂岩、碳质页岩和板岩；震旦系灯影组、陡山沱组为中—高阻层，主要岩性为硅质岩、白云岩、砂岩及碳质页岩；深部高阻层为前震旦系地层，南华系南沱组主要岩

表 1　北大巴山地层物性参数统计

Table 1　Statistics of physical parameters of North Daba Mountains strata

地层	主要岩性	电阻率范围/(Ω·m)	电性特征
权河口组(O_1q)	泥质板岩	1 200～3 800	中—高阻
高桥组(O_1gq)	泥板岩、灰质板岩、灰岩	1 500～4 000	中—高阻
黑水河组(ϵ_3h)	灰岩、泥灰岩、石灰岩	1 000～2000	中阻
八卦庙组(ϵ_2b)	灰岩、灰质板岩、泥灰岩	800～1 800	中阻
毛坝关组(ϵ_2m)	泥灰岩、碳质砂岩、碳质板岩	500～1 000	低阻
箭竹坝组(ϵ_1j)	灰岩、灰质泥质板岩、砂岩	650～1 000	低阻
鲁家坪组(ϵ_1l)	碳质板岩、灰质泥质板岩、灰岩	200～800	低阻
灯影组($Pt_3^3\epsilon_1dy$)	白云岩、灰岩夹硅质岩、碳质板岩	1 000～7 500	中—高阻
耀岭河组(Pt_3^1y)	凝灰质砂岩、钠长岩	3 000～8 000	高阻
侵入岩	正长闪长岩	3 300～15 000	高阻

表 2　上扬子地层物性参数统计

Table 2　Statistics of physical parameters of upper Yangtze strata

地层	主要岩性	电阻率范围/(Ω·m)	电性特征
清虚洞组(ϵ_2q)	白云岩、灰岩	5 000～12 000	高阻
天河板组(ϵ_1t)	灰岩, 偶夹灰—深灰色碳质页岩	3 000～6 500	中—高阻
石牌组(ϵ_1s)	灰岩、页岩、泥质砂岩	200～1 000	低阻
牛蹄塘组(ϵ_1n)	灰岩、碳质页岩、灰质页岩	150～800	低阻
灯影组($Pt_3^3\epsilon_1dy$)	硅质岩、厚层白云岩夹砂岩	2 000～6 000	中—高阻
陡山沱组(Pt_3^3d)	白云岩、碳质页岩夹泥质粉砂岩	2 800～6 500	中—高阻
南沱组(Pt_3^2bn)	凝灰质砂岩、砾岩	6 000～14 000	高阻

性为凝灰质砂岩、砾岩。

3)北大巴山地区寒武系鲁家坪组与毛坝关组、箭竹坝组地层电性特征接近, 扬子地区牛蹄塘组与石牌组电性特征接近, 均为低阻层, 作为整体与围岩存在明显的电阻率差异, 为广域电磁法探测提供了良好的地球物理基础。

2　广域电磁法原理与数值模拟

2.1　广域电磁法原理

广域电磁法是相对于传统的可控源音频大地电磁法(CSAMT)和 MELOS 方法提出来的, 通过人工接地场源建立谐变电磁场, 向地下发送不同频率的交变电流, 在广大的、不局限于传统“远区”的区域内, 观测一个或多个电磁场分量, 计算广域视电阻率, 达到探测不同埋深地质目标体的一种频率域电磁测深方法。根据场源不同的激发方式, 可分为水平电流源和垂直磁场源[14-15]。本次广域电磁探测采用水平电流源激发方式, 水平电流源电场 E_x 分量和广域视电阻率 ρ_a 表达式分别为:

$$E_x=\frac{I\mathrm{d}L}{2\pi\sigma r^3}\left[1-3\sin^2\phi+\mathrm{e}^{-kr}(1+\mathrm{i}kr)\right], \qquad (1)$$

$$\rho_a=K_{E-E_x}\frac{\Delta V_{MN}}{I}\frac{1}{F_{E-E_x}(\mathrm{i}kr)}, \qquad (2)$$

式中: I 为供电电流; dL 为电偶极源的长度; i 表示纯虚数; k 为均匀半空间的波数; r 为收发距; σ 为电导率; ϕ 为电偶极源方向和源的中点到接收点矢径之间的夹角; K_{E-E_x} 为装置系数; ΔV_{MN} 为观测到的电势差; MN 为测量电极距离; F_{E-E_x} 为电磁响应函数。

2.2　数值模拟

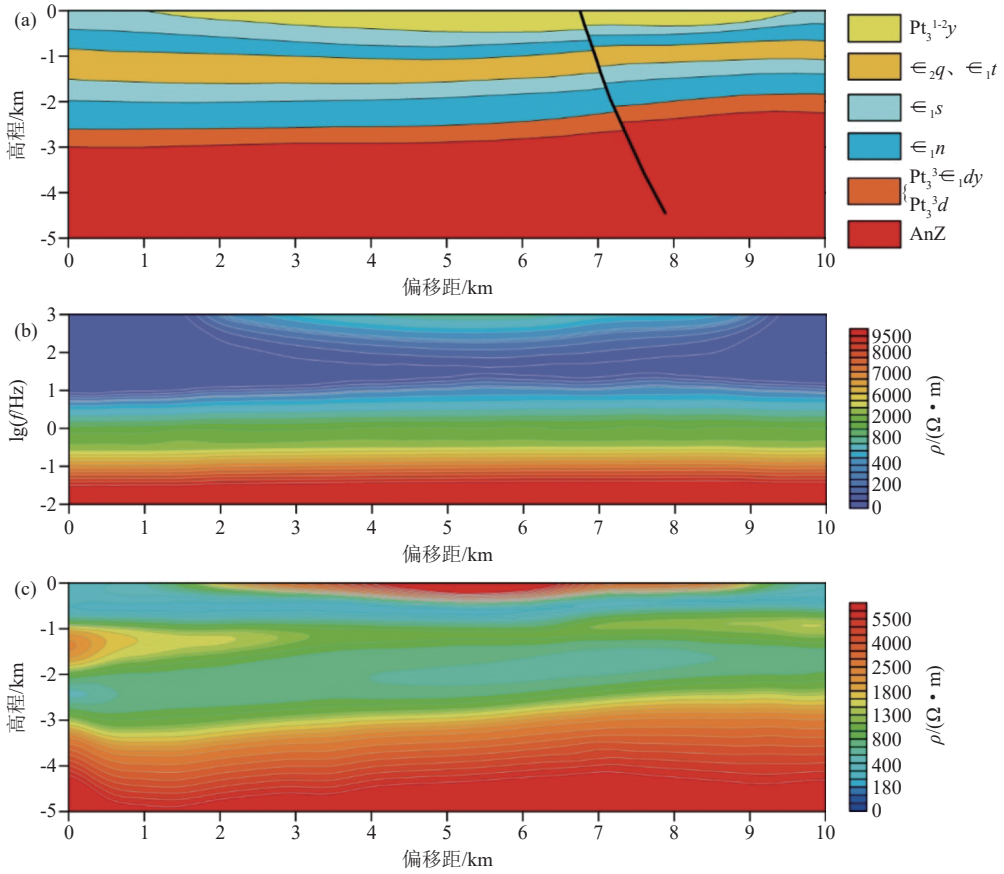
根据地质背景和物性参数, 分别以牛蹄塘组、鲁家坪组为目标层建立二维地电模型, 进行正反演模拟分析。

模型 1 为包含 1 个断裂的向斜模型, 共 8 套电性层。第一电性层为青白口系耀岭河组, 电阻率为 6 000 Ω·m; 第二电性层为寒武系石牌组, 电阻率为 300 Ω·m; 第三电性层为寒武系牛蹄塘组, 电阻率为 200 Ω·m; 第四电性组为寒武系清虚洞组、天河板组, 电阻率为 8 000 Ω·m; 第五电性层为寒武系石牌组, 电阻率为 300 Ω·m; 第六电性层为寒武系牛蹄塘组, 电阻率为 200 Ω·m; 第七电性层为震旦系灯影组、陡山陀组, 电阻率为 3 000 Ω·m; 第八电性层为前震旦系构成的基底, 电阻率为 10 000 Ω·m。

模型 2 为包含 1 个断裂的背斜模型, 共 7 套电

性层。第一电性层为奥陶系权河口组、高桥组，电阻率为 1 600 Ω·m；第二电性层为寒武系黑水河组、八卦庙组，电阻率为 6 000 Ω·m；第三电性层为寒武系毛坝关组，电阻率为 600 Ω·m；第四电性组为寒武系箭竹坝组，电阻率为 800 Ω·m；第五电性层为寒武系鲁家坪组，电阻率为 400 Ω·m；第六电性层为震旦系灯影组，电阻率为 2 400 Ω·m；第七电性层为前震旦系构成的基底，电阻率为 10 000 Ω·m。

图 3、图 4 为二维地电模型的模拟结果，可以看出，二维正反演模拟剖面形态与地电模型基本一致。在图 3 反演剖面上，埋深 0~1 km、2~3 km 处存在两套低阻层，与地电模型的第二、第三电性层和第五、第六电性层吻合，由于石牌组和牛蹄塘组地层电阻率接近，模拟区分困难。在图 4 反演剖面上，埋深 0~2 km 处存在一套低阻层，与地电模型第三、第四、第五电性层吻合，鲁家坪组与毛坝关组、箭竹坝组地层电阻率接近，模拟区分困难。二维地电模拟与物性参数值统计结果一致，牛蹄塘组与石牌组、鲁家坪组与毛坝关组、箭竹坝组地层电性特征接近，可以作为整体进行识别。



a—二维模型；b—正演结果；c—反演结果

a—two-dimensional model; b—forward results; c—inversion results

图 3　牛蹄塘组二维地电模型模拟结果

Fig. 3　The simulation results of two-dimensional geoelectric model of Niutitang Formation

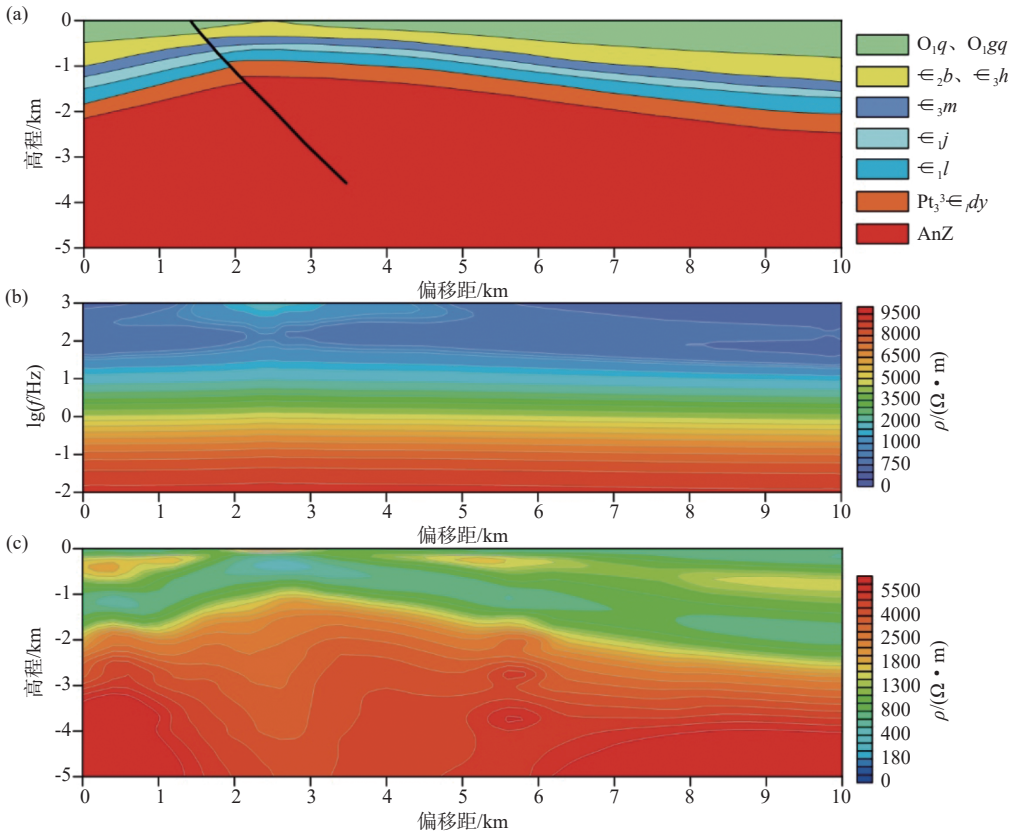
3　数据采集与处理

3.1　数据采集

研究区位于安康市镇坪县，共布设广域电磁测线 6 条（图 5），测点 731 个，点距 100~200 m，测线总长 14 km。采用广域电磁 E-E_x 观测方式，以一对接地电极形成的电流源作为场源，测量电场的水平分量中与供电电极方向平行的 E_x 分量。根据目标层探测深度，开展收发距试验、电极距试验，确定 E_x 分量观测频率范围 8 192~3/256 Hz，频点 54 个，收发距 10~20 km，测量电极距 MN=100 m。

3.2　数据处理

对广域电磁法资料进行飞点剔除、静态校正[16]、相关滤波处理，开展视电阻率曲线类型、视电阻率拟断面分析，对研究区的地质构造单元进行划分与归类，定性地了解测线上的电性分布、基底的起伏、断层的分布、电性层的划分等断面特征。



a—二维模型; b—正演结果; c—反演结果

a—two-dimensional model; b—forward results;c—inversion results

图 4　鲁家坪组二维地电模型模拟结果

Fig. 4　The simulation results of two-dimensional geoelectric model of Lujiaping Formation

3.3　综合信息建模与反演成像

由于电磁场固有的等效性、观测数据的离散和有限以及观测场包含的误差和其他场源的影响, 导致了广域电磁法反演结果不惟一。为减少反演成像的多解性, 准确识别目标层引起的异常, 在资料处理时采用了综合信息建模与反演成像技术[17-20], 反演方法为二维连续介质反演和二维层状介质反演。二维连续介质反演是在不受任何先验信息的约束下, 将剖面进行薄层单元分块划分, 而后进行电性拟合, 求得各单元的电阻率, 在断面上呈现出电性分布的等值线图, 以此进行地质认识与解释。二维层状介质反演是在对连续介质反演结果的地质认识基础上, 将“马赛克”式连续分布区块化, 建立地质、地电的初始模型, 进行二维反演, 用以修改初始的地质认识和校验地质解释成果。

综合信息建模与反演成像具体步骤为:

1)在不受任何先验信息的约束下进行二维连续介质反演, 通过电性拟合求取地层电阻率值;

2)将二维连续介质反演得到的电阻率模型转变成相应的速度模型, 通过偏移成像得到地下电性结构的图像, 获得研究区地层电性展布特征;

3)以偏移成像结果为基础, 对研究区电性层、构造进行标定与确认, 明确其地质意义, 结合区内实测地质剖面、区域地质资料、物性资料及测井资料构建一个与各种已知信息一致的电性—地质模型(图 6);

4)以此模型作为二维层状介质反演的初始模型, 进行二维反演。根据正演曲线与原始曲线拟合情况, 判断模型建立是否合理, 如不合理则对模型进行修正, 直到正演曲线与原始曲线完全拟合;

5)以二维层状介质反演结果为基础, 进行地质解释, 定量落实地层电性结构、断裂构造与目标层分布特征。

图 7 为综合信息建模前后反演效果对比。综合信息建模前, 反演剖面浅层与地面地质吻合相对较差, 深层结构反映不够清晰, 横向变化大; 综合信息建模后, 反演剖面浅层与地面地质吻合较好, 纵向上中深层电性分层明显, 横向上地层电性变化清楚。

4　资料解释

4.1　地层电性结构

广域电磁二维反演结果表明, 研究区地层南北

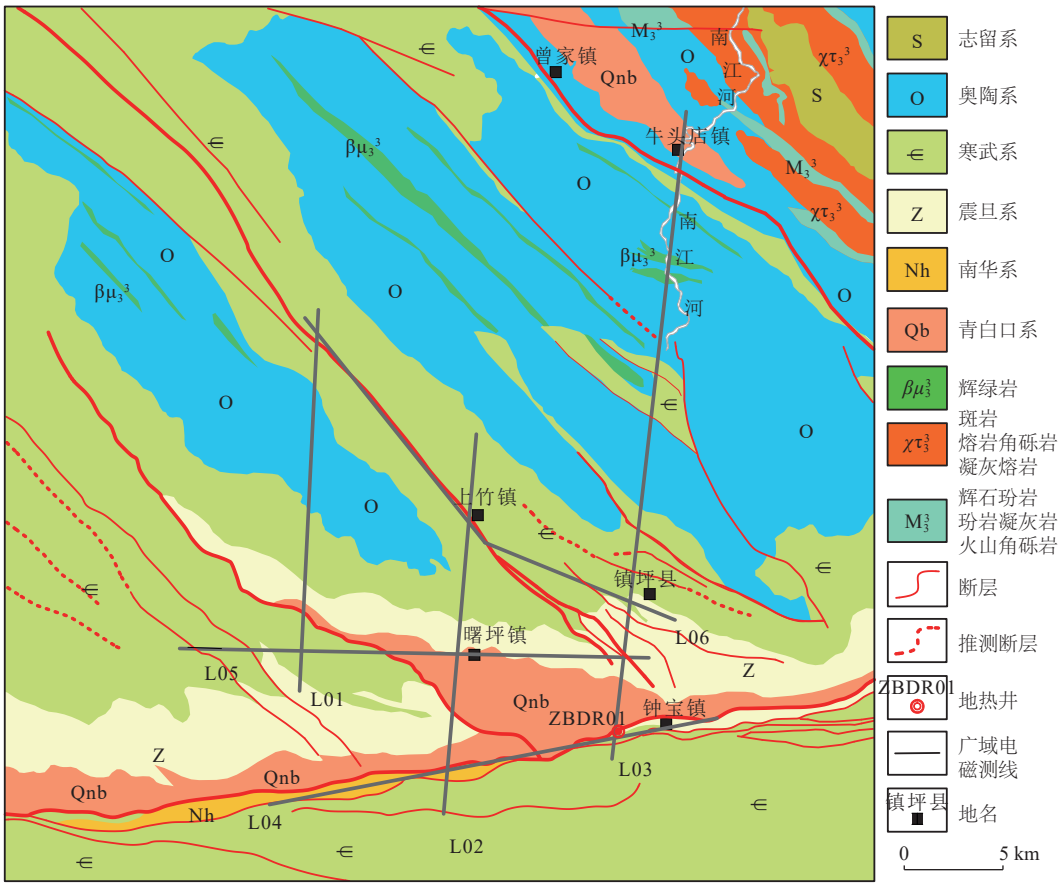
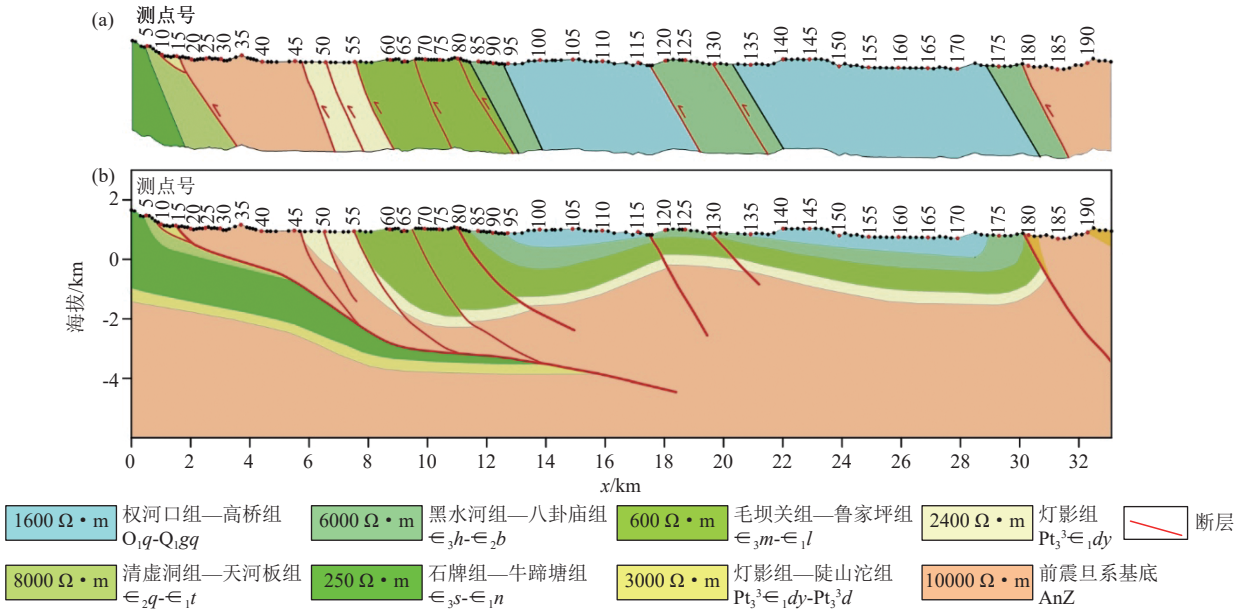


图 5　研究区地质简图及广域电磁测线位置

Fig. 5　Geological map of the study area and the location of wide-area electromagnetic survey line



a—实测地质露头剖面；b—地层电阻率初始模型

a—measured geological outcrop profile; b—the initial model of formation resistivity

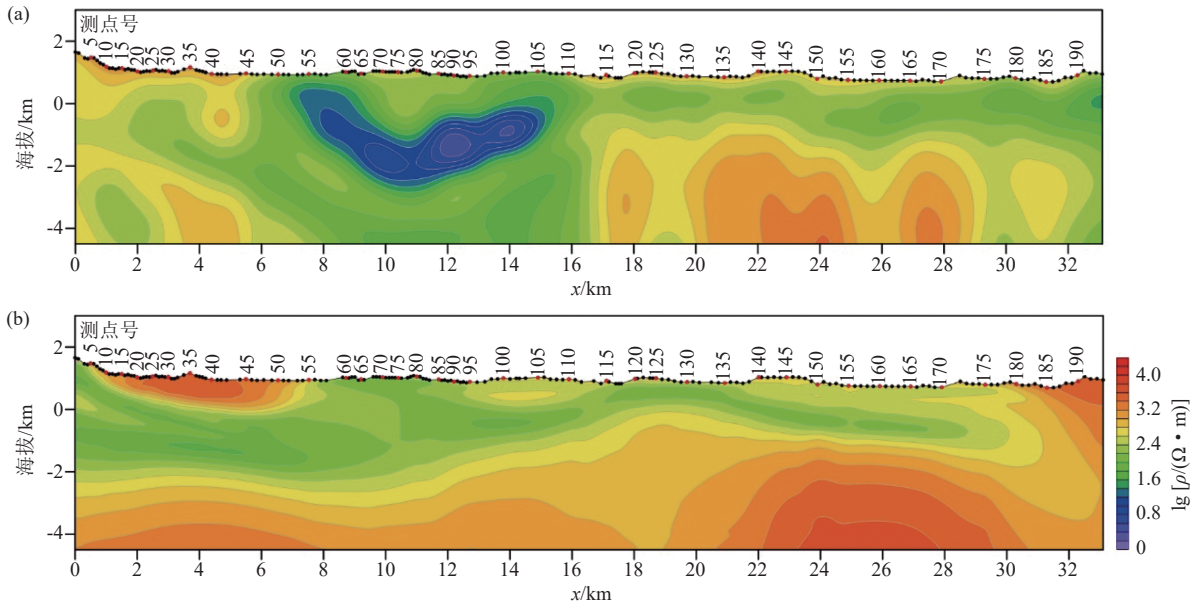
图 6　综合信息建模

Fig. 6　Comprehensive information modeling

电性分段明显，纵向电性分层清晰。以 L02、L03 线为例分析研究区地层电性的结构特征。

4.1.1　L02 线剖面电性特征

L02 线二维反演剖面见图 8，剖面上 1~17 号测



a—模型建立前; b—模型建立后

a—before model establishment; b—after the model is established

图 7　综合信息建模前后反演效果对比

Fig. 7　Comparison of inversion effects before and after comprehensive information modeling

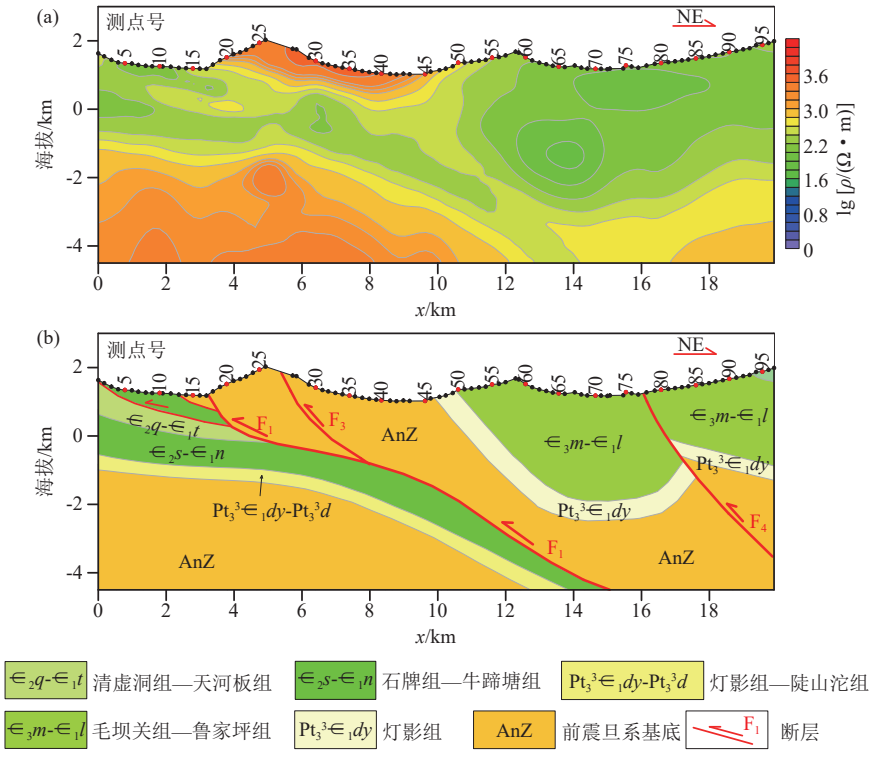


图 8　L02 线电阻率反演剖面(a)与地质解释剖面(b)

Fig. 8　Resistivity inversion profile (a) and geological interpretation profile (b) of line L02

点位于扬子地区, 地层电阻率变化趋势整体呈现向北东倾斜并往深部延伸的特征, 上部被北大巴山推覆构造压盖, 由浅至深呈现高—低—中高—低—中高—高的变化特征。浅部高阻层推测为基底青白口系耀岭河组, 中浅部低阻层推测为寒武系石牌组—牛蹄塘组, 厚度 0~500 m, 中部中高阻层推测为寒武系清水洞组—天河板组, 厚度 0~600 m, 其下低阻层为寒武系石牌组—牛蹄塘组, 厚度 0~1 000 m, 深部中高阻层推测为震旦系灯影组、陡山陀组, 厚度 0~350 m, 基底高阻推测为前震旦系。

17~97 号测点位于北大巴山地区, 地层电阻率整体呈现由北往南推覆的特征, 其中 17~70 号测点覆

盖在扬子地层上。17~26 号测点整体呈现高阻特征，推测为前震旦系地层；26~97 号测点呈现低—中高—高变化特征，低阻层推测为寒武系鲁家坪组—毛坝关组，中高阻推测为震旦系灯影组，高阻推测为前震旦系地层，鲁家坪组—毛坝关组地层连续性好，规模较大，厚度 0~3 000 m。

4.1.2　L03 线剖面电性特征

L03 线二维反演剖面见图 9，剖面上 1~15 号测点位于扬子地区，地层电阻率整体变化特征为向北东倾斜并往深部延伸，但延伸深度相对较浅，浅部中高阻层推测为震旦系灯影组、陡山陀组；中深部电阻率呈现中高—低—中高—低变化特征，中高阻推测为寒武系清水洞组—天河板组，低阻推测为石牌组—牛蹄塘组，受钟宝断裂影响，清水洞组与天河板组、石牌组与牛蹄塘组地层重复出现，石牌组—牛蹄塘组累计厚度为 0~1 700 m；深部中高阻特征推测为震旦系灯影组、陡山陀组，基底高阻推测为前震旦系地层。

15~194 号测点位于北大巴山地区，地层电阻率横向变化且连续，其中 15~120 号测点地层往南推，覆盖在扬子地层上。15~179 号测点地层可划分为 5 套电性层，由上至下呈现出中高—中—低—中高—高变化特征。浅部中高阻层推测为奥陶系高桥组、权河口组；中浅部中阻层推测为寒武系黑水河组、八卦庙组；中部低阻层推测为毛坝关组、箭竹坝组与鲁家坪组；深部中高阻推测为震旦系灯影组；基底高阻推测为前震旦系。寒武系毛坝关组、箭竹坝组与鲁家坪组地层连续性较好，且埋深适中，厚度在 0~3 000 m。179~194 号测点地层整体呈现高阻特征，推测为前震旦系地层。

4.2　断裂及构造单元

断裂导致地层电性结构发生变化，形成不同的电磁响应特征，对页岩气目标层的分布起到重要作用。依据反演电阻率剖面上等值线扭曲或同一电性层在深度、厚度上的突变，结合地表地质、钻井等资料，在研究区划分断裂 12 条，均为逆断层，北大巴山以 NW 向断裂为主，扬子地区（钟宝断裂带 F_1 及以南部的南大巴山）以近 EW 向断裂为主（图 10），钟宝断裂带 F_1 即城口—房县断裂带。钟宝断裂带 F_1、曾家坝断裂 F_2、高桥断裂 F_3 及镇坪—花里断裂 F_4 为研究区构造主控断裂，将研究区划分为平利逆冲推覆带、镇坪逆冲推覆带、高桥逆冲推覆带、高滩逆冲推覆带和华坪—钟宝逆冲褶皱带 5 个次级构造单元，其中华坪—钟宝逆冲褶皱带是受钟宝断裂带 F_1 控制的大型逆冲推覆构造（图 8、图 9）。主控断裂特征分述如下：

1）钟宝断裂带 F_1 区域上位于镇巴—城口弧形构造带的东段，为南秦岭—北大巴山逆冲推覆构造带主逆冲推覆界面，走向 NEE，倾向 NNW，总体倾向约 350°，滑动面由南往北呈叠瓦式逐渐变深，上陡下缓，自地表延伸至海拔-4.5 km 及更深处，水平延伸距离最远达 18 km。

2）曾家坝断裂 F_2 为平利逆冲推覆带和镇坪逆冲

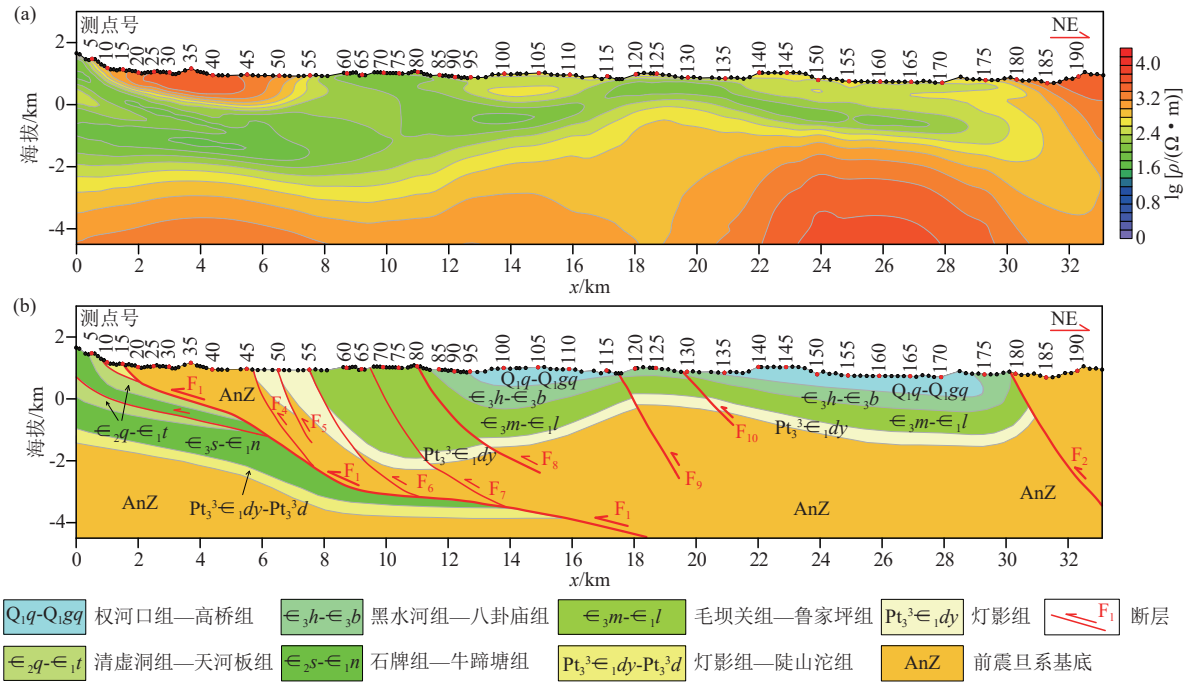


图 9　L03 线二维层状介质反演剖面（a）与地质解释剖面（b）

Fig. 9　Resistivity inversion profile (a) and geological interpretation profile (b) of line L03

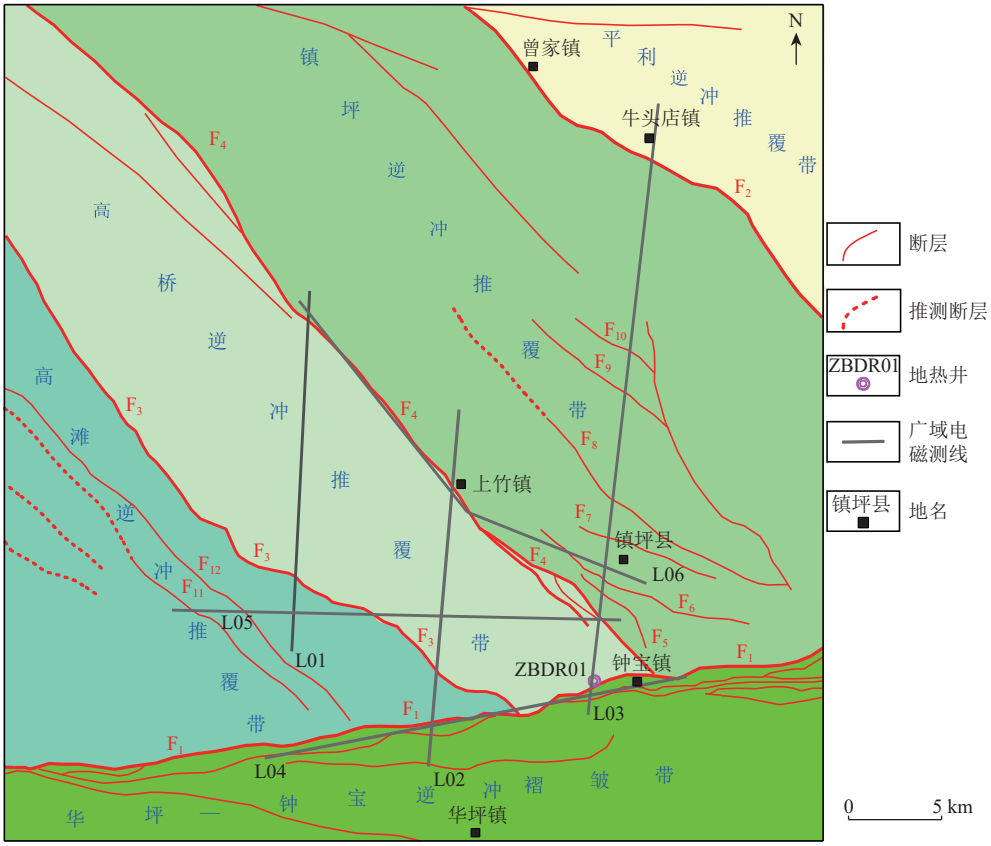


图 10　研究区断裂分布与构造单元划分

Fig. 10　The fault distribution and tectonic unit division map of the study area

推覆带的分界线, 呈 NW 走向展布, 倾向 NE, 倾角约 30°, 上陡下缓, 自地表延伸至海拔−3.5 km 处, 为逆冲推覆断裂, 在深部交汇于钟宝断裂带 F_1。

3)高桥断裂 F_3 为高桥逆冲推覆带和高滩逆冲推覆带的分界线, 呈 NW 走向展布, 倾向 NE, 上陡下缓, 自地表延伸至海拔−7.8 km 处, 为逆冲推覆断裂, 东南端交汇于钟宝断裂带 F_1。

4)镇坪—花里断裂 F_4 为镇坪逆冲推覆带和高桥逆冲推覆带的分界线, 为 NW 走向的逆推断层, 倾向 N, 倾角 46°~65°, 上陡下缓, 自地表延伸至海拔−3.5 km 处, 断裂东南端交汇于钟宝断裂带 F_1, 北西端延伸于研究区外。

4.3　目标层分布特征

扬子地区寒武系牛蹄塘组分布在研究区的南部, 走向近 EW, 除部分地表出露外, 大部分位于钟宝断裂带 F_1 下盘, 被北大巴山地层压覆。图 11 为牛蹄塘组底界面埋深, 可以看出牛蹄塘组底界面南北最宽 16.2 km, 东西最长 27.2 km, 面积约为 365 km^2, 由南往北逐渐变深, 并于 L02 线中部发育 WWE 向凸出的鼻状隆起。牛蹄塘组底界面埋深由钟宝断裂 F_1 控制, 沿着断裂走向发育两个深度中心, 一个在上竹镇附近, 埋深为 5 640 m, 另外一个位于 L01 线南部, 埋深 5 730 m。

北大巴山地区寒武系鲁家坪组主要分布在研究区的北部, 南部有少量分布, 部分地表出露。图 11 为鲁家坪组底界面埋深, 可以看出鲁家坪组底界面积约 500 km^2, 在 L01 线北部、L02 线上竹镇、L03 线镇坪县城区域埋深较大, 由镇坪—花里断裂 F_4 与断裂 F_7 控制, 其中镇坪县城北部附近最大埋深 2 600 m, 上竹镇附近最大埋深 2 840 m, L01 线北部附近最大埋深 3 850 m。

4.4　有利区分析

研究区寒武系牛蹄塘组页岩形成于深水陆棚相沉积环境, 样品有机碳含量和岩石热解测试结果表明, 有机碳 TOC 平均 4.25%, 镜质体反射率 Ro 平均 3.18%, 属于腐泥型 I 型干酪根, 处于过成熟阶段, 生烃潜力好。钟宝断裂带 F_1 下盘埋深 2 000~3 500 m 处, 受断裂影响低, 牛蹄塘组页岩受断裂影响低, 野外地质调查表明, 其厚度在 21.49~72.20 m 之间(未见顶底), 具有较好的盖层条件, 且埋藏深度适宜, 牛蹄塘组地层东西起伏变化小, 地层相对平缓, 有利于开采, 为页岩气勘探有利区(图 11)。

寒武系鲁家坪组板岩形成于浅海盆地相沉积环境, 样品有机碳含量和岩石热解测试结果表明, 有机

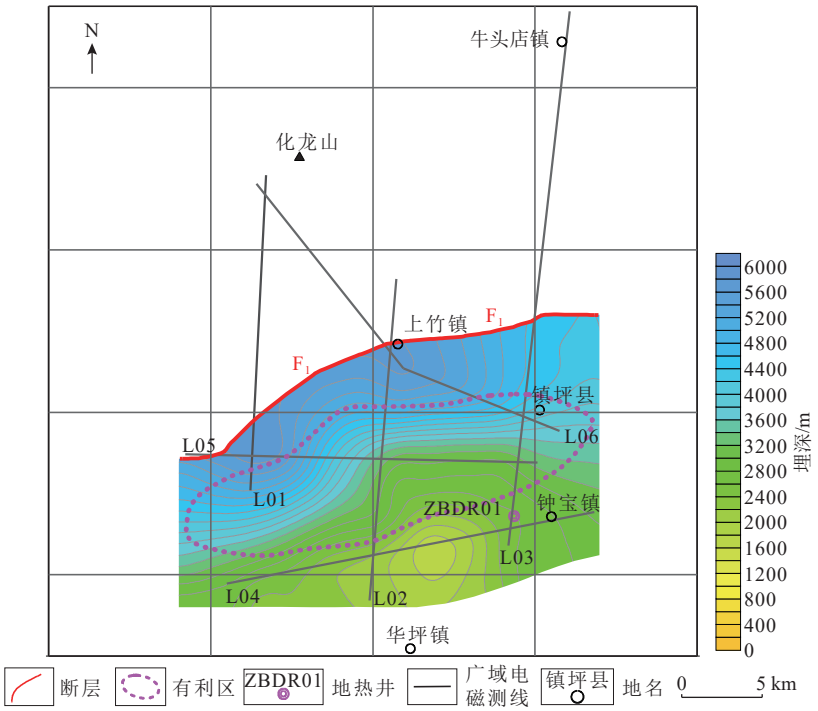


图 11　研究区牛蹄塘组底界构造

Fig. 11　Bottom boundary structure map of Niutitang Formation in the study area

碳 *TOC* 平均 3.42%, 镜质体反射率 *Ro* 平均 2.67%, 有机质成熟度较高, 具有较好的生烃潜力。鲁家坪组除局部地段出露至地表, 大部分被奥陶系高桥组、权河口组和寒武系黑水河组、八卦庙组、毛坝关组、箭竹坝组覆盖, 整体上具有较好的盖层条件。L01 线南部、上竹镇至镇坪县城之间埋深 2 000~3 500 m 处, 断裂相对较少, 鲁家坪组地层连续性好, 为页岩气勘探远景区(图 12)。

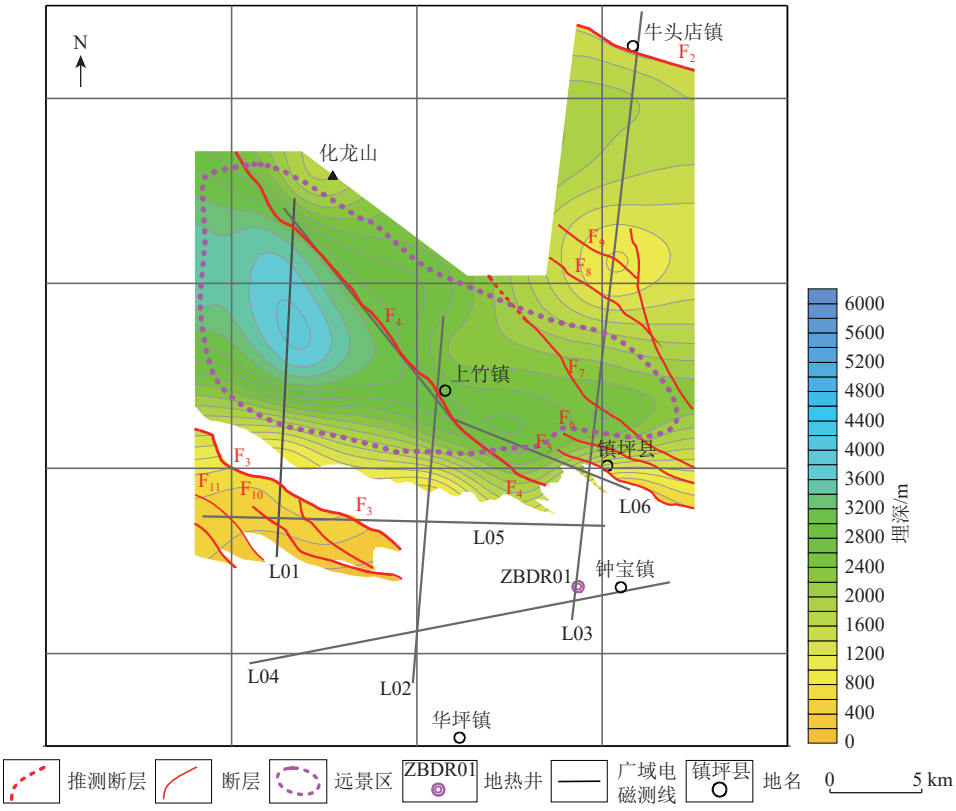


图 12　研究区鲁家坪组底界构造

Fig. 12　Bottom boundary structure map of Lujiaping Formation in the study area

5　结论

1）在陕南安康地区页岩气勘探中，利用广域电磁法有效地识别了研究区地层电性结构、断裂构造及目标层底界面，并对主控断裂、目标层展布特征进行了分析；

2）根据目标层的埋深变化、断裂影响及盖层条件，结合目标层沉积环境、样品有机碳含量和岩石热解测试结果对研究区页岩气有利区及远景区进行了预测，对研究区进一步开展页岩气勘探工作具有重要的指导意义；

3）基于广域电磁法建立的地质—地球物理模型，结合页岩有机地球化学特征进行有利区分析，提高了页岩气勘查空白区寻找靶区的可靠性，给安康地区及国内其他类似页岩气的地球物理勘探提供参考和借鉴。

参考文献（References）：

[1] 郭旭升，赵永强，申宝剑，等. 中国南方海相页岩气勘探理论：回顾与展望 [J]. 地质学报，2022，96（1）：172−182.
Guo X S, Zhao Y Q, Shen B J, et al. Marine shale gas exploration theory in southern China: review and prospects[J]. Acta Geologica Sinica, 2022, 96(1): 172−182.

[2] 聂海宽，党伟，张珂，等. 中国页岩气研究与发展 20 年：回顾与展望 [J]. 天然气工业，2024，44（3）：20−52.
Nie H K, Dang W, Zhang K, et al. Two decades of shale gas research & development in China: Review and prospects[J]. Natural Gas Industry, 2024, 44(3): 20−52.

[3] 邹才能，董大忠，熊伟，等. 中国页岩气新区带，新层系和新类型勘探进展，挑战及对策 [J]. 石油与天然气地质，2024，45（2）：309−326.
Zou C N, Dong D Z, Xiong W, et al. Advances, challenges, and countermeasures in shale gas exploration of underexplored plays, sequences and new types in China[J]. Oil & Gas Geology, 2024, 45(2): 309−326.

[4] 马新华，张晓伟，熊伟，等. 中国页岩气发展前景及挑战 [J]. 石油科学通报，2023，8（4）：491−501.
Ma X H, Zhang X W, Xiong W, et al. Prospects and challenges of shale gas development in China[J]. Petroleum Science Bulletin, 2023, 8(4): 491−501.

[5] 杨南坤，张煦，白文军，等. 陕西镇坪县钟宝镇以南一带牛蹄塘组页岩气资源潜力分析 [J]. 陕西地质，2022，40（1）：23−28.
Yang N K, Zhang X, Bai W J, et al. Potential resources of shale gas in the Niutitang Formation at Zhongbao Town of southern Zhenping County, Shaanxi Province[J]. Geology of Shaanxi, 2022, 40(1): 23−28.

[6] 王立波，张家政，杨南坤，等. 陕西镇坪县钟宝断裂周缘下寒武统牛蹄塘组页岩气成藏条件浅析 [J]. 陕西地质，2024，42（1）：27−35.
Wang L B, Zhang J Z, Yang N K, et al. Analysis of the shale gas formation conditions in the Lower Cambrian Niushutang Formation at the periphery of the Zhongbao Fracture in Zhenping County, Shaanxi, China[J]. Geology of Shaanxi, 2024, 42(1): 27−35.

[7] 赵雪娇，吴彦君，杨甫，等. 陕西省东南部下寒武统页岩气资源潜力分析 [J]. 中国煤炭地质，2017，29（2）：21−34,64.
Zhao X J, Wu Y J, Yang F, et al. Lower Cambrian Shale Gas Resources Potential Analysis in Southeastern Shaanxi Province[J]. Coal Geology of China, 2017, 29(2): 21−34,64.

[8] 陈相霖，郭天旭，石砥石，等. 陕南地区牛蹄塘组页岩孔隙结构特征及吸附能力 [J]. 岩性油气藏，2019，31（5）：52−60.
Chen X L, Guo T X, Shi D S, et al. Pore structure characteristics and adsorption capacity of Niutitang Formation shale in southern Shaanxi[J]. Lithologic Reservoirs, 2019, 31(5): 52−60.

[9] 张煦，杨南坤，白文军，等. 安康地区鲁家坪组页岩气成藏地质条件浅析 [J]. 陕西地质，2022，40（2）：17−21.
Zhang X, Yang N K, Bai W J, et al. Geology of shale gas reservoir in Lujiaping Formation, Ankang area[J]. Geology Of Shaanxi, 2022, 40(2): 17−21.

[10] 喻忠鸿，严玲琴，才智杰，等. 广域电磁法在青海省东昆仑页岩气调查评价中的应用 [J]. 中南大学学报（英文版），2020，27（1）：3388−3397.
Yu Z H, Yan L Q, Cai Z J, et al. Application of wide-field electromagnetic method in shale gas survey in Eastern Kunlun, Qinghai province, China[J]. Journal of Central South University, 2020, 27(1): 3388−3397.

[11] 杨学立，李博，彭传圣，等. 广域电磁法在我国南方海相页岩气勘探中的应用 [J]. 应用地球物理（英文版），2017，14（3）：441−448.
Yang X L, Li B, Peng C S, et al. Application of a wide-fi eld electromagnetic method to shale gas exploration in South China[J]. Applied Geophysics, 2017, 14(3): 441−448.

[12] 李帝铨，汪振兴，胡艳芳，等. 广域电磁法在武陵山区页岩气勘探中的探索应用——以黔北桐梓地区为例 [J]. 物探与化探，2020，44（5）：991−998.
Li D Q, Wang Z X, Hu Y F, et al. he application of wide field electromagnetic method to shale gas exploration in Wuling Mountain area: A case study of Tongzi area in northern Guizhou[J]. Geophysical and Geochemical Exploration, 2020, 44(5): 991−998.

[13] 何继善，李帝铨，戴世坤. 广域电磁法在湘西北页岩气探测中的应用 [J]. 石油地球物理勘探，2014，49（5）：1006−1012.
He J S, Li D Q, Dai S K. Shale gas detection with wide field electromagnetic method in North-western Hunan[J]. Oil Geophysical Prospecting, 2014, 49(5): 1006−1012.

[14] 何继善. 广域电磁测深法研究 [J]. 中南大学学报：自然科学版，2010，41（3）：1065-1072.
He J S. Wide field electromagnetic sounding methods[J], Journal of Central South University: Science and Technology, 2010, 41(3): 1065-1072.

[15] 何继善. 广域电磁法和伪随机信号电法 [M]，北京：高等教育出版社，2010.
He J S. Wide field electromagnetic method and pseudorandom signal electrical method[M]. Beijing: Higher Education Press, 2010.

[16] 朱裕振. 广域电磁法静态效应校正方法研究与应用 [D].长沙: 中南大学, 2011.
Zhu Y Z. Research and application of static effect correction method for wide-area electromagnetic method[D].Changsha: Central South University, 2011.

[17] 王亚民. 电法资料综合信息建模与反演成像的应用 [J].大庆石油地质与开发, 2005, 24(3): 101-102.
Wang Y M. Application of electric data comprehensive info rm ation m odeling and inversion imaging[J]. Petroleum Geology & Oilfield Development in Daqing, 2005, 24(3): 101-102.

[18] 郭冬, 丁文祥, 兰学毅. 基于重磁电震综合解释的三维地质建模——以南陵—宣城矿集区为例 [J]. 中国地质调查, 2024, 11(5): 139-152.
Guo D, Ding W X, Lan X Y. 3D geological modeling based on comprehensive interpretation of gravity, magnetism, electricity and seismicity: A case study of Nanling-Xuancheng ore district[J]. Geological Survey of China, 2024, 11(5): 139-152.

[19] 王延忠, 沈金松, 周正武, 等. 井震约束的广域电磁数据反演及其在保靖页岩气储层评价中的应用 [J]. 工程地球物理学报, 2016, 13(3): 253−262.
Wang Y Z, Shen J S, Zhou Z W, et al. The Inversion of the Wide Field Electrom agnetic Measurements with Well Logging and Seismic Constraints and Its Application to Evaluation of Shale Gas Reservoir in Baojing Area[J]. Chinese Journal of Engineering Geophysics, 2016, 13(3): 253−262.

[20] 戴世坤, 徐世浙. Mt 二维和三维连续介质快速反演 [J]. 石油地球物理勘探, 1997, 32(3): 305−317.
Dai S K, Xu S Z. Rapid inversion of magnetotelluric data for 2D and 3D continuous media[J]. Oil Geophysical Prospecting, 1997, 32(3): 305−317.

WFEM-based exploration and favorable-zone analysis of shale gas in the Ankang area, southern Shaanxi Province

SUN Jian[1, 4], LUO Wei-Feng[2, 3], ZHANG Jia-Zheng[2, 3], ZHOU Zhi[2, 3], ZHOU Hui[2, 3], KANG Hai-Xia[2, 3], WANG Li-Bo[1], YANG Nan-Kun[1], LUO Lin-Tao[2, 3]

(1. *Shaanxi Geological First Geological Team Co., Ltd., Ankang* 725000, *China*; 2. *Oil and Gas Survey, China Geological Survey, Beijing* 100083, *China*; 3. *Unconventional Oil & Gas Engineering Technology Center, China Geological Survey, Beijing* 100083, *China*; 4. *China University of Geosciences*(*Wuhan*), *Wuhan* 430074, *China*)

Abstract: The Ankang area in southern Shaanxi Province holds favorable geological conditions for shale gas accumulation and shale gas resource potential. However, multistage tectonic processes have somewhat destroyed shale reservoirs. Pinpointing local favorable zones for shale gas accumulation has become a key issue for shale gas exploration in the Ankang area. Therefore, this study investigated the lower Cambrian Niutitang and Lujiaping formations in the Ankang area using the wide-field electromagnetic (WFEM) method. Through integrated information modeling and inversion imaging, this study determined the electrical structures of strata, fault structures, and the distributions of the bottom boundaries of the target layers in the study area. Moreover, combined with the organic geochemical characteristics of shales, this study identified the favorable and prospect zones for shale gas exploration. The results of this study provide significant guidance for further shale gas exploration in the Ankang area and a reference for other similar geophysical exploration of shale gas in China.

Key words: shale gas; wide-field electromagnetic (WFEM) method; Niutitang Formation; Lujiaping Formation; Ankang

(本文编辑: 王萌)