

航空重磁构造分层与新层系研究

——以松辽盆地嫩江—林甸地区为例

刘燕戎¹⁾, 赖燕玲^{2)*}, 曹安琪¹⁾, 高 珊¹⁾, 王 宁¹⁾,
孟维棣³⁾, 杨冬红⁴⁾, 王立杰⁵⁾

1) 中国自然资源航空物探遥感中心, 北京 100083;

2) 河北省地质环境监测院, 河北石家庄 050021; 3) 吉林建筑大学, 吉林长春 130118;

4) 吉林大学东北亚国际地质研究与教学中心, 吉林长春 130026;

5) 吉林油田公司油气工程研究院, 吉林松原 138000

摘 要: 本文聚焦盆地结构和新层系研究, 基于最新采集的航空重磁综合测量数据和岩石样本物性数据, 结合重点地区井震资料, 对异常数据进行多尺度构造分层, 构建了松辽盆地中北部浅—中—深三维空间结构格架; 通过定性与定量研究, 系统分析了研究区上白垩统底面、中生界底面、磁性基底顶面等深度以及上白垩统、上侏罗统—下白垩统、上古生界等厚度, 为研究区域上古生界、上侏罗统—下白垩统等含油气新层系、探讨盆地结构特征对油气的控制作用提供地球物理证据。研究结果表明, 研究区不同地段的上古生界残留厚度差异性显著, 厚度变化范围在 0~9300 m 之间, 西部和北东部残留厚度较大, 北部和东部局部缺失; 上侏罗统—下白垩统厚度和埋藏深度在研究区北、南部明显不同, 总体呈现南部较厚而且埋藏较深北部较薄而且局部缺失的特征。

关键词: 航空重磁; 构造分层; 新层系; 嫩江—林甸; 松辽盆地

中图分类号: P631.125; P631.222 文献标志码: A doi: 10.3975/cagsb.2022.062101

Airborne Gravity and Magnetic Tectonolayering and New Strata: Exemplified by Nenjiang–Lindian Area of Songliao Basin

LIU Yan-xu¹⁾, LAI Yan-ling^{2)*}, CAO An-qi¹⁾, GAO Shan¹⁾, WANG Ning¹⁾,
MENG Wei-di³⁾, YANG Dong-hong⁴⁾, WANG Li-jie⁵⁾

1) China Aero Geophysical Survey and Remote Sensing Center for Nature Resources, Beijing 100083;

2) Hebei Institute of Geological Environment Monitoring, Shijiazhuang, Hebei 050021;

3) Jilin Jianzhu University, Changchun, Jilin 130118;

4) International Centre of Geoscience Research and Education in Northeast Asia, Jilin University, Changchun, Jilin 130026;

5) Oil and Gas Engineering Research Institute of Jilin Oilfield Company, Songyuan, Jilin 138000

Abstract: In this study, the structural characteristics and the new hydrocarbon strata series of Songliao basin were investigated using structural stratification based on the latest airborne gravity and magnetic data, density and magnetic measurements, and drilling and seismic data, and a three-dimensional framework was constructed in the shallow, middle, and deep strata of the basin. This study provides a systematic analysis of the depths of the bottoms of the Upper Cretaceous and the Mesozoic, the depth of the magnetic basement top, and the thicknesses of the Upper Cretaceous, Upper Jurassic–Lower Cretaceous, and Upper Paleozoic using a combination of qualitative analysis and quantitative calculation, which provide important geophysical evidences of the new petroliferous strata survey of the regional Upper Paleozoic and Upper Jurassic–Lower Cretaceous, including its influence on the different structural characteristics of oil and gas. The results show that the Upper Paleozoic strata with a thickness of 0–9300 m is mainly distributed in the western and northeastern parts of the study area, and

本文由中国地质调查局地质调查项目“松辽盆地及外围航空物探调查”(编号: DD20190028)资助。

收稿日期: 2022-04-12; 改回日期: 2022-06-14; 网络首发日期: 2022-06-23。责任编辑: 张改侠。

第一作者简介: 刘燕戎, 女, 1982 年生。博士, 教授级高工。主要从事地球物理综合研究。E-mail: 7773531@qq.com。

*通讯作者: 赖燕玲, 女, 1969 年生。本科, 高级工程师。长期从事综合地质-地球物理综合研究。E-mail: 340191600@qq.com。

was absent in the localities of the western parts. The Upper Paleozoic strata has significant differences in different sections in the study area. The thickness and depth of Upper Jurassic–Lower Cretaceous varies considerably from the north to the south, being thicker and deeper in the north and thinner and shallower in the south.

Key words: airborne gravity and magnetic; tectonolayering; new strata; Nenjiang–Lindian; Songliao basin

松辽盆地是我国最大的陆相含油气盆地, 经过 60 余年的勘探开发, 盆地浅部上白垩统常规层系石油开采量日益减少, 后备资源不足, 使大庆油田的可持续发展面临严峻形势(蔡尧忠等, 2002; 张玉明等, 2006; 杜乐天 and 欧光习等, 2007; 孟令顺 and 杜晓娟, 2009; 夏丹, 2017; 康晓倩等, 2019)。受限于深钻稀少和地震反射深部不清等研究现状与技术瓶颈, 松辽盆地接替新区新层系尚未取得大规模进展。近年来, 为了加快勘探步伐, 国家公益性地质调查单位在松辽盆地启动了以非震手段为主的基础地质与资源预测研究(李君等, 2008; 李文勇等, 2010; 牛花朋等, 2018; 邹长春等, 2018), 同时高精度航空地球物理研究也被列入该盆地区域基础地质调查重点工作之一。如何聚焦松辽盆地深部结构对油气赋存的制约作用, 利用有效的地球物理手段寻找深部油气资源, 对解决目前松辽盆地油气勘探开发面临的问题具有重要的科学意义。

航空重力测量是一项高科技航空物探方法, 我国地质调查系统于 2006 年引进了国际先进的 GT-1A 型航空重力仪测量系统, 经过消化吸收和自主研发, 已形成初步的技术体系, 先后在海域、陆域的多个构造单元进行了调查与研究, 取得了明显的地质效果, 展示了广阔的应用前景(李文勇等, 2010; Li et al., 2012, 2014; 刘燕戎 and 李文勇, 2015; 刘燕戎等, 2018, 2021)。尽管单一参数的航空地球物理方法对基础地质研究工作给予了有力支撑, 但在解决某些地质问题方面仍存在一定的局限性和多解性。为此, 经过一系列试验和技术攻关, 我国于 2016 年开启了航空重、磁综合研究工作。通过在同一飞机平台集成航空磁力仪与航空重力仪实现多参数综合采集, 获得了宝贵的航空重、磁综合测量数据, 在剖析深部地质构造、厘定大型岩浆岩带、查明磁性基岩岩性、计算磁性基底深度等方面拓展了航空地球物理应用领域。

本文依托最新采集的高精度航空重磁调综合测量数据, 旨在剖析盆地不同界面尤其是含油气新层系的结构特征, 以期对松辽盆地深部油气勘探提供最新的地球物理依据。

1 区域地质背景

松辽盆地处于中亚造山带东段, 是我国大型陆相中—新生代盆地, 覆盖面积约 26 万 km²。盆地地表被新生界广泛覆盖, 前新生代基岩全部隐伏(图

1), 地层自下而上主要包括前寒武系、下古生界、上古生界、侏罗系、白垩系与新生界等。该盆地经历了热隆张裂、断陷、拗陷和萎缩四个阶段, 具有断陷层—拗陷层双层结构, 最大沉积层厚度可达 10 000 m。

盆地一级构造单元包括西部斜坡区、北部倾没区、中央拗陷区、东北隆起区、东南隆起区、西南隆起区和开鲁拗陷区。研究区主要涉及北部倾没区大部分地区、中央拗陷区北缘与西部斜坡区北缘三个二级构造单元。受板块及地块之间的相互作用, 研究区及其邻区发育一系列 NNE 向为主的深大断裂, 控制着区域沉积作用、岩浆活动和变质作用等。

松辽盆地及外围岩浆活动十分频繁, 由老到新可划分为前震旦纪、加里东期、海西期、燕山期和喜山期五大旋回, 其中, 海西期和燕山期的岩浆活动尤为强烈。

2 数据与方法

2.1 数据

2.1.1 航空重磁数据

本文采用中国自然资源航空物探遥感中心 2021 年在松辽盆地嫩江—林甸地区采集的航空重磁综合测量数据, 测线方向为 115°—295°, 切割线方向为 25°—205°, 平均离地飞行高度为 182 m。

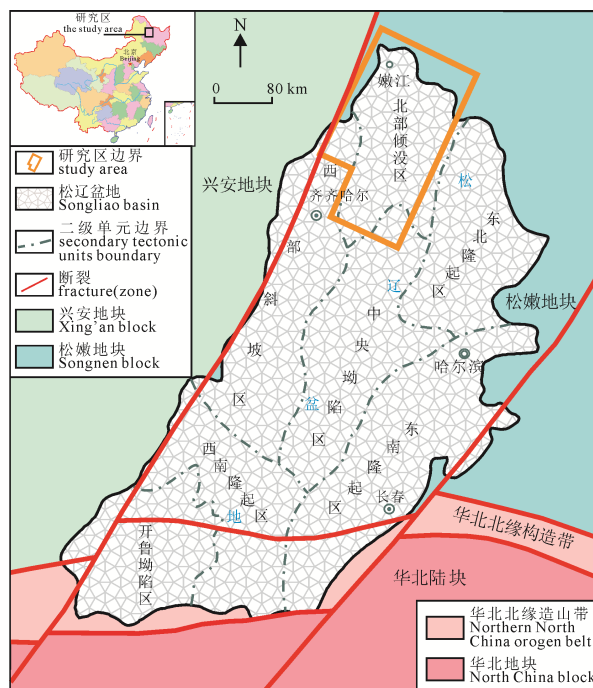


图 1 研究区位置图

Fig. 1 Location map of the study area

2.1.2 物性及其它数据

松辽盆地被第四系广泛覆盖, 前新生代基岩隐伏, 盆地周边属于低丘陵或山区, 前新生代基岩不同程度出露, 因此, 研究区物性数据主要通过周边露头区野外实际测量和盆地内以往钻井数据收集。2016—2020 年, 累计实测地层(岩石)露头物性点 687 个, 包括密度数据 2671 个, 磁化率数据 20 745 个。其它数据包括钻井 132 口; 地震剖面 59 条(累计长度 1641 km); 电磁法剖面 13 条。

2.2 界面深度及厚度计算方法

本次利用多种地球物理方法组合对研究区不同界面深度进行计算。主要包括:

①根据已知钻井数据及地震资料确定新生界底面深度。

②计算上白垩统底面深度。首先, 利用新生界底面深度进行正演, 计算新生界引起的重力异常(新生界密度采用 2.05 g/cm^3); 然后, 剥离新生界引起的重力异常, 得到前新生界引起的布格重力异常; 基于布格重力垂向一阶导数网格化数据, 建立如下欧拉方程(Thompson, 1982; Reid et al., 1990; Keating, 1998; Hansen and Suci, 2002; Stavrev and Reid, 2010):

$$(x-x_0)\frac{\partial \Delta T}{\partial x} + (y-y_0)\frac{\partial \Delta T}{\partial y} - (z-z_0)\frac{\partial \Delta T}{\partial z} = -N\Delta T(x, y, z) \quad (1)$$

式中, ΔT 为总磁场强度, N 为构造指数, (x, y, z) 为不同坐标点, ∂x 、 ∂y 、 ∂z 为不同方向梯度值, x_0 、 y_0 和 z_0 为深度值的空间位置。

利用不同坐标点 (x, y, z) 场值及其三个方向的梯度值, 解得未知变量 x_0 、 y_0 和 z_0 , 从而确定构造行迹及位置, 计算上白垩统底界面深度值; 最后, 以已知钻井、地震资料深度数据为约束, 局部修正计算数据。

③计算上侏罗统一下白垩统底面深度。首先, 利用上白垩统底面深度正演上白垩统引起的重力异常(上白垩统密度采用 2.25 g/cm^3); 然后, 利用小波分解方法(Daubechies, 1992), 设 t 为时间变量, 函数系 $\psi_{(a,b)}(t)$ 称为小波函数或简称为小波, 它是由函数 $\psi(t)$ 经过不同的时间伸缩尺度和不同的时间平移得到的。把连续小波变换中尺度参数 a 和平移参数 b 的离散化公式分别记为: $a = a_0^j$, $b = ka_0^j b_0$, 其中, a_0 、 b_0 是扩展步长, 令 $a_0=2$, $b_0=1$ 后, 每个网格点对应尺度值为 2^j , 平移值为 $2^j k$ 。 j 、 k 是初始化参数, 且 j 、 $k \in \mathbb{Z}$ (整数集), 扩展步长 $a_0 \neq 0$ 是固定值, 且总是假定 $a_0 > 0$, 得到离散小波函数表达式为:

$$\psi_{j,k} = a_0^{-\frac{j}{2}} \psi\left(\frac{t - ka_0^j b_0}{a_0^j}\right) = a_0^{-\frac{j}{2}} \psi(a_0^{-j} t - kb_0) \quad (2)$$

利用小波分解逼近系数求得盆地深部(主要是莫霍面)引起的区域重力异常, 并以航空布格重力

异常为基础, 将浅层(上白垩统)和深层(主要是莫霍面)引起的重力异常进行剥离, 得到前寒武系—上侏罗统一下白垩统引起的布格重力异常, 再利用帕克法(Oldenburg, 1974; Parker, 1974; Li and Oldenburg, 1998)迭代公式(3)计算上侏罗统一下白垩统底面深度(上侏罗统一下白垩统与古生界之间的密度差采用 0.18 g/cm^3):

$$\Delta \tilde{h}(u, v) = \frac{-e^{h\omega}}{2\pi G \rho} \Delta \tilde{g}(u, v) - \sum_{n=2}^{\infty} \Delta \tilde{h}^n \frac{(-\omega)^{n-1}}{n!} \quad (3)$$

式中, $\omega = \sqrt{u^2 + v^2}$, u, v 为 x 以及 y 方向的波数, G 为万有引力常数, ρ 为剩余密度, $\Delta \tilde{g}$ 是重力异常 Δg 的波谱, h 为界面深度, $\Delta \tilde{h}$ 是界面起伏 Δh 的波谱。

将计算结果与钻井、地震资料进行对比及修正后, 得到上侏罗统一下白垩统底面深度。

④以已知地震、钻井、大地电磁测深等资料作为约束控制, 对航磁异常导数切线法计算的深度数据进行改正, 改正后的数据作为最终的磁性基底顶面深度。

3 结果与分析

3.1 物性特征

3.1.1 密度特征

从密度差异看, 地层由老到新, 密度变化总体规律为由大变小(图 2)。根据地层密度的差异, 可将地层纵向序列划分为 5 个密度层, 自下而上依次为前寒武系—古生界、上古生界、上侏罗统一下白垩统、上白垩统与新生界。5 个密度层之间存在 4 个密度界面, 其与区域性不整合界面相一致。

地层(岩石)密度差异是引起重力异常的根本原因。当具有一定规模的前寒武系—古生界密度层和上古生界密度层埋藏较浅或出露地表时, 可引起显著的相对重力高异常; 当中生界密度层(上侏罗统一下白垩统、上白垩统)发育时, 常引起相对重力低异常, 反映了上侏罗统一下白垩统断陷、上白垩统凹陷等的存在。

3.1.2 磁性特征

从磁性差异看, 不同地层的磁性强度迥然有别(图 2), 主要特征包括: ①新生界区域分布微弱磁性层——主要由沉积碎屑岩组成, 磁化率多小于 $100 \times 10^{-5} \text{ SI}$, 不会引起明显的正磁异常; ②白垩系和侏罗系局部分布强磁性层——包含磁性较强、厚度较大但不稳定的中基性火山(碎屑)岩, 磁化率平均值为 $1600 \times 10^{-5} \text{ SI}$ 左右, 常引起高幅值跳跃变化正磁异常; ③上古生界区域分布微弱磁性层——主要由沉积岩组成, 磁化率多小于 $100 \times 10^{-5} \text{ SI}$, 不会引起明显的正磁异常; ④前寒武系—古生界中-

强磁性层——为一套具有中-强磁性的变质岩系，可引起一定幅值平缓正磁异常。

3.2 区域重、磁异常特征

3.2.1 重力异常特征

从宏观面貌看，研究区布格重力高、低异常均

较为发育，异常值波动幅度大且较为频繁(图 3)。

研究区布格重力异常分布不均，以不同的异常形态组合构成不同重力分区。北部总体表现为相对重力低异常中镶嵌着局部重力高，其中相对重力高多呈 NE-NNE 向的条带状或近团块状，相对重力低

地层				岩性	密度 /(g/cm ³)	密度 分层	密度柱状 /(g/cm ³) 2.0 2.2 2.4 2.6 2.8	磁化率 /(×10 ⁻⁵ SI)	磁性 特征	磁性柱状 /(×10 ⁻⁵ SI) 300 600 900 1200		
新生界	第四系			黏土、亚黏土、砂、砂砾石	1.98	低密度层		22	微弱			
	新近系			泥岩、砂岩、砂砾岩	2.11			2.05g/cm ³			31	
	古近系											
中生界	白垩系	上统	明水组	泥岩夹砂岩	2.16	中-低 密度层	2.25g/cm ³	26	微弱			
			四方台组	泥岩夹砂岩，底部为砂砾岩	2.23			43				
			嫩江组	泥岩夹油页岩	2.25			30				
			姚家组	泥岩与厚层砂岩	2.23			39				
			青山口组	泥岩夹砂岩	2.31			19				
			泉头组	泥岩与砂岩互层	2.43			98			微弱	
	登娄库组	泥岩与砂岩互层	2.50	55								
	营城组	中-酸性火山岩、火山碎屑岩及正 常沉积岩夹煤层	2.54	527	中等							
	沙河子组	泥岩与砂岩、砾岩互层夹煤层	2.55	262	弱							
	侏罗系	上统	火石岭组	安山岩、玄武岩、凝灰岩夹砂岩、 砂砾岩、泥岩及煤线	2.53	中密度层	2.52g/cm ³	1083	中强			
	上古生界	二叠系	石炭系	砂泥质板岩、砂岩、泥岩夹泥灰岩、 灰岩、凝灰岩	2.67			76	微弱			
灰岩、泥岩、砂岩夹凝灰岩、安山岩				2.69	12			微弱				
下古生界		前寒武系		绢云母片岩、石英片岩、绿泥石千 枚岩、变质砂岩	2.72			高密度层	2.70g/cm ³	481	中等	
				斜长角闪岩、麻粒岩、变粒岩、花 岗质片麻岩						1249	中强	

图 2 研究区及周边地层(岩石)密度与磁化率图

Fig. 2 Map showing the density and magnetic susceptibilities of strata (rock samples) in the study area and its adjacent area

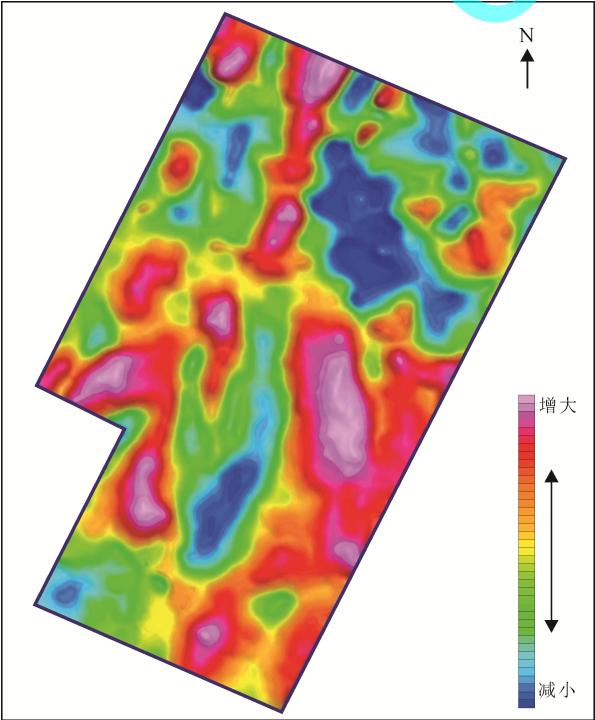


图 3 研究区航空布格重力异常图
Fig. 3 Airborne Bouguer gravity map of the study area

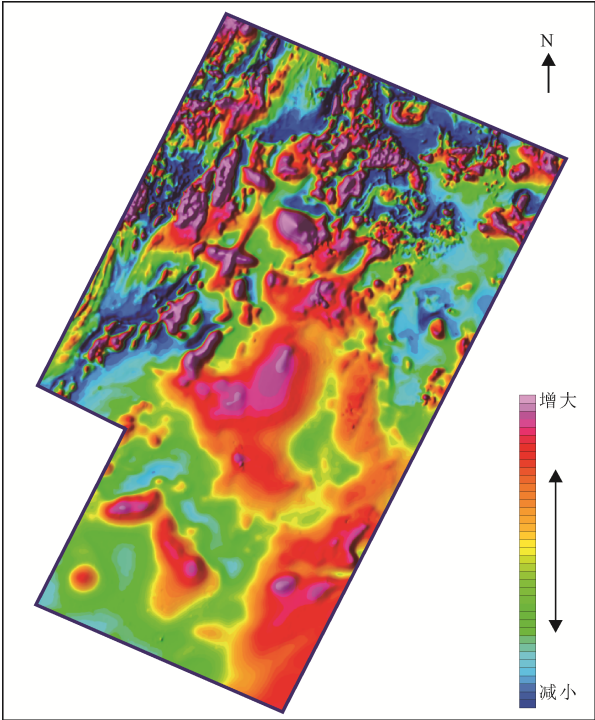


图 4 研究区航磁异常图
Fig. 4 Airborne magnetic map of the study area

多为团块状, 相对重力低异常的分布面积约占研究区的三分之二。中南部重力高、低异常的分布面积相近, 东部及北西部以相对重力高为主, 其它地区多为相对重力低, 重力高、低异常走向主要为 NNE 向和近 SN 向, 其次为 NW 向, 相对重力高、低异常的发育性及其走向的多样性, 反映了区域构造变动的强烈性或沉积相的多变性或岩浆岩体的发育性。

研究区布格重力异常梯度带较为发育但缺乏巨型线性梯级带, 多数梯级带延伸距离较短, 连续性较差, 而且延伸方向各异。研究区共发育延伸长度大于 10 km 的航空布格重力梯级带约 30 条, 其延伸距离均小于 75 km, 且多数梯级带长度在 50 km 以下。梯级带走向可见 NE-NNE 向、近 SN 向、NW 向和近 EW 向四个方向。梯级带的发育特征反映了区域构造活动的多期性和复杂性。

3.2.2 磁力异常特征

研究区航磁异常具有显著的波动性, 且北部和南部磁异常面貌迥然不同(图 4)。北部表现为负磁背景上发育跳跃变化正磁异常, 局部异常较破碎, NNE 向线性磁异常带或串珠状磁异常发育(尤其是

西部)。南部表现为负磁背景上发育大面积低缓正磁异常, 同时可见一定数量、不同方向的航磁梯度带, 正磁异常以近椭圆形、带状居多, 异常走向主要包括 NE 向、NW 向两组方向。南、北部不同的磁异常面貌, 反映了南、北部地质背景、磁性基底、火成岩等特征的差异性。

3.3 盆地构造层划分

3.3.1 磁性基底

磁性基底构造层是前寒武纪地层, 这套地层埋藏深, 厚度大, 分布范围广, 主要为一套前寒武纪变质岩系, 岩性主要包括角闪岩、麻粒岩、变粒岩、花岗质片麻岩、片岩、千枚岩等, 并伴有大量花岗岩侵入。物性柱状显示该构造层密度大, 平均密度为 2.73 g/cm^3 , 具有中-强磁性, 平均磁化率可达 $1249 \times 10^{-5} \text{ SI}$ 。该构造层的展布特征如下:

(1) 该套地层整体呈现西深东浅的格局, 顶面深度起伏较大, 深度值 0~9800 m(图 5, 图 6)。研究区西部(北部斜坡嫩江东凹陷与依安凹陷北西部等构造单元)埋藏深度较大, 深度值多为 6500~9100 m; 东北部(北部斜坡五大连池凹陷)最大埋藏深度可达

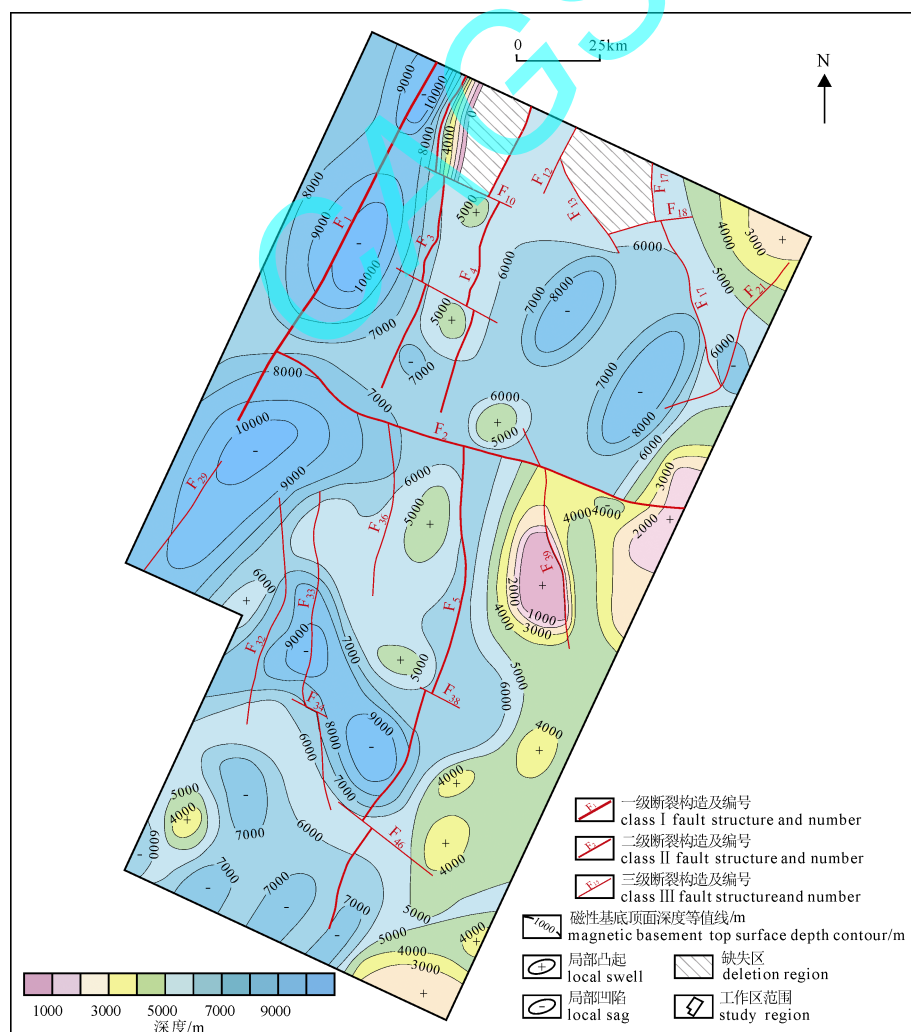


图 5 磁性基底顶面深度图
Fig. 5 Depth map of the magnetic basement top

7900 m; 南西部(中部坳陷林甸凹陷)最大埋藏深度约6900 m; 南东部(中部坳陷太平庄凹陷)埋藏深度多为4400~5100 m; 北东部(北部斜坡五大连池凹陷北东隅)埋藏深度变浅, 多为2900~5200 m; 中东部(北部斜坡克山凸起)埋藏深度逐渐变浅, 多小于4300 m。

(2)基底断裂对前寒武系顶面深度具有明显的

控制作用。断裂主要以 NNE 向为主, 其次为近 NW 向, 少数为近 SN 向。中部(北部斜坡依安凹陷东部)深度梯度带与 NNE 向 F₅ 断裂相对应, 中东部(北部斜坡克山凸起东部)深度梯度带受 NNW 向 F₃₉ 断裂控制, 北西部(北部斜坡尖山凸起带)前寒武系顶面深度明显受 NNE 向 F₃ 断裂和 F₄ 断裂的控制。

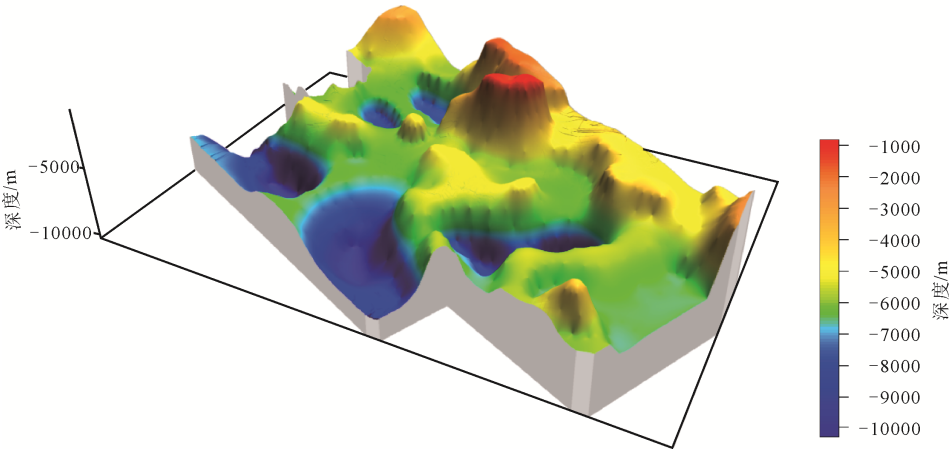


图 6 磁性基底顶面形态立体图
Fig. 6 Morphological stereogram of magnetic basement top

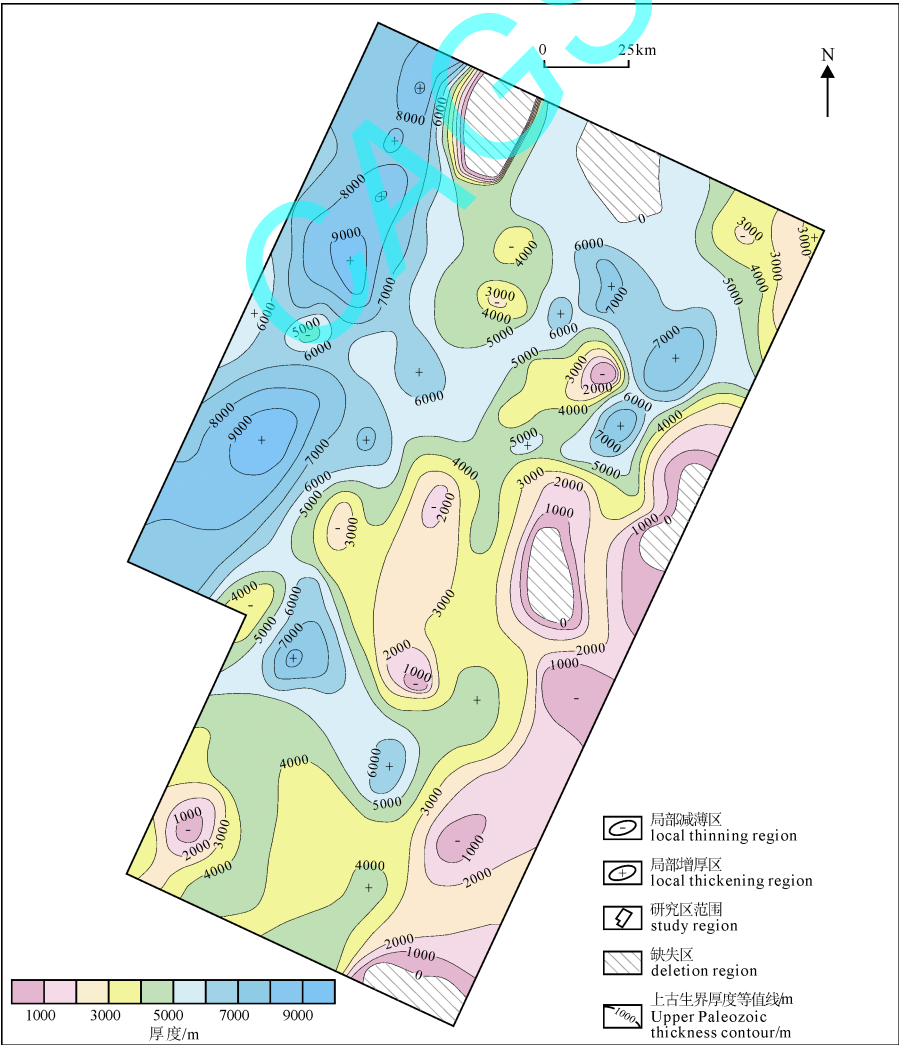


图 7 上古生界厚度图
Fig. 7 Thickness map of the Upper Paleozoic

3.3.2 上古生界

该构造层为一套海陆交互相沉积岩夹火山岩系, 其密度中等, 平均密度介于中生界与前寒武系之间。主要特征如下: (1) 上古生界在大部分地区分布, 局部缺失。主要分布于研究区西部(松辽盆地北部斜坡嫩江东凹陷等构造单元)、东北部(北部斜坡五大连池凹陷等构造单元)、中南部(北部斜坡富海凸起带)、中西部(西部斜坡广丰凸起带)等区域, 北部边缘及东部局部地段缺失。

(2) 上古生界残留厚度差异较大, 主要表现为西厚东薄的特征, 厚度值 0~9300 m(图 7)。主要可见 6 个厚度中心, 分别位于东北部(北部斜坡嫩江东凹陷西部)、中西部(北部斜坡依安凹陷北西部)、东北部(北部斜坡五大连池凹陷中部、南东部)、中北部(北部斜坡尖山凸起带南部)、南西部(北部斜坡富海凸起带)与中南部(北部斜坡依安凹陷南部)。

3.3.3 上侏罗统一白垩统

该套地层发育比较完整, 为一套湖泊相、河流相碎屑岩系, 夹有油页岩、化学岩以及火山岩等,

平均密度大于上白垩统, 小于上古生界。其主要特征如下:

(1) 在研究区南部广泛分布, 北部局部地段缺失(图 8 和图 10)。主要分布于松辽盆地北部斜坡五大连池凹陷、嫩江东凹陷、依安凹陷、克山凸起南部, 中部拗陷林甸凹陷、太平庄凹陷, 西部斜坡富裕凹陷等构造单元内。

(2) 底面深度由北向南呈逐渐增大的特点, 深度值为 0~3550 m(图 8 和图 9)。北部埋藏深度相对较小, 多小于 2200 m, 底面深度由西部向中东部呈逐渐增大的趋势。南部埋藏深度较大, 除中西部富海凸起带南部埋深小于 1500 m 外, 其它地区埋深多大于 2500 m, 最大深度分别位于依安凹陷(约 3570 m)、太平庄凹陷(约 3550 m)、五大连池凹陷(约 3560 m)与林甸凹陷(约 3250 m)。

(3) 上侏罗统一白垩统残留厚度中等, 整体呈现北薄南厚的特征, 厚度值为 0~2160 m(图 10)。主要可见 9 个厚度中心, 最大残留厚度位于依安凹陷、五大连池凹陷与嫩江东凹陷南部, 厚度可达

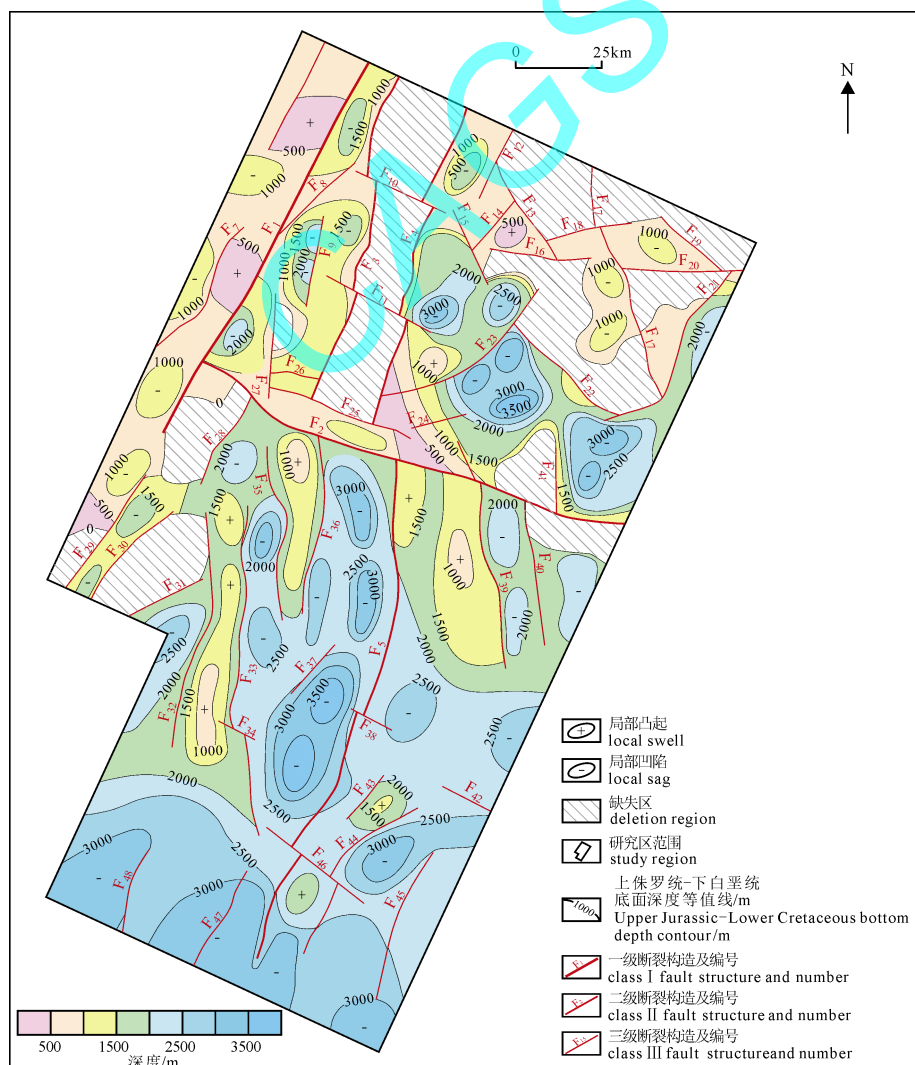


图 8 上侏罗统一白垩统底面深度图

Fig. 8 Depth map of the Upper Jurassic-Lower Cretaceous bottom

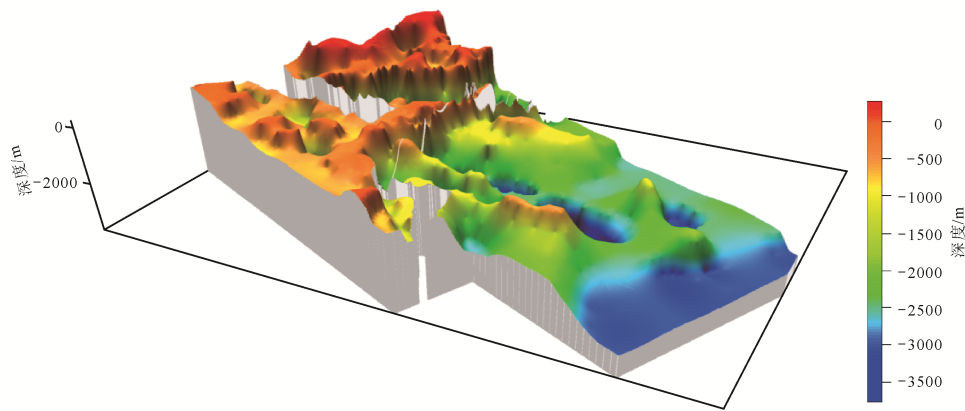


图 9 上侏罗统一下白垩统底面形态立体图
Fig. 9 Morphological stereogram of Upper Jurassic-Lower Cretaceous bottom



图 10 上侏罗统一下白垩统厚度图
Fig. 10 Thickness map of the Upper Jurassic-Lower Cretaceous bottom

2100 m; 克山凸起南部、林甸凹陷、富裕凹陷等构造单元内的残留厚度次之, 变化范围为 600~1500 m; 太平庄凹陷、五大连池凹陷北东部等构造单元内的残留厚度相对较薄; 富海凸起带、广丰凸起带、克山凸起北部等构造单元内的残留地层较薄或仅零星残留。

(4)NNE 向与 NW 向断裂主要控制着该套地层的展布形态。上侏罗统一下白垩统沉积凹陷边界多为断裂构造, 如依安凹陷发育的上侏罗统一下白垩

统夹持于 NNE 向 F_5 断裂与近 SN 向 F_{33} 断裂之间, 富裕凹陷内部发育的下白垩统明显受控于 NNE 向 F_{32} 断裂与 NE 向 F_{31} 断裂。

3.3.4 上白垩统

研究区上白垩统包括青山口组、姚家组、嫩江组、四方台组和明水组, 其平均密度值明显大于新生界, 小于下白垩统。上白垩统发育具有如下特征:

(1)除盆缘缺失外, 盆内均有发育, 深度值由北向南逐渐变大(图 11, 图 12)。南部太平庄凹陷的上

白垩统底面深度值最大, 可达 1800 m; 南部和中部的林甸凹陷与依安凹陷、克山凸起、五大连池凹陷和富裕凹陷的上白垩统底面深度中等, 平均深度约 1500 m; 北部的五大连池凹陷北部、尖山凸起带北部、嫩江东凹陷北部深度较小, 平均深度约 530 m。

(2) 上白垩统断裂构造不发育, 平均厚度中等, 总体呈现由北向南逐渐增厚的趋势, 厚度值为 0~1860 m(图 13)。南部和中部的林甸凹陷、太平庄凹陷、依安凹陷、富裕凹陷、五大连池凹陷南部等构造单元内的厚度较大, 厚度值多在 750~1500 m 之间; 北部地区的厚度较薄, 多小于 750 m。

3.3.5 三维空间构造格架

通过对研究区进行垂向构造分层, 构建了浅、中、深多层次三维空间构造格架(图 14), 揭示了松辽盆地中北部在形成演化过程中经历的多期构造运动。

中生代早期, 盆地处于热隆阶段, 前寒武纪结晶基底与古生代地层由于热隆上拱作用而发生张裂, 构造层被 NNE 向和近 EW 向断裂切割。晚侏罗世和早白垩世早—中期, 盆地演化进入断陷阶段, 在

NNE-NE 向拉张断裂和 NW 向张剪断裂的共同控制下, 形成了若干断陷、断隆、阶地等次级构造单元, 并在负向构造单元中沉积了巨厚的上侏罗统一下白垩统。晚侏罗世—早白垩世断陷阶段初期, 上侏罗统一下白垩统底面发育古生界凸起和古潜山等局部构造, 为油气运聚提供了重要构造背景。早白垩世晚期—晚白垩世, 盆地进入拗陷期, 盆地演化由早白垩世早—中期的张裂逐渐转变为早白垩世晚期—晚白垩世的区域性沉降, 上白垩统具有北部斜坡缓倾浅埋、中南部凹陷发育的沉积特征, 断裂构造不甚发育且沉积层更为连续, 对油气保存十分有利。

3.4 盆地深部新层系特征

本次利用航空重磁构造分层结果, 进一步研究盆地深部新层系特征。除上白垩统属于常规油气勘探层位外, 上侏罗统一下白垩统与上古生界作为盆地深部两个新层系, 均具有一定的油气勘探前景。

3.4.1 上古生界

根据野外踏勘与钻井资料, 松辽盆地分布的上古生界是一套海陆交互相夹火山碎屑沉积岩系, 主要岩性包括砂岩、粉砂岩、泥岩、石灰岩、泥灰

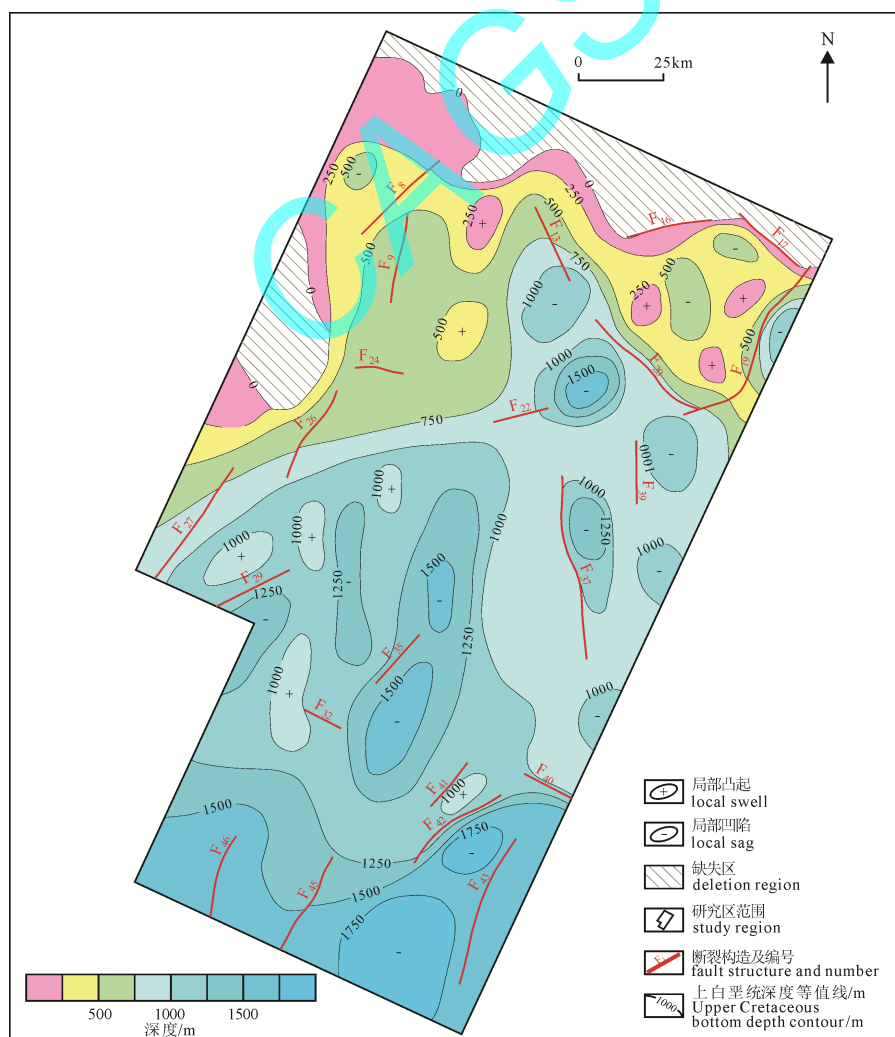


图 11 上白垩统底面深度图

Fig. 11 Depth map of the Upper Cretaceous bottom

岩、白云质灰岩夹凝灰岩、安山岩等，局部地区可见动力变质或热接触变质形成的变质岩。重磁联合反演结果表明，松辽盆地深部岩浆上涌后侵入并刺穿沉积地层，大部分地区广泛发育沉积岩(晚古生界)。研究区内分布的砂岩层多为中砂、粗砂(砾)、细砂状结构，颗粒间空隙较为发育，渗透性良好；灰岩层多具有溶蚀孔和裂缝等空隙，储集能力较强，可作为有效储层。此外，研究区分布的部分火山碎屑岩具有气孔构造和粒间空隙，具有一定的渗透性和储集能力。该层系中的暗色泥岩层数多、分布广、厚度大，既是生油层又是良好的盖层；虽然红色或

灰色泥岩的有机质含量偏低，但可作为良好的油气盖层。北东向与北西向的贯通断裂为深部油气运移与扩散提供了良好的通道，为上覆地层成藏提供了良好的条件。

研究区上古生界主要保留在西部、北东部以及中南部局部地区，平均沉积厚度可达 4000 m 以上，局部地区沉积厚度可达 9000 m 以上。目前已有的研究成果初步证实，松辽盆地上古生界具备二次生烃的地质条件，加上上古生界具有多套生储盖组合，使得该层系具备一定的含油气潜力，上古生界残留的几个厚度中心可作为进一步勘探的重点地区。

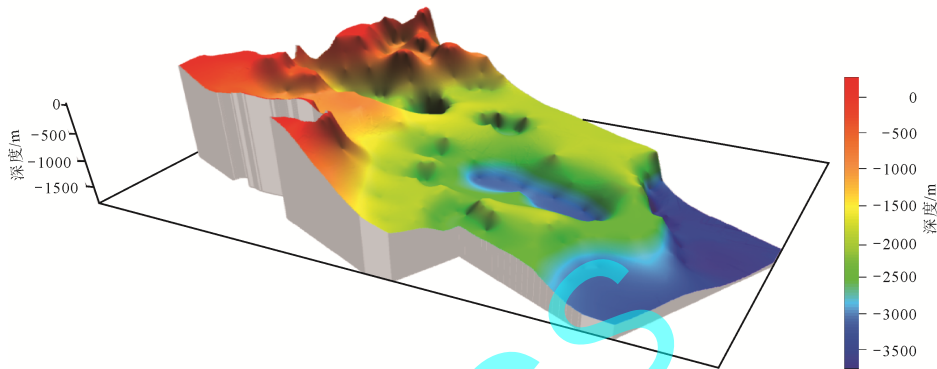


图 12 上白垩统底面形态立体图
Fig. 12 Morphological stereogram of Upper Cretaceous bottom

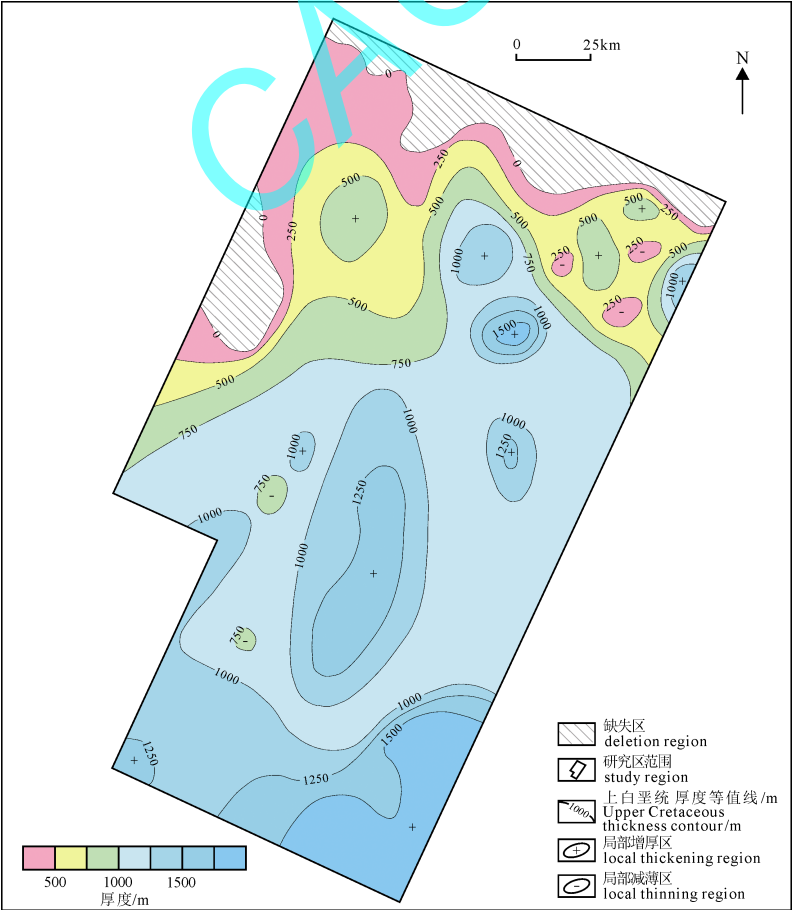
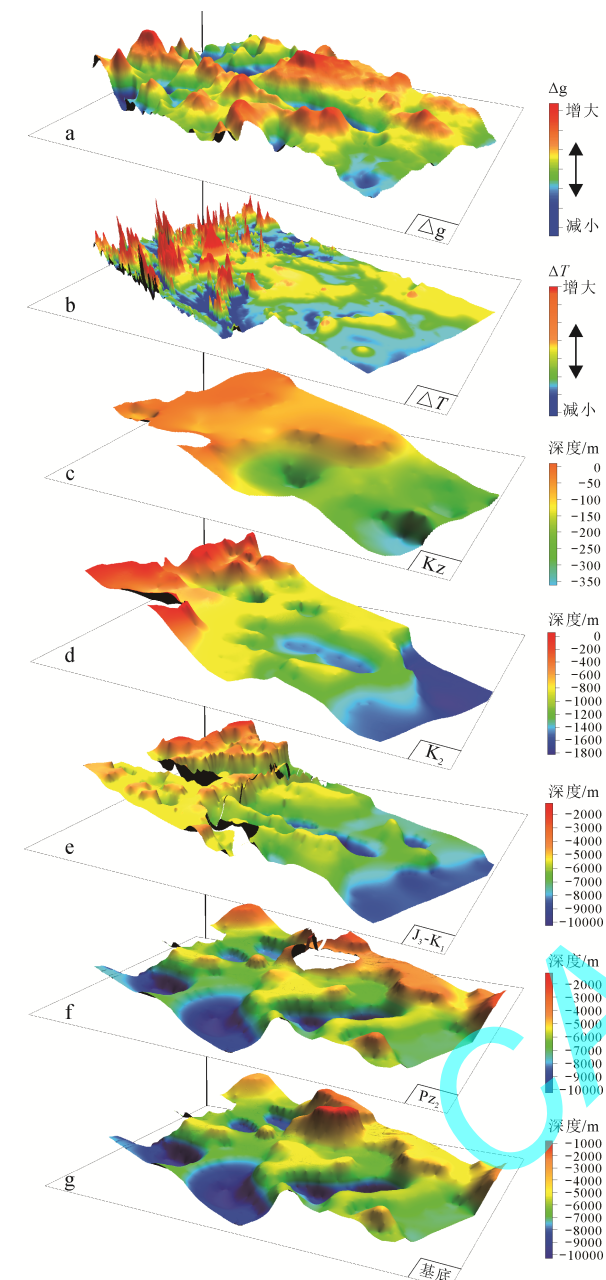


图 13 上白垩统厚度图
Fig. 13 Thickness map of the Upper Cretaceous



a—布格重力异常图; b—航磁异常图; c—新生界底面形态立体图; d—上白垩统底面形态立体图; e—上侏罗统一下白垩统底面形态立体图; f—上古生界底面形态立体图; g—磁性基底顶面形态立体图。

a—Bouguer gravity map; b—airborne magnetic map of the study area; c—morphological stereogram of Cenozoic bottom; d—morphological stereogram of Upper Cretaceous bottom; e—morphological stereogram of Upper Jurassic-Lower Cretaceous bottom; f—morphological stereogram of Upper Paleozoic bottom; g—morphological stereogram of magnetic basement top.

图 14 研究区构造分层立体图

Fig. 14 Stereogram showing tectonolayering of the study area

3.4.2 上侏罗统一下白垩统

上侏罗统一下白垩统包括上侏罗统火石岭组、下白垩统沙河子组、营城组、登娄库组与泉头组,是研究区另一套重要碎屑沉积岩(砂岩、泥岩等)含油气新层系。根据已知钻探资料,该层系储集层以沉

积碎屑岩为主,其次为火山碎屑岩。沙河子组发育砂岩、粉砂岩、泥岩等,砂岩和砾岩可以作为良好储层,泥岩既是生油层又是盖层。登娄库组砂岩厚度大,储集层发育,已在松辽盆地其它地区获工业性气流;区内发育的暗色泥岩有机质丰度高,多属于Ⅱ型和Ⅲ型,有机质演化程度较高且多处于成熟阶段,因此具备较好的生烃潜力,构成了区域主要的烃源岩。

强烈的裂谷作用造就了一系列断陷构造单元,东北部、中部与中南部断陷的沉陷幅度较大,沉积了一套较厚的碎屑岩系。南部沉积厚度较为稳定,平均厚度 2500 m 左右,南缘林甸凹陷的沉积厚度可达 3000 m 左右。中部、南缘在盆地发展过程中长期处于沉降中心与沉积中心,泥岩发育,形成了沉积厚度较大的含油建造,加之该套地层发育多层泥岩、砂岩和生储盖组合,因此具有较好的油气前景,可以作为进一步油气勘探的目标层位。

4 结论

(1)实现航空重、磁综合测量是我国航空地球物理探测技术的重大突破和基础地质研究方法的重大进步,有力支撑与服务了新时代我国基础地质研究和油气勘探工作。松辽盆地嫩江—林甸地区最新采集的航空重、磁数据蕴含着丰富的地球物理信息,在揭示区域重磁场特征的同时,可以深入研究区域构造、盆地构造层以及深部新层系残留分布等特征,为岩浆岩发育和深部地震反射不清等地区的勘探工作提供地球物理新方法。

(2)松辽盆地嫩江—林甸地区自上而下可划分为新生界、上白垩统、上侏罗统一下白垩统、上古生界、下古生界—前寒武系五大构造层,不同构造层具有不同的构造形态。上白垩统断裂构造不发育,底面形态总体显示为北部翘起、南部逐渐下陷;上侏罗统一下白垩统断裂东北向与北西向断裂构造发育,底面形态总体呈现为北部抬起、南部差异升降;上古生界断裂构造发育中等,底面形态总体表现为差异升降的不规则凹凸形状。

(3)上古生界和上侏罗系一下白垩统两个新层系在松辽盆地嫩江—林甸地区不同地段的赋存状况迥然有别。上古生界主要分布于西部、东北部和中部南部局部地区,厚度多为 5000~8000 m,北部和东部残留厚度较小且局部缺失;上侏罗统一下白垩统在南部埋藏较深且保留厚度较大,厚度 1100~2200 m,在其它地段埋藏较浅而且保留厚度较小。

Acknowledgements:

This study was supported by China Geological Survey (No. DD20190028).

参考文献:

- 蔡尧忠, 刘玉梅, 袁智广. 2002. 松辽盆地东南隆起区油气地质特征[J]. 吉林地质, 21(3): 22-28.
- 杜乐天, 欧光习. 2007. 盆地形成及成矿与地幔流体间的成因联系[J]. 地学前缘(中国地质大学(北京); 北京大学), 14(2): 215-224.
- 康晓倩, 冯晖, 侯贺晨, 孙成城, 刘乾, 俞海龙. 2019. 松辽盆地北部石炭-二叠纪地层厚度: 来自深反射地震的证据[J]. 中国地质, 46(5): 1116-1125.
- 李君, 黄志龙, 刘宝柱, 柳波. 2008. 伸展构造与反转构造对油气分布的控制作用-以松辽盆地东南隆起区为例[J]. 新疆石油地质, 29(1): 19-21.
- 李文勇, 周坚鑫, 周锡华, 郭志宏, 安战锋, 徐剑春, 李冰, 罗锋. 2010. 航空重力局部异常地质成因分类及找矿意义[J]. 地球科学进展, 25(10): 1061-1069.
- 刘燕戌, 李文勇, 曹安琪. 2018. 基于航空重磁特征对突泉盆地构造的认识[J]. 中国地质调查, 5(1): 44-50.
- 刘燕戌, 李文勇. 2015. 南海黄航空重力局部异常解析[J]. 地球物理学进展, 30(3): 1418-1425.
- 刘燕戌, 路文芬, 杨冬红. 2021. 基于重磁资料的铀矿预测研究-以松辽盆地西部为例[J]. 地球学报, 42(1): 63-73.
- 孟令顺, 杜晓娟. 2009. 勘探重力学与地磁学[M]. 北京: 地质出版社.
- 牛花朋, 王贵文, 鲜本忠, 付健伟, 焦小芹, 李洪娟. 2018. 深层火山碎屑熔岩形成机理及其指相意义研究-以松辽盆地庆深气田为例[J]. 地学前缘(中国地质大学北京, 北京大学), 25(6): 281-288.
- 夏丹. 2017. 松辽盆地构造隆幅影响因素及与油气藏形成关系[J]. 大庆石油地质与开发, 36(3): 13-17.
- 张玉明, 张青林, 王明君, 杨木壮. 2006. 松辽盆地十屋断陷反转构造样式及其油气勘探意义[J]. 地球学报, 27(2): 151-156.
- 邹长春, 张小环, 赵金环, 彭诚, 张淑霞, 李宁, 肖亮, 牛一雄, 丁娱娇, 秦宇星, 林峰. 2018. 松辽盆地科学钻探工程松科二井东孔上白垩统地球物理测井科学成果[J]. 地球学报, 39(6): 679-690.
- structure and hydrocarbon potential of the South Yellow Sea[J]. Journal of Asian Earth Sciences, 90: 127-136.
- LI Wen-yong, ZHOU Jian-xin, XIONG Sheng-qing, GUO Zhi-hong, LU Wen-fen, XU Jian-chun, LIU Yan-xu. 2012. Effect and prospect of basic geological survey based on airborne gravimetry in China[J]. Acta Geologica Sinica (English Edition), 86(1): 38-47.
- LI Wen-yong, ZHOU Jian-xin, ZHOU Xi-hua, GUO Zhi-hong, AN Zhan-feng, XU Jian-chun, LUO Feng. 2010. Geological genetic Classification and Prospecting Significance on Local Anomaly of Airborne Gravimetry[J]. Advances in Earth Science, 25(10): 1061-1069(in Chinese with English abstract).
- LI Y G, OLDENBURG D W. 1998. 3-D inversion of gravity data[J]. Geophysics, 63(1): 109-119.
- LIU Yan-xu, LI Wen-yong, CAO An-Qi. 2018. Recognition of Tuquan Basin structure based airborne gravity magnetic characteristics[J]. Geological Survey of China, 5(1): 44-50(in Chinese).
- LIU Yan-xu, LI Wen-Yong. 2015. Interpretation of local anomalies of airborne gravity in the south yellow sea[J]. Progress in Geophysics, 30(3): 1418-1425(in Chinese with English abstract).
- LIU Yan-xu, LU Wen-fen, YANG Dong-hong. 2021. The Prediction of Uranium Deposits Based on Gravity and Magnetic Data: Exemplified by Western Songliao Basin[J]. Acta Geoscientia Sinica, 42(1): 63-73(in Chinese with English abstract).
- MENG Ling-shun, DU Xiao-juan. 2009. Exploration gravity and geomagnetism[M]. Beijing: Geological Publishing House(in Chinese).
- NIU Hua-peng, WANG Gui-wen, XIAN Ben-zhong, FU Jian-wei, JIAO Xiao-qin, LI Hong-juan. 2018. The formation mechanism of pyroclastic lava and its significance for the identification of volcanic rock faces: a case study from Qingshen gasfield, Songliao basin[J]. Earth Science Frontiers, 25(6): 281-288(in Chinese with English abstract).
- OLDENBURG D W. 1974. The inversion and interpretation of gravity anomalies[J]. Geophysics, 39(4): 526-536.
- PARKER R L. 1974. Best bounds on density and depth from gravity data[J]. Geophysics, 39(5): 644-649.
- REID A B, ALLSOP J M, GRANSER H, MILLET A J, SOMERTON I W. 1990. Magnetic interpretation in three dimension using Euler deconvolution[J]. Geophysics, 55: 80-91.
- STAVREV P, REID A. 2010. Euler deconvolution of gravity anomalies from thick contact/fault structures with extended negative structural index[J]. Geophysics, 75(6): 151-158.
- THOMPSON D T. 1982. EULDPH: a new technique for making computer-assisted depth estimates from magnetic data[J]. Geophysics, 47(1): 32-38.
- XIA Dan. 2017. Influencing factors of the tectonic uplifts and their relationships with the petroleum accumulation in Songliao basin[J]. Petroleum Geology and Oilfield Development in Daqing, 36(3): 13-17(in Chinese).
- ZHANG Yu-ming, ZHANG Qing-lin, WANG Ming-jun, YANG Mu-zhuang. 2006. The reverse structural styles in the Shiwu rift depression, Songliao basin, and their oil and gas exploration significance[J]. Acta Geoscientia Sinica, 27(2): 151-156(in Chinese with English abstract).
- ZOU Chang-chun, ZHANG Xiao-huan, ZHAO Jin-huan, PENG Cheng, ZHANG Shu-xia, LI Ning, XIAO Liang, NIU Yi-Xiong, DING Yu-jiao, QIN Yu-xing, LIN Feng. 2018. Scientific Results of Geophysical Logging in the Upper Cretaceous Strata, CCSD SK-2 East Borehole in the Songliao Basin of Northeast China[J]. Acta Geoscientia Sinica, 39(6): 679-690(in Chinese with English abstract).

References:

- CAI Yao-zhong, LIU Yu-mei, YUAN Zhi-guang. 2002. Geological features of oil and gas in the southeast upwelling area, Songliao basin[J]. Jilin Geology, 21(3): 22-28(in Chinese).
- DAUBECHIES I. 1992. Ten lectures on wavelets. Society for Industrial and Applied Math[J]. Philadelphia: Pennsylvania.
- DU Le-tian, OU Guang-xi. 2007. Genetic relationship between basin formation, associated mineralization and mantle fluids[J]. Earth Science Frontiers(China University of Geosciences, Beijing; Peking University), 14(2): 215-224(in Chinese with English abstract).
- HANSEN R O, SUCIU L. 2002. Multiple-source Euler deconvolution[J]. Geophysics, 67(2): 525-535.
- KANG Xiao-qian, FENG Xuan, HOU He-sheng, SUN Cheng-cheng, LIU Qian, YU Hai-long. 2019. Carboniferous-Permian stratigraphic thickness in northern Songliao Basin: Evidence from deep reflection seismic data[J]. Geology in China, 46(5): 1116-1125(in Chinese with English abstract).
- KEATING P B. 1998. Weighted Euler deconvolution of gravity data[J]. Geophysics, 63(5): 1595-1603.
- LI Jun, HUANG Zhi-long, LIU Bao-zhu, LIU Bo. 2008. Control effects of spreading structure and reversal structure on hydrocarbon distribution-an example from Dongnan uplift in Songliao basin[J]. Xinjiang Petroleum Geology, 29(1): 19-21(in Chinese).
- LI Wen-yong, LIU Yan-xu, XU Jian-chun. 2014. Onshore offshore