



## 长白山玄武岩覆盖区地质矿产调查综合地球物理解释 ——以开峰林场地区为例

孙剑爽<sup>1</sup>, 陈桂虎<sup>1</sup>, 张龙<sup>1</sup>, 徐磊<sup>2</sup>, 张敏<sup>3</sup>, 崔雷<sup>4</sup>

1. 中国地质调查局牡丹江自然资源综合调查中心, 黑龙江牡丹江 157000;
2. 中国地质调查局呼和浩特自然资源综合调查中心, 内蒙古呼和浩特 010000;
3. 中国地质调查局西安矿产资源调查中心, 陕西西安 710000;
4. 黑龙江哈工石墨科技有限公司 黑龙江鸡西 158100

**摘要:** 结合长白山玄武岩覆盖区的 7 条综合物探剖面, 利用重力、高精度磁法、可控源音频大地电磁测深、浅层地震勘探等多种物探工作方法, 研究和探讨了玄武岩覆盖之下地质体的空间展布、岩性和构造特征, 进行了地质填图和找矿方法的有效性试验, 并结合工程钻孔加以验证。绘制了玄武岩覆盖区基底推断图和玄武岩厚度等值线图, 总结了新生代玄武岩覆盖区区域地质矿产调查的有效工作方法手段。

**关键词:** 玄武岩覆盖区; 重力测量; 高精度磁法; 可控源音频大地电磁测深; 浅层地震; 长白山地区

## COMPREHENSIVE GEOPHYSICAL INTERPRETATION FOR THE GEOLOGICAL AND MINERAL SURVEY IN BASALT-COVERED REGION OF CHANGBAI MOUNTAIN: A Case Study of Kaifeng Forest Farm Area

SUN Jian-shuang<sup>1</sup>, CHEN Gui-hu<sup>1</sup>, ZHANG Long<sup>1</sup>, XU Lei<sup>2</sup>, ZHANG Min<sup>3</sup>, CUI Lei<sup>4</sup>

1. Mudanjiang Natural Resources Comprehensive Survey Center, CGS, Mudanjiang 157000, Heilongjiang Province, China;
2. Hohhot Natural Resources Comprehensive Survey Center, CGS, Hohhot 010000, China; 3. Xi'an Mineral Resources Survey Center, CGS, Xi'an 710000, China; 4. Heilongjiang Hagong Graphite Technology Co., Ltd., Jixi 158100, Heilongjiang Province, China

**Abstract:** Combined with 7 comprehensive geophysical sections in the basalt-covered area of Changbai Mountains, multiple geophysical exploration methods such as gravity, high-precision magnetic survey, controlled source audio-frequency magnetotellurics (CSAMT) and shallow seismic exploration are used to study the spatial distribution, lithology and structural characteristics of basalt-covered geological bodies. Through geological mapping and validity test of prospecting methods, the results are verified with engineering drilling. Furthermore, the paper draws the inferred map of basement in the basalt covered area and contour map of basalt thickness, and summarizes the effective methods of geological and mineral survey in Cenozoic basalt-covered region.

**Key words:** basalt-covered area; gravity survey; high-precision magnetic survey; CSAMT; shallow seismic; Changbai Mountains

收稿日期: 2022-01-10; 修回日期: 2022-04-12. 编辑: 李兰英.

基金项目: 中国地质调查局项目“吉林省 1:5 万开峰林场(K52E011007)、白西林场(K52E012007)、东岗(K52E012006)、松树镇(K52E012005)幅区域地质矿产调查”(编号 12120114038401).

作者简介: 孙剑爽(1987—), 男, 工程师, 主要从事地球物理勘探与研究, 通信地址 黑龙江省牡丹江市东安区卧龙街 45 号, E-mail//82270805@qq.com

## 0 引言

长白山地区在漫长的地质演化过程中,经历了多期的火山喷发活动,形成了复杂的地质构造,特别是新生代的火山活动,形成大面积的玄武岩覆盖层,遮盖了它古老的面貌.由于大面积的玄武岩覆盖,研究区的地层与地质构造露头非常有限,给研究区的深部地质调查与矿产勘探带来了很大的困难<sup>[1-3]</sup>.以往对该区域的地质工作多采用单一的地球物理方法,而单一的地球物理方法往往存在探测和解释上的局限性.因此,针对长白山玄武岩覆盖区复杂的地质情况,本研究采用综合地球物理解释的方法,采取大深度、高精度、长剖面的工作方式,在确定玄武岩厚度的同时,对玄武岩覆盖区下深部地质特征、断裂构造位置进行推断,以期研究区地质调查和找矿提供参考<sup>[4]</sup>.

## 1 区域地质概况

研究区位于吉林省东南部的中朝边界,大地构造位置处于华北陆块北缘东段,中朝克拉通的东北端,东邻日本海,是中国大陆东西向构造和东北向构造相互叠加转换最具代表性的地区,也是现代西太平洋板块俯冲带的前端,经历了多次的地壳运动,火山和地震活动频繁<sup>[5-9]</sup>.

研究区内地层发育,太古宙—新生代地层均有不同程度的出露,地层以断层接触为主.地层区划前中生代属于华北地层大区,晋冀鲁豫地层区,辽东地层分区,浑江地层小区;中生代属于滨太平洋地层大区,吉南辽东地层分区,通化地层小区.研究区所处Ⅰ级大地构造单元为华北古陆,Ⅱ级构造单元为渤海东古陆块,Ⅲ级构造单元为太子河—浑江陆表海盆地<sup>[10-12]</sup>.研究区中东部属长白山玄武岩覆盖区,大面积出露新生代玄武岩,西部出露古元古界、新元古界、古生界及中生界.古元古界为中深变质岩类,新元古界—古生界为海相—海陆交互沉积建造,中—新生代主要为陆相火山—沉积岩.研究区内岩浆岩分布广泛,岩体多呈北东向或东西向,个别呈北西向及南北向<sup>[13-14]</sup>.

## 2 区域地球物理特征

### 2.1 重力场特征

研究区布格重力异常(图1)总体上呈西高东低形式分布,中部平稳.在松树镇北东方向至仙人桥一带

异常由高至低变化,且梯度变化较大.松树镇—松江河一带、松江河东北部分,异常变化平稳.松江河东南部异常由高向低变化,且梯度变化较大.

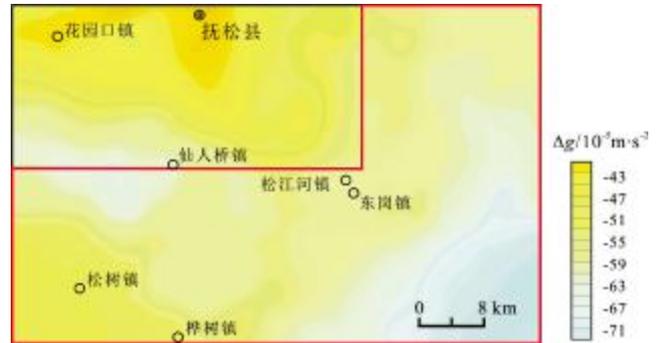


图1 布格重力异常图

Fig. 1 The Bouguer gravity anomaly map

剩余重力异常(图2)及二阶导数重力异常(图3)显示,区内重力异常带分布较为明显,总体具有“两高一低”的特点,即:松树镇至松江河镇发育北东向重力高异常带,松江河至泉阳发育南北向重力高异常带,南岭村附近发育北东向重力低异常带.

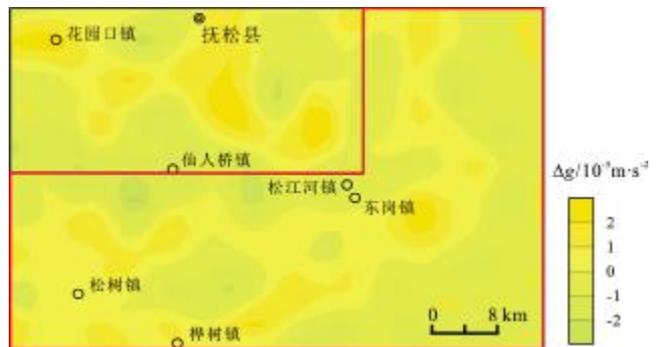


图2 剩余重力异常图

Fig. 2 The residual gravity anomaly map

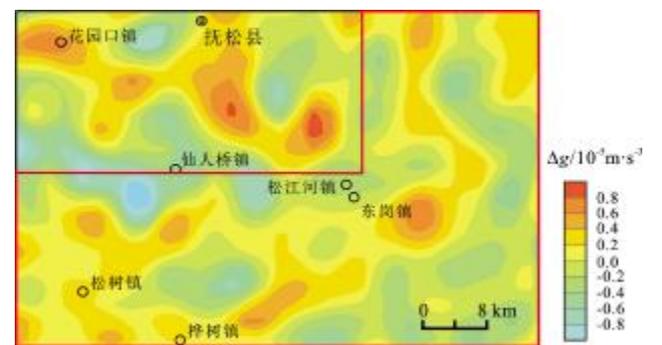


图3 布格重力异常垂向二阶导数等值线平面图

Fig. 3 Vertical second derivative contour map of Bouguer gravity anomaly

研究区东部重力低异常,推测与东部玄武岩覆盖层下基底地质特征或火山机构有关.西北部大营林场一带重力低异常,重力异常等值线密集,推测与该区发育的二长花岗岩有关.松树镇西部至松江镇一带重力高异常,与下白垩统火山岩有关.在松树镇-仙人桥异常梯度变化较大部位、松江河东南部分异常梯度变化较大部位,推测与北东、北西向断裂构造有关.

对重力异常的上延处理结果(图 4)显示区域重力异常特征:从西北到东南异常值逐渐减小,反映表层玄武岩逐渐变厚,此特征也表示基底深度和莫氏面深度逐渐增大;从仙人桥西部到果松村有异常低值带,表示基底深度较大,该带南部和北部特征一致,为重力高值区,基底较浅.

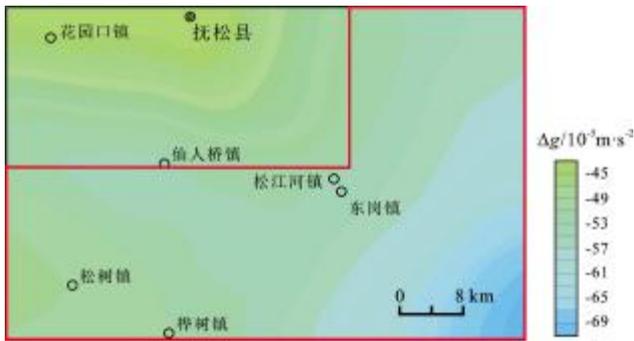


图 4 布格重力异常上延 2 km 等值线平面图

Fig. 4 Contour map of Bouguer gravity anomaly by 2 km upward continuation

### 2.2 磁场特征

研究区西南部大安煤矿-月亮沟、南部仙人站、东南部石龙岗一带为航磁正负异常交替变化区域,磁场值分别为-40~+40 nT、-340~+240 nT;西南部松树镇、中部庙岭村、西部长青沟一带为正磁场区,磁场值为 40~240 nT;松江河镇以东为负磁场,磁场值为-40~-720 nT.

研究区东部平稳负磁场区为大面积玄武岩分布区.玄武岩一般显示为正磁异常,而区内则表现为负异常,推测是由于受后期地磁场的影响,产生极性倒转,或者长白山玄武岩磁性特征程度由外向内逐渐降低的特征.中部正磁场区为中生界火山岩,发育少量新生界玄武岩,造成区内以正磁异常为主、负异常零星分布的特征.研究区西南部主要为中生界火山岩以及古生界地层,古生界岩性为灰岩、砂岩,基本无磁性,故呈现正负异常交替的特征.在松江河镇磁场零等值线一带推测为北西向断裂构造带.在松江河镇南部有一

呈楔形的正异常与负异常的零等值线区域,推测为北东向构造(图 5).

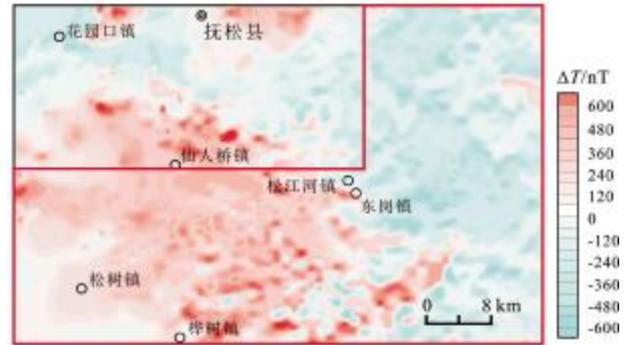


图 5 航磁异常图

Fig. 5 The aeromagnetic anomaly map

通过对航磁异常的上延及求导分析(图6、7)发现:调查区东部平稳负磁场地段分布着大面积的玄武岩,覆盖厚.在松江河镇至仙人桥镇一带变化平稳正磁场地段分布着大面积的玄武岩,玄武岩覆盖层较薄,推测玄武岩覆盖层下伏地层为早白垩统果松组火山岩.

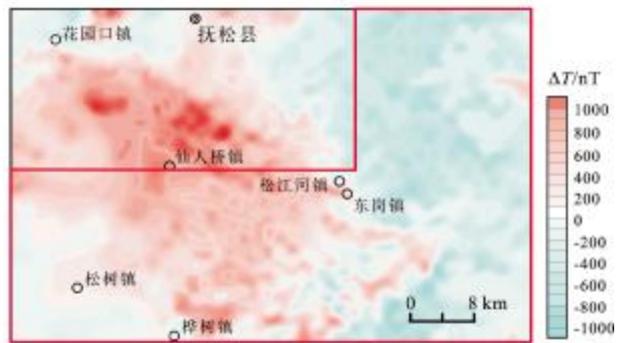


图 6 航磁上延 0.5 km 等值线平面图

Fig. 6 Contour map of aeromagnetic anomaly by 0.5 km upward continuation

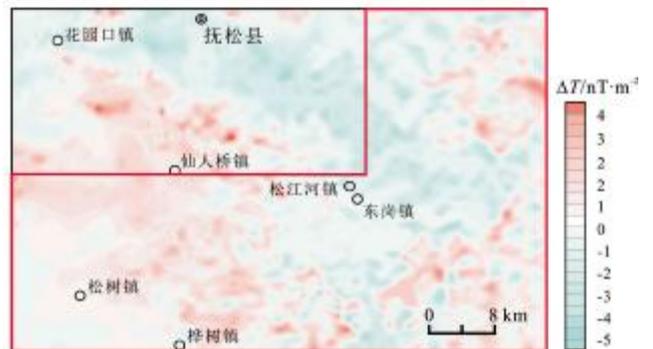


图 7 航磁异常垂向一阶导数等值线平面图

Fig. 7 Vertical first derivative contour map of aeromagnetic survey

## 2.3 电场特征

绿泥片岩、石英砂岩、粉砂岩、砂岩、砂砾岩、玄武岩电阻率值较低,为区内的低阻区;极化率值较低,在本区形成低阻低极化的电性特征。

安山岩、流纹岩电阻率值中等,为区内的中阻区;极化率值较低,在本区形成中阻低极化的电性特征。

花岗片麻岩、闪长质片麻岩电阻率值中等,为区内的中阻区;极化率值较高,在本区形成中阻高极化的电性特征。

大理岩、石灰岩、灰岩、花岗斑岩电阻率平均值高,极化率值较低,在本区形成高阻低极化的电性特征<sup>[15]</sup>。

综上所述,本区发育的沉积岩整体上视电阻率低,低阻区,视极化率也低,显示低阻低极化特征;区内火山岩和侵入岩整体上视电阻率变化中等,为中阻区,视极化率较高,显示中阻高极化特征;区内分布的大理岩、灰岩、花岗斑岩为高阻,视极化率较低,显示高阻低极化特征(详见表1)。

## 3 工作布署

研究区共布设高精度联合剖面测量7条(ZC01—ZC07),开展了高精度重力测量、高精度磁法测量、可控源音频大地电磁测深、浅层地震等多种地球物理测量方法<sup>[16-21]</sup>。目的是查明玄武岩盖层下不同地质体之间的接触关系、新生代玄武岩厚度变化规律及其产状特征,进一步确定玄武岩下基岩岩性,并根据实测剖面绘制玄武岩厚度等值线图及基岩地质图,为区域地质矿产调查工作提供依据。

## 4 剖面测量成果解译及推断

### 4.1 ZC01(烟筒砬子—维东管理站)

该剖面为研究区典型重点研究剖面,布格重力异常由西北端—东南端呈高一低形态分布(图8)。剖面东南部重力低推断为古生代—中生代上叠盆地,西北部重力高对应薄层玄武岩、白垩系火山岩、青白口系鲧鱼台组石英砂岩及古元古界结晶基底。

表1 研究区典型岩石物性参数统计表

Table 1 Physical parameters of typical rocks in the study area

填图单位名称	岩性	样品数	密度/(kg/m <sup>3</sup> )	磁化率/4 $\pi$ ×10 <sup>-6</sup>	电阻率/ $\Omega$ m	极化率/%
青白口系鲧鱼台组石英砂岩	石英砂岩	31	2.91	53	677	0.9
中震旦统八道江组叠层石灰岩	叠层石灰岩	33	2.67	78	3095	0.6
寒武系第二-第三统馒头组粉砂岩	粉砂岩	31	2.34	45	574	0.8
寒武系芙蓉统-下奥陶统冶里组灰岩	灰岩	37	2.57	98	3896	0.7
中-下二叠统山西组砂岩	砂岩	30	2.01	170	479	0.9
上三叠统小河口组粉砂岩	粉砂岩	29	2.1	120	423	0.8
古元古代花岗片麻岩	花岗片麻岩	30	2.72	59	1589	0.9
新太古代英云闪长质片麻岩	英云闪长片麻岩	32	2.65	18330	1793	1.5
古元古界花山组绿泥片岩	绿泥片岩	31	2.98	210	497	1.2
古元古界珍珠门岩组大理岩	大理岩	30	2.83	67	3407	0.7
上三叠统小河口组球状风化火山岩	球状风化火山岩	30	2.78	170	1093	1.6
下白垩统果松组安山岩	安山岩	30	2.61	11690	994	1.8
下白垩统林子头组凝灰质砂砾岩	凝灰质砂砾岩	27	2.34	180	407	0.9
新近系-第四系玄武岩	玄武岩	30	2.94	15960	514	1.1
早白垩世花岗斑岩	花岗斑岩	29	2.79	11520	2876	1.2
早白垩世流纹斑岩	流纹斑岩	30	2.94	110	1198	0.9

注:各参数为该类岩石样品的平均值。

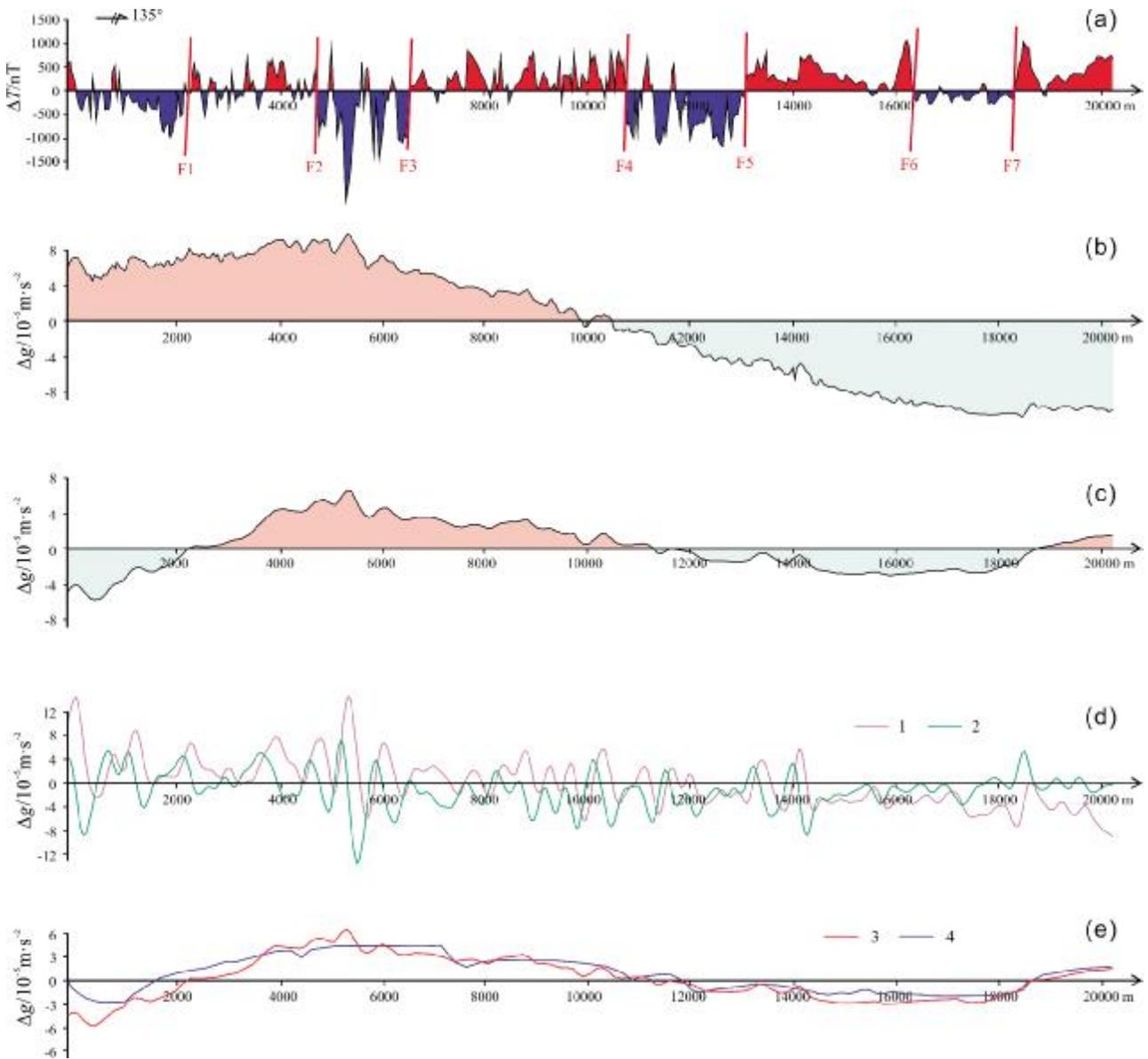


图 8 ZC01 重磁异常剖面图

Fig. 8 Gravity-magnetic anomaly profile of ZC01

a—高精度磁测异常剖面(high precision magnetic anomaly); b—布格重力异常剖面(Bouguer gravity anomaly); c—高剩余重力异常剖面(high residual gravity anomaly); d—一阶导数推断图(first derivative inference); e—剩余重力 2.5D 反演推断图(2.5D inversion inference of residual gravity); 1—垂向一阶导数(vertical first derivative); 2—水平一阶导数(horizontal first derivative); 3—实测曲线(surveyed curve); 4—理论曲线(theoretical curve)

剖面磁场呈正负磁场交替变化, 磁场强度变化较大. 正磁场变化范围为 0~200 nT, 推测为区内的安山质凝灰熔岩引起; 负磁场变化范围为 0~ -400 nT, 推测为区内主要岩性玄武岩所引起. 在负磁场较强地段表明玄武岩覆盖较厚. 在正负磁场交替部位推测断裂 7 条(图 8a).

根据重磁异常选取典型剖面位置, 在 2 300~16 040 m 布置了浅层地震剖面(图 9). 结果显示 H1 位于双程走

时 100 ms 以上, 为地表. H2 位于双程走时 120~350 ms 之间, 在地震剖面上表现为连续性较好的强能量反射同相轴, H2 上覆地层和下伏地层之间存在很明显的波阻抗差异. 在 H1 和 H2 之间, 地层岩性主要以新生代玄武岩为主, 且其厚度在 CMP 号 1900 附近达到最大, 约 500 m 左右(双程走时 350 ms 左右), 其厚度由此处向两侧逐渐减小, 至石英砂岩出露地段尖灭, 之后再向北西方向继续增大. H3 仅在剖面两端有发育, 位于双

程走时 200~350 ms 之间,在剖面北西端,其厚度具有往北西方向逐渐增大的趋势;在剖面南东方向,其厚度则具有往南东方向减小的趋势. H4 位于双程走时 330~560 ms 之间,仅见于剖面西北部,在地震剖面上表现为向上凸起的弧状反射轴,能量较强,连续性一般. 在瞬时频率剖面上, H4 表现为中高频与中低频的分界, 即 H4 上部为中高频特征, 其下部为中低频特征;在瞬时相位上,亦表现出向上凸起的弧状特征,且相位较连续. 推测 H4 为新元古代石英砂岩底界面或古元古代地层顶界面. 在 H1 和 H4 之间(CMP 号 240—650 之间),地层岩性以石英砂岩为主. 在 CMP 号 250 附近,其厚度最大值达到 1 100 m 左右(双程走时 550 ms 左右). H5 位于双程走时 200~700 ms 之间,在剖面西北端埋深大,在剖面中部和西南段埋深相对较浅. H5 在地震剖面上表现为能量较强、连续性较好的反射同相轴,在此界面之下一般为低频短轴反射、弱反射或杂乱反射. 在瞬时振幅剖面上, H5 表现为强振幅特征,且在 H5 界面之下为弱振幅特征. 在瞬时频率剖面

上可看出,在 H5 界面之下频率普遍较低. 推测 H5 为太古宙花岗片麻岩顶界面. 在剖面东南段, H3 和 H5 之间为古元古代地层.

根据重磁异常特征, 优选 1 400~8 480 m 布设了可控源音频大地电磁测深剖面. 结果显示由西北 0 m 至东南 4 400 m, 大部分为低阻区, 这与区内分布的玄武岩关系密切. 在 900 m 以下, 为一高阻层, 推测 900 m 以下为侵入岩, 形成一个巨厚的基底. 同时, 在 200~400 m 深度内也存在一系列不规则状高阻体, 推测为小型岩体. 2 500 m 为侵入岩的隆起地带. 从 4 400 m 到剖面 7 075 m 中阻层推测为变质岩, 4 400 m 附近为两种岩性的接触带, 在 4 200 m 与 5 120 m 存在两处断层, 延深大于 600 m (图 10).

综合地球物理解译(图 11): 北部 3~6 km 地段青白口系基岩出露地表, 其他地段地表为新近系和第四系玄武岩、下白垩统安山岩; 西北部下白垩统安山岩下为青白口系石英砂岩; 东南部 6~11 km 玄武岩下是青白口系, 基底为古元古代花岗岩; 东南部 11~20 km 玄

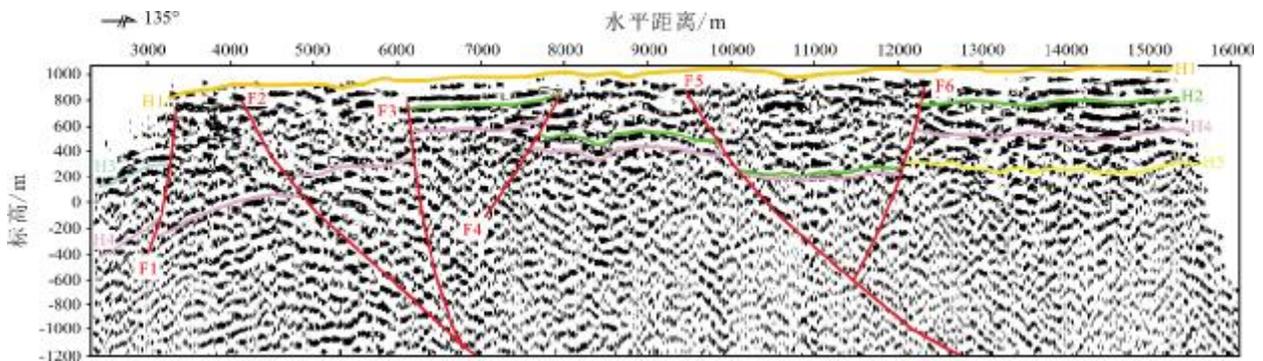


图 9 ZC01 剖面浅层地震断面解译图

Fig. 9 Shallow seismic interpretation section of ZC01

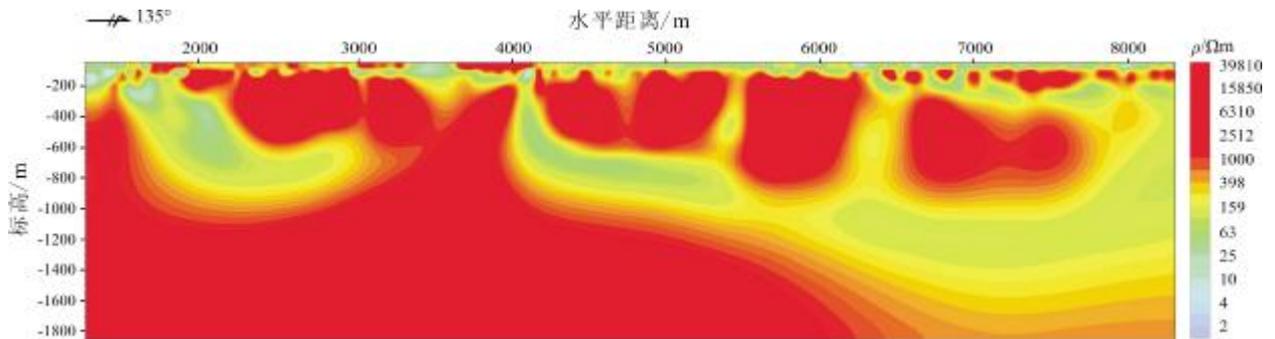


图 10 ZC01 剖面可控源音频大地电磁测深视电阻率二维反演断面图

Fig. 10 2D inversion of CSAMT apparent resistivity of section ZC01

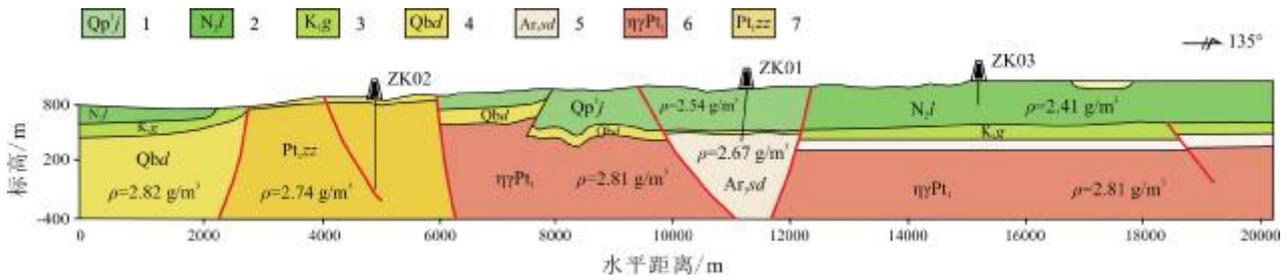


图 11 ZC01 剖面地质推断图

Fig. 11 Inferred geological profile of ZC01

1—下更新统军舰山组 (Lower Pleistocene Junjianshan fm.); 2—上新统老岭组 (Pliocene Laoyeling fm.); 3—下白垩统果松组 (Lower Cretaceous Guosong fm.); 4—青白口系钓鱼台组 (Qingbaikouan Diaoyutai fm.); 5—古元古界珍珠门岩组 (Paleoproterozoic Zhenzhumen fm.); 6—新太古界四道砬子河岩组 (Neoproterozoic Sidaolazihe fm.); 7—古元古代片麻状二长花岗岩 (Paleoproterozoic gneissic monzogranite)

玄武岩下是安山岩,基底为古元古代花岗岩;西北部玄武岩和安山岩厚度均小于 100 m;东南部 6 km 处玄武岩厚度从几十米开始向南逐渐增厚,到剖面东南部达到 500 m.

采用多种物探方法结果对比解译,布设钻孔 3 个,通过钻孔揭露玄武岩覆盖层厚度及地下地质体特征.结果表明,综合物探方法解译的成果与钻探验证结果较为吻合,充分表明该组合方法的有效性.并结合综合物探方法解译的成果,查明了玄武岩覆盖区深部地质体特征,为玄武岩覆盖区地质矿产调查方法综合评价提供依据(图 12).

#### 4.2 ZC02(西江村—梁山村)

该剖面中部 22~26 km 地段古元古代花岗岩和古元古界变质岩基岩出露地表,其他地段地表为新近系和第四系玄武岩、白垩系安山岩.西北部火山岩下为三叠系沉积岩,基底为寒武系变质岩;东南部玄武岩、安山岩下部是古元古界变质岩基底.西北部玄武岩厚度小于 100 m,安山岩厚度小于 200 m;东南部玄武岩和安山岩厚度均小于 100 m.

#### 4.3 ZC03(长春村—头道松花江)

该剖面 9 km 处青白口系基岩出露地表,其他地段地表为新近系和第四系玄武岩、白垩系安山岩.西北部火山岩下基底为青白口系石英砂岩,整条剖面玄武岩、安山岩下部是青白口系石英砂岩.西北部玄武岩厚度小于 100 m,安山岩厚度小于 200 m;东南部玄武岩和安山岩厚度均为 100~200 m.

#### 4.4 ZC04(暖水村西—仙人站西)

该剖面南部 17.5~18.6 km 处古元古代花岗岩、新

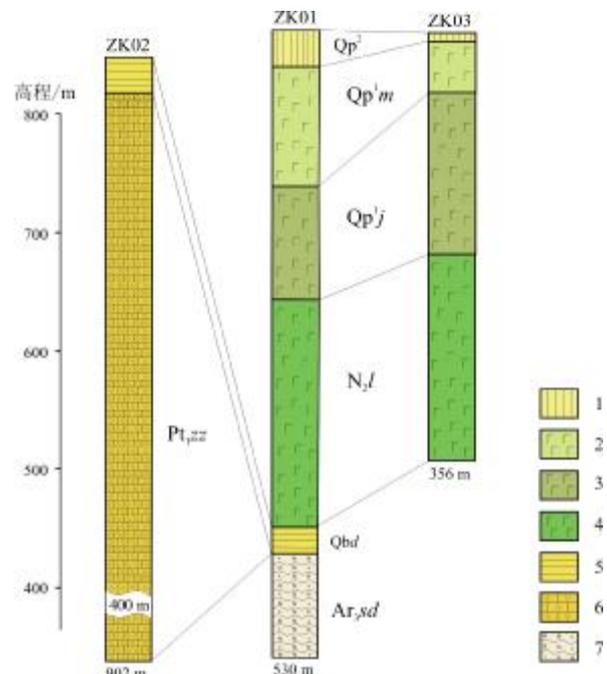


图 12 钻孔柱状对比图

Fig. 12 Comparison of borehole columns

1—中更新统黄土 (Middle Pleistocene loess); 2—下更新统漫江组 (Lower Pleistocene Manjiang fm.); 3—下更新统军舰山组 (Lower Pleistocene Junjianshan fm.); 4—上新统老岭组 (Pliocene Laoyeling fm.); 5—青白口系钓鱼台组 (Qingbaikouan Diaoyutai fm.); 6—古元古界珍珠门组 (Paleoproterozoic Zhenzhumen fm.); 7—新太古界四道砬子河岩组 (Neoproterozoic Sidaolazihe fm.)

太古界变质岩基岩出露地表,其他地段地表为新近系和第四系玄武岩、白垩系安山岩.北部火山岩下为三叠系沉积岩,基底是古元古代花岗岩;南部玄武岩、安山岩下是奥陶系灰岩.北部玄武岩和安山岩厚度均小于 100 m;南部玄武岩厚度 100~200 m.

4.5 ZC05(松江河镇—白西林场南西)

该剖面南部 10 km 处古元古代花岗岩、新太古代花岗岩基岩出露地表, 其他地段地表为新近系和第四系玄武岩、白垩系安山岩. 北部火山岩下为新太古界、震旦系、青白口系地层单元; 南部玄武岩、安山岩下部是新太古界变质岩基底. 北部玄武岩厚度小于 100 m, 安山岩厚度为 200~250 m; 南部玄武岩厚度小于 100 m,

安山岩厚度为 200~300 m.

4.6 ZC06(板石河经营所—东马鞍山北)

整条剖面地表为新近系和第四系玄武岩. 北部玄武岩下为白垩系安山岩, 基底是古元古代花岗岩; 南部玄武岩下为白垩系安山岩, 基底是青白口系石英砂岩, 只有剖面南端基底是三叠系沉积岩. 整条剖面玄武岩厚度为从剖面北端 100 m 逐渐增加到南端的 200 m,

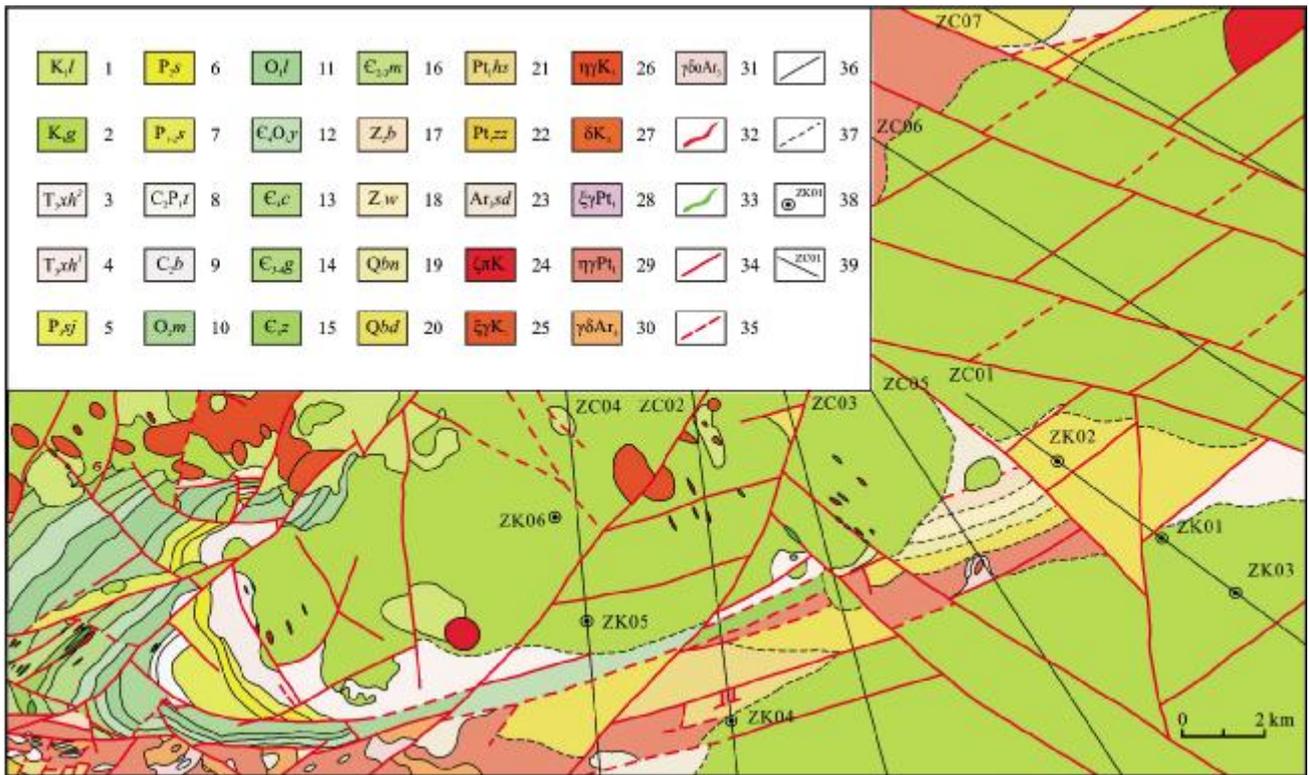


图 13 玄武岩覆盖区基底推断图

Fig. 13 Inferred geological map of basalt covered basement

1—下白垩统林子头组(Lower Cretaceous Linzitou fm.); 2—下白垩统果松组(Lower Cretaceous Guosong fm.); 3—上三叠统小河口组上段(Upper mem. of Xiaohekou fm., Upper Triassic); 4—小河口组下段(Lower mem. of Xiaohekou fm.); 5—上二叠统孙家沟组(Upper Permian Sunjiagou fm.); 6—中二叠统盒子组(Middle Permian Hezi fm.); 7—下-中二叠统山西组(Lower-Middle Permian Shanxi fm.); 8—上石炭-下二叠统太原组(Upper Carboniferous-Lower Permian Taiyuan fm.); 9—上石炭统本溪组(Upper Carboniferous Benxi fm.); 10—中奥陶统马家沟组(Middle Ordovician Majiagou fm.); 11—下奥陶统亮甲山组(Lower Ordovician Liangjiashan fm.); 12—寒武系芙蓉统-下奥陶统冶里组(Cambrian Furongian-Lower Ordovician Yeli fm.); 13—寒武系芙蓉统炒米店组(Cambrian Furongian Chaomidian fm.); 14—寒武系三统-芙蓉统崮山组(Cambrian Series 3-Furongian Gushan fm.); 15—寒武系三统张夏组(Cambrian Series 3 Zhangxia fm.); 16—寒武系二统-三统馒头组(Cambrian Series 2-3 Mantou fm.); 17—上震旦统八道江组(Upper Sinian Badaojiang fm.); 18—下震旦统万隆组(Lower Sinian Wanlong fm.); 19—青白口系南芬组(Qingbaikouan Nanfen fm.); 20—青白口系豹鱼台组(Qingbaikouan Diaoyutai fm.); 21—古元古界花山岩组(Paleoproterozoic Huashan fm.); 22—古元古界珍珠门岩组(Paleoproterozoic Zhenzhumen fm.); 23—新太古界三道砬子河岩组(Neoarchean Sidaolazihe fm.); 24—早白垩世英安斑岩(Early Cretaceous dacite porphyry); 25—早白垩世正长花岗岩(Early Cretaceous syenogranite); 26—早白垩世二长花岗岩(Early Cretaceous monzogranite); 27—早白垩世闪长岩(Early Cretaceous diorite); 28—古元古代正长花岗岩(Paleoproterozoic syenogranite); 29—古元古代片麻状二长花岗岩(Paleoproterozoic gneissic monzogranite); 30—新太古代花岗岩闪长片麻岩(Neoarchean granodiorite gneiss); 31—新太古代英云闪长片麻岩(Neoarchean tonalite gneiss); 32—花岗闪长岩脉(granodiorite vein); 33—闪长玢岩脉(diorite porphyrite vein); 34—实测断裂(surveyed fault); 35—推测断裂(inferred fault); 36—地质界线(geological boundary); 37—推测地质界线(inferred geological boundary); 38—钻孔编号(borehole number); 39—重磁联合解译剖面及编号(gravity-magnetic interpretation section and number)

白垩系安山岩厚度为 100~200 m.

#### 4.7 ZC07(泉阳镇—曙光林场北东)

该剖面大部分地表为第四系玄武岩,只有 5 km 处出露青白口系石英砂岩.北部玄武岩下为青白口系石英砂岩和新太古界变质岩基底;南部玄武岩下为白垩系安山岩,基底是青白口系石英砂岩.中部玄武岩厚度较大,达到 150 m,向剖面两端逐渐减小到几十米,剖面南部玄武岩下的白垩系安山岩厚度为 100~150 m.

### 5 工作成果

(1)揭露了研究区玄武岩基底覆盖特征,编制了玄武岩覆盖区基底地质图(图 13).依据研究区综合地球物理解译成果,结合区域地质特征,对玄武岩覆盖层下地质体特征进行推断,研究区东部玄武岩覆盖层下大面积发育下白垩统果松组.研究区南部出露的新太古界四道砬子河岩组以及古元古代深成变质岩(古元古代二长花岗岩),上震旦统八道江组、青白口系鲢鱼台组、南芬组等为松树镇幅南部老变质基底东延部分,主要受北东、北西向断裂构造控制,受其影响地层单元被

分割成多个断块.研究区北部开峰林场幅仅在泉阳村东部发育新太古界四道砬子河岩组以及青白口系鲢鱼台组,板石河养路工区西侧有古元古代二长花岗岩发育.东马鞍山南部发育有上三叠统小河口组.

(2)查明了研究区玄武岩厚度,编制了玄武岩覆盖层厚度等值线图(图 14).根据研究区综合地球物理测量方法解译成果,结合钻孔揭露资料,研究区东南部玄武岩厚度较大,为 100~500 m,厚度等值线变化梯度较大.西北部玄武岩厚度较小,多为 20~60 m,等值线变化梯度较小.玄武岩整体上具有自南东至北西,厚度由深变浅的趋势.

### 6 结论

对于大面积玄武岩覆盖区的长白山地区,可以利用综合物探方法的组合实施,通过不同方法的反演解译成果,结合工程钻孔加以验证,准确分析判断玄武岩覆盖之下地质体的空间展布及岩性、构造特征.本研究解决了单一的地球物理方法存在的探测和解释上的局限性,为区域地质填图和找矿方法提供了依据.

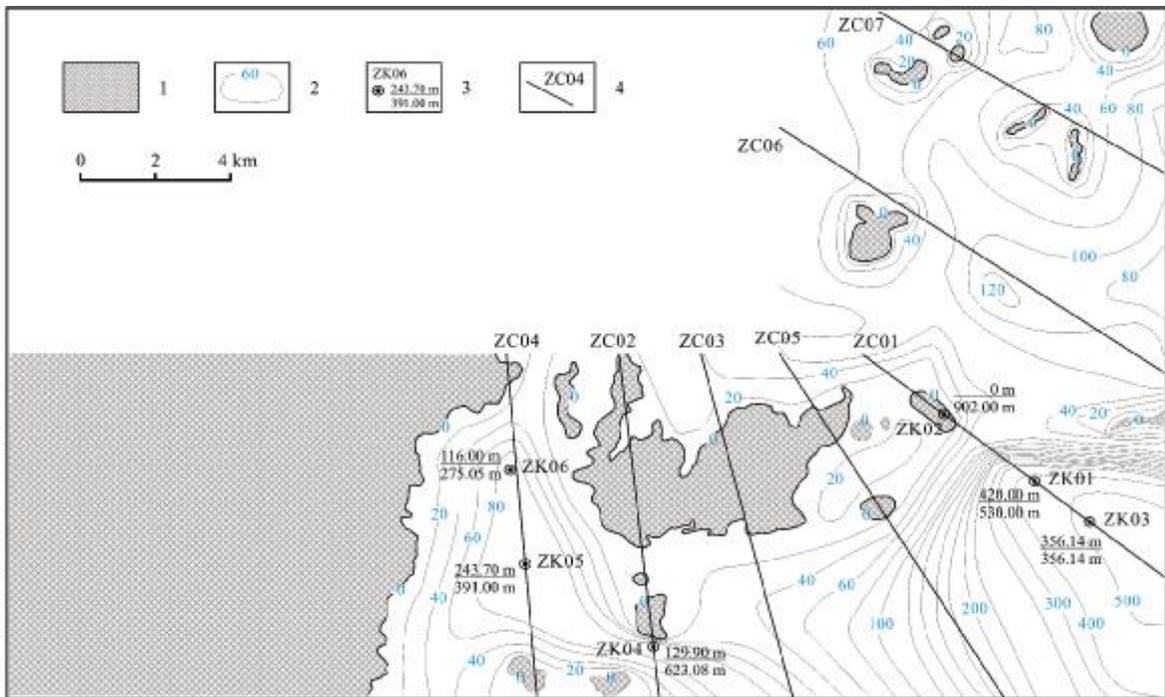


图 14 玄武岩厚度等值线图

Fig. 14 Contour map of basalt thickness

1—基底出露区(basement exposed area); 2—玄武岩厚度等值线(basalt thickness contour); 3—钻孔位置及编号-玄武岩厚度/钻孔深度(borehole and number-basalt thickness/drilling depth); 4—重磁联合解译剖面及编号(gravity-magnetic interpretation section and number)

## 参考文献(References):

- [1] 乔中坤, 黄大年, 周文月, 等. 长白山玄武岩盖层地质构造研究[J]. 地球物理学进展, 2016, 31(5): 1991-1997.  
Qiao Z K, Huang D N, Zhou W Y, et al. Research of geological structure of Changbai Mountain basalt cover[J]. Progress in Geophysics, 2016, 31(5): 1991-1997.
- [2] 唐钊, 朱奕先, 李桐林. 长白山玄武岩覆盖区重力异常的地质意义[J]. 吉林地质, 2018, 37(1): 66-70.  
Tang Z, Zhu Y X, Li T L. The geological significance of gravity anomaly of Changbai Mountain basalt cover[J]. Jilin Geology, 2018, 37(1): 66-70.
- [3] 李根. CSAMT 方法在长白山玄武岩覆盖区找矿中的应用[D]. 南昌: 东华理工大学, 2017.  
Li G. Application of geophysical prospecting method to study the geological structure of karst area in the Changbai Mountain [D]. Nanchang: East China University of Technology, 2017.
- [4] 屈旭钧, 董晓健. 综合物探方法在玄武岩覆盖区的应用——以三道砬子河—马鞍山剖面为例[J]. 吉林地质, 2017, 36(4): 18-21.  
Qu X J, Dong X J. Application of comprehensive geophysical method in basalt covered area: Take Sandaolazihe-Ma'anshan section as an example[J]. Jilin Geology, 2017, 36(4): 18-21.
- [5] 姚美娟, 陈建平, 籍进柱. 月球南海地区玄武岩厚度估算[J]. 地学前缘, 2019, 26(3): 271-281.  
Yao M J, Chen J P, Ji J Z. Thickness estimation of basalts in Mare Australe[J]. Earth Science Frontiers, 2019, 26(3): 271-281.
- [6] 王开燕, 刘丹, 柳俊茹, 等. 东北地区地壳结构研究[J]. 地球物理学进展, 2015, 30(1): 61-69.  
Wang K Y, Liu D, Liu J R, et al. Crustal seismic in the northeast of China[J]. Progress in Geophysics, 2015, 30(1): 61-69.
- [7] 崔笃信, 王庆良, 李克, 等. 长白山天池火山近期形变场演化过程分析[J]. 地球物理学报, 2007, 50(6): 1731-1739.  
Cui D X, Wang Q L, Li K, et al. Analysis of recent deformation of Changbaishan Tianchi volcano [J]. Chinese Journal of Geophysics, 2007, 50(6): 1731-1739.
- [8] 刘若新, 樊祺诚, 郑祥身, 等. 长白山天池火山的岩浆演化[J]. 中国科学(D辑), 1998, 28(3): 226-231.  
Liu R X, Fan Q C, Zheng X S, et al. Magmatic evolution of Tianchi volcano in Changbai Mountain[J]. Science in China (Series D), 1998, 28(3): 226-231. (in Chinese)
- [9] 赵亮. 辽宁桓仁—吉林通化地区中生代火山岩年代学研究[D]. 长春: 吉林大学, 2015.  
Zhao L. Study on the geochronology of Mesozoic volcanic rocks in Huanren, Liaoning and Tonghua, Jilin[D]. Changchun: Jilin University, 2015.
- [10] 滕大伟. 吉林白山市板石沟铁矿成矿要素及找矿预测研究[D]. 长春: 吉林大学, 2018.  
Teng D W. Ore-forming factors and metallogenic prediction of Baishigou iron in Baishan City, Jilin Province[D]. Changchun: Jilin University, 2018.
- [11] 韦选建, 罗先熔, 杨龙坤, 等. 吉林长白山玄武岩覆盖区地电化学找矿研究[J]. 矿产勘查, 2017, 8(3): 464-472.  
Wei X J, Luo X R, Yang L K, et al. Application of geo-electrochemical method for prospecting in basalt coverage area, Changbai Mountain, Jilin[J]. Mineral Exploration, 2017, 8(3): 464-472.
- [12] 佟智强. 吉林抚松四道砬子河岩组斜长角闪岩成因[D]. 长春: 吉林大学, 2018.  
Tong Z Q. The genesis of amphibolite of Sidaolazihe Formation in Fusong area, Jilin Province[D]. Changchun: Jilin University, 2018.
- [13] 潘波. 长白山天池火山晚更新世以来喷发序列研究[J]. 国际地震动态, 2017(11): 39-41.  
Pan B. Eruptive history of the Changbaishan Tianchi volcano, China/DPRK, since the Late Pleistocene[J]. Recent Developments in World Seismology, 2017(11): 39-41. (in Chinese)
- [14] 林琳. 长白山区矿泉水资源成因与开发调控的研究[D]. 长春: 吉林大学, 2016.  
Lin L. The research on the genesis and the exploitation control scheme of the mineral spring water resource in the Changbai Mountain district[D]. Changchun: Jilin University, 2016.
- [15] 丑述一. 吉南松树镇地区金及多金属矿综合信息预测[D]. 长春: 吉林大学, 2016.  
Chou S Y. Comprehensive information prediction of gold and polymetallic ore in Songshu Town area of south of Jilin Province[D]. Changchun: Jilin University, 2016.
- [16] 寿玲芳. 地面高精度磁测和 CSAMT 在淳安竹尖山多金属矿普查中的应用研究[D]. 杭州: 浙江大学, 2015.  
Shou L F. The application of the ground high-precision magnetic survey method and CSAMT on polymetallic deposit investigation in Zhujiangshan of Chun'an County[D]. Hangzhou: Zhejiang University, 2015.
- [17] 任伟龙, 宁君, 翟亮亮, 等. 综合地球物理勘探在八仙筒地区砂岩型铀矿勘查中的应用[J]. 东华理工大学学报(自然科学版), 2017, 40(3): 279-283.  
Ren W L, Ning J, Zhai L L, et al. Application of integrated geophysical prospecting to sandstone-type uranium deposits exploration in Baxiantong area[J]. Journal of East China University of Technology, 2017, 40(3): 279-283.
- [18] 刘波. 黑龙江省黑河市伊洛特河金矿床成矿地质条件及找矿潜力分析[D]. 长春: 吉林大学, 2016.  
Liu B. Analysis of metallogenic geological conditions and prospecting potential of the Yiluote-River gold deposit in Heihe, Heilongjiang Province[D]. Changchun: Jilin University, 2016.

(下转第 393 页/Continued on Page 393)

- 2003, 23(2): 27–31.
- [22] Song X Y, Zhou M F, Cao Z M, et al. Late Permian rifting of the South China Craton caused by the Emeishan mantle plume? [J]. *Journal of the Geological Society*, 2004, 161(5): 773–781.
- [23] 许志琴, 侯立玮, 王大可, 等. 中国西南部松潘-甘孜中生代碰撞型造山带的薄壳构造及前陆逆冲系[J]. *中国地质科学院院报*, 1990, 11(1): 126–129.
- Xu Z Q, Hou L W, Wang D K, et al. Thin-skinned tectonics and foreland thrust sheets in the Songpan-Garze orogenic belt in southwestern China [J]. *Bulletin of the Chinese Academy of Geological Sciences*, 1990, 11(1): 126–129.
- [24] 闫全人, 王宗起, 闫臻, 等. 碧口群火山岩的时代——SHRIMP 锆石 U-Pb 测年结果[J]. *地质通报*, 2003, 22(6): 456–458.
- Yan Q R, Wang Z Q, Yan Z, et al. Geochronology of the Bikou Group volcanic rocks: Newest results from SHRIMP zircon U-Pb dating [J]. *Geological Bulletin of China*, 2003, 22(6): 456–458.
- [25] Zhang H F, Zhang L, Harris N, et al. U-Pb zircon ages, geochemical and isotopic compositions of granitoids in Songpan-Garze fold belt, eastern Tibetan Plateau: Constraints on petrogenesis and tectonic evolution of the basement [J]. *Contributions to Mineralogy and Petrology*, 2006, 152(1): 75–88.
- [26] 崔加伟, 郑有业, 田立明, 等. 松潘-甘孜造山带北部岗龙地区巴颜喀拉山群地球化学特征和锆石 U-Pb 年代学特征: 对物源及构造环境的启示[J]. *矿物岩石地球化学通报*, 2016, 35(4): 719–742.
- Cui J W, Zhen Y Y, Tian L M, et al. Geochemical characteristics and zircon U-Pb ages of the Bayankalashan Group in the Ganglong area of the northern Songpan-Ganzi orogenic belt: Implication for its provenance and tectonic environment [J]. *Bulletin of Mineralogy, Petrology and Geochemistry*, 2016, 35(4): 719–742.
- [27] 田光昊, 侯红星, 邵兴坤, 等. 巴颜喀拉北部江日嘎玛花岗岩侵入岩地球化学特征及锆石年龄[J]. *地质找矿论丛*, 2022, 37(2): 207–215.
- Tian G H, Hou H X, Shao X K, et al. Geochemical characteristics and zircon age of Jiangri Gama intrusive granite in the North Bayan Hara area [J]. *Contributions to Geology and Mineral Resources Research*, 2022, 37(2): 207–215.
- [28] 秦利, 裴先治, 李佐臣, 等. 扬子板块西北缘碧口微地块新元古代大陆弧岩浆作用: 来自锆石 U-Pb 年代学、Hf 同位素和地球化学证据[J]. *地球科学与环境学报*, 2021, 43(4): 686–709.
- Qin L, Pei X Z, Li Z C, et al. Neoproterozoic continental arc magmatism in Bikou micro-block, the northwestern margin of Yangtze Plate, China: Evidence from Zircon U-Pb dating, Hf isotope and geochemistry [J]. *Journal of Earth Sciences and Environment*, 2021, 43(4): 686–709.
- [29] 付彦文, 张金明, 薛万文, 等. 东昆仑开木棋河东花岗闪长岩及其暗色微粒包体成因: 来自年代学和岩石地球化学的证据[J]. *矿物岩石*, 2021, 41(3): 84–94.
- Fu Y W, Zhang J M, Xue W W, et al. Genesis of the granodiorite and its dark micro-granular inclusions in the east Kaimuqihe area, East Kunlun: Evidence from chronology and petrogeochemistry [J]. *Journal of Mineralogy and Petrology*, 2021, 41(3): 84–94.
- [30] 田光昊, 侯红星, 邵兴坤, 等. 川西西康群酸性侵入岩地质、地球化学特征及找矿意义[J]. *现代矿业*, 2021, 37(12): 91–97.
- Tian G H, Hou H X, Shao X K, et al. Geological and geochemical characteristics and prospecting significance of acid intrusive rocks in Xikang Group, western Sichuan [J]. *Modern Mining*, 2021, 37(12): 91–97.
- [19] 张宏嘉. 本溪-集安地区三维地质结构重磁电综合解释[D]. 长春: 吉林大学, 2013.
- Zhang H J. Integrated geophysical interpretation of 3D geological structure of Benxi-Ji'an metallogenic belt [D]. Changchun: Jilin University, 2013.
- [20] 吴占彩, 贺克升. 重、磁、电在地热勘查中的应用[J]. *中国资源综合利用*, 2017, 35(9): 132–134.
- Wu Z C, He K S. Application of gravity, magnetism and electricity in geothermal prospecting [J]. *China Resources Comprehensive Utilization*, 2017, 35(9): 132–134.
- [21] 李玉芹, 王学贞, 王振生, 等. 大兴安岭东坡甘珠尔庙银多金属矿地质特征及找矿方向[J]. *矿物学报*, 2011, 31(3): 610–614.
- Li Y Q, Wang X Z, Wang Z S, et al. A tentative study of the geology and ore potentiality of Ganzhuermiao Ag polymetallic deposit, east-side hill of Daxinganling, China [J]. *Acta Mineralogica Sinica*, 2011, 31(3): 610–614.

(上接第 496 页/Continued from Page 496)