第 59 卷 第 5 期
2026 年（总 249 期）

西 北 地 质
NORTHWESTERN GEOLOGY

Vol. 59 No. 5
2026(Sum249)



引文格式：杨骄，郎兴海，董维财，等. 北祁连松树南沟金矿区地面磁异常特征及找矿方向[J]. 西北地质，2026，59(5)：329−342. DOI：10.12401/j.nwg.2026049

Citation：YANG Jiao，LANG Xinghai，DONG Weicai，et al. Characteristics of Ground Magnetic Anomalies and Prospecting Direction in the Songshunangou Gold Deposit，North Qilian Orogenic Belt[J]. Northwestern Geology，2026，59(5)：329−342. DOI：10.12401/j.nwg.2026049

北祁连松树南沟金矿区地面磁异常特征及找矿方向

杨骄[1]，郎兴海[1,*]，董维财[2,*]，罗超[2]，王旭辉[1]，叶紫枫[1]，
高焕丽[1]，李善财[3]，王兆帅[1]，王登科[2]

（1. 成都理工大学地球与行星科学学院，四川 成都 610059；2. 四川鑫顺矿业股份有限公司，四川 成都 610041；
3. 青海省有色第二地质勘查院，青海 西宁 810007）

摘 要：松树南沟金矿区位于北祁连造山带中段南缘，成矿地质条件优越，已发现东矿床和西矿床，达到大型规模。矿区找矿潜力巨大，但找矿方向需要进一步厘定，为下一步找矿工作部署提供科学依据。基于此，笔者系统总结了松树南沟金矿区岩矿石物性特征，认为区内正磁异常与成矿斑岩（晚奥陶世石英闪长斑岩）和赋矿火山岩（上奥陶统扣门子组玄武安山岩）密切相关；在此基础上，采用化极、延拓等方法对矿区地面磁测数据进行处理，圈定出 7 处正磁异常区（T1、T2、T3、T4、T5、T6 和 T7），其中 T1 异常区与西矿床位置吻合。对 T2 和 T3 两处磁异常区开展野外查证，采集地面露头样品分析结果显示，其 Au 品位分别为 0.07×10^{-6} ～ 1.65×10^{-6} 和 0.10×10^{-6} ～0.29×10^{-6}；在 T2 异常区的探槽工程，揭露最高 Au 品位达 0.54×10^{-6}。研究结果表明，区内正磁异常区具有良好的成矿地质条件和找矿前景，可作为下一步找矿勘查的重点靶区。

关键词：松树南沟；北祁连；斑岩型矿床；地面磁测；找矿方向

中图分类号：P631 **文献标志码**：A **文章编号**：1009-6248(2026)05-0329-14

Characteristics of Ground Magnetic Anomalies and Prospecting Direction in the Songshunangou Gold Deposit, North Qilian Orogenic Belt

YANG Jiao[1], LANG Xinghai[1,*], DONG Weicai[2,*], LUO Chao[2], WANG Xuhui[1], YE Zifeng[1],
GAO Huanli[1], LI Shancai[3], WANG Zhaoshuai[1], WANG Dengke[2]

（1. College of Earth and Planetary Sciences, Chengdu University of Technology, Chengdu 610059, Sichuan, China；
2. Sichuan Xinshun Mining Co., LTD, Chengdu 610041, Sichuan, China；3. Qinghai Second Nonferrous Geological

收稿日期：2026-01-08；**修回日期**：2026-06-17；**责任编辑**：吕鹏瑞

基金项目：深地国家科技重大专项（2025ZD1006208-02），国家自然科学基金（42572103），威海市能源资源调查评价重点实验室开放课题（LDKF-2023WH-04），新一轮找矿突破战略行动科技支撑项目（ZKKJ202405、ZKKJ202427），四川省自然科学基金（2024NSFSC1954、2025ZNSFSC1196），物化探所中央级公益性科研院所基本科研业务费专项资金资助项目（AS2022P03），成都理工大学珠峰科学研究计划（2020ZF11407），青海省北祁连成矿带金−铜−铅−锌−萤石矿成矿规律研究（scxy-zb2026-004）联合资助。

作者简介：杨骄（2003−），男，硕士研究生，地质学专业。E−mail：wangyiyj2021@163.com。

*** 通讯作者**：郎兴海（1982−），男，教授，主要从事矿床学、矿产普查与勘探教学和研究工作。E−mail：langxinghai@126.com。
董维财（1980−），男，高级工程师，主要从事地质学、矿业工程研究工作。E−mail：232454889@qq.com。

© Editorial Office of *Northwestern Geology*. OA under CC BY-NC-ND

Exploration Institute, Xining 810007, Qinghai, China）

Abstract: The Songshunangou gold deposit is located on the southern margin of the central segment of the North Qilian Orogenic Belt, characterized by excellent metallogenic geological conditions. The eastern and western deposits have been discovered within the mining area, reaching large-scale deposit status. Although the area exhibits significant prospecting potential, the exploration direction requires further clarification to provide a scientific basis for the next phase of exploration planning. Based on this, this paper systematically summarizes the physical properties of rocks and ores in the Songshunangou gold deposit. It is concluded that the positive magnetic anomalies in the area are closely associated with the mineralized porphyry (Late Ordovician quartz diorite porphyry) and the ore-hosting volcanic rocks (basaltic andesite of the Upper Ordovician Koumenzi Formation). Ground magnetic survey data from the mining area were processed using methods such as reduction-to-the-pole and upward continuation, delineating seven positive magnetic anomaly zones (T1, T2, T3, T4, T5, T6, and T7). Among these, the T1 anomaly zone coincides with the location of the Western Deposit. Field verification was conducted on the T2 and T3 magnetic anomaly zones. Analysis of surface outcrop samples collected during verification showed gold grades of 0.07–1.65 g/t and 0.10 – 0.29 g/t, respectively. Trenching work carried out in the T2 anomaly zone revealed a maximum gold grade of 0.54 g/t. The results indicate that the positive magnetic anomaly zones possess favorable metallogenic geological conditions and promising prospecting potential, making them key target areas for further exploration.

Keywords: Songshunangou; North Qilian; porphyry deposit; ground magnetic survey; prospecting direction

斑岩型矿床作为全球金属矿产的重要来源，提供了全球约 75% 的铜、90% 的钼及 20% 的金，具有重要的经济价值，其成矿作用常与中酸性斑岩体密切相关，主要发育于俯冲相关的岩浆弧或大陆碰撞造山带（张寿庭等，2011；吕鹏瑞等，2020；钟世华等，2025）。特提斯成矿域是全球三大主要成矿域之一，具有形成斑岩型矿床的良好地质条件（吴福元等，2020；Wang et al.，2025；钟世华等，2025）。北祁连造山带位于特提斯成矿域东段的青藏高原北东缘，呈 NW−SE 向延伸，是中国西部重要的铜金多金属成矿带，构成以铜、金、钨、钼为主的金属成矿系列（丛智超，2017）。目前在该成矿带已发现松树南沟金矿、浪力克铜矿、车路沟金矿等斑岩型矿床（张翔等，2023；王旭辉等，2025），红沟铜矿、石居里铜矿、白银厂铜矿等火山成因块状硫化物型矿床（Xu et al.，2024），以及小柳沟钨钼矿、西柳沟钨钼矿等矽卡岩型矿床（刘晓煌等，2007；赵辛敏等，2014；Wang et al.，2020；图 1b）。

松树南沟金矿区位于北祁连造山带中段南缘，前人在松树南沟金矿区开展了初步的研究工作。在矿床成因类型方面，Lang et al.（2024）、王旭辉等（2025）通过详细的野外调查和系统岩相学鉴定，确定西矿床为斑岩型金矿床，东矿床为中硫化型浅成低温热液金矿床，二者构成了一个斑岩−浅成低温热液成矿系统。前人研究表明，松树南沟金矿是北祁连造山带中一个达大型规模的斑岩−浅成低温热液型矿床，形成于与北祁连洋俯冲有关的岩浆弧环境中，是特提斯成矿域最古老的斑岩−浅成低温热液成矿系统（Lang et al.，2024；王旭辉等，2025），该矿区具有良好的斑岩−浅成低温热液成矿的地质条件，有望成为北祁连造山带内重要的金资源基地（王旭辉等，2025）。尽管矿区找矿潜力巨大，但找矿方向需要进一步厘定，为矿区下一步找矿工作部署提供科学依据。为此，笔者在前人已有工作基础之上，综合分析矿区地面磁测数据，圈定磁异常区，并优选磁异常区进行查证，研究成果将指明矿区下一步的主要找矿方向，科技支撑矿区的勘查工作部署。

1 地质背景

北祁连造山带主体呈 NW−SE 向延伸，其北界受控于龙首山断裂，与阿拉善地块相接；南部受控于中祁连北缘断裂，与中祁连地块相连；北西侧被阿尔金断裂所切，与塔里木地块相邻（Shao et al.，2019；Sun et al.，2019；Zhang et al.，2021；党子豪等，2026；图 1）。北祁连造山带内构造以褶皱构造及断裂构造为主。其中，褶皱构造主要发育有托莱山复式背斜和冷龙岭复

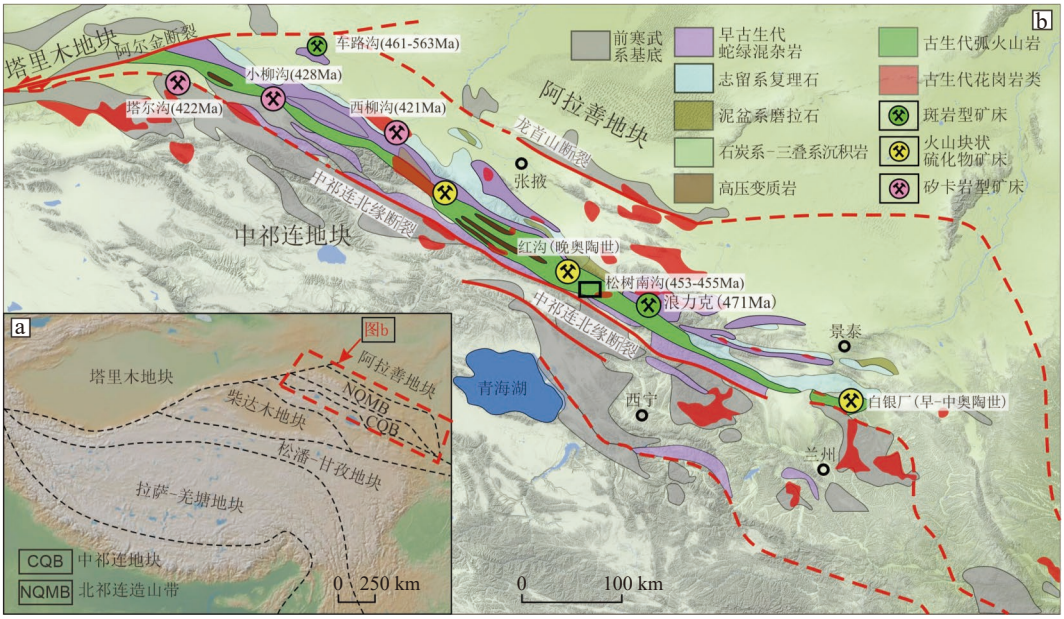


图1　北祁连造山带大地构造位置图(据 Lang et al.，2024 修改)

Fig. 1　Geological map of the northern Qilian orogenic belt

式向斜(谭金生等, 2024; Yang et al., 2024)。北祁连造山带发育 NW 向主导的断裂体系, 主要由龙首山断裂带、中祁连北缘断裂带和阿尔金断裂带三大构造单元构成(何磊等, 2024; 图 1b), 其中, 前两者呈 NWW 向展布, 后者则以 SWW 向切割前两个断裂构造(陈宣华等, 2019; 李冰, 2020)。

北祁连造山带出露的地层主要由前寒武系基底、古生界地层及中生界地层组成(图 1b)。前寒武系基底包含古元古界北大河群、古元古界朱龙观群、中元古界镜铁山群、新元古界白羊沟群与大柳沟群 4 套岩系。古生界地层以火山–沉积岩为主, 变质岩较少, 主要包括早古生代弧火山岩、蛇绿混杂岩带、志留系泥盆系、石炭系 4 个地层单元(Song et al., 2013; 王旭辉等, 2025)。中生界地层主要为三叠系, 出露于北祁连造山带北缘(图 1b)。侵入岩类型主要为花岗质岩石, 侵位时间主要为早古生代, 多分布于拉东沟、苏油沟和西岔沟等地区(Zheng et al., 2017; Yang et al., 2018; 张丽琪, 2019)。

2　矿区地质特征

松树南沟金矿区位于北祁连造山带中段南缘(Lang et al., 2024; Wang et al., 2025; 图 1b)。矿区内出露地层由老到新依次为下元古界托赖岩群、上奥陶统扣门子组、三叠系窑沟群和第四系(图 2)。下元古界托赖岩群主要分布于矿区南部, 出露面积约为 5 km^2(图 2), 地层岩性主要为含眼球状长石片麻岩及黑云斜长片麻岩等。上奥陶统扣门子组是矿区最主要地层, 出露于矿区中部, 出露面积约为 22 km^2, 地层岩性主要为玄武安山岩、晶屑凝灰岩、流纹质凝灰岩、火山角砾岩夹集块岩等。三叠系窑沟群位于矿区北部, 出露面积约为 1 km^2(图 2), 该地层出露的岩性主要为长石石英砂岩。第四系在矿区内广泛分布(图 2), 主要为坡积、冲积、洪积、残积和冰水堆积物等。矿区主要的赋矿围岩为玄武安山岩、晶屑凝灰岩和流纹质凝灰岩, 成岩时代为晚奥陶世(～457.8 Ma; Lang et al., 2024)。

矿区内岩浆活动频繁, 侵入岩发育, 主要形成于寒武纪、晚奥陶世和晚志留世 3 个时期, 且展布受区域构造控制。寒武纪石英闪长岩主要分布于矿区南部(图 2), 呈 NW 向延伸, 主要以岩脉、岩墙的形式产出; 晚奥陶世石英闪长斑岩主要分布于矿区北东部(图 2), 是西矿床的含矿斑岩, 主要以岩株、岩脉的形式产出; 晚奥陶世花岗闪长斑岩主要分布于矿区北东部(图 2), 整体沿 NW 向展布; 晚奥陶世闪长玢岩主要分布于矿区北西部及北东部(图 2); 晚志留世石英钠长斑岩呈岩脉状分布于矿区北西部(图 2)。此外, 矿区南部零星分布有镁铁质–超镁铁质蛇纹岩。

松树南沟金矿区发育东、西两个金矿床, 二者在空间上相距约为 2 km, 共同构成一个晚奥陶世(约 455 Ma)的斑岩–中硫化型浅成低温热液金矿系统(Lang et al.,

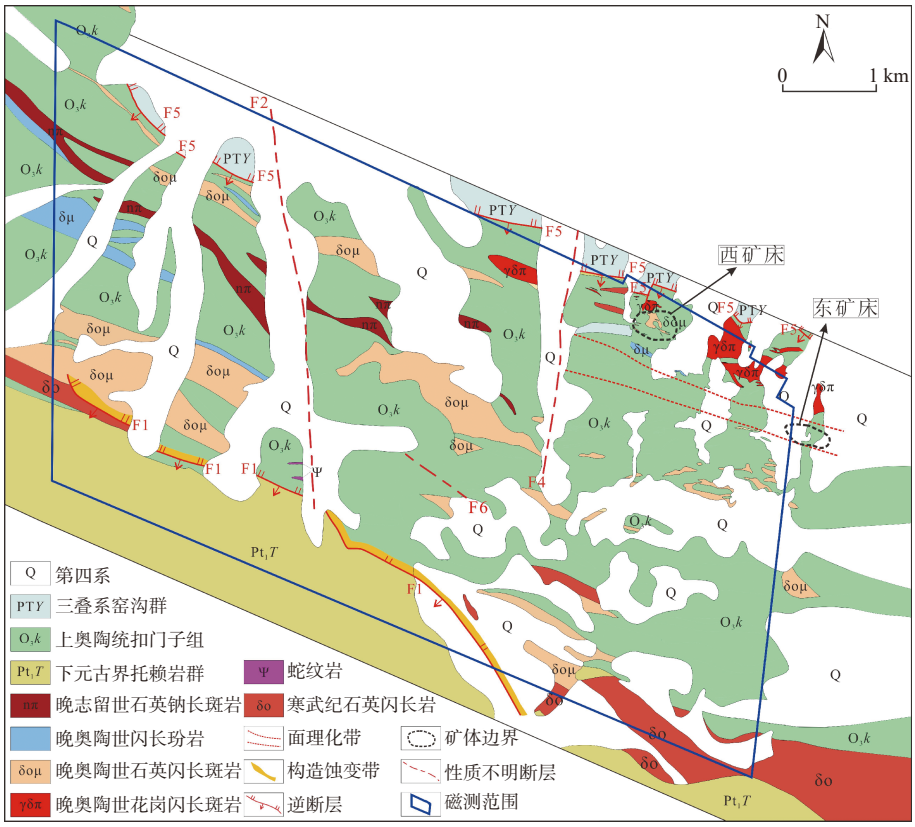


图2 青海省松树南沟金矿矿区地质简图(据王登科等，2017修改)

Fig. 2 Geological map of the Songshunangou gold deposit, Qinghai province

2024)。其中，西矿床为斑岩型金矿床，矿体主要赋存于晚奥陶世石英闪长斑岩及其与上奥陶统扣门子组玄武安山岩的接触带中(图3)，呈椭圆状，平均垂直延伸约为300 m，达大型规模。热液蚀变包括钾化、青磐岩化和绢云母–绿泥石化。金矿化主要与钾化蚀变密切相关，金属矿物以黄铜矿、斑铜矿、自然金、磁铁矿和黄铁矿为主。矿区内发育磁铁矿脉、绿帘石脉、石英–黄铜矿–斑铜矿脉、石英–黄铜矿–黄铁矿脉、黄铁矿脉、方解石脉、碳酸盐–石英–多金属脉等7种脉体。金主要以自然金形式赋存于石英–黄铜矿–斑铜矿脉中，少量为黄铁矿中的不可见金。东矿床为中硫化型浅成低温热液金矿床，矿体主要产于上奥陶统扣门子组晶屑凝灰岩、流纹质凝灰岩和玄武安山岩中(图3)，受NWW向面理构造控制，呈脉状或透镜状产出。热液蚀变以绢云母–绿泥石化为主，局部发育绢英岩化。金属矿物组合以方铅矿、低铁闪锌矿、黄铁矿、黄铜矿、黝铜矿、砷黝铜矿、自然金及少量银金矿为特征。矿床内发育的脉体有黄铁矿脉、方解石脉、碳酸盐–石英–多金属脉、碳酸盐–石英–黄铁矿脉，含金脉体主要为碳酸盐–石英–多金属脉和碳酸盐–石英–黄铁矿脉中，金多与石英和锰方解石共生(图4)。

3 松树南沟金矿区地面磁测数据采集

3.1 物性参数

矿区岩矿石物性参数的测定可以为异常的推断与解释提供地球物理依据(刘天佑，2007；陈大磊等，2022)。对研究区野外采集的7种不同岩性(累计404件岩矿石)的物性特征进行整理与统计(表1)。

矿区内晶屑凝灰岩、片麻岩、砂岩等岩石均变现为弱磁性或者无磁性，磁化率算术平均值小于$400\times10^{-6}\times4\pi$ SI。这些岩石具有较小的磁化率，一般不会引起磁异常，其分布区域多为正常背景场。矿区玄武安山岩(磁铁矿化)、玄武安山岩(绢云母–绿泥石化)、石英闪长斑岩的磁性较强，磁化率算术平均值均大于$1\,000\times10^{-6}\times4\pi$ SI。玄武安山岩在矿区各类岩矿中磁性最强，尤其是发育磁铁矿化的玄武安山岩(表1)。

结合矿区地质特征分析，矿区上奥陶统扣门子组玄武安山岩由于本身含有少量的磁铁矿副矿物，使岩石具有弱磁性；在玄武安山岩与侵入岩接触带附近发

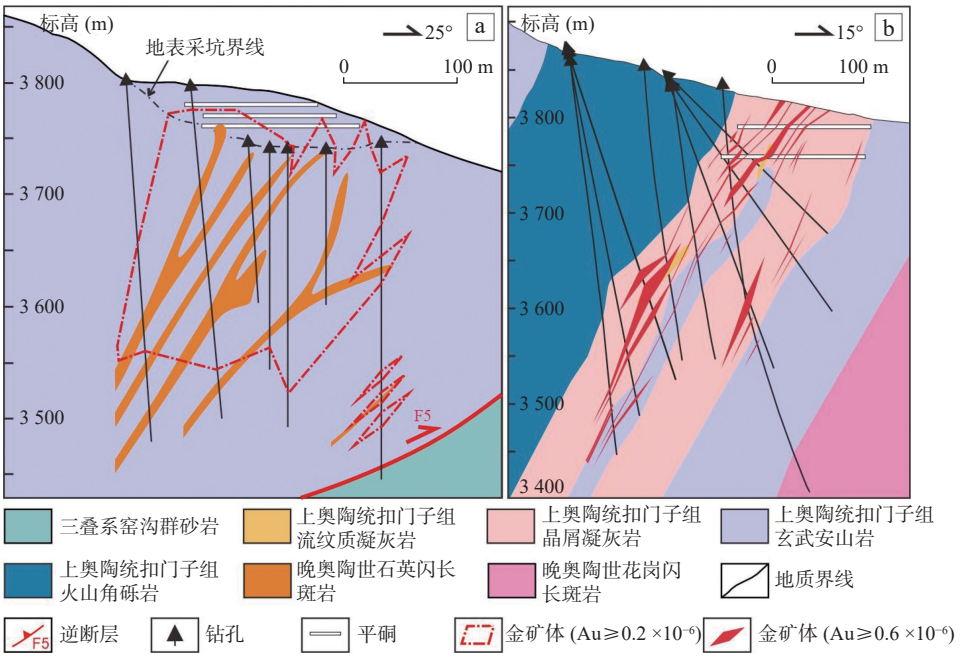
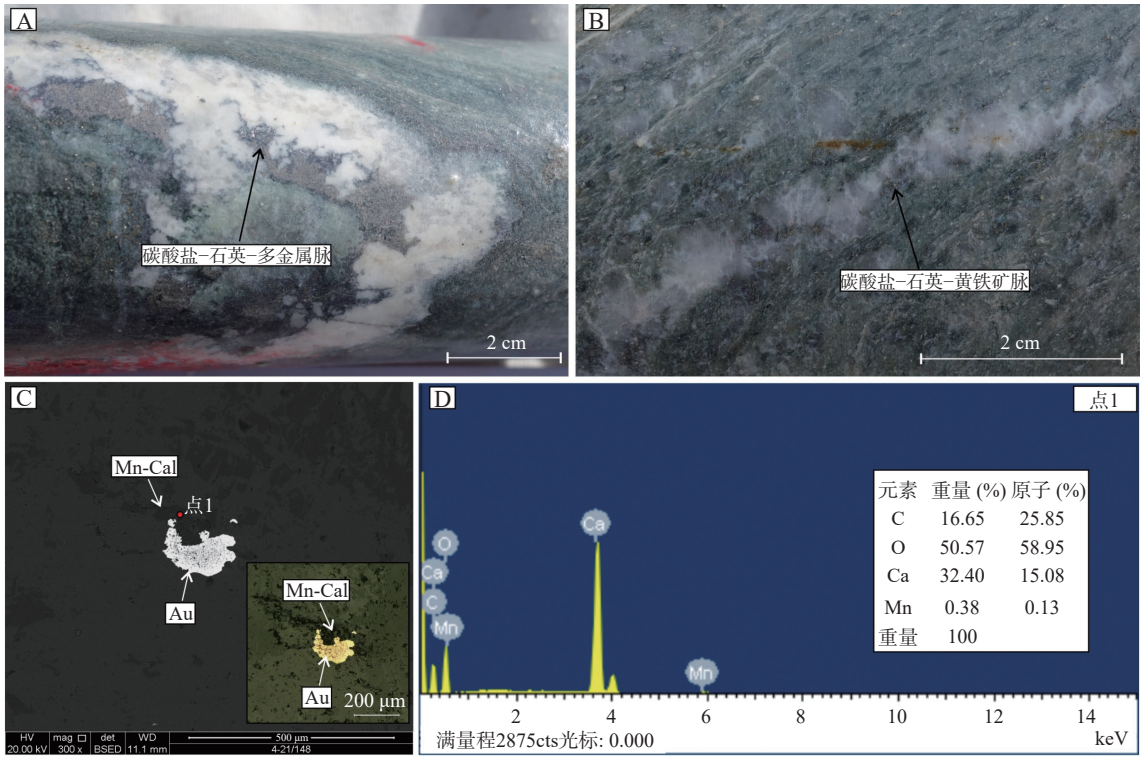


图3　松树南沟金矿区西矿床(a)和东矿床(b)矿体地质剖面图(据王旭辉等，2025 修改)

Fig. 3　Geological profile of the orebodies in (a) the western deposit and (b) the eastern deposit of the Songshunangou gold deposit



a.晶屑凝灰岩中的碳酸盐–石英–多金属脉；b.晶屑凝灰岩中的碳酸盐–石英–黄铁矿脉；c.自然金与锰方解石共生；d.锰方解石能谱图

图4　松树南沟金矿东矿床床含金脉体组构特征

Fig. 4　Fabric characteristics of gold-bearing veins in the eastern deposit of the Songshunangou gold deposit

育有强烈钾化蚀变，形成了大量的脉状、浸染状的热液磁铁矿，显著提升了玄武安山岩的磁性。此外，石英闪长斑岩由于普遍发育钾化，富含热液磁铁矿，因此也具有较高的磁性。

综上所述，通过系统开展地面磁法测量，寻找分布于上奥陶统扣门子组玄武安山岩和石英闪长斑岩

表 1 松树南沟金矿区岩石磁性参数统计表

Tab. 1 Statistical table of magnetic property parameters of rocks from the Songshunangou gold deposit

岩性	数量(件)	磁化率K($10^{-6}\times 4\pi$ SI)	
		范围值	算术平均值
玄武安山岩(磁铁矿化)	143	623～60 203	15 021
玄武安山岩(绢云母-绿泥石化)	38	89～6 833	1 645
玄武安山岩	105	10～9 168	1 311
石英闪长斑岩	26	107～1 573	1 042
花岗闪长斑岩	37	350～1 600	597
晶屑凝灰岩	21	23～1 473	305
片麻岩	9	115～187	153
砂岩	24	0～509	140

中的高值正磁异常区,可为矿区金矿床的勘查提供有效的地球物理找矿标志。

3.2 野外测量工作部署

松树南沟金矿区地面磁测工作采用重庆奔腾数控技术研究所生产的 WCZ-1 型质子磁力仪,对地面磁测数据进行面积、质量检查和日变观测,并按要求对观测数据做日变、高度、纬度和总基改正。其中,高度改正从总基点高程(3 800 m)起算,每向上升高 1 m,总场强度 T 改正值+0.025 527 594 nT;纬度改正以总基点为零值,每向北移动 1 m,T 改正值−0.025 527 594 nT。地面磁测工作的总精度为± 3.59 nT,满足设计及规范要求(<± 5 nT)。矿区地面磁测工作的基本网度为 100 m × 20 m,测线方位为 207°,东、西矿床之间的测区测网网度加密至 50 m × 20 m(图 5)。本次磁测数据处理使用的主要软件为北京金浩林勘探技术有限公司开发的浩拓地球物理软件(版本号:3.9.3.0),可以用于磁测工作中的数据处理与解释、图件编制等各个阶段。

4 异常圈定

4.1 磁异常分布规律

松树南沟金矿区 ΔT 等值线异常平面图(图 6)显示,全区磁异常值多为 100 nT,对应地表出露的弱磁或者无磁性的晶屑凝灰岩、片麻岩、砂岩等。矿区磁场变化比较复杂,主要表现为沿 NW-SE 向及近 EW 向展布的条带状异常,幅值变化为−800～1 000 nT。矿区磁异常展布方向与区内构造走向基本一致,表明区域构造不仅控制着地表矿化露头的分布,更可能作为深部成矿流体的运移通道。根据研究区物性特征选择的磁化倾角和磁化偏角分别为 56°和 −1°,对实测的磁异常数据进行化极处理,消除斜磁异常的影响后(图 7),对比化极前 ΔT 磁异常图发现磁异常略向北移动,部分磁异常消失,形态未发生明显变化,与本区构造对应较好。

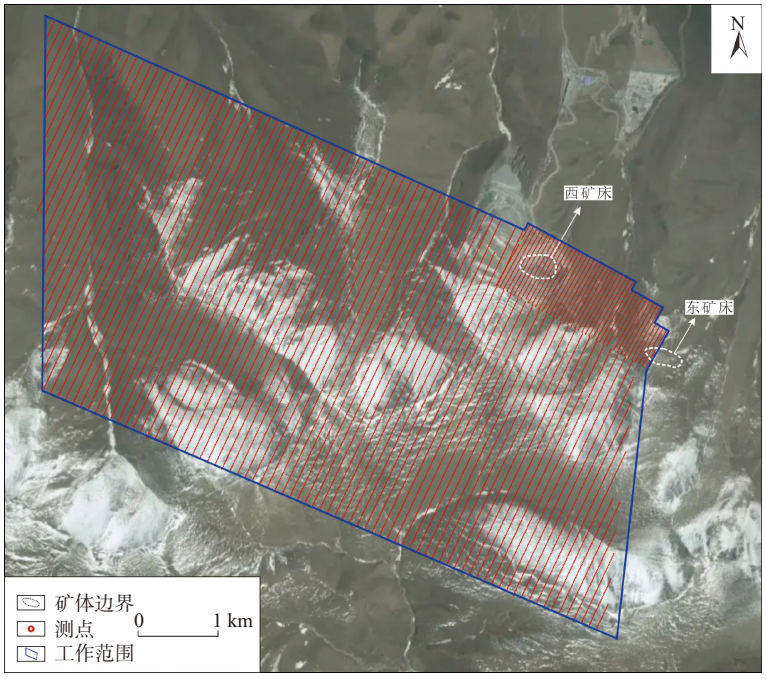


图5 松树南沟金矿区地面磁测工作范围图

Fig. 5 Ground magnetic survey area map of the Songshunangou gold deposit

松树南沟金矿区西矿床磁异常 ΔT 场值约为 400～800 nT, 异常呈近等轴状, 与西矿床矿体空间展布呈嵌套关系, 异常中心分布于玄武安山岩及石英闪长斑岩接触带附近。因此, 根据地面磁测数据及矿区地质特征, 选择 400 nT 为异常下限, 考虑异常具有一定规模、形态相对完整等条件, 在松树南沟金矿区共圈出 ΔT 磁异常 7 处, 分别为 T1、T2、T3、T4、T5、T6 和 T7 异常区, 且 T1 异常区位于西矿床范围内(图 6)。

4.2　磁异常特征

为了进一步研究矿区磁异常特征, 对磁测数据进行向上延拓处理(图 8、图 9)。向上延拓处理之后, 随着上延深度的增加, 磁异常幅值总体随着深度的加深, 异常值变小, 范围扩大, 部分异常消失, 由此推断磁性体埋深较浅, 体积小。基于松树南沟金矿区地面磁测异常图以及向上延拓 100 m 后 ΔT 等值线异常图(图 8、图 10), 对矿区磁异常特征进行分析。

T1 异常与西矿床范围叠合较好, 异常面积为 0.08 km^2, 东西长为 190 m, 南北长为 187 m(图 10)。异常形态规则, 峰值高、梯度陡, ΔT 场值极大值为 878.2 nT(图 6)。ΔT 上延 100 m, 异常区域变小, 说明该异常区为浅部磁性地质体引起(图 7)。异常区内主要出露上奥陶统扣门子组玄武安山岩及晚奥陶世石英闪长斑岩(图 10)。该异常为矿致异常, 在异常区上奥陶统扣门子组玄武安山岩与晚奥陶世石英闪长斑岩接触带附近发育有强烈钾化蚀变, 形成了大量的脉状、浸染状的热液磁铁矿, 从而引起该正磁异常。

T2 异常分布于矿区南西侧, 异常面积为 0.12 km^2, 东西长为 691 m, 南北长为 301 m(图 10)。异常走向 SE, 呈条带状, 峰值高、梯度陡, ΔT 场值极大值为 1 706 nT(图 6)。ΔT 上延 100 m 后, 异常消失, 说明该异常区为浅部磁性地质体引起(图 8)。异常区主要出露晚奥陶世石英闪长斑岩, 断层 F1 沿异常南侧通过, 断层走向与异常走向基本一致(图 10)。从延拓的结果可以看出, 此处磁异常地质体埋深较深, 规模较大, 地表测得异常区出露的石英闪长斑岩磁化率为 $1\,000\times10^{-6}\times4\pi$～$1\,500\times10^{-6}\times4\pi$ SI。因此, 推测该正磁异常可能与发育钾化蚀变的晚奥陶世石英闪长斑岩有关。

T3 异常分布于测区中南部, 异常面积为 0.77 km^2, 东西长为 1 270 m, 南北长为 749 m(图 10)。异常整体走向 NW, 呈长条带形, 峰值高、梯度缓, ΔT 场值极大值为 3 572 nT(图 6)。ΔT 上延 100 m 后, 异常表现为 NW 向延伸的正磁异常, 说明该异常为深部磁性地质体引起(图 8)。异常区地表主要出露上奥陶统扣门子组玄武安山岩及下元古界托赖岩群, 其北侧发育呈透镜状侵位的蛇纹岩体。异常区内石英闪长斑岩岩体沿 NW 向展布, 与异常走向一致。由延拓结果可知引

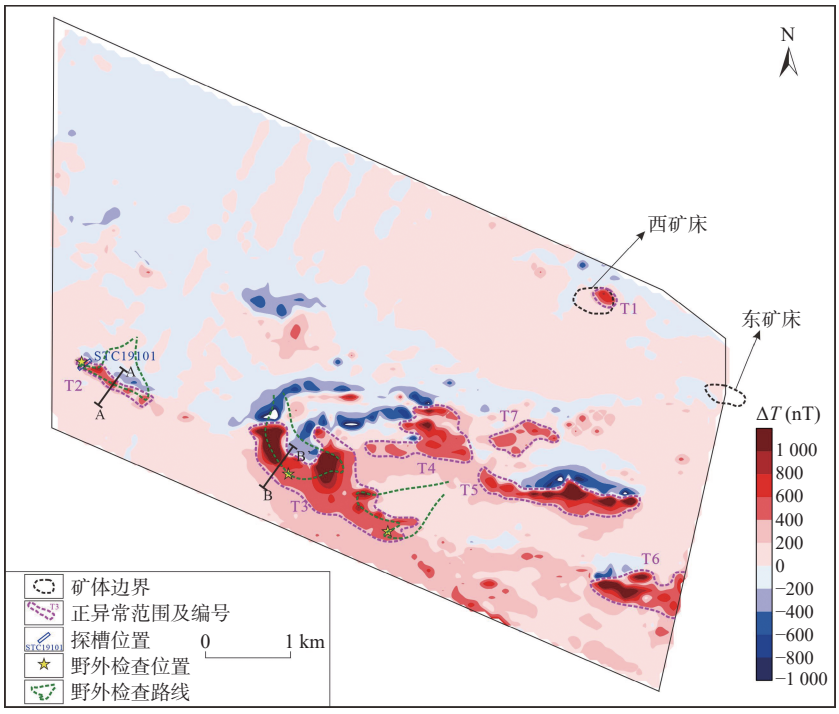


图6　松树南沟金矿区 ΔT 等值线异常平面图

Fig. 6　ΔT Contour anomaly map of the Songshunangou gold deposit

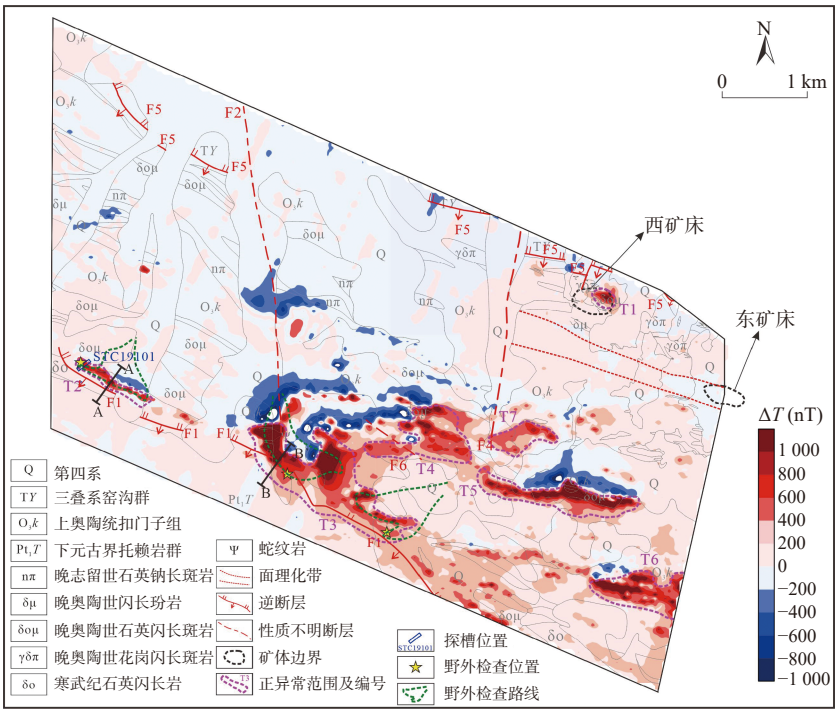


图7 松树南沟金矿区 ΔT 化极等值线异常平面图

Fig. 7 ΔT Reduction-to-the-Pole contour anomaly map of the Songshunangou gold deposit

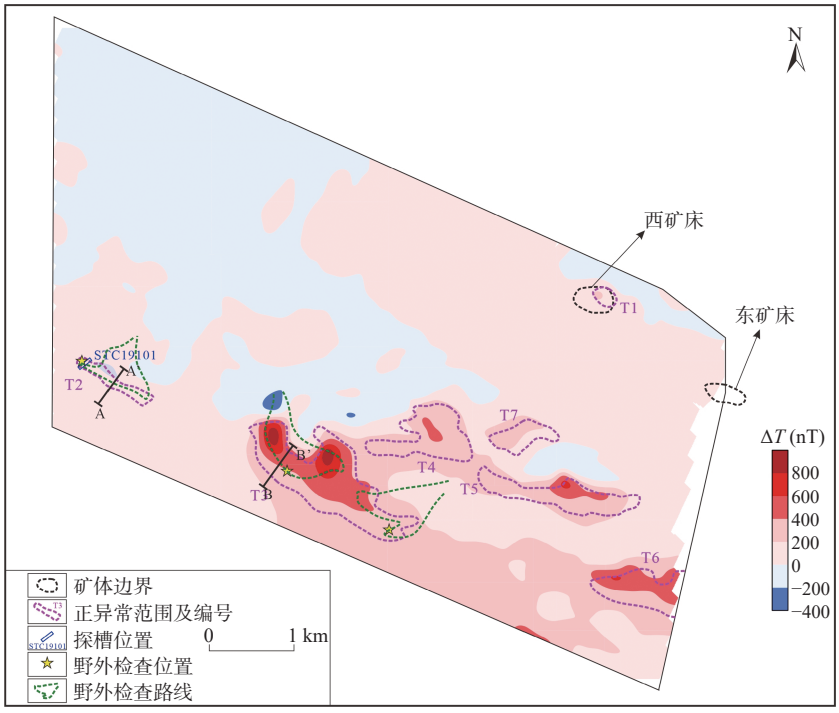


图8 松树南沟金矿区向上延拓 100m 后 ΔT 等值线异常图

Fig. 8 ΔT Contour anomaly map after 100m upward continuation of the Songshunangou gold deposit

起异常的磁性地质体埋深较深，揭示异常区深部可能存在缓倾伏的石英闪长斑岩。因此，推测 T3 异常可能为深部石英闪长斑岩引起的正异常。

T4 异常分布于矿区中部，异常面积为 0.29 km^2，东西长为 643 m，南北长为 607 m(图 10)。异常呈不规则状，峰值高、梯度缓，ΔT 场值极大值为 1 287 nT(图 6)。ΔT 上延 100 m 后，异常变为 NW 向的正异常，说明该异常为中深部的磁性地质体引起(图 8)。异常区主要

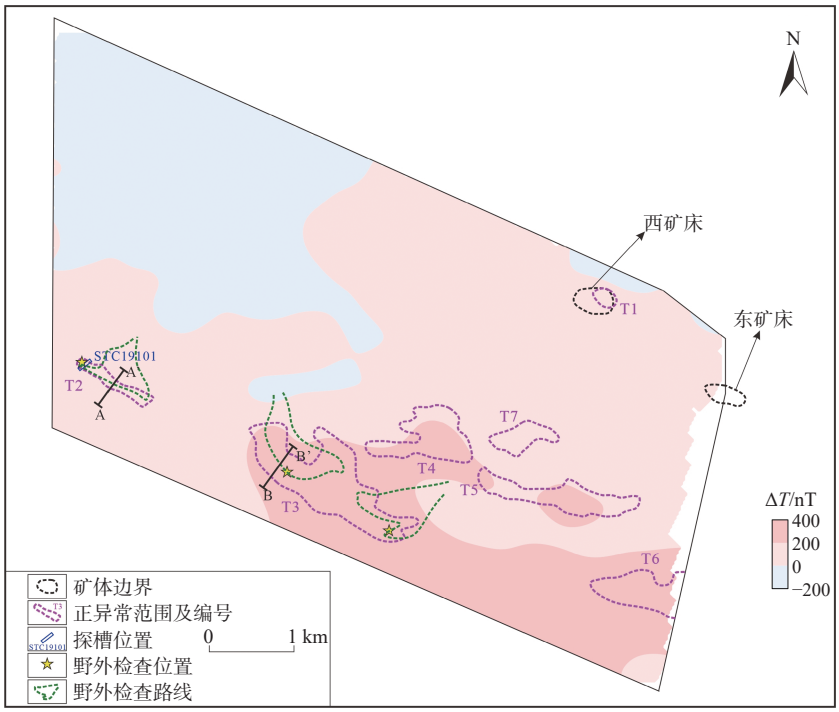


图9　松树南沟金矿区向上延拓 200m 后 ΔT 等值线异常图

Fig. 9　ΔT Contour anomaly map after 200m upward continuation of the Songshunangou gold deposit

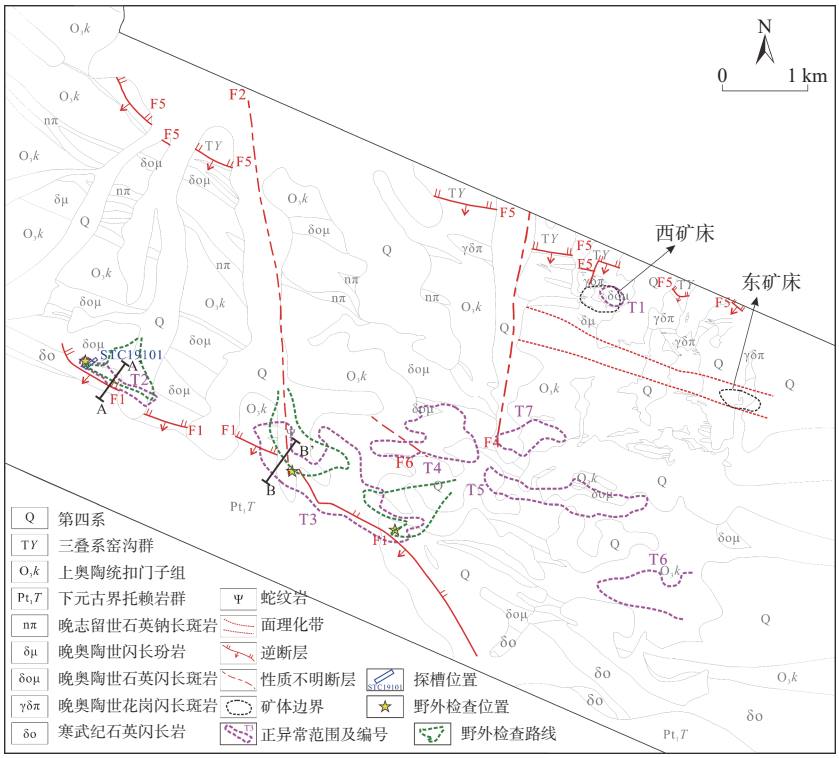


图10　松树南沟金矿区地面磁测异常图

Fig. 10　Ground magnetic survey anomaly map of the Songshunangou gold deposit

出露上奥陶统扣门子组玄武安山岩及晚奥陶世石英闪长斑岩, 引起异常的磁性地质体埋深较深, 推测该正磁异常可能由发育磁铁矿化的上奥陶统扣门子组玄武安山岩及钾化蚀变的晚奥陶世石英闪长斑岩共同引起。

T5 异常分布于矿区中东部, 异常面积为 0.45 km^2, 东

西长为 1 454 m, 南北长为 357 m(图 10), 呈近 EW 向条带状展布, 峰值高、梯度陡, ΔT 场值极大值为 4 475 nT(图 6)。ΔT 上延 100 m 后, 异常形态趋于规整, 变为近 EW 向正异常, 说明该异常可能由中深部磁性地质体引起(图 8)。异常区出露上奥陶统扣门子组玄武安山岩与晚奥陶世石英闪长斑岩, 异常走向与岩层走向一致, 埋深较深(图 10)。因此, 推测该异常可能为发育磁铁矿化的上奥陶统扣门子组玄武安山岩及钾化蚀变的晚奥陶世石英闪长斑岩共同引起。

T6 异常分布于测区南东部, 异常面积为 0.38 km^2, 东西长为 876 m, 南北长为 841 m(图 10)。异常呈近 EW 向条带状展布, 峰值高、梯度缓, ΔT 场值极大值为 1 903 nT(图 6)。从延拓的结果可以看出, 磁异常地质体埋深较深, 规模较大(图 8)。异常区主要分布于上奥陶统扣门子组玄武安山岩中(图 10), 由于磁异常地质体埋藏深度较深, 规模较大, 因此推测该正异常可能由发育磁铁矿化的上奥陶统扣门子组玄武安山岩和深部发育钾化蚀变的晚奥陶世石英闪长斑岩共同引起。

T7 异常分布于 T4 异常东部, 异常面积约为 0.11 km^2, 东西长为 470 m, 南北长为 200 m(图 10)。异常不规则状, 峰值中等, 梯度缓, ΔT 场值极大值为 735 nT(图 6)。ΔT 上延 100 m 后, 异常消失, 说明该异常由浅部磁性地质体引起(图 8)。区内主要出露上奥陶统扣门子组玄武安山岩, 推测该异常与此岩性有关。

4.3 2.5D 人机交互反演

2.5D 人机交互拟合法以二维半多边形截面水平棱柱体为场源初始模型, 基于先验地质资料、物性特征及半定量解释结果设定初始参数, 通过人机交互调整与计算机自动迭代反演相结合的方式, 有效实现对隐伏磁性地质体赋存特征的精细推断(范正国等, 2010; 刘晓峰等, 2017)。笔者在 T2 和 T3 异常区各选择 1 条剖面(图 10)进行 2.5D 人机交互反演。反演结果(图 11、图 12)显示, 磁性体主要呈 NE 走向, 埋深较浅; T2 异常区埋深为 5.35 m, 规模较小; T3 异常区埋深为 41.7m, 规模较大。

5 异常验证与找矿方向

综合上述对地面磁测异常的解释, 推测测区内具有高磁性的石英闪长斑岩和玄武安山岩可能为矿化岩体。测区南部磁异常展布方向与区内 F1 断层走向基本一致, 受 F1 断层控制, 且异常强烈, 该断层可能作为深部成矿流体的运移通道。因此, 为进一步探明研究区内引起异常的原因和人机交互反演结果的正确性, 笔者选取了 T2 与 T3 异常区开展了相应的异常区查证工作。

T2 异常区主要出露晚奥陶世石英闪长斑岩(图 13a), 异常查证过程中发现异常区内发育石英闪

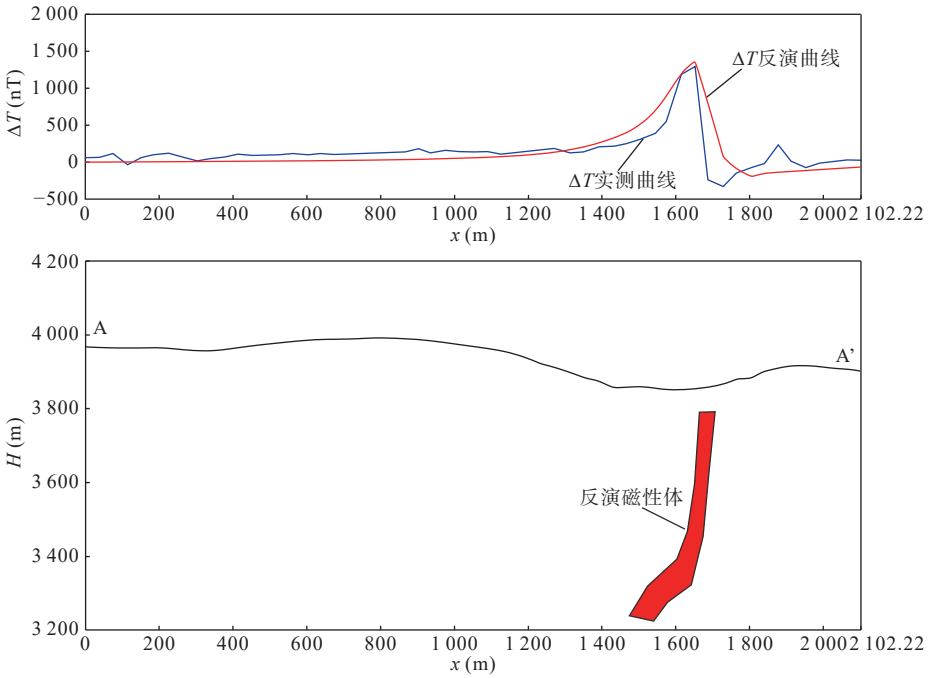


图11 T2 异常区 A-A'剖面 2.5D 人机交互反演图

Fig. 11 Figure A-A' profile 2.5D Human-Computer interactive inversion map of the T2 anomaly area

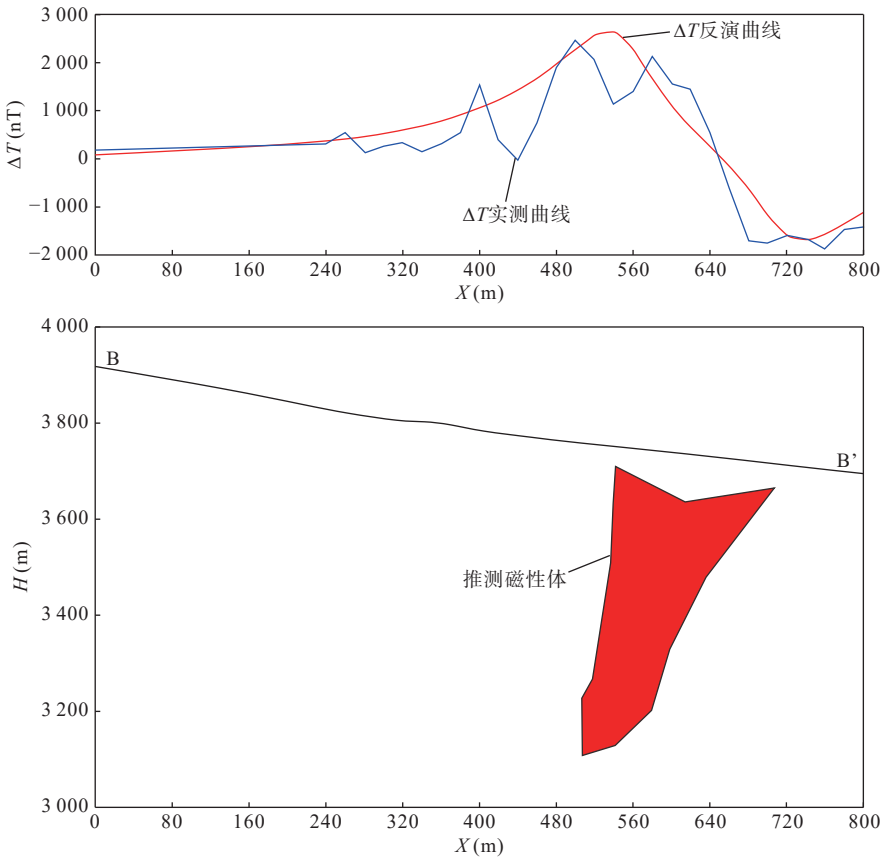


图12　T3 异常区 B-B'剖面 2.5D 人机交互反演图

Fig. 12　Figure B-B' profile 2.5D Human-Computer interactive inversion map of the T3 anomaly area



图13　T2 异常区矿化露头及手标本照片

Fig. 13　Field outcrops and hand specimens in the T2 anomaly area

长斑岩。石英闪长斑岩中的硫化物主要为黄铁矿和方铅矿(图 13b～图 13d),以浸染状为主。异常区南部边界可见片麻岩,未见矿化现象。对该异常区开展连续捡块异常查证工作,捡块取样分析结果显示,该异常区捡块样品 Au 品位为 0.07×10^{-6}～1.65×10^{-6}。在异常区内的探槽 STC19101(图 10),揭露金矿(化)体,厚约为 1.5 m,最高 Au 品位达 0.54×10^{-6}(图 14)。结合地面磁测显示出的高磁性特征与 2.5D 人机交互反演结果,认为该异常区具有良好的成矿潜力,可进一步开展勘查评价。

T3 异常区主要出露上奥陶统扣门子组玄武安山岩及下元古界托赖岩群,第四系覆盖严重(图 15a)。异常查证过程中发现异常区中心的玄武安山岩中可见孔雀石化,含黄铁矿等硫化物,以浸染状为主,蚀变以青磐岩化、黄铁绢英岩化为主(图 15b～图 15d)。异常区南侧边部可见片麻岩,未见矿化现象。对该异常区开展连续捡块异常查证工作,捡块取样分析结果显示,该异常区捡块样品 Au 品位为 0.10×10^{-6}～0.29×10^{-6}。结合地面磁测显示出的高磁性特征,认为该异常区深部可能存在隐伏矿体,具有较好的成矿潜力,可开展进一步的勘查评价工作。

综上所述,笔者以高 ΔT 场值圈定 7 处异常区(T1、T2、T3、T4、T5、T6 和 T7),其中 T1 异常区位于西矿床内。对 T2 和 T3 异常区进行野外查证,发现异常区 T2 和 T3 的部分样品达到矿(化)体品位,认为松树南沟金矿区东、西矿床外围区域具有巨大的找矿前景,

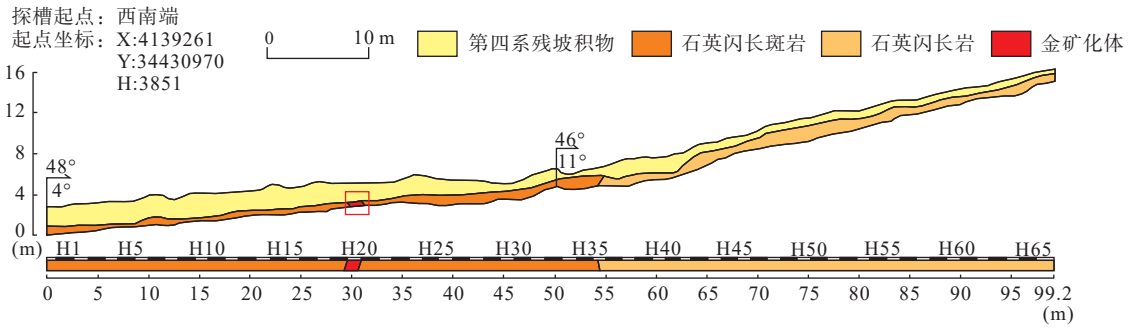


图14 松树南沟金矿区 STC19101 探槽素描图

Fig. 14 Trench STC19101 sketch map of the Songshunangou gold deposit

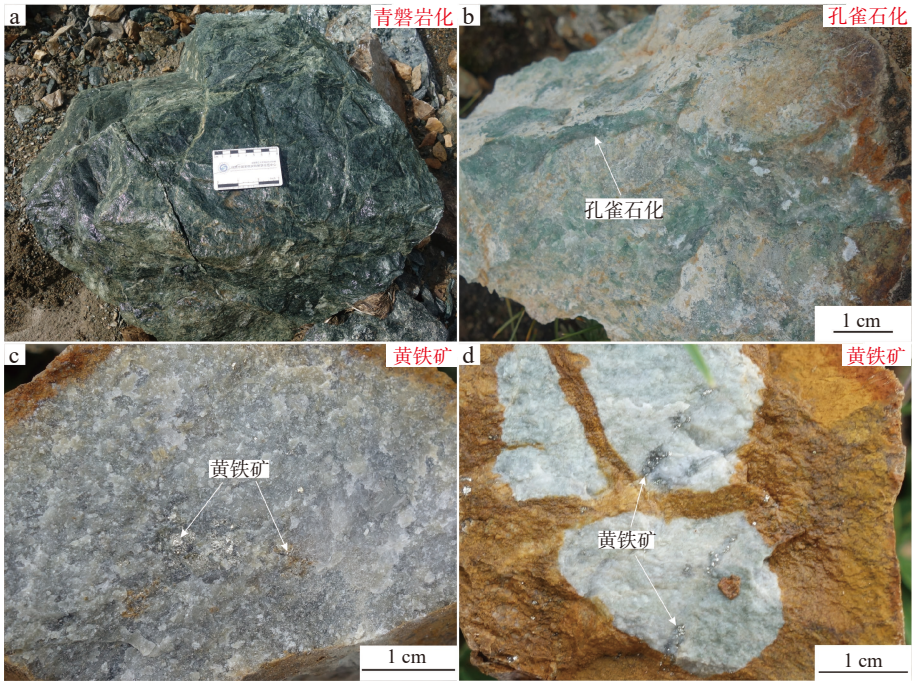


图15 T3 异常区矿化露头及手标本照片

Fig. 15 Field outcrops and hand specimens in the T3 anomaly area

也证明了地面磁测方法的有效性。此外,其他靶区也展现出显著的磁异常,推测也具有良好的成矿前景。建议未来以 T2、T3、T4、T5、T6 和 T7 异常区为重点,分阶段开展系统的找矿勘查工作。通过野外地质调查与地质填图,结合探槽工程,查明异常区的成矿地质条件、矿化类型及矿(化)体的空间展布特征;在此基础上,依据矿(化)体的展布规律和控矿因素,合理布设钻探工程,进一步查明靶区深部矿(化)体的形态、规模及连续性。通过上述工作,有望推动松树南沟金矿区实现新的找矿突破。

6　结论

(1)利用化极、延拓等方法处理矿区地面磁测数据,结合矿区地质特征,共圈出了 7 处高磁异常区。

(2)7 处异常区均呈现出高值正磁异常特征,其中 T1 异常区与西矿床重合。通过对 T2 和 T3 磁异常区进行野外查证,确定异常区部分样品达到矿(化)体品位,找矿潜力良好,证明了地面磁测方法的有效性。

(3)根据野外调查和工程验证结果,确定松树南沟金矿区东、西矿床外围具有良好的找矿潜力。建议未来对 T2、T3、T4、T5、T6 和 T7 异常区逐步开展找矿勘查工作,推动松树南沟金矿区实现新的找矿突破。

利益冲突声明(Conflict of Interests):

所有作者声明不存在利益冲突。

All authors disclose no relevant conflict of interests.

参考文献(References):

陈宣华,邵兆刚,熊小松,等. 祁连造山带断裂构造体系,深部结构与构造演化[J]. 中国地质, 2019, 46(5): 995−1020.

CHEN Xuanhua, SHAO Zhaogang, XIONG Xiaosong, et al. Fault system, deep structure and tectonic evolution of the Qilian Orogenic Belt, Northwest China[J]. Geology in China, 2019, 46(5): 995−1020.

陈大磊,王润生,贺春艳,等. 综合地球物理探测在深部空间结构中的应用-以胶东金矿集区为例[J]. 物探与化探, 2022, 46(1): 70−77.

CHEN Dalei, WANG Runshen, HE Cunyan, et al. Application of integrated geophysical exploration in deep spatial structures: A case study of Jiaodong gold ore concentration area[J]. Geophysical and Geochemical Exploration, 2022, 46(1): 70−77.

丛智超. 青海北祁连铜多金属矿床成矿规律研究 [D]. 长春: 吉林大学, 2017.

CONG Zhichao. Study on Metallogenic of Copper Polymetallic Deposit in the North Qilian, Qinghai[D]. Changchun: Jilin University, 2017.

党子豪,陈刚,赵伟波,等. 北祁连东北缘香黄沟剖面磨拉石沉积岩系碎屑锆石 U-Pb 年代学及其地质意义[J]. 西北地质, 2026, 59(2): 219−235.

DANG Zihao, CHEN Gang, ZHAO Weibo, et al. Detrital Zircon U-Pb Geochronology of Molasse Sedimentary Rock Series in Xianghuanggou Section, Northeastern Margin of North Qilian Mountains and Its Geological Significance[J]. Northwestern Geology, 2026, 59(2): 219−235.

何磊,韩小锋,杨怀宇,等. 北祁连西段昌马地区晚奥陶世弧前沉积−构造演化[J]. 西北地质, 2024, 57(3): 128−138.

HE Lei, HAN Xiaofeng, YANG Huaiyu, et al. Late Ordovician Tectono-Sedimentary Evolution of the Changma Area, Forearc Basin in the Western North Qilian Orogen[J]. Northwestern Geology, 2024, 57(3): 128−138.

李冰. 祁连造山带早古生代构造演化与新生代陆内生长变形研究 [D]. 北京: 中国地质科学院, 2020.

LI Bing. Study on the early Paleozoic tectonic evolution andCenozoic intracontinental development of Qilian Orogen, northern Tibet[D]. Beijing: Chinese Academy of Geological Sciences, 2020.

刘天佑. 地球物理勘探概论 [M]. 北京: 地质出版社, 2007.

刘晓煌,孙柏年,屈文俊,等. 北祁连山西段西柳沟钨钼矿的 Re-Os 定年及地质意义[J]. 岩石学报, 2007, 23(10): 2434−2442.

LIU Xiaohuang, SUN Bainian, QU Wenjun, et al. Re-Os dating of molybdenite in Xiliugou W-Mo deposit in western part of north Qilian Mountains and its geological significance[J]. Acta Petrologica Sinica, 2007, 23(10): 2434−2442.

吕鹏瑞,姚文光,张辉善,等. 特提斯成矿域中新世斑岩铜矿岩石成因,源区,构造演化及其成矿作用过程[J]. 地质学报, 2020, 94(8): 2291−2310.

LÜ Pengrui, YAO Wenguang, ZHANG Huishan, et al. Petrogenesis, source, tectonic evolution and mineralization process of the Miocene porphyry Cu deposits in the Tethyan metallogenic domain[J]. Acta Geologica Sinica, 2020, 91(8): 2291−2310.

谭金生,王彬,段亮,等. 祁连造山带中生代古地磁新结果及其地质意义[J]. 地球物理学报, 2024, 67(7): 2744−2760.

TAN Jinsheng, WANG Bing, DUAN Liang, et al. New Mesozoic paleomagnetic results from the Qilian Orogenic Belt and their geological significance[J]. Chinese Jouenal Geophys, 2024, 67(7): 2744−2760.

王登科,王冠,刘智,等. 青海省门源县松树南沟金矿外围岩金

普查阶段性报告 [R]. 四川鑫顺矿业股份有限公司, 2017.

王旭辉, 郎兴海, 叶紫枫, 等. 青海北祁连成矿带原特提斯洋俯冲期斑岩-浅成低温热液成矿系统的发现及其找矿意义[J]. 岩石学报, 2025, 41(5): 1584−1605.

WANG Xuhui, LANG Xinghai, YE Zifeng, et al. The discovery of the porphyryepithermal metallogenic system during the subduction of the Proto-Tethys Ocean in northern Qilian metallogenic belt,QinghaiProvinceanditsimplicationsformineralexploration[J]. Acta Petrologica Sinica, 2025, 41(5): 1584−1605.

吴福元, 万博, 赵亮, 等. 特提斯地球动力学[J]. 岩石学报, 2020, 36(6): 1627−1674.

WU Fuyuan, WAN Bo, ZHAO Liang, et al. Tethyan geodynamics [J]. Acta Petrologica Sinica, 2020, 36(6): 1627−1674.

张寿庭, 赵鹏大. 斑岩型矿床—非传统矿产资源研究的重要对象[J]. 地球科学—中国地质大学学报, 2011, 36(2): 247−254.

ZHANG Shouting, ZHAO Pengda. Porphyry Ore Deposits: Important Study Subjects of Nontraditional Mineral Resources[J]. Earth Science-Journal of China University of Geosciences, 2011, 36(2): 247−254.

赵辛敏, 张作衡, 郭少丰, 等. 北祁连西段小柳沟钨钼矿床矿物学, 硫同位素特征及其地质意义[J]. 矿床地质, 2014, 33(6): 1338−1356.

ZHAO Xinming, ZHANG Zuoheng, GUO Shaofeng, et al. Mineral and sulfide isotopic characteristics of Xiaoliugou W-Mo deposit in Northwest Qilian Mountain and their geological significance[J]. Mineral Deposits, 2014, 33(6): 1338−1356.

张翔, 黄增保, 刘子锐, 等. 北祁连车路沟斑岩型金矿床含矿岩体年代学、地球化学与岩石成因[J]. 岩石学报, 2023, 39(2): 499−514.

ZHANG Xiang, HUANG Zengbao, LIU Zirui, et al. Geochronology, geochemical characteristics and genesis of Chelugou gold deposit ore-bearing porphyry in the North Qilian orogenic belt[J]. Acta Petrologica Sinica, 2023, 39(2): 499−514.

张丽琪. 北祁连-阿拉善地块南缘古生代碰撞后岩浆作用及深部过程 [D]. 武汉: 中国地质大学, 2019.

ZHANG Liqi. Post-collisional Magmatism and Geodynamic Process from North Qilian Orogen to Southern Margin of Alxa Block, NW China[D]. Wuhan: China University of Geosciences, 2019.

钟世华, 李三忠, 丰成友, 等. 原特提斯和古特提斯碰撞岩浆与斑岩成矿: 以东昆仑祁漫塔格地区为例[J]. 地质通报, 2025, 44(4): 511−533.

ZHONG Shihua, LI Sanzhong, FENG Chengyou, et al. Proto-Tethys and Paleo-Tethys collisional magmas and porphyry mineralization: A case study of the Qimantagh area, East Kunlun Mountains[J]. Geological Bulletin of China, 2025, 44(4): 511−533.

范正国, 黄旭钊, 熊盛青, 等. 磁测资料应用技术要求 [M]. 北京: 地质出版社, 2010.

刘晓峰, 白顺宝. 利用 GeoIPAS 软件处理磁测数据及应用实例分析[J]. 甘肃科技, 2017, 33(1): 31−33.

LIU Xiaofeng, BAI Sunbao. Processing magnetic measurement data using GeoIPAS software and analysis of application examples[J]. Gansu Science and Technology, 2017, 33(1): 31−33.

Lang X H, Xiang Z P, Wang X H, et al. Unveiling an early Paleozoic porphyry-epithermal gold system in Songshunangou district, North Qilian, northwest China: Geological and geochronological constraints[J]. Ore Geology Reviews, 2024, 164: 105816.

Shao Y, Tan H, Peng G, et al. Geology, fluid inclusions and stable isotopes of the Xialiugou polymetallic deposit in North Qilian, northwest China: constraints on its metallogenesis[J]. Minerals, 2019, 9(8): 478.

Song S, Niu Y, Su L, et al. Tectonics of the north Qilian orogen, NW China[J]. Gondwana Research, 2013, 23(4): 1378−1401.

Sun H S, Li H, Algeo T J, et al. Geochronology and geochemistry of volcanic rocks from the Tanjianshan Group, NW China: Implications for the early Palaeozoic tectonic evolution of the North Qaidam Orogen[J]. Geological Journal, 2019, 54: 1769−1796.

Wang X H, Wu W Z, Lang X H, et al. Apatite and zircon compositions as petrogenetic and metallogenic indicators for Late Ordovician porphyries in the Songshunangou gold district, North Oilian orogenic belt(China)[J]. Ore Geology Reviews, 2025, 106502.

Wang Y C, Li H, Liu J S, et al. Genesis of W-Mo mineralization in the Xiaoliugou and Ta'ergou ore fields, North Qilian orogen (NW China): constraints from fluid inclusions and S-Pb-H-O-Nd isotopes[J]. Ore Geology Reviews, 2020, 124: 103649.

Xu H, Sun X, Xiao K, et al. Classification of volcanogenic massive sulfide deposits in North Qilian, China: Evidenced from lithostratigraphy and geodynamic setting[J]. Ore Geology Reviews, 2024, 106228.

Yang H, Xiong S, Liu Q, et al. Tectonic framework of Qilian orogen: reveal from an aeromagnetic anomaly feature[J]. Applied Geophysics, 2024, 21(3): 528−548.

Yang X Q, Zhang Z H, Santosh M, et al. Hydrothermal copper mineralization in the Mesoproterozoic Huashugou banded iron formation, northwest China: Characteristics, timing of formation and genesis[J]. Ore Geology Reviews, 2018, 102: 776−790.

Zhang C, Yu X, Yang F, et al. Petrology and geochronology of the Yushigou nephrite jade from the North Qilian orogen, NW China: implications for subduction-related processes[J]. Lithos, 2021, 1: 380−381.

Zheng Y, Ding Z, Cawood P A, et al. Geology, geochronology and isotopic geochemistry of the Xiaoliugou W-Mo ore field in the Qilian Orogen, NW China: case study of a skarn system formed during continental collision[J]. Ore Geology Reviews, 2017, 81: 575−586.