

<https://doi.org/10.3799/dqkx.2025.263>

Short Survey



陕西省凤县高植被覆盖区高光谱遥感找矿新发现及其勘查意义

宋建国¹, 张振凯^{1*}, 刘磊^{2*}, 张文龙¹, 吝路军², 张铎¹, 吕晓叶¹

1. 自然资源陕西省卫星应用技术中心, 陕西西安 710119

2. 长安大学地球科学与资源学院, 陕西西安 710054

0 引言

研究区位于凤太 Pb-Zn-Au 矿集区西部, 处于西秦岭造山带与华北、华南板块及祁连、松潘—甘孜等多个构造单元聚合部位(图 1a, 1b), 是陕西省新一轮战略性找矿突破行动的重点地区, 属高植被覆盖区。区内地层发育较齐全, 地质构造复杂, NW-NWW 向和 NE-NEE 向断裂与复式褶皱构造发育(图 1c), 为区域金、铅锌等多金属成矿奠定了良好的基础(王瑞廷等, 2007; 王义天等, 2009; 胡乔青, 2015; 张亚峰等, 2018; 赵端昌等, 2021; 王颖维等, 2022)。区域上矿产资源丰富, 以金、铅锌为主, 铜次之, 具备较好的找矿潜力。

遥感技术作为一种技术手段, 由于具有经济、高效等优势, 在低植被覆盖区矿产勘查中已被广泛应用, 并取得了较好的找矿应用成效(刘磊等, 2022)。随着遥感技术和遥感蚀变信息提取方法的进一步发展, 利用高光谱遥感技术可快速地提取蚀变

矿物信息、划分蚀变分带、圈定矿化异常等, 在矿产勘查应用中具有重要的意义(白杨林等, 2023)。但卫星高光谱遥感数据因空间分辨率不足与混合像元问题, 难以有效识别植被覆盖区的基岩露头与蚀变矿物分布信息。如何在增强高光谱遥感影像空间分辨率的同时有效保留其光谱特征, 有效获取代表性端元光谱并准确提取植被覆盖区的矿化小露头是当前面临的技术难点, 有待进一步研究解决。

近年来, 研究区虽开展了大量地质找矿勘查与研究, 但因地处高植被覆盖区而进展缓慢, 缺乏遥感技术找矿相关应用。因此, 自 2024 年至今, 自然资源陕西省卫星应用技术中心联合长安大学, 选取南秦岭凤太 Pb-Zn-Au 矿集区作为典型示范区, 收集现有的基础地质、矿产地质、遥感影像等资料, 开展高植被覆盖区高光谱遥感找矿应用技术研究, 新发现碎裂化蚀变闪长玢岩脉 2 处、金矿化点 4 处, 证实了高光谱遥感技术在高植被覆盖区找矿应用的适用性。

基金项目: 陕西省公益性地质调查项目(No.202413)。

作者简介: 宋建国(1993—), 男, 硕士, 工程师, 从事地质调查与矿产勘查工作。ORCID: 0009-0000-1228-1987。E-mail: songjgChina@163.com

* 通讯作者: 张振凯(1988—), 男, 博士, 高级工程师, 从事智能成矿预测相关研究工作。E-mail: zhangzhenkai1988@foxmail.com

刘磊(1982—), 男, 博士, 教授, 主要从事遥感地质与地学大数据相关研究工作。E-mail: liul@chd.edu.cn

引用格式: 宋建国, 张振凯, 刘磊, 张文龙, 吝路军, 张铎, 吕晓叶, 2025. 陕西省凤县高植被覆盖区高光谱遥感找矿新发现及其勘查意义. 地球科学, 50(12): 5026—5031.

Citation: Song Jianguo, Zhang Zhenkai, Liu Lei, Zhang Wenlong, Lin Lujun, Zhang Xinlei, Lü Xiaoye, 2025. New Discoveries and Exploration Significance of Hyperspectral Remote Sensing Prospecting in Highly Vegetated Area of Fengxian County, Shaanxi Province. *Earth Science*, 50(12): 5026—5031.

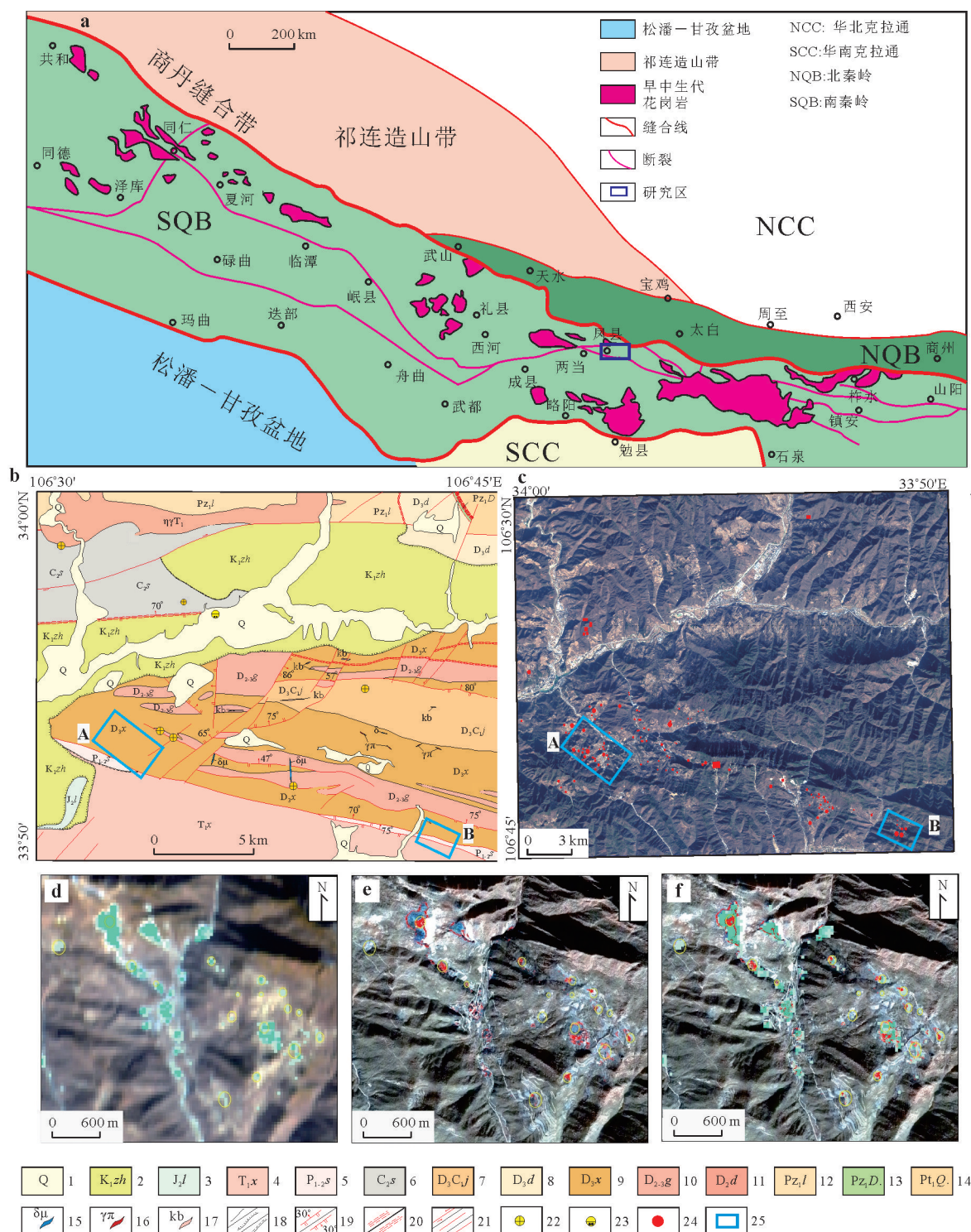


图 1 研究区大地构造背景、金矿产地质图与遥感异常信息提取图

Fig.1 Tectonic setting and geological map of gold deposits and remote sensing anomaly information extraction map of the study area

a. 研究区大地构造背景图; b. 金矿产地质图; c. 融合影像及综合遥感异常图; d. 某矿区融合前绢云母化蚀变信息提取图; e. 某矿区融合后绢云母化蚀变信息提取图; f. 某矿区融合前后绢云母化蚀变信息叠加图; 1. 第四系; 2. 下白垩统周家湾组; 3. 中侏罗统龙家湾组; 4. 下三叠统西坡组; 5. 下—上二叠统水峡口组; 6. 上石炭统四峡口组; 7. 上泥盆—下石炭统九里坪组; 8. 上泥盆统大草滩组; 9. 上泥盆统星红铺组; 10. 中—上泥盆统古道岭组; 11. 中泥盆统大枫沟组; 12. 下古生界罗汉寺岩组; 13. 下古生界丹凤岩群; 14. 下元古界秦岭岩群; 15. 闪长玢岩脉; 16. 花岗斑岩脉; 17. 钠长角砾岩脉; 18. 地质界线/角度不整合界线/平行不整合界线; 19. 逆断层/正断层及其产状; 20. 脆韧性剪切带/脆韧性剪切带; 21. 平移断层/区域性断层/一般断层; 22. 金矿床(点); 23. 砂金矿点; 24. 综合遥感异常; 25. 重点找矿区

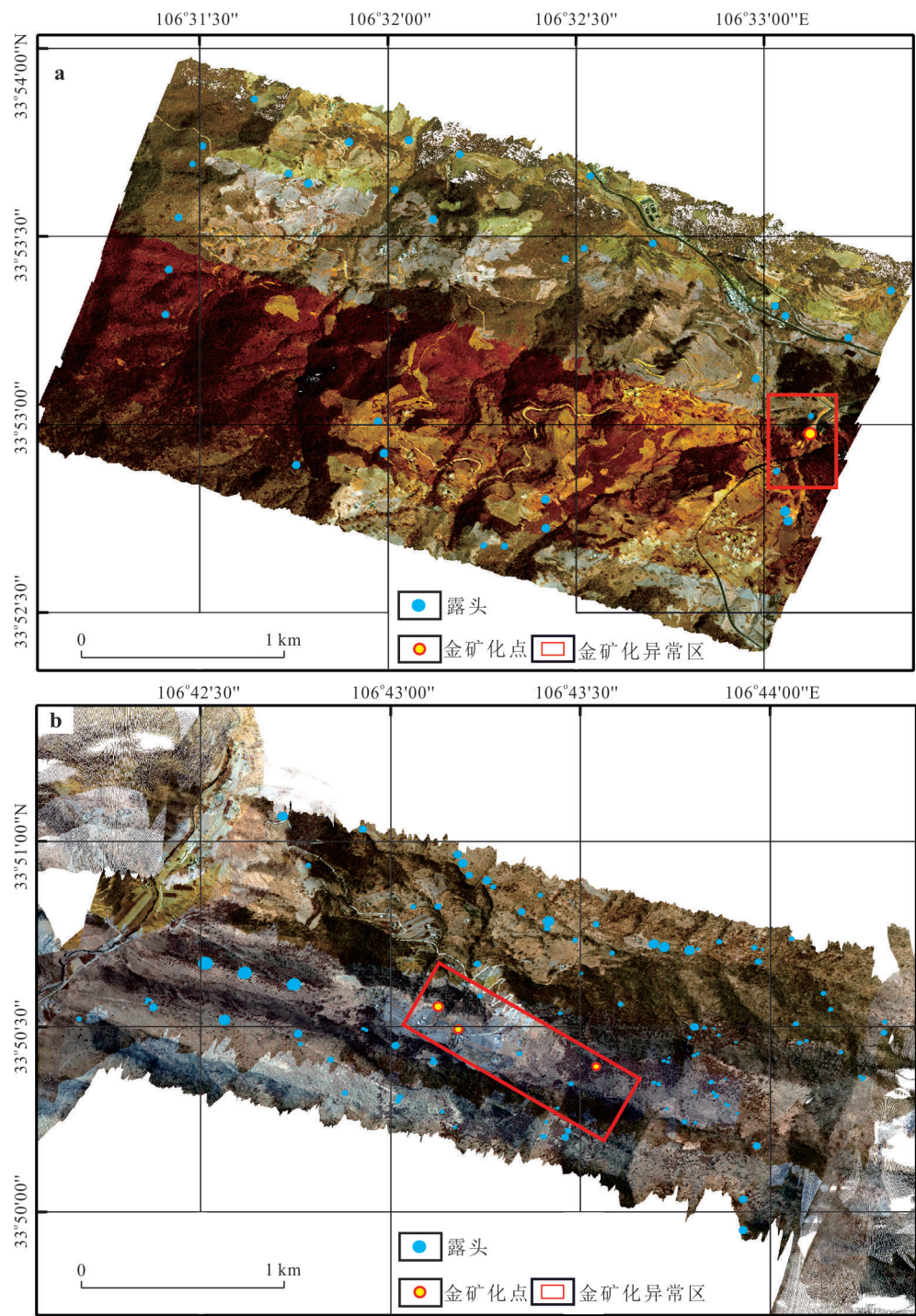


图 2 无人机高光谱遥感蚀变异常

Fig.2 Alteration anomaly results of unmanned aerial vehicle hyperspectral remote sensing

1 研究方法

采用航天—航空—地表—深部高光谱遥感技术,将地表基岩、深部钻孔岩心实测光谱数据与卫星高光谱、无人机高光谱遥感影像数据结合,建立区域标准蚀变矿物光谱库;采用 SFIM、CNMF、

Hysure 和 NonRegSRNet 等 4 种空间分辨率融合算法,对 30 m 资源一号 02D 卫星(ZY1-02D)高光谱影像与 2 m 高分六号卫星(GF-6)高分辨率影像进行空间分辨率融合,通过对比融合前后影像的光谱一致性,最终优选 Hysure 方法融合结果用于后续提取;利用空间—光谱端元提取方法对融合前后影像

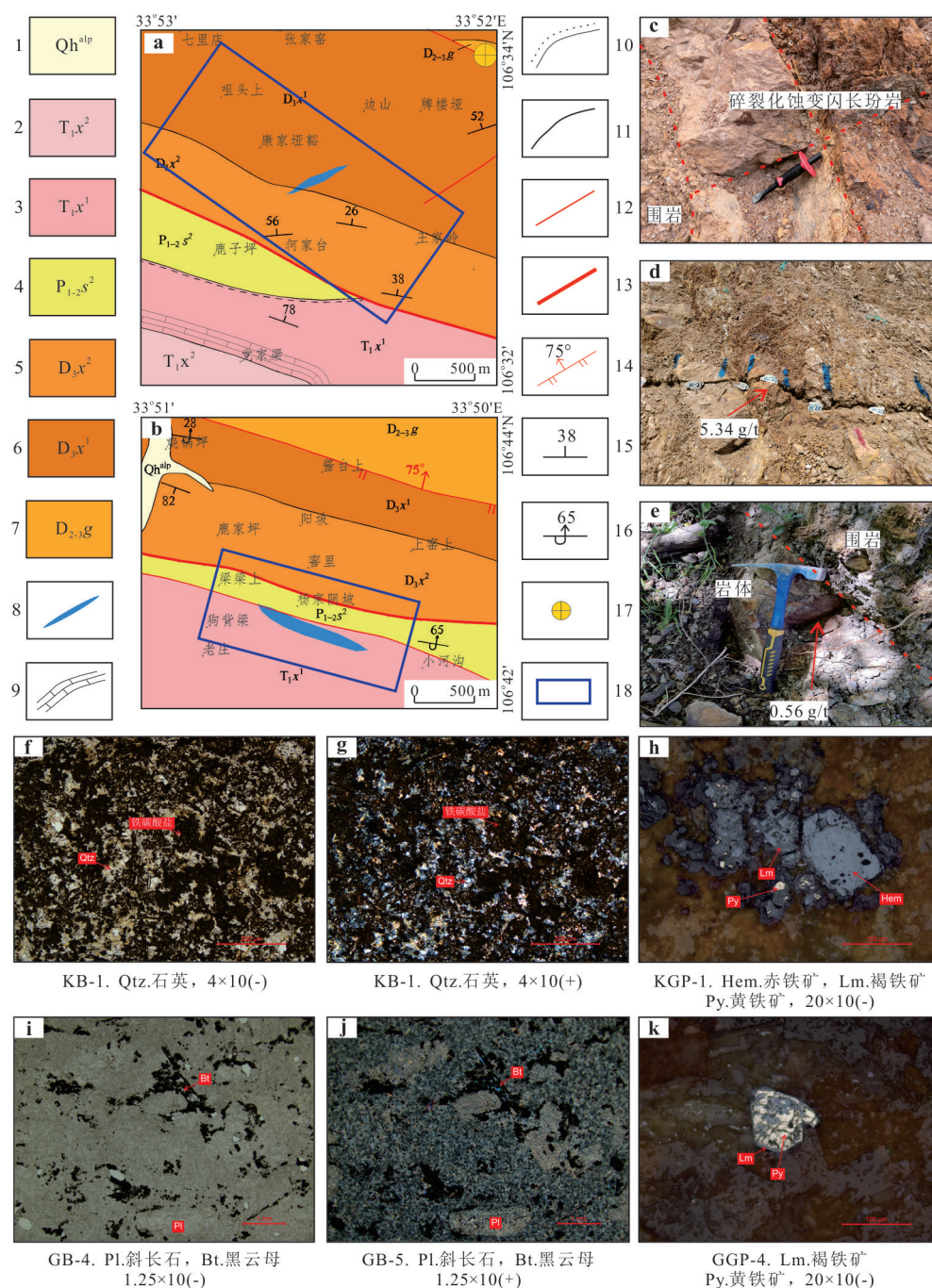


图3 金矿化点地质简图与野外及矿石特征

Fig.3 Geological map, field and ore characteristics of gold mineralization points

a. 康家垭地质简图; b. 狗背梁地质简图; c. 康家垭碎裂化蚀变闪长玢岩野外照片; d. 康家垭裂隙槽取样照片; e. 狗背梁碎裂化蚀变闪长玢岩野外照片; f. g. 康家垭金矿化标本薄片镜下特征; h. 康家垭金矿化标本光片镜下特征; i. j. 狗背梁金矿化标本薄片镜下特征; k. 狗背梁金矿化标本光片镜下特征

1. 全新统冲洪积物; 2. 下三叠统西坡组 2 段; 3. 下三叠统西坡组 1 段; 4. 下二叠统水峡口组 2 段; 5. 上泥盆统星红铺组 2 段; 6. 上泥盆统星红铺组 1 段; 7. 中一上泥盆统古道岭组; 8. 碎裂化蚀变闪长玢岩脉; 9. 灰岩标志层; 10. 不整合界线; 11. 地质界线; 12. 一般断裂; 13. 区域性大断裂; 14. 逆断层; 15. 层理产状; 16. 倒转层理产状; 17. 小型金矿床(点); 18. 重点找矿区

提取端元光谱, 通过光谱角制图法处理融合前后高光谱数据, 进行矿化蚀变弱信息及小露头提取; 结合区域成矿地质特征及 1:5 万水系沉积物地球化学特征, 综合分析圈定遥感异常并进行野外查证, 根

据野外验证情况选定异常重点区进行亚米级无人机高光谱遥感数据获取与找矿应用, 形成可迁移、可推广的高植被覆盖区高光谱遥感找矿技术流程。

2 结果分析

通过对比 SFIM、CNMF、Hysure、NonRegSRNet 四种空间分辨率融合算法融合前后影像光谱,发现 Hysure 法获得的光谱基本保留了原始影像中的光谱吸收位置与深度特征,利用该方法获得研究区空间分辨率为 2 m 的高光谱影像(图 1d)。基于融合后的高光谱影像(图 1d),结合实测光谱中与成矿有关矿物光谱,以 JPL 光谱库中方解石、绿泥石、白云母、高岭石、白云石的光谱曲线为参考,利用空间—光谱端元提取方法提取端元光谱,采用光谱角制图法提取矿化端元和 5 种矿物空间分布。通过对比融合前(图 1e)与融合后(图 1f)高光谱影像绢云母化蚀变提取与叠加结果(图 1g),发现由于融合后影像空间分辨率提高,提取结果空间分布与融合前较接近,但融合后的提取结果面积更小,且细节更为清晰,对于分析异常真伪、选择野外检查点更为有利。通过对比与成矿密切相关的 5 种蚀变矿物及端元光谱异常空间分布与叠加情况,经综合分析,在区内圈定 125 处综合遥感蚀变异常(图 1d),异常区多处于构造、岩性界线附近(图 1c)。经野外查证,将两处综合遥感蚀变异常集中区(6 km²)划定为找矿重点区(图 1c、1d 中的 A 区与 B 区),开展无人机高光谱遥感数据采集与信息提取研究。基于无人机高光谱遥感影像蚀变信息提取结果,在 A 区(康家垭豁;图 2a)和 B 区(狗背梁;图 2b)圈定了存在矿化蚀变信息的小露头 132 处,经野外查证表明,无人机高光谱遥感提取结果与实际地质现象具有良好的一致性。

3 应用成效

将构建的高光谱遥感找矿技术流程应用于陕西省凤县高植被覆盖区,通过野外查证,于康家垭豁、狗背梁地区成功发现 2 处碎裂化蚀变闪长玢岩脉(图 3a、3b)、4 处金矿化点(图 2a、2b)。金矿化皆与碎裂化蚀变闪长玢岩直接相关(图 3f~3k),金矿化主要赋存于碎裂化蚀变闪长玢岩及其与蚀变围岩接触部位(图 3c、3e),受区域断裂构造控制明显(图 3a、3b)。围岩为千枚岩夹变质粉砂岩,局部夹有薄层灰岩,片理化、劈理化构造破碎较强,矿化蚀变以碳酸盐化、硅化、褐铁矿化为主。其中,3 件岩石化学样分析显示狗背梁金品位达 0.56 g/t、0.39 g/t、0.30 g/t;55 件刻槽化学样分析显示,康家垭豁存在 2 条 Au 矿体,主矿体宽约 2 m,露头可见长度约 30 m,Au 加

权平均品位约 3.31 g/t,最高品位达 5.34 g/t,且 Au 异常高值点出现在碎裂化蚀变闪长玢岩中(图 3c、3d)。通过对康家垭豁、狗背梁地区金矿化点成因初步研究,认为其矿化类型与区域现有的以石英脉型和蚀变岩型为代表的 Au 成矿类型存在差异,其成因类型应为岩体中的破碎带蚀变岩型。

4 勘查意义

高植被覆盖区覆盖严重且地形复杂,地质勘查找矿存在诸多障碍,找矿进展缓慢。随着航天和航空高光谱遥感技术的进一步发展,高光谱遥感找矿技术体系有望实现更加精准的矿化预测与绿色高效的找矿目的,推动地质勘查找矿领域的技术创新。本研究通过深入分析研究区的遥感数据与实测光谱数据,研究矿化与矿物、光谱的关系,优选了适合高光谱影像的弱畸变融合方法,提高了卫星高光谱影像植被覆盖区小露头提取能力,据此优选重点区开展无人机高光谱蚀变露头精准提取。上述技术在陕西省凤县取得了成功应用,有助于推进国产高光谱遥感影像在高植被覆盖区找矿勘查中的进一步应用,可为高植被覆盖区战略性矿产资源找矿突破提供技术借鉴。

References

- Bai, Y. L., Lv, F. J., Su, H. B., et al., 2023. Review of Hyperspectral Remote Sensing Altered Mineral Information Extraction. *Remote Sensing Information*, 38(1): 1–10 (in Chinese with English abstract).
- Hu, Q. Q., 2015. The Mineralization Features, Mechanism and Metallogenic Regularity of the Fengtai Pb-Zn Polymetallic Ore Cluster in West Qinling, China (Dissertation). Chinese Academy of Geological Sciences, Beijing (in Chinese with English abstract).
- Liu, L., Zhang, T., Yin, F., et al., 2022. Remote Sensing of Geological Features and Mineral Prospecting Indicators for Pb-Zn Deposits in the Khuzdar-Lasbela Zone, Pakistan. *Acta Geologica Sinica*, 96(3): 1012–1025 (in Chinese with English abstract).
- Wang, R. T., Wang, T., Gao, Z. J., et al., 2007. The Main Metal Deposits Metallogenic Series and Exploration Direction in Fengtai Ore Cluster Region, Shaanxi Province. *Northwestern Geology*, 40(2): 77–84 (in Chinese with English abstract).
- Wang, Y. T., Wang, R. T., Dai, J. Z., et al., 2009. Strike Slip Dual Structure and Its Ore Controlling Significance in

Fengtai Ore Concentration Area, West Qinling. *Acta Mineralogica Sinica*, 29(Suppl. 1): 188—189 (in Chinese).

Wang, Y. W., Zhao, D. C., Du, B., et al., 2022. Geological Characteristics and Metallogenic Regularity of Typical Gold Deposits in Fengtai Ore Concentration Area, Shaanxi Province. *Geological Survey of China*, 9(2): 63—72(in Chinese with English abstract).

Zhang, Y. F., Yang, T., Yi, P. F., et al., 2018. Report on Basic Geological Survey Results in the West of Fengtai Ore Field, Shaanxi Province. Shaanxi Mineral Resources and Geological Survey, Xi'an (in Chinese).

Zhao, D. C., Zhang, Z. K., Du, B., et al., 2021. Study on Gold Metallogenic Regularity and Prospecting Direction in Fengtai Ore Concentration Area, Shaanxi Province. Shaanxi Mineral Resources and Geological Survey, Xi'an (in Chinese).

中文参考文献

白杨林,吕凤军,苏鸿博,等,2023.高光谱遥感蚀变矿物信息提取研究综述.遥感信息,38(1): 1—10.

胡乔青,2015.西秦岭凤太矿集区铅锌多金属矿床成矿作用特征、机制与成矿规律(博士学位论文).北京:中国地质科学院.

刘磊,张婷,尹芳,等,2022.巴基斯坦胡兹达尔—拉斯贝拉铅锌成矿带遥感地质特征与成矿预测.地质学报,96(3): 1012—1025.

王瑞廷,王涛,高章鉴,等,2007.凤—太多金属矿集区主要金属矿床成矿系列与找矿方向.西北地质,40(2): 77—84.

王义天,王瑞廷,代军治,等,2009.西秦岭凤太矿集区走滑双重构造及其控矿意义.矿物学报,29(增刊1): 188—189.

王颖维,赵端昌,杜彪,等,2022.陕西凤太矿集区典型金矿地质特征及其成矿规律.中国地质调查,9(2): 63—72.

张亚峰,杨涛,易鹏飞,等,2018.陕西省凤太矿田西部基础地质调查成果报告.西安:陕西省矿产地质调查中心.

赵端昌,张振凯,杜彪,等,2021.陕西凤太矿集区金成矿规律及找矿方向研究.西安:陕西省矿产地质调查中心.