

基于岩性分区的化探异常衬值法优化

权国荣^{1,2}, 王跃堃^{1,2*}, 王阿特^{1,2}, 孙军刚^{1,2}, 何虎军³

1. 中国地质调查局西安矿产资源调查中心, 陕西 西安 710100;
2. 中国地质调查局金矿勘查技术创新中心, 陕西 西安 710100;
3. 长安大学地球科学与资源学院, 陕西 西安 710054



摘要:希结勒研究区位于新疆阿勒泰地区青河县南部,具有复杂的地质构造特征,主要为一套产出于晚古生代岛弧带的中—基性火山岩建造。以1:1万土壤地球化学测量为基础,比较了传统的异常圈定方法和岩性分区异常下限衬值法在异常圈定中的利弊。结果表明:使用统一下限的传统异常圈定方法,对来自不同异常背景的干扰很敏感,会导致假异常或弱的异常被忽略;岩性分区异常下限衬值法将研究区划分为沉积岩、火山岩和侵入岩3个子区,分别计算衬值并归一化处理,大幅改善了异常识别的精度。对区内已知的金、铜矿点进行验证,结果表明岩性分区法圈定的异常不仅与矿点空间位置吻合度更高,而且呈现出更清晰的浓度分带特征,其空间展布规律与区域成矿地质背景具有更好的相关性。该方法通过消除岩性背景差异的影响,有效增强了异常与背景的相关对比度,为复杂岩性分布区的化探异常识别提供了新的研究思路。

关键词:化探异常;岩性分区;衬值法;异常下限;希结勒地区

中图分类号:P59 文献标志码:A 文章编号:1005-2518(2026)01-0103-12 DOI:10.11872/j.issn.1005-2518.2026.01.217
引用格式:权国荣,王跃堃,王阿特,等.基于岩性分区的化探异常衬值法优化[J].黄金科学技术,2026,34(1):103-114.QUAN Guorong, WANG Yuekun, WANG Ate, et al. Optimization of the Geochemical Anomaly Contrast Method Based on Lithologic Zoning[J]. Gold Science and Technology, 2026, 34(1): 103-114.

地球化学勘查作为矿产资源预测的重要手段,其异常圈定的准确性直接决定了找矿效率和资源评估的可靠性。传统异常圈定方法基于全域统计理论,通过统一背景值计算异常下限。这种方法自19世纪末诞生以来,经过国内外学者的系统性发展,已成为矿产资源勘查的重要手段,并取得了显著成果(陈海龙等,2025)。例如:我国通过1:20万区域化探扫面发现了胶东金矿带(李廷栋,2022);美国通过土壤测量发现了克莱马克斯钼矿(Pettke et al, 2010);澳大利亚通过水系沉积物测量发现了奥林匹克坝铜铀金矿(Cook et al, 2024)。尽管该方法在斑岩铜矿和卡林型金矿勘查中取得了显著成

果,但在岩性—构造复杂区常会考虑以下2个方面的影响:(1)高背景岩体(如花岗岩)导致假异常频发(刘达东等,2025);(2)低背景区弱异常易被掩盖(Smedley et al, 2007; 朵德英等, 2025)。

针对上述问题,学者们相继探索出多种改进方法,例如岩性分区校正法和背景场分解法等,在异常圈定中展现出意想不到的效果(陈晶源等,2025)。其中,岩性分区衬值法通过构建“地质单元—地球化学场”耦合模型,在智利 Los Pelambres 斑岩铜矿和内蒙古三七林场铜矿的应用中显示出独特优势(Moshefi et al, 2020; Liao et al, 2021)。然而,该方法在造山带多期次成矿系统的适用性仍需实证检验。

收稿日期:2025-07-14;修订日期:2025-12-01

基金项目:中国地质调查局项目“新疆青河阿拉塔斯—带金矿重点调查区调查评价”(编号:DD20230378)和“全国金矿重点调查区调查评价”(编号:DD20230060)联合资助

作者简介:权国荣(1994—),男,陕西西安人,工程师,从事金矿勘查研究工作。E-mail: gtyzqgr@163.com

*通信作者:王跃堃(1992—),男,陕西西安人,工程师,从事地球化学勘探研究工作。E-mail: wangyuekun1992@126.com

© Editorial Department of Gold Science and Technology (CC BY-NC-ND)

新疆青河县希特勒研究区是检验异常下限衬值法在复杂岩性区化探圈定效果的理想场所。区内晚古生代岛弧带发育多期次地质事件,形成了以蕴都喀拉组为代表的沉积岩、以康布铁堡组为代表的火山岩以及以花岗斑岩为代表的侵入岩并存的复杂地质背景(白建科,2021)。前期勘查显示,Au和Cu等成矿元素在不同岩性单元中背景值差异显著,其中,侵入岩中Au背景值是沉积岩的2.1倍,传统方法圈定的异常与矿点空间偏差超过200 m(李建江等,2020)。此外,区域NW向断裂控制的矿化体严格受岩性界面制约,金矿体主要赋存于安山岩与凝灰质粉砂岩的接触带(李建江等,2020),亟须通过岩性分区厘清成矿元素富集规律。为此,本研究采用1:1万土壤测量数据,结合地质填图划分三大岩性子区,为该方法在造山带型矿床的适用性提供关键实证。

1 研究区概况

1.1 地质概况

希特勒研究区位于新疆维吾尔自治区阿勒泰地区青河县南部约30 km处,在大地构造上隶属于北准噶尔地层分区中的二台地层小区(钱程等,2023),该区火山岩形成于晚古生代岛弧环境,以中一基性火山岩及其碎屑岩建造为主(陈波,2011),并构成下泥盆统至下石炭统地层跨度的岩石组合(白建科,2021)。其中,中泥盆统北塔山组广泛发育的凝灰质地层为富矿地层(黄岗等,2025),其东部为早二叠世侵位的哈旦逊岩体,岩浆型矿化主要发育于哈旦逊岩体边部,矿化体赋存于正长斑岩体中,希特勒研究区地质矿产图如图1所示。

1.2 地球化学景观特征

研究区位于新疆青河县中部偏北,总体处于低山丘陵地貌单元。区内海拔高程为1 117~1 638 m,相对高差为0~200 m,地形切割程度中等,基岩出露较好。该区气候为温带大陆性干旱气候,春、秋季短暂且温差大,5~10月为野外工作时间。区内水系不发育,且以季节性河流居多,年平均降水量低,蒸发量强烈。常年多风,有着剧烈的风力作用,但风成沙的覆盖很少。地表覆盖以第四系残坡积物和岩屑为主。研究区土壤层普遍不发育,地表覆

盖以基岩风化形成的岩屑和碎屑物为主,本次采集的样品90%以上为此类介质。

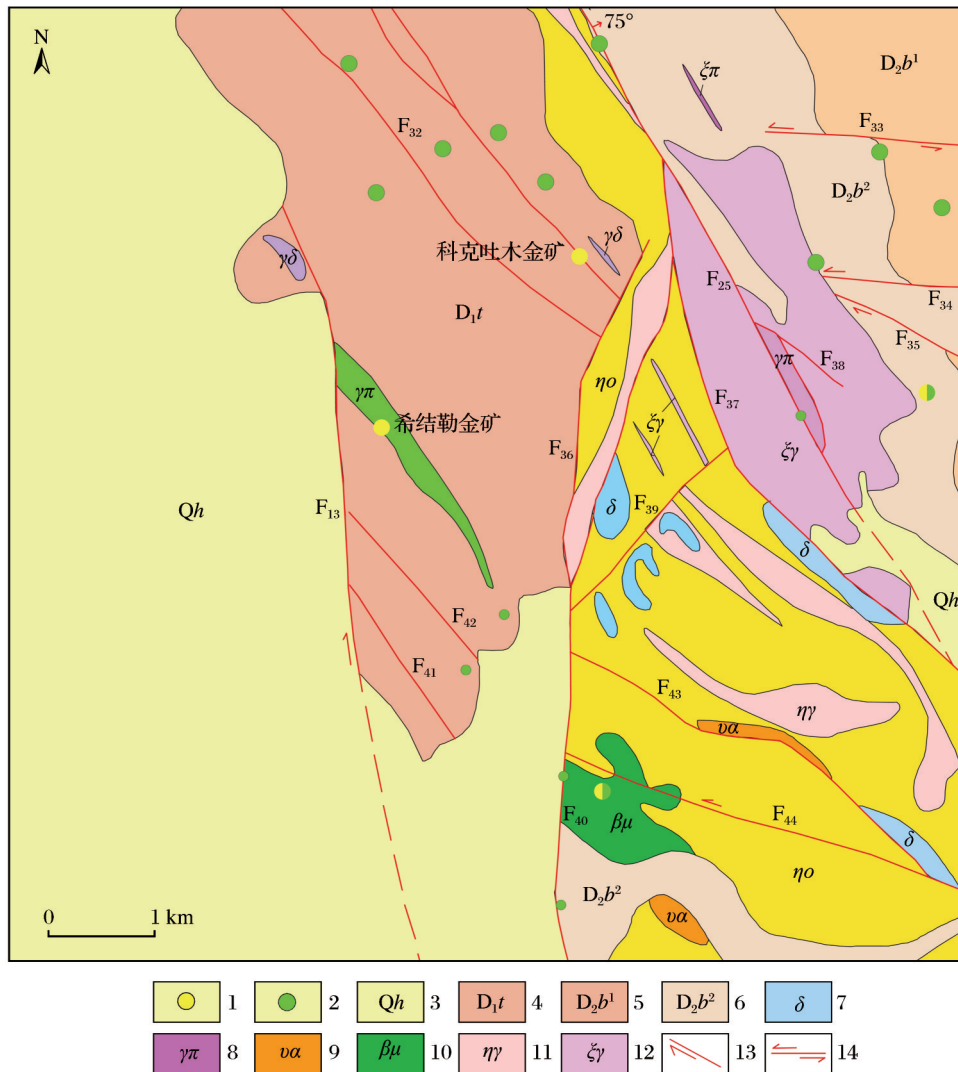
2 样品采集与分析

考虑到地形及岩性的影响,将研究区划分为南北2个采样区进行采样,在1:1万地形图上布设250 m间距的样品点位,每个点位进行3~5个子样组合采样,研究区土壤层不发育,因此主要采集地表风化碎屑物样品,在基岩区采集浅部风化碎屑,在局部第四系覆盖区采集30~50 cm土壤,野外样品干燥可直接过筛,样品粒级为-4~+20目,采集样品重量为500 g。测线方位为近NE向,测线垂直于区域构造线与蚀变带展布方向(图2)。工作区地球化学景观为半干旱、裸露一半裸露区域,样品为残坡积物,采集较易,对于少量的设计采样点无法采集的情况,采用移点(弃点)方式,即在设计点位的土壤测线(40°)方向左右10 m(点距的1/5范围)、垂直测线方向50 m(点距的1/4范围)的矩形范围内,选择适宜部位采样,在以上可移点矩形范围内,仍有个别采样点未能采集到合适样品,作弃点处理。设计采集土壤多元素样品共930个,重复样按照3%设计为28个,弃点3个,弃点率为0.32%。每个样品点均记录样品采集编号、照片、GPS航迹和筷子上绑红布条标记位置等信息。土壤样品由中国地质调查局西安矿产资源调查中心实验室进行分析,测定了Pb、Cu、Zn、Ni、As、Hg、Au、Ag、W、Bi、Co、Mo和Sb共13种元素,Zn、As、Hg和Co元素采用粉末压片-X射线荧光光谱法测定,所用的检测设备为X射线荧光光谱仪,设备型号为WDX-4000;Au和Ag元素采用原子吸收光谱法测定,所用的检测设备为原子吸收光谱仪,设备型号为iCE3000(吕婷,2020)。

3 异常圈定方法对比研究

3.1 传统方法异常圈定

正态分布检验:将927组数据导入SPSS软件中并选择Au元素检查其正态分布和对数正态分布,实测曲线和预期曲线偏离程度较大。Au元素的含量分布既不服从正态分布,也不符合对数正态分布(图3),需进行异常筛选(高艳芳等,2017)。



1. 金矿点; 2. 铜矿点; 3. 第四系; 4. 泥盆系托让格库都克组; 5. 泥盆系北塔山组上段; 6. 泥盆系北塔山组下段; 7. 闪长岩; 8. 正长斑岩; 9. 辉石安山岩; 10. 辉绿玢岩脉; 11. 二长花岗岩; 12. 钾长花岗岩; 13. 正断层; 14. 左行走滑断层

图1 希结勒地区地质矿产图

Fig. 1 Geological and mineral map of Xijiele area

异常值筛选:以样本数据的平均值加3倍标准差作为初始判断阈值,对超出阈值部分进行剔除,连续迭代这一过程,直至所有数据均趋于稳定,每次迭代后的图像分布如图4所示。元素异常下限的确定沿用经典统计标准即采用最终平均值加两倍标准差予以确定,在此基础上,以内、中、外三级分类进行异常级别划分,其阈值分别设定为4倍、2倍和1倍异常下限(袁民汕,2023)。基于所确定的阈值,对各元素的单元素地球化学异常进行了圈定,区内各元素异常分布结果如图5所示。

3.2 岩性分区异常下限衬值法异常圈定

对研究区的不同岩性分区各元素的化验结果进行特征统计,由表1可知,不同地质分区因其独特的岩性特征组合发育出不同的背景值与异常下限(商振城等,2022)。按照传统方法计算出的Au背景值应为 0.0017×10^{-6} ,按照岩性分区法将这一数据进行更精细划分,自然就可以显示出更加丰富的信息,例如Au在各子区中的背景值最大值为 3.8×10^{-9} ,最小值为 1.2×10^{-9} ,二者相差悬殊,2个最值相差3.17倍;Cu元素全区背景值为 66.0×10^{-6} ,在各子

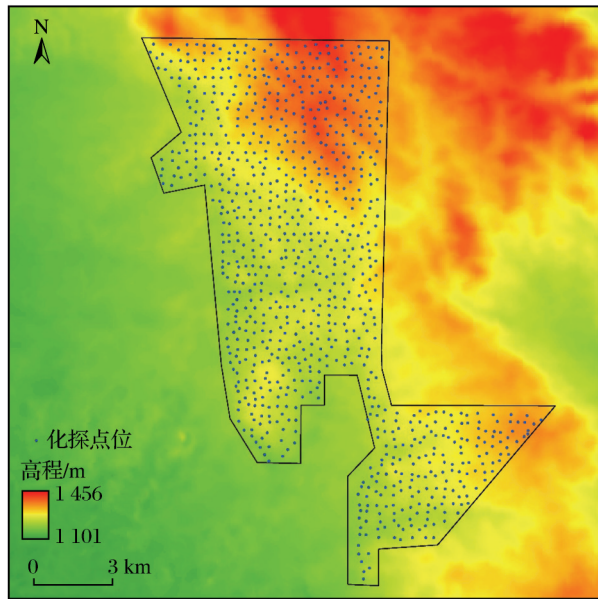


图2 采样位置图

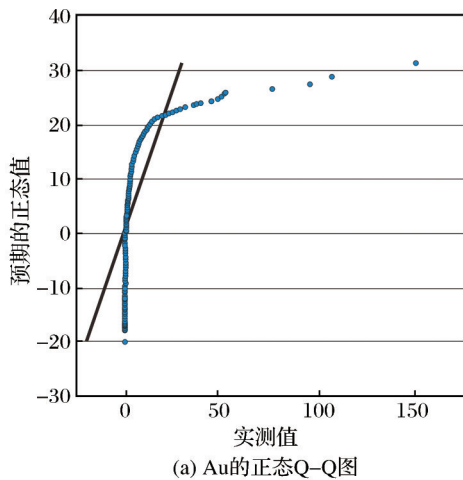
Fig. 2 Sampling location map

区中的背景值最大值为 82.3×10^{-6} , 最小值为 56.7×10^{-6} , 2个最值相差 1.45 倍。

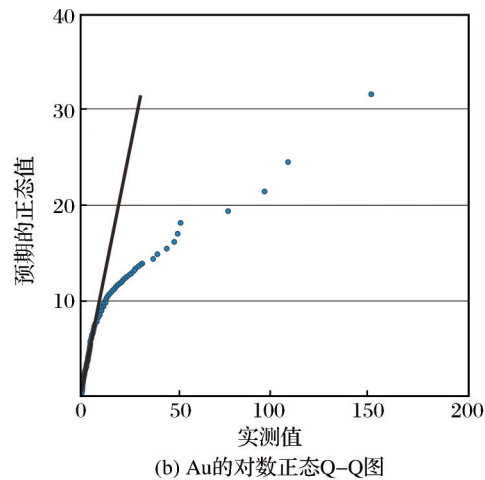
此外, 统计发现一般在侵入岩中测试的元素含量较大, 在火山岩中测试的元素含量较小, 这表明

元素含量在不同岩性子区差异较大, 说明统一背景值会掩盖真实的差异, 进行元素分区具有一定的必要性(杨建国等, 2010)。基于此情况, 传统异常下限提取方法无法避免侵入岩区的假异常或在火山岩区遗漏真异常, 所以需要充分考虑区内地质特征而进行岩性分区。

基于上述地质特征参数差异, 将研究区整体划分为 3 个岩性单元: 沉积岩区、火山岩区和侵入岩区, 各子区空间分布如图 6 所示, 确保同一子区内地层与岩性特征相对均一(孟秋熠, 2020)。沉积岩区是分布最广泛的岩性单元, 主要分布于研究区北部, 面积占比为 63%, 其地层主要为托让格库都克组, 点位占比为 67.1%; 火山岩区主要为晚古生代岛弧带中发育的一套中—基性火山岩及其碎屑岩建造(热亚尼古丽·杰力力, 2012), 岩性以安山岩和玄武岩为主, 主要分布于研究区南部, 面积占比为 25%, 点位占比为 20.5%; 侵入岩区主要为早石炭世—早二叠世的酸性岩株和岩脉, 具有中等程度的剥蚀, 受后期韧性剪切作用的影响, 具有明显的糜棱岩化特征, 呈带状和脉状在全区不规则分布, 面积占比为 12%, 点位占比为 12.4%。



(a) Au的正态Q-Q图



(b) Au的对数正态Q-Q图

图3 正态分布检测

Fig. 3 Normal distribution detection

岩性分区: 将全区划分为沉积岩区、火山岩区和侵入岩区 3 个岩性子区, 确保同一子区内地层与岩性特征相对均一(罗赣平, 2023)。

衬值计算: 以子区各采样点的元素含量值与子区背景值之比作为原始衬值, 需要注意的是, 此方

法隐含了“次生异常含量与下伏基岩背景值之间存在近似线性衬度关系”的假设。连续迭代出衬值均值加 3 倍标准差的异常值(杨用彪等, 2024)。

衬值归一化: 不同子区背景值与异常下限不同, 不同子区的同种元素要在一张图展现, 须归一

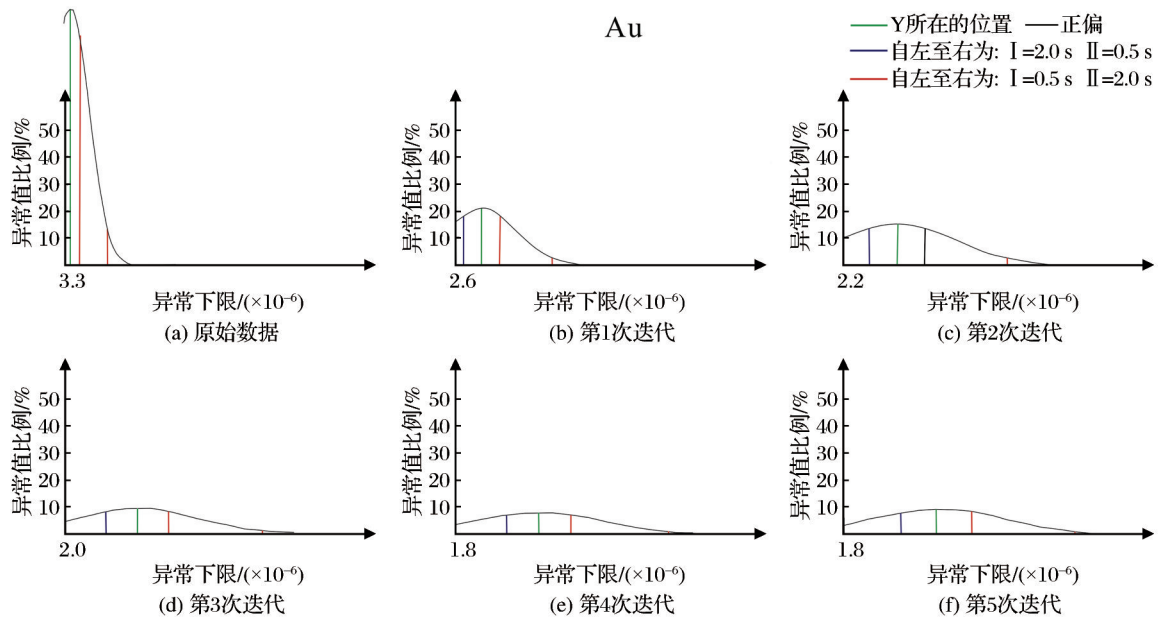


图4 连续异常迭代

Fig. 4 Continuous abnormal iteration

化衬值。

离散数据网格化:分别将每种元素采样点归一化后的衬值投影为一个孤点,采用Grd模型将离散数据进行网格化处理。

异常下限计算:按传统方法统计衬值的均值及异常下限(T),将 T 、 $2T$ 、 $4T$ 分别圈定为异常的外带、中带和内带,如图6所示。

3.3 异常差异比较

通过新疆维吾尔自治区自然资源厅提供的研究区内矿点以及本项目在科克吐木和希结勒对金矿体采刻槽样进行验证(图7)。对于希结勒金矿,传统方法在该区产生“泛异常化”现象[图8(a)],虽然圈定出 1.2 km^2 的异常范围,但矿体仅处于外带,且异常中心与矿体无成因联系。岩性分区法则通过背景校正,呈现出更具找矿意义的异常特征[图8(b)]:(1)异常连续性较好,斑点沿NW向线性排列,与隐伏断裂展布吻合;(2)异常更精准,75%的异常点与矿体间距小于 80 m ;(3)剔除沉积岩区 1.2×10^{-9} 低背景干扰后,异常衬值梯度真实反映了矿化强度变化。这一对比凸显了地质锚点的核心价值——若无实体矿体定位,传统方法的较分散的异常不易掌握异常分布规律,而衬值法提供了精确的构造带方位,明确了找矿方向。

对于科克吐木金矿,传统方法表现出明显的“异常弱化”效应[图9(a)]。该方法圈定的异常呈现以下特征:首先,异常空间分布极不连续,形成多个孤立的异常斑点,异常完整度仅为32%;其次,异常强度普遍偏弱,其中三级异常占比高达74%,二级异常占26%,无一级异常,导致异常信息熵值降低至1.2(理想值应大于2.5)。这种异常弱化现象主要源于:(1)全域统计未能消除凝灰质砂岩(背景值为 1.2×10^{-9})与安山岩(背景值为 2.8×10^{-9})的岩性差异;(2)矿化信号在背景平均化过程中被稀释。相比之下,岩性分区衬值法在该矿区展现出显著优势[图9(b)]。首先,圈定的异常连续性明显改善,异常完整度提升至68%,形成呈NW向展布的异常带,与区域控矿构造走向一致;其次,异常分级更加合理,其中三级异常占比达70%,二级异常占比为25%,一级异常仅占5%,异常信息熵值提升至2.8,达到了理想水平。更重要的是,该方法圈定的异常与已知矿体的空间吻合度大幅提升,其中一级异常区与矿体位置的空间偏差均小于 100 m 。

此外,对收集的哈旦逊金铜矿点与铜矿点分别进行对比,对于哈旦逊金铜矿,传统方法圈定的Au异常较分散,浓集中心排列不规则,金矿位于异常中带[图10(a)]。岩性分区异常下限衬值法圈定的

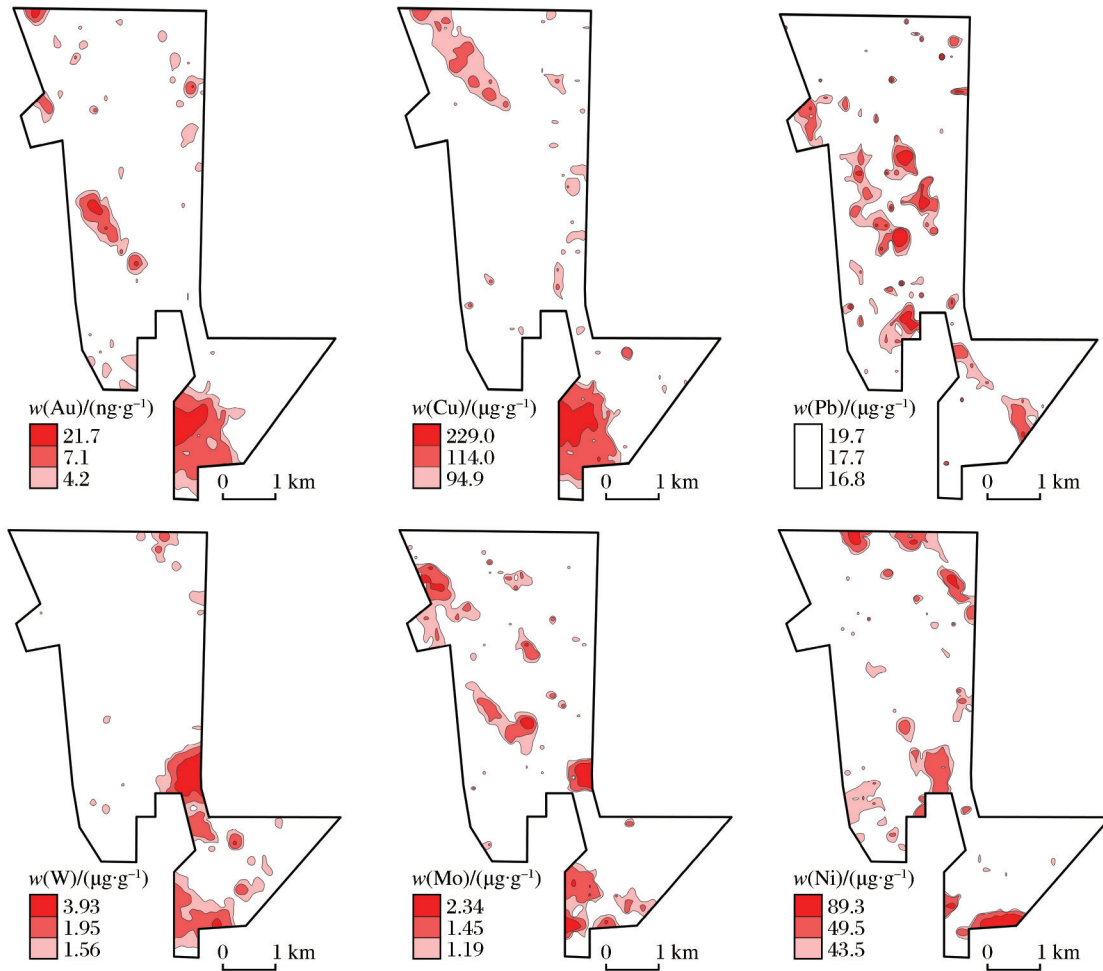


图5 传统方法圈定的异常分布图

Fig. 5 Anomaly distribution map delineated by traditional method

表1 2种方法统计的元素背景值 (X) 与异常下限 (C)

Table 1 Element background values (X) and anomaly lower limits (C) counted by two methods

异常检查方法	分类	参数	Au	Cu	Pb	W	Mo
岩性分区异常下限衬值法	沉积岩 n=622	X	1.8	69.4	14.4	1.2	0.8
		C	3.8	111.5	21.2	1.8	1.3
	火山岩 n=190	X	1.2	56.7	14.3	1.3	0.8
		C	2.8	123.9	22.1	2.2	1.2
	侵入岩 n=115	X	3.8	82.3	13.3	1.3	1.0
		C	11.5	185.2	21.0	2.1	1.8
传统方法	n=927	X	1.7	66.0	14.2	1.2	0.8
		C	3.7	116.7	21.3	1.9	1.3
	算术平均值		3.3	77.7	14.4	1.3	1.0
		新疆土壤丰度	1.40	24.0	23	1.8	0.8
		浓集系数	2.36	3.24	0.63	0.72	1.25

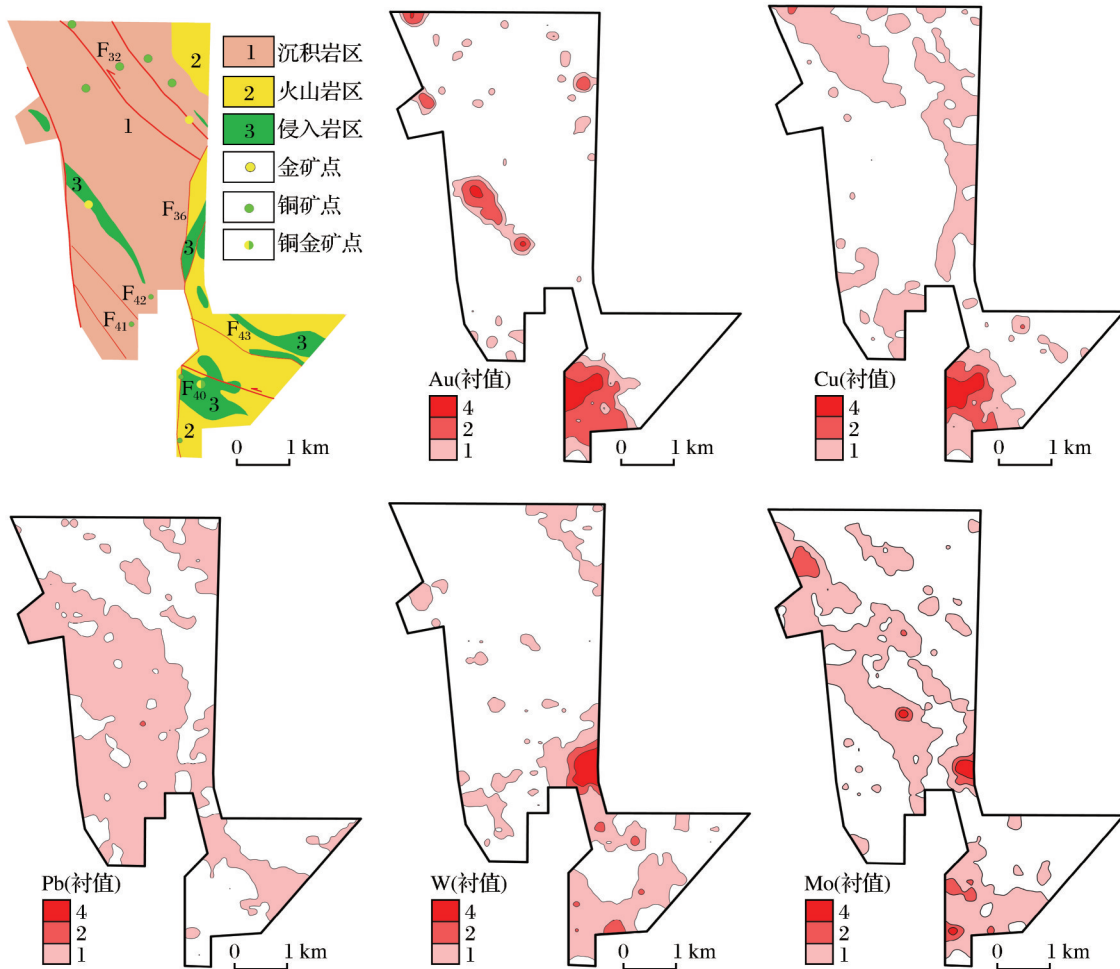


图6 岩性分区异常下限衬值法圈定的异常分布图

Fig. 6 Anomaly distribution map delineated by the lower limit lining method of lithological zoning anomalies

异常呈明显的梯度环带,分布规律较强,金矿位于异常内带[图 10(b)]。对于研究区内收集的 10 处铜矿点进行对比,如表 2 所示,采用传统方法有 1 处铜矿点位于铜异常外带,2 处位于中带,2 处位于内带,5 处位于非异常区域;采用岩性分区异常下限衬值法有 1 处铜矿点位于异常外带,3 处位于中带,2 处位于内带,4 处位于非异常区域。

4 讨论

分别采用 2 种不同的异常圈定方法绘制 Au、Cu、Pb、W 和 Mo 元素异常等值线图,对比分析各元素异常空间特征的差异,基于岩性子区地球化学背景特征统计,不同岩性子区元素背景值存在较大差异(南艳等,2017)。Au 元素背景值受岩性影响较

大,表现出侵入岩的高背景特征,Cu 背景值受岩性影响中等,表现出火山岩的中高背景特征,Pb、W 和 Mo 元素背景值受岩性影响较小,表现出沉积岩的低背景特征(王克军,2004)。然而,张诗敏等(2023)通过对内蒙古呼伦贝尔市基岩与化探数据进行比较,认为 Cu 和 Pb 等元素与背景值关系较密切。李随民等(2023)通过比较冀中钼矿元素与酸性岩体含量,认为二者之间差异较大,存在明显的盐矿时差。杨用彪等(2023)对溧阳盆地化探样品 Au、W 元素与基岩丰度进行对比,认为其受背景值影响较小。因此,不同区域、不同成矿条件和地质特征内岩性对背景值的影响程度不同,元素含量受到区域局限和地质特征的双重制约,具有多样性和区域性两大特征,而这种多样性反映了岩性的本底特征,区域性则反映表生地质作用的差异化因素,如物

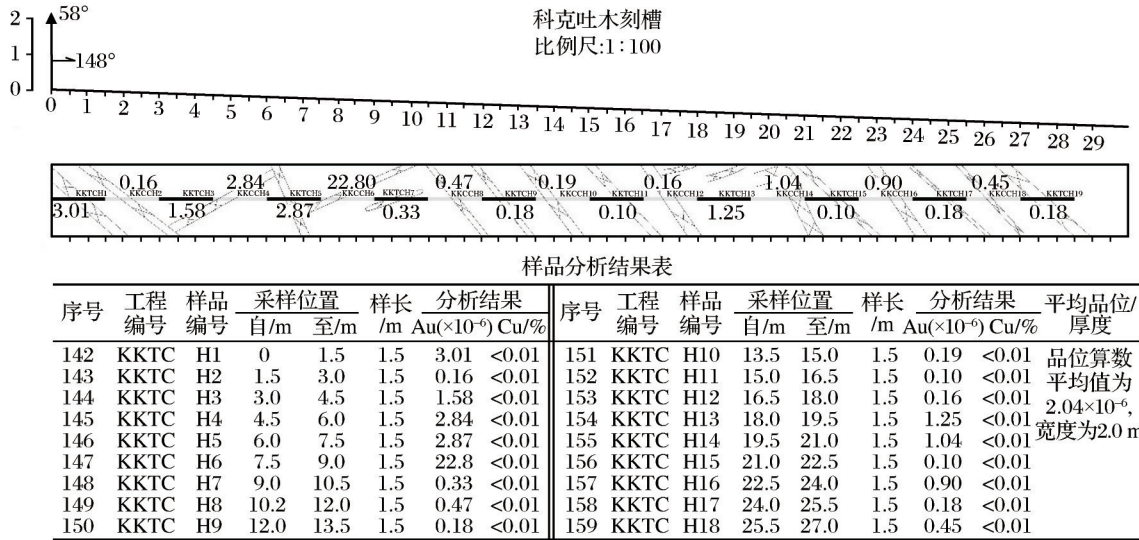
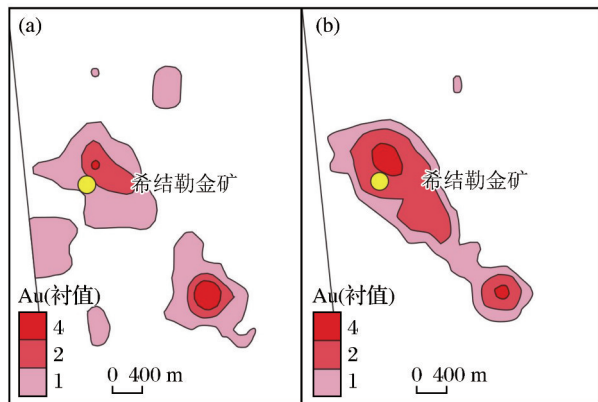


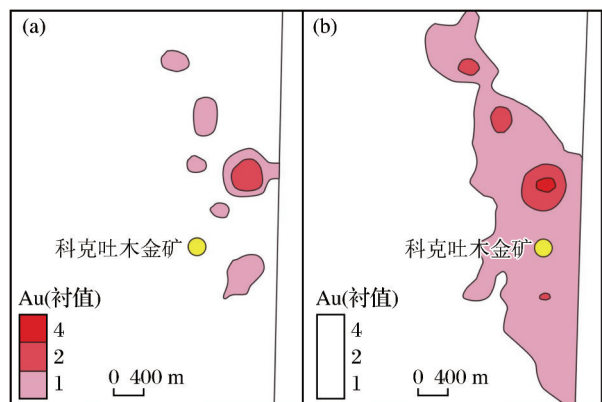
图7 科克吐木刻槽样检测值
Fig. 7 Keketumu groove sample detection value



(a)传统方法;(b)岩性分区异常下限衬值法

图8 希结勒地区金异常结果对比

Fig. 8 Comparison of gold anomaly results in Xijiele area



(a)传统方法;(b)岩性分区异常下限衬值法

图9 科克吐木地区金异常结果对比

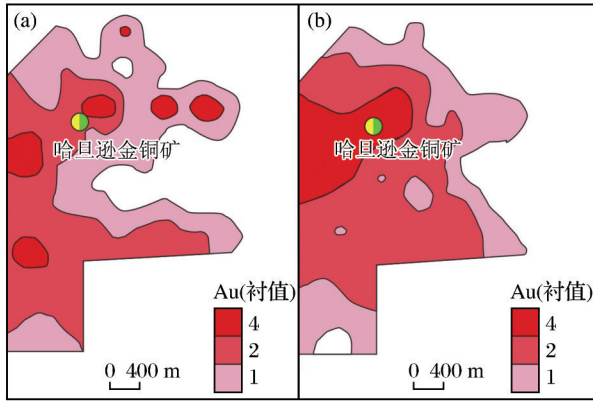
Fig. 9 Comparison of gold anomaly results in Keketumu area

理、化学风化过程或外生成矿作用(马昌前等, 2024)。

对比2种方法圈定的异常并结合参数统计(图2, 表1),可以看出不同方法下的异常差异与浓集系数关系密切。例如Au的高含量多出现于侵入岩对应的高背景区与沉积岩对应的低背景区的过渡地带,传统方法采样Grd模型通过搜索半径的筛选会将高背景区圈定为异常,导致虚假异常的出现;而岩性分区会通过浓集系数区分背景值,使得评价更为客观。Cu元素受侵入岩和碳酸盐岩等多背景的影响,传统方法圈定异常多集中在侵入岩和碳酸盐岩

分布区,异常面积普遍偏大,这一现象与Zhou et al (2024)的研究结果一致。

需要注意的是,需要对岩性分区衬值法的适用条件与局限性进行讨论。该方法更适用于矿化与特定岩性关系密切或受“构造—岩性”界面控制的矿床类型,对于成矿物质主要源于深部流体、异常严格受构造控制的矿床,该方法需谨慎使用或需结合构造格架进行优化。同时,由于研究区是物理风化为重,本文假设了次生异常与基岩背景是线性衬值度的关系,实际上表生地球化学是一个复杂的过程,异常还会受剥蚀程度和地形等因素的影响,从



(a)传统方法;(b)岩性分区异常下限衬值法

图 10 哈旦逊地区金异常结果对比

Fig. 10 Comparison of gold anomaly results in Hadanxun area

表 2 铜矿点结果比较

Table 2 Comparison of copper mining site results

异常检查方法	外带	中带	内带	非异常区
传统方法	1	2	2	5
岩性分区异常下限衬值法	1	3	2	4

而破坏这种线性关系来影响该方法的准确性,本文只是从岩性的维度来优化对异常空间的探讨,非直接评估矿化规模。

5 结论

(1)在新疆希结勒研究区以及基岩出露好且覆盖以风化碎屑为主的浅覆盖区的特定景观和地质条件下,岩性分区异常下限衬值法能够显著提高复杂地质区化探异常的识别精度。相比传统方法,该方法通过分区计算背景值,有效降低了侵入岩高背景区的假异常干扰,并增强了火山岩区弱异常的识别能力。在新疆希结勒矿区的应用中,金矿异常与矿点的吻合度从42%提升至78%,有效提升了异常识别在金矿勘查应用中的效率。

(2)衬值归一化处理使不同岩性单元的地球化学异常具有可比性,尤其适用于斑岩型—浅成低温热液型金矿系统的“岩性+构造”控矿特点的矿床。研究表明,元素富集特征受岩性背景和成矿作用的共同制约,未来可结合机器学习优化岩性分区算法对寻找隐伏矿床作进一步探索。

致谢 在野外工作期间,中国地质调查局西安矿产资源调查中心刘宇刚、杨广州、张斌斌、李培峰、赵扬帆、史延、王卫斌、李瑞金、尚斌、沈佳豪、闫佳佳和张文武等同志在采样工作等方面作出了贡献,在此一并表示衷心感谢!

参考文献 (References):

Cook N J, Ehrig K, Ciobanu C L, et al, 2024. Detailed characterisation of precious metals and critical elements in anode slimes from the Olympic Dam copper refinery, South Australia[J]. *Minerals Engineering*, 206: 108539.

Liao L L, Du S S, Ding Y, et al, 2021. Highly stable surface-enhanced Raman spectroscopy assay on abnormal thrombin levels in the blood plasma of cancer patients[J]. *Analytical Methods*, 13(37): 4328-4333.

Moshefi P, Hosseinzadeh M R, Moayyed M, et al, 2020. Distinctive geochemical features of biotite types from the sub-economic Sonajil porphyry-type Cu deposit, northwestern Iran: implications for analysis of porphyry copper deposit mineralization potential[J]. *Journal of Geochemical Exploration*, 214: 106543.

Pettke T, Oberli F, Heinrich C A, 2010. The magma and metal source of giant porphyry-type ore deposits, based on lead isotope microanalysis of individual fluid inclusions[J]. *Earth and Planetary Science Letters*, 296(3/4): 267-277.

Smedley P L, Knudsen J, Maiga D, 2007. Arsenic in groundwater from mineralised Proterozoic basement rocks of Burkina Faso[J]. *Applied Geochemistry*, 22(5): 1074-1092.

Zhou Z K, Li H, Li X F, et al, 2024. Genesis of gold mineralization in southwestern Hunan, South China: evidence from ore-hosted zircon geochronology and geochemistry[J]. *Ore Geology Reviews*, 175: 106340.

白建科, 2021. 新疆东准噶尔地区石墨矿成因及成矿规律[D]. 西安: 西北大学.

Bai Jianke, 2021. Metallogeny of the graphite deposits in the eastern Junggar area, northern Xinjiang[D]. Xi'an: Northwest University.

陈波, 2011. 新疆西天山莱历斯高尔—肯登高尔铜铅锌矿集区成矿作用研究[D]. 西安: 长安大学.

Chen Bo, 2011. Metallogenesis of Lailisigaoer-Kendenggaer copper-molybdenum-lead-zinc ore cluster in Western Tianshan, Xinjiang, China[D]. Xi'an: Chang'an University.

陈海龙, 张威, 欧阳志强, 等, 2025. C-A 多重分形模型在复杂地球化学叠加场分解中的应用研究: 以湖南沃溪金矿区为例[J]. *地球科学进展*, 40(8): 847-863. Chen

- Hailong, Zhang Wei, Ouyang Zhiqiang, et al, 2025. Application of C-A multifractal model in complex geochemical superposition diel decomposition: a case study of the Woxi Au mining area in Hunan Province [J]. *Advances in Earth Science*, 40(8): 847-863.
- 陈晶源, 马英, 陈金牛, 等, 2025. 柴达木盆地鸭湖构造深层卤水水化学及硫同位素特征 [J]. *西北地质*, 58(6): 56-73. Chen Jingyuan, Ma Ying, Chen Jinniu, et al, 2025. Hydrochemical and sulfur isotope characteristics of deep brine in the Yahu structure zone of Qaidam Basin [J]. *Northwestern Geology*, 58(6): 56-73.
- 朵德英, 刘秀峰, 李波, 2025. 基于构造地球化学弱信息提取技术的金属矿产探测研究 [J]. *物探与化探*, 49(5): 1053-1060. Duo Deying, Liu Xiufeng, Li Bo, 2025. Metal mineral exploration based on tectono-geochemistry weak information extraction [J]. *Geophysical and Geochemical Exploration*, 49(5): 1053-1060.
- 高艳芳, 柳青青, 王玮, 等, 2017. 正态分布和对数变换在化探数据处理中存在问题的讨论 [J]. *物探化探计算技术*, 39(3): 404-410. Gao Yanfang, Liu Qingqing, Wang Wei, et al, 2017. The discussing of normal distribution and log value in geochemical exploration [J]. *Computing Techniques for Geophysical and Geochemical Exploration*, 39(3): 404-410.
- 袞民汕, 吕新彪, 李光春, 等, 2023. 分区标准化与多元统计分析在浅覆盖区地球化学勘查中的应用: 以大兴安岭某区 1:5 万土壤地球化学调查为例 [J]. *矿物学报*, 43(1): 112-124. Gun Minshan, Lü Xinbiao, Li Guangchun, et al, 2023. The application of the zoning standardization and multivariate statistical analysis for the geochemical exploration in the shallow overburden area: a case study of the 1:50000 soil geochemical survey in an area within the Daxing'anling Mountains, China [J]. *Acta Mineralogica Sinica*, 43(1): 112-124.
- 黄岗, 周建波, 尹福光, 等, 2025. 东准噶尔卡拉麦里洋内初始俯冲时限: 来自早泥盆世斜长花岗岩的证据 [J]. *地质学报*, 99(7): 2311-2329. Huang Gang, Zhou Jianbo, Yin Fuguang, et al, 2025. Timing of initial subduction in the Kalamaili Paleo-Ocean, East Junggar: evidence from the early devonian plagiogranite [J]. *Acta Geologica Sinica*, 99(7): 2311-2329.
- 李建江, 张燕, 2020. 新疆青河县希结勒金矿床特征及找矿潜力分析 [J]. *新疆有色金属*, 43(2): 72-73. Li Jianjiang, Zhang Yan, 2020. Characteristics and prospecting potential analysis of Xijiele gold deposit in Qinghe, Xinjiang [J]. *Xinjiang Youse Jinshu*, 43(2): 72-73.
- 李随民, 焦雪红, 韩玉丑, 等, 2023. 冀北两种类型钼矿床地质特征与控矿因素差异性分析 [J]. *地球学报*, 44(6): 967-982. Li Suimin, Jiao Xuehong, Han Yuchou, et al, 2023. Difference analysis of the geological characteristics and ore-controlling factors of two types of molybdenum deposits in northern Hebei Province [J]. *Acta Geoscientica Sinica*, 44(6): 967-982.
- 李廷栋, 2022. 中国地质矿产调查事业发展历程 [J]. *地质力学学报*, 28(5): 653-682. Li Tingdong, 2022. Development history of geological and mineral survey in China [J]. *Journal of Geomechanics*, 28(5): 653-682.
- 刘达东, 田辉, 范青青, 等, 2025. 黔北地区复杂构造区下古生界页岩气成藏地质条件及勘探方向 [J]. *天然气工业*, 45(2): 51-62. Liu Dadong, Tian Hui, Fan Qingqing, et al, 2025. Geologic conditions and exploration prospects of the lower Paleozoic shale gas reservoirs in the northern Guizhou complex structural area, SW China [J]. *Natural Gas Industry*, 45(2): 51-62.
- 罗赣平, 2023. 探究地球化学在地质矿产勘查中的应用 [J]. *世界有色金属*, (5): 100-102. Luo Ganping, 2023. Exploring the application of geochemistry in geological and mineral exploration [J]. *World Nonferrous Metals*, (5): 100-102.
- 吕婷, 2020. 电感耦合等离子体质谱法测定镍基高温合金中痕量元素砷、银、镓、镉、钇、碲的方法研究 [D]. 北京: 中国机械科学研究总院. Lü Ting, 2020. Determination of trace elements arsenic, silver, gallium, cadmium, yttrium and tellurium in nickel base superalloy by inductively coupled plasma mass spectrometry [D]. Beijing: China Academy of Machinery Science and Technology.
- 马昌前, 刘彬, 薛振华, 等, 2024. 从长英质侵入体揭示火山喷发过程与岩浆通道系统 [J]. *岩石学报*, 40(7): 1997-2018. Ma Changqian, Liu Bin, Xue Zhenhua, et al, 2024. Insights into the volcanic eruption process and magmatic plumbing systems from felsic intrusions [J]. *Acta Petrologica Sinica*, 40(7): 1997-2018.
- 孟秋熠, 2020. 东准噶尔古生代花岗岩时空分布规律与成矿作用 [D]. 北京: 中国地质大学(北京). Meng Qiuyi, 2020. Spatiotemporal distribution and mineralization of paleozoic granites in East Junggar [D]. Beijing: China University of Geosciences.
- 南艳, 雷自强, 徐艳, 等, 2017. 应用小波分析法确定新疆达巴特地区地球化学勘查异常下限 [J]. *甘肃科技*, 33(16): 20-22, 3. Nan Yan, Lei Ziqiang, Xu Yan, et al, 2017.

- Using wavelet analysis to determine the lower limit of geochemical exploration anomalies in Dabate area, Xinjiang [J]. *Gansu Science and Technology*, 33(16):20-22, 3.
- 钱程, 李龙, 2023. 浅析新疆东准噶尔地区地质特征及成矿规律[J]. *世界有色金属*, (19): 61-63. Qian Cheng, Li Long, 2023. Analysis of geological characteristics and metallogenic laws in the east Junggar Region of Xinjiang [J]. *World Nonferrous Metals*, (19): 61-63.
- 热亚尼古丽·杰力力, 2012. 清河伽马特(含铜金)铁矿层状岩体地质特征及含矿性研究[D]. 乌鲁木齐: 新疆大学.
- Rayani G J. 2012. Geology characteristics and ore-bearing potential of the Jiamate Fe (Cu-Au) ore-bearing layered intrusion in Qinghe[D]. Urumqi: Xinjiang University.
- 商振城, 罗先熔, 李超, 等, 2022. 内蒙古额济纳旗梧桐井南多金属矿区土壤地球化学特征及找矿预测[J]. *现代矿业*, 38(8): 26-31. Shang Zhencheng, Luo Xianrong, Li Chao, et al, 2022. Soil geochemical characteristics and prospecting prediction of Wutongjingnan polymetallic mining area in Ejina banner, Inner Mongolia [J]. *Modern Mining*, 38(8):26-31.
- 王克军, 2004. 甘肃西秦岭甘加一八松地区金矿地球化学特征及找矿标志[J]. *甘肃冶金*, 26(2): 58-61. Wang Kejun, 2004. Geochemistry characteristics and ore-prospecting marks of gold deposits in the Ganjia-Basong area of western Qinling, Gansu [J]. *Gansu Metallurgy*, 26(2): 58-61.
- 杨建国, 闫晔轶, 任有祥, 等, 2010. 北山地区斑岩铜(钼金)矿成矿规律与找矿方向[J]. *矿床地质*, 29(增刊1): 313-314. Yang Jianguo, Yan Yeyi, Ren Youxiang, et al, 2010. Metallogenic regularity and prospecting direction of porphyry copper (molybdenum gold) deposits in Beishan area [J]. *Mineral Deposits*, 29(Suppl.1): 313-314.
- 杨用彪, 曹积飞, 王丽娟, 等, 2024. 岩性分区异常下限衬值法圈定化探异常的优劣: 以江苏金山地区为例[J]. *西北地质*, 57(6): 318-325. Yang Yongbiao, Cao Jifei, Wang Lijuan, et al, 2024. Advantages and disadvantages in delineating geochemical anomalies by lithologic zoning anomaly based on lower limit contrast method: a case study in Jinshan, Jiangsu Province [J]. *Northwestern Geology*, 57(6): 318-325.
- 杨用彪, 黄顺生, 王丽娟, 等, 2023. 溧阳盆地金山地区土壤地球化学特征及找矿效果[J]. *地质与勘探*, 59(4): 791-802. Yang Yongbiao, Huang Shunsheng, Wang Lijuan, et al, 2023. Geochemical characteristics of soil and their prospecting effect in the Jinshan area of Liyang Basin [J]. *Geology and Exploration*, 59(4): 791-802.
- 张诗敏, 李随民, 周吉晨, 等, 2023. 森林沼泽覆盖区化探异常提取方法研究: 以内蒙古三七林场幅为例[J]. *化工矿产地质*, 45(2): 188-192. Zhang Shimin, Li Suimin, Zhou Jichen, et al, 2023. Study on extraction method of geochemical anomaly in forest swamp covered area: a case study of Sanqi tree farm in Inner Mongolia [J]. *Geology of Chemical Minerals*, 45(2): 188-192.

Optimization of the Geochemical Anomaly Contrast Method Based on Lithologic Zoning

QUAN Guorong^{1,2}, WANG Yuekun^{1,2}, WANG Ate^{1,2}, SUN Jungang^{1,2}, HE Hujun³

1. Xi'an Center of Mineral Resources Survey, China Geological Survey, Xi'an 710100, Shaanxi, China;

2. Technology Innovation Center for Gold Ore Exploration, China Geological Survey, Xi'an 710100, Shaanxi, China;

3. School of Earth Science and Resources, Chang'an University, Xi'an 710054, Shaanxi, China

Abstract: The Xijiele research area is situated in the southern region of Qinghe County, within Altay Prefecture, Xinjiang. This area exhibits a complex geological structure, characterized by the presence of basic volcanic and clastic rock formations within the Late Paleozoic island arc zone. This study utilizes 1:10 000 soil geochemical measurement data to evaluate the relative merits and drawbacks of conventional anomaly delineation techniques versus lithological zoning anomaly lower limit lining methods. The findings reveal that traditional approaches, which apply a uniform lower limit for anomalies across the entire region, are vulnerable to interference from areas with high background levels, resulting in the potential oversight of false or weak anomalies. In contrast, the lithological zoning anomaly lower limit lining method enhances the precision of

anomaly identification by categorizing sedimentary, volcanic, and intrusive rocks into three distinct sub-zones, calculating lining values, and normalizing them accordingly. The validation of established gold (Au) and copper (Cu) mineral deposits within the region indicates that the anomalies identified through the lithological zoning method not only demonstrate a higher degree of concordance with the spatial distribution of the mineral deposits but also exhibit more distinct concentration zoning characteristics. Furthermore, their spatial distribution patterns show improved correlation with the regional geological background of mineralization. This method effectively enhances the contrast between anomalies and background by mitigating the influence of lithological background variations, thereby offering a novel technical approach for the identification of geochemical anomalies in areas with complex lithological distributions. It holds significant practical value for guiding mineral exploration efforts in regions with analogous geological backgrounds.

Key words: geochemical anomaly; lithology zoning; contrast value method; anomaly threshold; Xijiele area