

RaA 氡气、分量化探联袂测量方法在粤北犁壁岭地段 隐伏铀矿勘查中的应用

胡鹏^{1,2}, 丁卫撑^{2*}, 张凡颖¹, 龙自强¹, 陈军军¹

1. 核工业二九〇研究所, 广东 韶关 512029;

2. 成都理工大学核技术与自动化工程学院, 四川 成都 610059



摘要:粤北长江矿集区是我国花岗岩型铀矿的重要产区,分布有我国现存唯一的特大型硬岩铀矿床——棉花坑铀矿床。为评价该区北部深部铀矿找矿潜力,选取与棉花坑铀矿床成矿条件相似的犁壁岭地段,开展了RaA 氡气、分量化探联袂测量,从而进一步扩大SN向断裂带的找矿成果。方法组合的可行性研究及犁壁岭地段找矿实践表明,RaA 氡气、分量化探联袂测量方法能够有效预测深部隐伏铀矿,隐伏铀矿化体常定位于U-Rn-Be-Mo等找矿指示元素的复合异常区。针对区内找矿指示元素在局部铀成矿有利位置存在弱异常的现象,提出采用多找矿指示元素组合构建铀成矿有利地段综合预测指数(H),用于弥补依靠U、Rn复合异常定位隐伏矿体会遗漏部分铀成矿有利位置的缺点,达到强化弱异常及指示隐伏矿体有效信息的目的。据此,在犁壁岭地段预测了4处综合异常(编号为ZH-1~ZH-4),从中优选异常面积最大、浓集程度最高的ZH-3号异常进行钻探揭露验证。结果显示,14号和19号带揭露到累计视厚度为8.80 m、平均品位为0.085%的工业铀矿段,证实犁壁岭地段深部具备良好的铀矿找矿潜力,扩大了长江矿集区北部的找矿空间。

关键词:RaA 氡气测量;分量化探;隐伏铀矿;弱异常;指示元素组合;犁壁岭地段

中图分类号:P612 文献标志码:A 文章编号:1005-2518(2025)06-1103-14 DOI:10.11872/j.issn.1005-2518.2025.06.156
引用格式:胡鹏,丁卫撑,张凡颖,等.RaA 氡气、分量化探联袂测量方法在粤北犁壁岭地段隐伏铀矿勘查中的应用[J].黄金科学技术,2025,33(6):1103-1116.HU Peng, DING Weicheng, ZHANG Fanying, et al. Application of RaA Radon Gas and Partial Extraction Geochemical Prospecting Combined Measurement Method in the Exploration of Concealed Uranium Deposits in the Libiling Area, Northern Guangdong Province[J]. Gold Science and Technology, 2025, 33(6): 1103-1116.

粤北长江矿集区是我国花岗岩型铀矿的重要产区,其内分布有我国现存唯一的特大型硬岩铀矿床——棉花坑铀矿床。该矿床铀矿化主要赋存于近SN向断裂带内,以厚度大、品位富和连续性好而著称(祁家明等,2019;Zhang et al.,2023)。2019年科技部实施的“华南热液型铀矿基地深部探测技术示范”项目,在棉花坑铀矿床深部取得重大找矿突破,并在1550 m深度发现了我国最深的工业铀矿

化体,刷新了我国工业铀矿化发现的最深记录,同时也为粤北地区开辟500~1500 m深度的“第二找矿空间”提供了有力支撑(马永胜,2022)。据统计,长江矿集区铀矿床主矿体埋深均大于200 m,且地表广泛覆盖第四系浮土,导致传统的野外地质调查手段难以有效获取深部找矿信息,因此众多地质工作者将深部找矿的核心技术需求聚焦于能获取深部找矿信息的物化探方法(王勇等,2020;赵欣怡

收稿日期:2025-05-04;修订日期:2025-08-28

基金项目:中国核工业地质局项目“广东省和平县古坑—李田地区铀矿资源调查评价”(编号:202439-4)资助

作者简介:胡鹏(1987—),男,四川青神人,博士研究生,高级工程师,从事铀矿地质科研与生产工作。E-mail:498420635@qq.com

*通信作者:丁卫撑(1978—),男,浙江台州人,教授,博士生导师,从事氡及其子体探测研究工作。E-mail:17817717@qq.com

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

等,2022)。

众所周知,铀属于天然放射性元素,其衰变子体 ^{222}Rn 能依靠地质营力不断穿透铀矿体周围岩石,迁移至地表土壤中富集(黄建乐等,2021;郭建军等,2024;程俊义等,2025)。基于这一特性,开展RaA氡气测量,能够有效获取深部隐伏铀矿信息,间接达到寻找隐伏铀矿的目的。然而,土壤中氡浓度易受地形起伏、土壤层厚度和孔隙度等非致矿因素的影响(李茂等,2014;胡鹏等,2024),导致单一的RaA氡气测量方法在深部找矿预测中效果欠佳,需与其他深部找矿方法组合测量,以提升其准确性。分量化探法是基于地气流迁移理论发展而来的深穿透地球化学找矿方法,其核心原理是通过选择性提取土壤中活动态金属元素含量(尹金双等,2012),实现对深部隐伏矿体的有效预测。经过多年勘探实践验证,分量化探法是华南地区深部铀矿找矿的有效方法(赖静等,2017;刘幼建等,2020;王家跃等,2022)。但是,该方法同样存在局限,从野外样品采集、实验室样品制备再到化学分析需要耗费大量时间,期间更无法为同期开展的地质勘查工作提供及时指导。

基于上述认识,RaA氡气、分量化探组合测量,不仅能够有效解决分量化探样品分析周期长、难以实时指导深部找矿工作的难题,还能够为判别RaA氡气测量中非致矿因素引起的氡浓度异常提供客观依据。二者联袂测量能够充分发挥RaA氡气测量的便捷性和及时性,以及分量化探测量在矿致异常识别中的可靠性等优势,进而为该区域深部铀矿找矿工作提供科学指导。犁壁岭地段位于长江矿集区北延段,发育有与棉花坑铀矿床主含矿带相似的SN向断裂。为进一步扩大矿集区SN向断裂带的铀矿找矿成果,也为评估矿集区北延段深部铀成矿潜力,优选犁壁岭地段开展RaA氡气、分量化探联袂测量工作,旨在预测铀成矿有利位置,为后续工程部署提供科学依据。

1 区域地质概况

诸广山复式岩体是EW向骑田岭—诸广山花岗岩带的重要组成部分[图1(a)],以多幕式构造—岩浆活动及多期“成矿大爆发”为主要特色,也是稀

有金属、铀和钨等矿产的重要产地(李宏卫等,2021; Qi et al,2024)。长江矿集区位于诸广山岩体南部,并大致被NEE向城口断裂、黄溪水断裂及NE向塘洞断裂、成功坳断裂所限制,其内产出有棉花坑(特大型)、书楼丘(大型)、水石(中型)等铀矿床及一大批矿化异常点,显示出优越的铀成矿地质条件。该区出露的围岩为印支期二云母花岗岩(油洞岩体)和燕山期黑云母花岗岩(长江岩体)[图1(b)]。区内主控矿因素为断裂,铀矿化主要赋存于近SN向张扭性硅化断裂带内,呈不规则的单脉状、扁豆状或透镜状产出,沿断裂倾向延伸稳定。整体而言,区内多方向断裂的交切和夹持部位是铀成矿的有利位置。

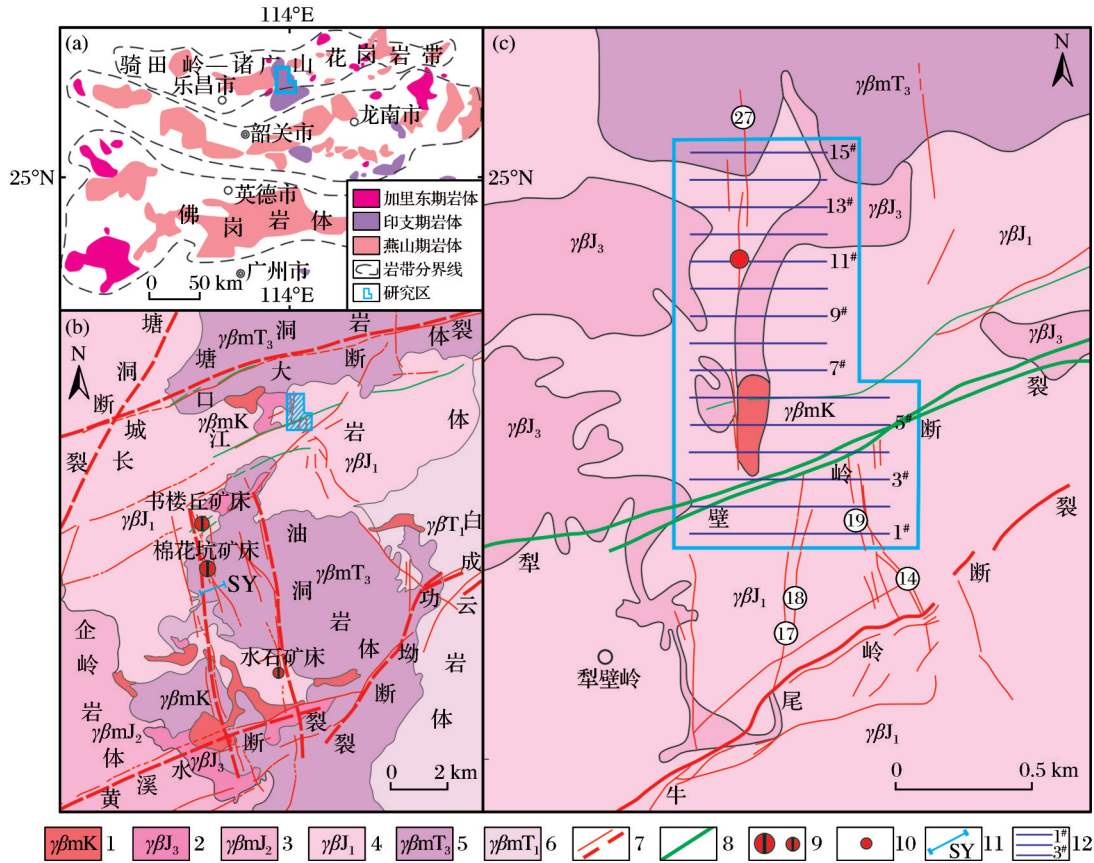
犁壁岭地段位于长江矿集区北延段[图1(c)],具有与棉花坑、书楼丘矿床相似的赋矿围岩条件,均为印支期二云母花岗岩(塘洞岩体)和燕山期黑云母花岗岩(长江岩体),铀含量为 $9\times 10^{-6}\sim 26\times 10^{-6}$,平均值为 12.70×10^{-6} ,明显高于我国东部上地壳值(1.55×10^{-6})(高山等,1999),为区内铀成矿提供了丰富的铀源,是中等含铀—富铀岩体(龙自强等,2024)。此外,晚期还大量发育酸性和中基性岩脉,进一步促进了铀的活化、迁移和富集。区内断裂发育,按走向可划分为NE和近SN向2组。NE向断裂为犁壁岭和牛尾岭断裂,长度为7~15 km,倾角为 $68^{\circ}\sim 80^{\circ}$,断裂性质均为压扭性。其中,犁壁岭断裂又被后期中基性岩脉改造和充填,反映断裂沟通了地幔热源,可为区内铀成矿提供丰富的热源和矿化剂,属于重要的导矿构造;近SN向的14号、19号和27号等断裂则为区内有利的含矿构造,长度为1.0~1.5 km,宽度为0.5~5.0 m,属于张—扭性断裂。带内普遍发育与铀矿化密切相关的硅化、赤铁矿化、黄铁矿化和萤石化等热液蚀变。整体而言,该地段集构造、岩浆和蚀变于一体,显示出优越的铀成矿环境和成矿条件。

2 方法原理及工作部署

2.1 方法原理

(1) RaA 氡气测量

氡(Rn)的天然放射性同位素主要包括 ^{219}Rn 、 ^{220}Rn 和 ^{222}Rn ,分别来自钍系、铀系和铀系,其衰变链如图2所示(Nazaroff,1992)。在氡气测量实践



1. 中细粒二云母花岗岩; 2. 中细粒黑云母花岗岩; 3. 中粒二云母花岗岩; 4. 中粗粒黑云母花岗岩; 5. 粗中粒二云母花岗岩; 6. 黑云母花岗岩; 7. 实测或推断裂; 8. 中基性岩脉; 9. 铀矿床; 10. 伽玛异常点; 11. 试验剖面及编号; 12. 测线及编号

图1 粤北岩浆岩带分布示意图(a)(修改自周新民, 2007)、长江矿集区地质简图(b)及犁壁岭地段铀矿地质简图(c)

Fig. 1 Schematic map of magmatic rock belt distribution in northern Guangdong (a) (modified after Zhou, 2007), geological map of the Changjiang ore concentration area (b) and geological map of uranium deposit in the Libiling segment (c)

中,因核素 ^{219}Rn 和 ^{220}Rn 半衰期极短(分别为3.96 s和55.6 s),所以RaA氡气测量的目标核素为半衰期相对较长的 ^{222}Rn (3.82 d)(Idowu et al, 2022),其核心原理是通过探测 ^{222}Rn 第一代子体 ^{218}Po 衰变释放的 α 粒子计数率来间接量化土壤中的氡气浓度。首先,利用测氡仪(如FD-3017 RaA)主动抽取土壤孔隙中富集的氡气;然后,通过施加高压静电场,利用金属收集片收集带正电荷的 $^{218}\text{Po}^+$ 离子;其次,采用金硅面垒半导体探测器精确测量 ^{218}Po 衰变释放的特征 α 粒子;最后,依据平衡状态下 α 粒子计数率(N)与氡气浓度(C_{Rn})间的线性关系($C_{\text{Rn}}=J \times N$, J 为经标定的仪器换算系数)量化土壤中的氡气浓度。

^{222}Rn 作为铀系衰变链中唯一的气态元素,具备较强的迁移特性,能通过热力传递、对流、扩散及抽吸等地质营力从地下数百米深度迁移至浅表土壤

孔隙中富集。在理想条件下,土壤中氡浓度的高低与深部铀矿化情况密切相关,因此通过系统测量其空间分布可大致评估工作区深部铀矿资源潜力。多年铀矿找矿实践证实,RaA氡气测量是深部铀矿勘查的有效方法(宋亮等, 2015;郭建军等, 2024;胡鹏等, 2024),且该方法能够大致反映埋深500 m的铀矿体(宋亮等, 2015;郭建军等, 2024),具有野外用时短、易操作和灵活性强等优点。

(2) 分量化探法测量

分量化探是基于地气迁移理论而发展起来的深穿透铀矿找矿方法(尹金双等, 2012),其核心原理为地球内部的上升地气流(Rn 、 He 和 CO_2 等)捕获隐伏矿体及蚀变带中活动态金属元素(图3),并将其携带至浅表土壤中留存,形成铀及其共伴生元素异常。野外通过采集B层土样,待其阴干后,送

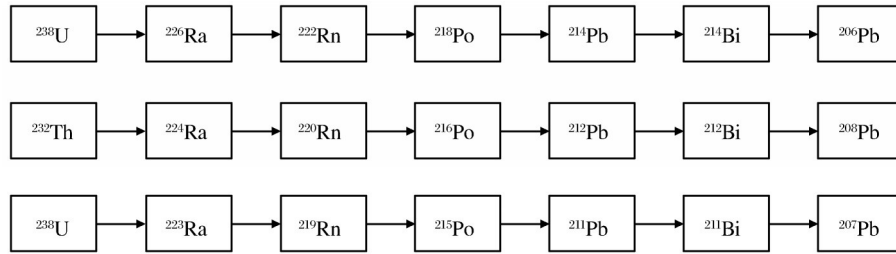
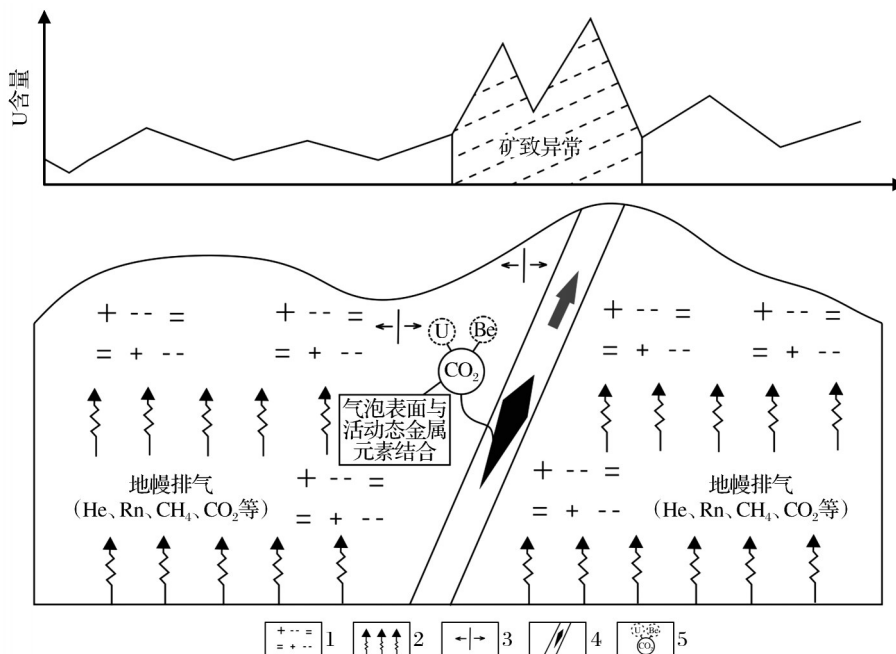


图2 铀系、钍系和锕铀系简化衰变图

Fig. 2 Simplified decay diagram of uranium, thorium and actinide-uranium series

实验室通过特殊的提取剂提取金属活动态元素的含量,进而获取深部铀矿找矿信息。金属活动态元素的特点是用弱或很弱的提取剂,甚至去离子水就能够将其提取出来(胡鹏等,2025),因其仅提取元

素的活动态部分而非矿物晶格中的稳定态部分,故称为分量化探。这些活动态元素含量是地气流途经所有地质体的综合反映,其找矿目标元素的含量高低也可作为判别深部矿化信息的主要参考。



1. 花岗岩;2. 上升地气流;3. 张性构造;4. 断裂及铀矿体;5. 吸附的活动态金属元素

图3 分量化探方法示意图(修改自胡鹏等,2025)

Fig. 3 Schematic diagram of partial extraction geochemical prospecting method (modified after Hu et al, 2025)

2.2 工作部署及数据采集

测区物化探工作分2部分开展。首先,优选棉花坑铀矿床6号勘探线部署方法有效性试验,用于验证 RaA 氦气法、分量化探联袂测量预测深部铀矿化的有效性及矿致异常特征;其次,优选犁壁岭地段开展综合物化探扫面工作,圈定综合异常,评价其深部铀成矿潜力。方法有效性试验采用剖面测量,剖面长度为700 m,方向为75°,点距为20 m,垂

直于棉花坑矿床主含矿带——9号带[图1(b)]。犁壁岭地段综合物化探测量采用面积测量,网度为100 m×20 m,测线方向为90°,自南向北编号为1#~15#[图1(c)],以控制区内近SN向27号、14号和19号等铀成矿有利构造为目的,并兼顾NE向犁壁岭断裂。

RaA 氦气法测量使用FD-3017 RaA型测氦仪,野外测量工作严格按《铀矿勘查氦及其子体测量规

范》(EJ/T 605—2018)执行。到达野外测点后,用钢钎打入 60~70 cm 的导向孔,随后插入取样器,并迅速踏实取样器周围的松土,以防止大气混入。每个测点测量 2 次,每次测量时间为 2 min,取其平均值作为测点土壤氡浓度值,共完成 446 个测点数据采集。分量化探样品采集参照《土壤地球化学测量规程》(DZ/T 0145—2017)执行,采集 B 层土样,采样深度为 20~40 cm,共采集 446 件样品,经自然阴干后过 80 目筛,送至核工业北京地质研究院进行分析测试,测试元素包括 Be、Mn、Th、U 和 W 等 14 种元素。

3 方法组合可行性试验研究

棉花坑铀矿床位于诸广山复式岩体南部,是我国现存唯一的特大型硬岩铀矿床,也是区内该类型矿床的典型代表。遵循“由已知到未知”的原则,优选棉花坑铀矿床 6 号勘探线开展 RaA 氡气和分量化探联袂测量方法的可行性研究,同时探寻区内矿致异常特征,建立科学的隐伏矿体预测模式。试验结果如图 4 所示,揭示出如下物化探异常特征:

(1)在埋深 200~400 m 的隐伏铀矿体上方,存在明显的土壤氡浓度异常和分量 U 异常。但土壤氡浓度在 9-2 号含矿带地表出露处仅见微弱异常,经地表查证为土壤致密且厚度较薄致使测氡仪无法采集到足量气体所致。

(2)已知含矿断裂地表出露处,除分量 U 异常外,还伴随不同程度的分量 Be、Mn、Zn 和 Mo 等异常。究其原因在于,含矿构造带是成矿流体和物质聚散的有利通道和场所(韩润生,2005),某些地球化学性质相似的元素在铀成矿过程中共同迁移、富集或亏损,从而形成与 U 元素具有显著空间关联性的复合蚀变地球化学场。

(3)依据 Rn、U、Be 和 Mo 等元素异常复合情况,在平距 100 m 和 620 m 附近推断出 2 条隐伏的含矿断裂带(F_1 和 F_2),其中 F_1 断裂带已被邻线(相距 50 m)钻探工程 ZK4-1 揭露证实,并在带内揭露到视厚度为 5.90 m、铀品位为 0.066% 的工业矿体。

棉花坑铀矿床的矿体埋藏深度较深,加上覆地质体的屏蔽作用,以及早期非含铀热液对断裂通道的阻塞等,导致找矿指示元素局部呈现弱异常特征,如 9-2 号含矿断裂带的氡浓度异常。若仅采用

RaA 氡气测量则易错失该含矿带,若仅采用分量化探测量则需耗费大量时间等待分析测试结果,且不能随时追索控制含矿断裂。因此,二者联袂测量不仅能够第一时间为地质人员提供找矿线索,也能够弥补 RaA 氡气测量易受非致矿因素影响的缺点。综上所述,RaA 氡气和分量化探联袂测量方法是寻找隐伏花岗岩型铀矿的一种有效且可行的方法,隐伏铀矿体常定位于 Rn、U、Mo 和 Be 等找矿指示元素异常复合处。

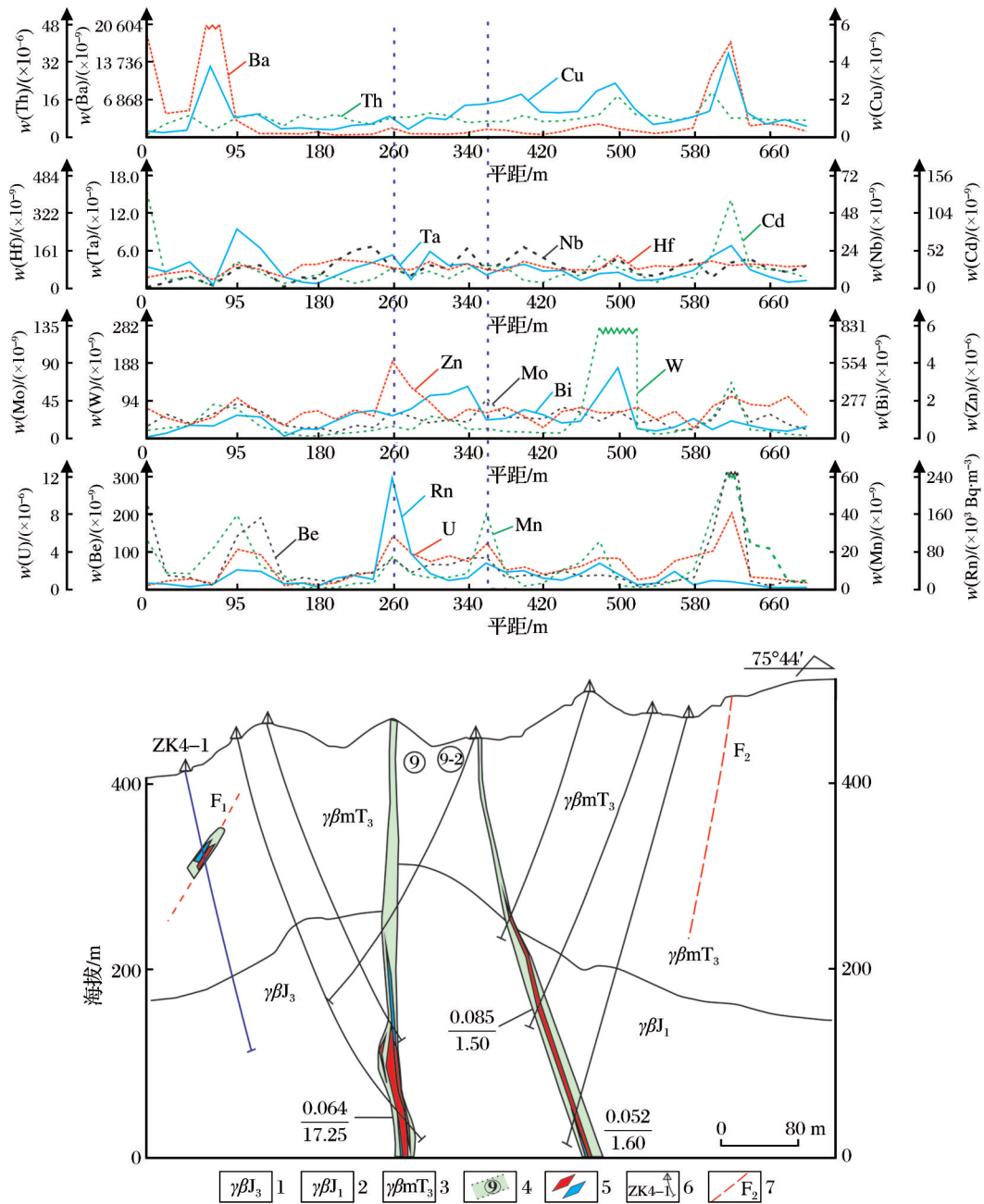
4 物化探测量成果

4.1 分量化探测量

(1) R 型聚类分析

前文已述,具有相似地球化学性质的元素在流体运移过程中发生协同迁移与分异,进而形成具有显著空间关联性的复合蚀变地球化学场。这种多元素耦合作用不仅反映了深部成矿作用的物理化学条件,而且为定位隐伏铀矿(化)体提供了多维度的找矿标志。为进一步凸显犁壁岭地段与 U 相关元素的聚合性,建立区内多维度找矿标志,选择 R 型聚类分析方法对 14 种元素进行聚类分析。

R 型聚类分析结果如图 5 所示,当欧式距离小于 15 时,元素聚类呈现 4 个组合:① Hf-Ta-Nb-Bi; ② Be-U-Mo-W-Mn; ③ Zn-Ba; ④ Cu-Cd-Th。其中,第 1 组 Hf-Ta-Nb-Bi 属高场强元素组合,均向岩浆演化后期富集。因 Nb 和 Ta 等元素易富集于黑云母中(刘英俊,1987),而区内广泛出露的黑云母花岗岩则能为 Nb、Ta 和 Hf 等稀有元素富集提供良好的载体;Bi 属于亲硫元素,在自然界中以形成 Bi^{3+} 为特征,但亦可形成络合阳离子 $[BiO]^+$,赋存于钽铋矿($SbTaO_4$)中(刘英俊,1987)。第 2 组 Be-U-Mo-W-Mn 为主成矿元素及其共伴生元素组合。其中,W 属于高温成矿元素,可能代表早期南岭地区钨多金属成矿作用(吴德海等,2019),而区内铀成矿属中低温成矿(肖冠雄,2019),U、W 的相关性推测与二者空间叠置有关。Mo 以 $[MoO_4]^{2-}$ 络合阴离子形式与铀酰离子结合,能通过铁氢氧化物吸附而富集(张宇等,2021)。Mn 和 Fe 均属铁族元素, Mn^{2+} 和 Fe^{2+} 晶体化学性质相近,可相互替换共存;Mn、U 相关应是 Mn、Fe 类质同像的结果,与含矿带中普遍



1.中细粒黑云母花岗岩;2.中粗粒黑云母花岗岩;3.粗中粒二云母花岗岩;4.蚀变带及编号;5.工业矿体和矿化体;6.钻孔及编号;7.推断断裂及编号

图4 棉花坑铀矿床6号勘探线方法有效性试验结果

Fig. 4 Effectiveness test results of No.6 exploration line method in the Mianhuakeng uranium deposit

发育的赤铁矿化蚀变相对应。Be、U共生则与Be-F、U-F络合物协同迁移有关,并于物化条件改变时由Be-F和U-F络合物分解、沉淀所致(张龙, 2019)。第3组Zn-Ba和第4组Cu-Cd-Th为中酸性岩浆常见元素组合,Cu、Zn和Cd属亲硫元素,Ba属碱土金属元素,Th属于放射性元素,推测与区内复

杂的中酸性岩浆活动有关。

综上所述,初步可选定U-Mo-W-Mn-Be等元素作为该地区的铀矿找矿指示元素组合。

(2)单元素地球化学特征

为直观展示铀及其共伴生元素的空间分布特征,U、Mn、Be、W和Mo分析数据均采用反距离权重

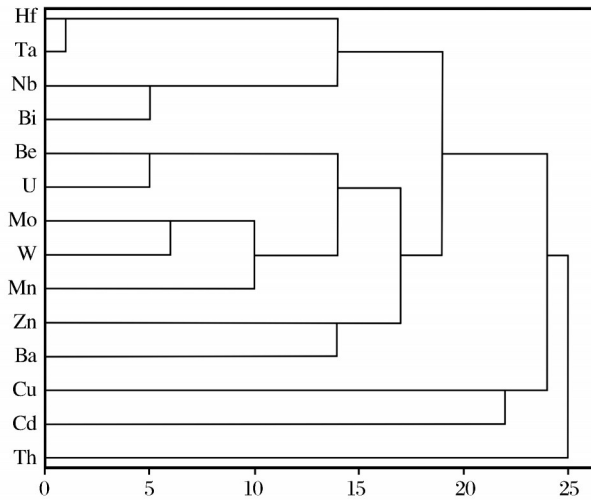


图5 犁壁岭地段分量化探R型聚类谱系图

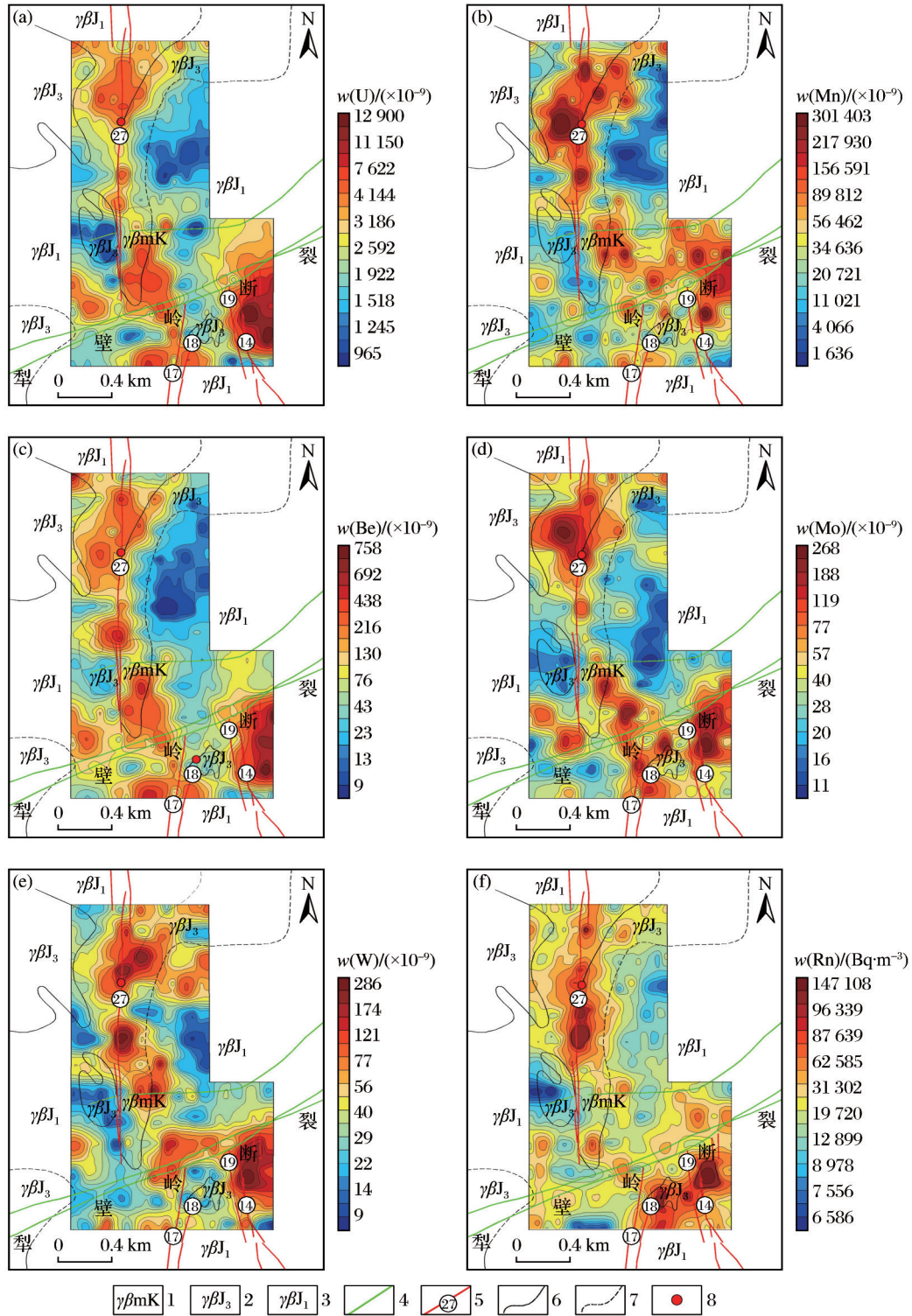
Fig. 5 R-type cluster pedigree diagram of partial extraction geochemical prospecting in Libiling segment

插值法(IDW)进行网格化处理,然后采用累积频率分级法勾绘单元地球化学等值线图(图6)。

测区内分量U含量场晕整体呈“南北高,中部低”的分布特征[图6(a)],大致以分量U含量介于 1.518×10^{-9} ~ 2.592×10^{-9} 为背景场,反映地气迁移途经花岗岩体的U含量背景;以U含量小于 1.333×10^{-9} 为低值场,代表地气途经花岗岩为U亏损区,除岩浆分异演化造成U分布不均匀之外,更多为后期构造和热液活动造成U元素的活化、迁移和流失所致。因其集中分布于燕山早期第一阶段的中粗粒斑状黑云母花岗岩内,预示其可能为区内铀源体之一。以分量U含量大于 3.186×10^{-9} 为高值场,代表地气途经地质体为铀富集区,也是区内铀矿找矿的有利区域。因其集中分布于断裂附近,表明断裂活动是区内铀迁移富集的主要驱动力。整体而言,测区内具有相对规模的分量U异常带(U含量大于等于 4.144×10^{-9})共2条,均呈SN向带状展布,且与27号、14号、19号等断裂带的空间复合程度高,预示该类断裂带为区内铀富集的有利构造。其中,以西部分量U异常场晕规模最大,连续性最好,断续延伸约1200 m,其U含量为 4.500×10^{-9} ~ 16.855×10^{-9} ,严格受近SN向27号、17号和18号带控制,表现为串珠状浓集中心,推测与区内“尖灭再现”的铀成矿规律有关。由于该异常带穿过犁壁岭断裂继续往南延伸,推测27号带与17号、18号带应属同一条断

裂带,被后期犁壁岭断裂左行错断所致。东部异常带位于测区东南部,严格受14号和19号带控制,因其异常面积大,分量U浓集程度高,U含量为 12.036×10^{-9} ~ 619.140×10^{-9} ,且地表查证发现了成矿期热液活动,如微晶石英脉和紫黑色萤石等,推测其深部具备良好的铀矿找矿潜力。

铀及相关元素等值线图研究表明,Be、Mo异常与U异常高度吻合,而W、Mn异常与U异常呈现局部复合、局部分离的特征[图6(b)~6(e)]。究其原因,可能与区内多期次热液活动有关。黄国龙等(2015)对棉花坑铀矿床的研究表明,区内铀成矿过程可划分为3个期次——矿前期(碱交代高温石英脉+含钨石英脉阶段)、成矿期(含铀隐晶—微晶石英脉+含铀紫黑色萤石脉阶段)和矿后期(黏土—萤石—石英脉+方解石脉阶段)。其中,W异常场的空间异质性源于矿前期含钨石英脉的分布特征,其与U异常场的复合区对应于成矿期富铀热液对早期含钨脉体的叠加改造,分离区则反映了缺失成矿期富铀热液叠加的原生W异常区。方法有效性试验剖面显示,棉花坑铀矿床已知含矿带的W异常并不明显,推测为试验剖面含矿带上部早期钨矿体已被剥蚀殆尽所致,也与长江矿集区含钨石英脉仅赋存于海拔较高位置的认识一致(黄国龙等,2015)。U与Mn异常场的复合、分离受控于元素地球化学行为差异。铀在氧化条件(U^{6+})下形成可溶性铀酰络合物(如 $[UO_2(CO_3)_3]^{5-}$),而在还原环境(U^{4+})中沉淀为沥青铀矿; Mn^{2+} 在还原条件下可溶,但在氧化条件下转化为 Mn^{4+} 氧化物沉淀,二者在氧化—还原过渡带(如测区北部异常复合区)可发生共沉淀。该特征与棉花坑铀矿床“上氧化,下还原”的垂向分带模式(陶意,2020)相似,指示犁壁岭地段深部可能存在类似矿化结构。相较于棉花坑铀矿床超千米的矿化垂幅,预示其深部具备良好的铀矿找矿潜力。Be异常场与U异常场的空间耦合性,可归因于成矿期富氟流体的协同迁移机制;铀以氟铀酰络合物(如 $[UO_2F_3]^-$)、铍以 BeF_4^{2-}/BeF_3 形式共同搬运(张龙,2019),后期物化条件的改变导致络合物分解,形成紫黑色萤石—沥青铀矿共生组合。Mo与U的耦合性则与区内中低温(150~250℃)成矿环境密切相关(肖冠雄,2019),Mo以 $[MoO_4]^{2-}$ 络合阴离子形式与铀酰离子结合,并通过铁氢氧化物吸附富集(张宇



1. 中细粒二云母花岗岩; 2. 中细粒黑云母花岗岩; 3. 中粗粒黑云母花岗岩; 4. 中基性岩脉; 5. 断裂带及编号; 6. 岩性接触界线; 7. 相变界线; 8. 已知伽玛异常点

图6 犁壁岭地段分量铀及相关元素等值线图(a~e)和氡浓度等值线图(f)

Fig. 6 Contour maps of partial uranium and associated elements (a~e) and radon concentration (b) in Libiling segment

等,2021),也与孙国权等(2022)在棉花坑铀矿床矿化蚀变带内发现U、Mo同迁入的研究结论一致。

综上所述,Mo、Be与U场晕更为一致,且与铀成矿过程密切相关,指示Mo、Be和U可能为区内最佳的找矿指示元素组合。

4.2 RaA 氡气测量

区内氡浓度场晕展布与分量U场晕展布特征相似,均呈“南北高,中部低”[图6(f)]。该氡浓度场晕大致以氡浓度在12 899~25 017 Bq/m³为背景场,代表花岗岩中所含的微量U不断衰变所释放的²²²Rn浓度。以氡浓度小于10 622 Bq/m³为低值场,集中分布于中粗粒斑状黑云母花岗岩内,与分量U低值场区复合好,为铀源体中活性铀丢失后剩余铀衰变形成的²²²Rn浓度,预示着中粗粒斑状黑云母花岗岩可能为区内的铀源体,与张丽等(2018)认为长江岩体为区内重要铀源体的认识一致。以氡浓度大于62 585 Bq/m³为异常,集中分布于近SN向断裂附近,显示强烈的构造相关性,同时也是区内主控矿因素为断裂的体现。区内具有相对规模的氡浓度异常带有2条,分别位于测区的北部和南部。其中,以北部氡浓度异常带连续性最好,长度约为600 m,氡浓度为10 200~125 868 Bq/m³,表现出串珠状浓集中心,主要受27号带及岩性接触界面联合控制。与分量U含量异常相比,其氡浓度异常并未继续向南延伸至犁壁岭地段,应为地表土壤厚度较薄所致,但仍见明显的氡浓度增高场,推测区内的铀成矿作用继续向南延伸。南部氡浓度异常带位于犁壁岭断裂以南,受多条近SN向断裂带控制,其氡浓度为12 036~619 140 Bq/m³,峰值高,梯度变化大,显示出强烈的氡浓集现象。该区紧邻深部导矿断裂,且广泛发育近SN向断裂(如14号和19号带等)。地表调查显示,这些断裂具有张扭性活动特征,并伴随成矿期的紫黑色萤石、硅化和赤铁矿化等蚀变,其构造属性和蚀变类型均与棉花坑铀矿床高度相似,指示其深部有较相似的铀成矿地质条件。基于构造—蚀变耦合规律,推测该组近SN向断裂带深部具备良好的铀矿找矿前景。

5 综合异常及钻探揭露验证

元素地球化学相似性普遍存在,单一元素异常

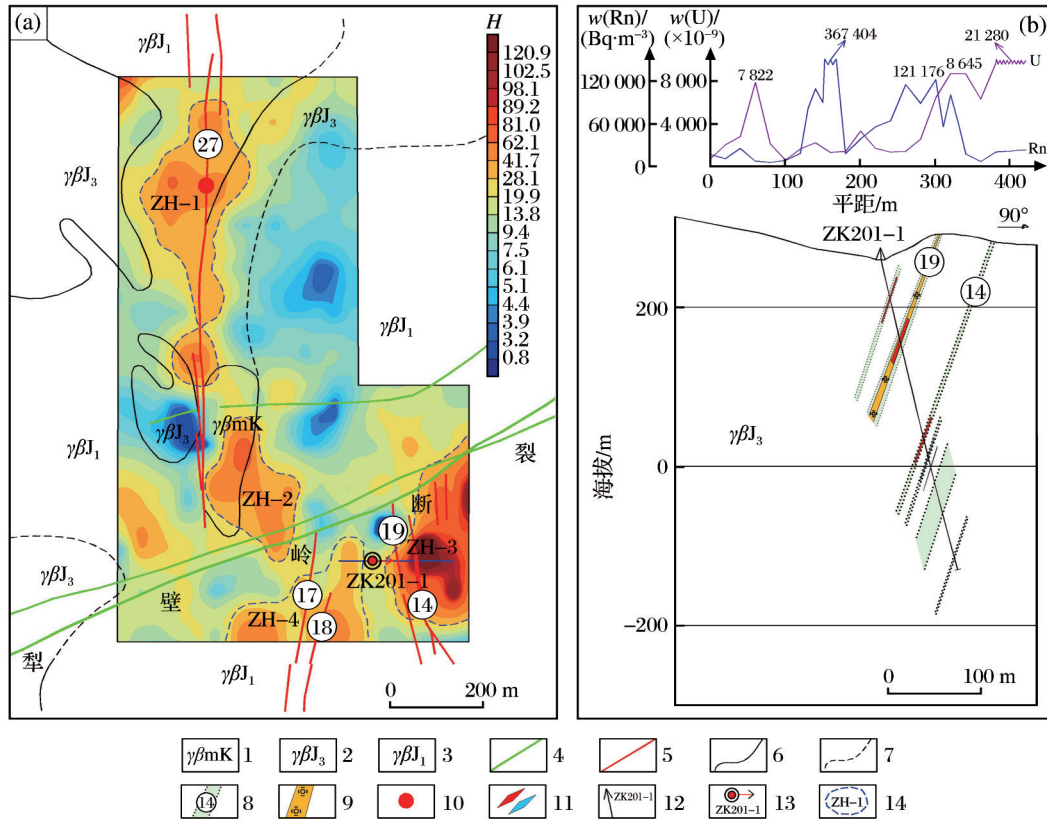
有时很弱,如棉花坑铀矿床的9-2号含矿带地表出露处的氡浓度异常及U异常。如果仅依靠U、Rn复合异常定位隐伏矿体的预测方法,可能会遗漏部分铀成矿有利位置。为了减小隐伏矿体预测遗漏的概率,采用多找矿指示元素组合可发现单元素不能确定的异常,并强化弱异常及指示隐伏矿体异常的有效信息,增强隐伏矿体引起的弱矿致异常(韩润生,2005;郭泽华等,2019)。基于U元素独特的物理化学性质,依据其衰变子体²²²Rn可迁移特性及随地气流迁移的活性态U、Be和Mo对隐伏铀矿的定位指示作用,根据式(1)和式(2)对Rn、U、Be和Mo标准化后相互累加,构建铀成矿有利地段综合预测指数(H),并利用该综合预测指数进行综合找矿预测。

$$x_{ij}^* = \frac{x_{ij} - \min(x_j)}{\max(x_j) - \min(x_j)} \quad (1)$$

$$H = \left(\sum_{k=1}^n x_{ij}^* \right) \times 100 \quad (2)$$

式中: x_{ij} 为*i*测点*j*元素浓度(Bq·m⁻³)或含量(×10⁻⁹); $\min(x_j)$ 为*j*元素浓度(Bq·m⁻³)或含量(×10⁻⁹)最小值; $\max(x_j)$ 为*j*元素浓度(Bq·m⁻³)或含量(×10⁻⁹)最大值; x_{ij}^* 为*i*测点*j*元素浓度或含量标准化后数值; H 为铀成矿有利地段综合预测指数; k 为参与铀成矿预测的元素种类。

相较于氡浓度和U含量异常场晕,铀成矿有利地段综合预测指数 H 的异常场晕“带状”特征十分明显[图7(a)],其异常连续性与空间延展性明显优于单一元素异常,并进一步拓宽了27号带中部的铀矿勘查空间。结合铀成矿有利地段综合预测指数 H 的异常场晕特征及所属地质情况,以 $H \geq 28.1$ 为异常下限,在区内圈定了4处综合异常(编号为ZH-1~ZH-4)。地表查证显示,ZH-1号和ZH-3号综合异常铀成矿地质条件较为优越,分别受27号和14(19)号硅化断裂带控制,其断裂性质为张扭性,与棉花坑铀矿床主含矿带(9号)断裂性质一致。其中,27号带主要由硅化碎裂岩、构造角砾岩、白色块状石英和红色、灰绿色微晶石英组成,局部发育有明显铀异常,铀含量介于 50×10^{-6} ~ 300×10^{-6} ,与红色微晶石英关系密切。14号和19号带内物质组分相似,主要由硅化碎裂岩、微晶石英、构造角砾和花岗碎裂岩组成,长度约为1 km,宽度为1~5 m,并在综合预



1. 中细粒二云母花岗岩; 2. 中细粒黑云母花岗岩; 3. 中粗粒黑云母花岗岩; 4. 中基性岩脉; 5. 断裂带; 6. 岩性接触界线; 7. 推测地质界线; 8. 蚀变带及编号; 9. 硅化断裂带; 10. 伽玛异常点; 11. 铀矿体; 12. 钻孔及编号; 13. 验证钻孔位置及编号; 14. 综合异常及编号

图7 犁壁岭地段综合异常图(a)及钻探揭露验证剖面图(b)

Fig. 7 Comprehensive anomaly map (a) and drilling validation profile (b) of Libiling area

测指数 H 浓集中心附近发现了铀矿化信息,与硅化、赤铁矿化及紫黑色萤石关系密切,其铀含量最高可达 1120×10^{-6} ,显示出良好的铀矿找矿线索。基于此,本文优选异常面积最大和浓集程度最高的ZH-3号异常进行钻探揭露验证[图7(b)],并在14号和19号断裂带内累计揭露视厚度为8.80 m、平均品位为0.085%工业铀矿段,进一步证实分量化探、RaA氡气联袂测量在隐伏铀矿预测中的有效性。

综上所述,建议犁壁岭地段以近SN向的27号和14(19)号带为工作重点,以“硅化带型”铀矿为主攻类型,优先对ZH-1号和ZH-3号铀成矿有利位置进行深部钻探揭露验证,有望进一步扩大SN向断裂带找矿成果。

6 结论

(1) 针对研究区典型矿床已知勘探线的方法可

行性研究试验显示,RaA氡气、分量化探联袂测量能有效探寻隐伏铀矿化,可作为长江矿集区隐伏铀矿预测的有效找矿方法组合。

(2) 综合聚类分析结果和研究区矿化蚀变特点,认为犁壁岭地段铀矿找矿指示元素组合为U-Be-Mo-Rn。

(3) 依据铀成矿有利地段综合预测指数异常及其所属地质情况,预测4处综合异常。经后期钻探工程揭露验证,在ZH-3号综合异常累计揭露视厚度为8.80 m、平均品位为0.085%的工业铀矿段,取得了良好的找矿应用效果,进一步拓宽了长江矿集区北部的找矿范围。

参考文献(References):

Idowu PF, Joseph AF, Olatunde MO, et al, 2022. Artificial neural network modeling of soil gas radon concentration on dif-

- ferent lithologies for southwest Nigeria[J]. *Journal of Radiation Research and Applied Sciences*, 15: 346-352.
- Nazaroff W W, 1992. Radon transport from soil to air [J]. *Reviews of Geophysics*, 30(2): 137-160.
- Qi J M, Xia X P, Qiu L, et al, 2024. Mineralization process of the Changjiang uranium orefield in South China: constraints from pitchblende geochemistry [J]. *Ore Geology Reviews*, 169: 106067.
- Zhang L, Wang F Y, 2023. New identification of quaternary uranium mineralization at the Mianhuakeng granite-related uranium deposit, South China [J]. *Journal of Earth Science*, 34(5): 1635-1640.
- 程俊义, 彭松, 范云飞, 等, 2025. 兴义某铀矿土壤氡气特征及其找矿应用 [J]. *物探与化探*, 49(4): 810-817. Cheng Junyi, Peng Song, Fan Yunfei, et al, 2025. Characteristics and prospecting application of soil radon in a uranium mining area, Xingyi City, China [J]. *Geophysical and Geochemical Exploration*, 49(4): 810-817.
- 高山, 骆庭川, 张本仁, 等, 1999. 中国东部地壳的结构和组成 [J]. *中国科学 D 辑*, 29(3): 204-213. Gao Shan, Luo Tingchuan, Zhang Benren, et al, 1999. Structure and composition of the crust in eastern China [J]. *Science in China (Series D)*, 29(3): 204-213.
- 郭建军, 赵天林, 潘伟, 等, 2024. 二连盆地咸拉嘎凹陷土壤氡异常特征及铀成矿预测 [J]. *中国地质调查*, 11(3): 25-31. Guo Jianjun, Zhao Tianlin, Pan Wei, et al, 2024. Radon anomaly characteristics in the soil and uranium metallogenetic prediction in Xianlaga depression of Erlian Basin [J]. *Geological Survey of China*, 11(3): 25-31.
- 郭泽华, 王雷, 韩润生, 等, 2019. 滇西云县红豆山铜矿构造地球化学特征及找矿预测 [J]. *中国地质*, 46(1): 178-190. Guo Zehua, Wang Lei, Han Runsheng, et al, 2019. Tectonic geochemical characteristics and ore prediction in Hongdoushan copper deposit, Yunxian area, Western Yunnan [J]. *Geology in China*, 46(1): 178-190.
- 韩润生, 2005. 隐伏矿定位预测的矿田(床)构造地球化学方法 [J]. *地质通报*, 24(10): 978-984. Han Runsheng, 2005. Orefield deposit tectono-geochemical method for the localization and prognosis of concealed orebodies [J]. *Geological Bulletin of China*, 24(10): 978-984.
- 胡鹏, 王家跃, 汪清浩, 等, 2024. 综合物化探方法在荷泗地区“交点”型铀矿找矿预测中的应用 [J]. *铀矿地质*, 40(5): 981-991. Hu Peng, Wang Jiayue, Wang Qinghao, et al, 2024. The application of comprehensive geophysical and geochemical exploration method in the prospecting and prediction of “intersection” type uranium deposit in Hesi area [J]. *Uranium Geology*, 40(5): 981-991.
- 胡鹏, 张凡颖, 王兴明, 等, 2025. 分量化探在琶江地区深部铀矿勘查中的应用研究 [J]. *铀矿地质*, 41(2): 332-346. Hu Peng, Zhang Fanying, Wang Xingming, et al, 2025. Application of partial extraction geochemical exploration method in the prospecting of deep uranium mineralization in Pajiang area [J]. *Uranium Geology*, 41(2): 332-346.
- 黄国龙, 曹豪杰, 徐文雄, 等, 2015. 诸广棉花坑铀矿床垂向分带模式及深部找矿潜力 [J]. *铀矿地质*, 31(3): 355-362. Huang Guolong, Cao Haojie, Xu Wenxiong, et al, 2015. Vertical zoning model and prospecting potential in depth of Mianhuakeng uranium deposit in Zhuguang [J]. *Uranium Geology*, 31(3): 355-362.
- 黄建乐, 陈晓冬, 李家金, 等, 2021. 综合物化探法在砂岩型铀矿中深部找矿中的实践与分析——以新疆昭苏盆地为例 [J]. *地质与勘探*, 57(5): 1099-1106. Huang Jianle, Chen Xiaodong, Li Jiajin, et al, 2021. Prospecting middle and deeply buried sandstone-type uranium deposits beneath the Zhaosu Basin, Xinjiang by integrated geophysical methods [J]. *Geology and Exploration*, 57(5): 1099-1106.
- 赖静, 潘家永, 吴德海, 等, 2017. 粤北长江铀矿区铀分量化探与深部找矿潜力 [J]. *金属矿山*, 46(2): 89-95. Lai Jing, Pan Jiayong, Wu Dehai, et al, 2017. U partial content geochemical exploration and deep prospecting potential of Changjiang uranium mining area in northern Guangdong Province [J]. *Metal Mine*, 46(2): 89-95.
- 李宏卫, 屈尚侠, 林小明, 等, 2021. 广东新丰新坪花岗闪长岩(104 Ma)地球化学、锆石 U-Pb 年龄和 Hf 同位素研究 [J]. *中国地质*, 48(5): 1524-1539. Li Hongwei, Qu Shangxia, Lin Xiaoming, et al, 2021. Petrogeochemistry, zircon U-Pb age and Hf isotope of Xinping granodiorite (104 Ma) in Xinfeng area, Guangdong Province [J]. *Geology in China*, 48(5): 1524-1539.
- 李茂, 么成雅, 邱崇涛, 等, 2014. AMT 与土壤氡测量在连山关—祁家堡子地区铀矿勘查中的应用 [J]. *物探与化探*, 38(1): 28-34. Li Mao, Yao Chengya, Qiu Chongtao, et al, 2014. The application of audiomagnetotellurics and soil radon survey to the exploration of uranium deposits in Lianshanguan-Qijiabaozi area [J]. *Geophysical and Geochemical Exploration*, 38(1): 28-34.
- 刘英俊, 1987. 元素地球化学导论 [M]. 北京: 地质出版社. Liu Yingjun, 1987. Introduction to geochemistry of elements [M]. Beijing: Geological Publishing House.

- 刘幼建, 谢焱石, 谭凯旋, 等, 2020. 深部元素地气迁移的分量化探证据: 以郴州金狮岭铀多金属矿床为例[J]. 金属矿山, 49(7): 146-154. Liu Youjian, Xie Yanshi, Tan Kaixuan, et al, 2020. Evidence for partial content geochemical exploration method of deep elemental gas migration: a case study of Jinshiling uranium polymetallic deposit in Chenzhou City[J]. Metal Mine, 49(7): 146-154.
- 龙自强, 彭渤洋, 刘斌, 2024. 粤北地区塘洞岩体地球化学特征及地质意义[J]. 铀矿地质, 40(3): 459-469. Long Ziqiang, Peng Boyang, Liu Bin, 2024. Geochemical characteristics and geological significance of Tangdong granite intrusion in the north Guangdong [J]. Uranium Geology, 40(3): 459-469.
- 马永胜, 2022. 诸广南长江地区科学钻探铀矿化特征及找矿意义[D]. 北京: 核工业北京地质研究院. Ma Yongsheng, 2022. Uranium mineralization characteristics and prospecting significance of scientific drilling in Zhuguangnan Changjiang area [D]. Beijing: Beijing Research Institute of Uranium Geology.
- 祁家明, 朱捌, 吴建勇, 等, 2019. 粤北仁化棉花坑铀矿床成矿热液演化及其对成矿过程的约束[J]. 岩石学报, 35(9): 2711-2726. Qi Jiaming, Zhu Ba, Wu Jianyong, et al, 2019. The evolution of ore-forming fluid and its constraint on mineralization process in Mianhuakeng uranium deposit, northern Guangdong, China [J]. Acta Petrologica Sinica, 35(9): 2711-2726.
- 宋亮, 柯丹, 顾大钊, 等, 2015. 尼日尔 Azelik 砂岩型铀矿勘查中土壤氡气测量方法应用研究[J]. 世界核地质科学, 32(4): 237-242. Song Liang, Ke Dan, Gu Dazhao, et al, 2015. Study on application of soil radon survey method in the exploration for sandstone type uranium deposit in Azelik, Niger [J]. World Nuclear Geoscience, 32(4): 237-242.
- 孙国权, 范洪海, 高元宝, 等, 2022. 粤北书楼丘矿床围岩蚀变特征与流体成矿作用[J]. 矿床地质, 41(2): 345-358. Sun Guoquan, Fan Honghai, Gao Yongbao, et al, 2022. Study on characteristics of wall rock alteration and fluid mineralization in Shulouqiu deposit, northern Guangdong [J]. Mineral Deposits, 41(2): 345-358.
- 陶意, 2020. 诸广山地区棉花坑矿床铀成矿氧化还原条件研究[D]. 北京: 核工业北京地质研究院. Tao Yi, 2020. Study on redox conditions of uranium mineralization in Mianhuakeng deposit in Zhuguangshan area [D]. Beijing: Beijing Research Institute of Uranium Geology.
- 王家跃, 郎白秋, 汪清浩, 2022. 伽马能谱、土壤氡与分量化探联合探测方法在粤北百顺地区铀矿勘查中的应用[J]. 铀矿地质, 38(3): 508-515. Wang Jiayue, Lang Baiqiu, Wang Qinghao, 2022. Application of gamma spectrum, soil radon and partial extracting geochemical prospecting method in the uranium exploration of Baishun area, northern Guangdong Province, China [J]. Uranium Geology, 38(3): 508-515.
- 王勇, 王东升, 吴国东, 等, 2020. 地气测量方法在粤北长排花岗岩型铀矿勘查中的应用[J]. 铀矿地质, 36(4): 302-310. Wang Yong, Wang Dongsheng, Wu Guodong, et al, 2020. Application of geogas method in the exploration of granite-type uranium deposit in Changpai area of northern Guangdong [J]. Uranium Geology, 36(4): 302-310.
- 吴德海, 夏菲, 潘家永, 等, 2019. 粤北棉花坑铀矿床热液蚀变与物质迁移研究[J]. 岩石学报, 35(9): 2745-2764. Wu Dehai, Xia Fei, Pan Jiayong, et al, 2019. Characteristics of hydrothermal alteration and material migration of Mianhuakeng uranium deposit in northern Guangdong Province [J]. Acta Petrologica Sinica, 35(9): 2745-2764.
- 肖冠雄, 2019. 粤北棉花坑矿床9号矿带蚀变地球化学特征与成矿物质源示踪[D]. 抚州: 东华理工大学. Xiao Guanxiong, 2019. Study on geochemical characteristics and the source of ore-forming material analysis of No. 9 metallogenic belt in the Mianhuakeng deposit, northern Guangdong [D]. Fuzhou: East China Institute of Technology.
- 尹金双, 李子颖, 葛祥坤, 2012. 分量化探法在铀资源勘查中的研究与应用[M]. 北京: 中国原子能出版社. Yin Jinshuang, Li Ziying, Ge Xiangkun, 2012. Research and application of partial geochemical prospecting methods in uranium exploration [M]. Beijing: Atomic Energy Press.
- 张丽, 孙立强, 陈卫锋, 等, 2018. 诸广南部产铀花岗岩长江岩体中的绿泥石和铀源矿物研究[J]. 高校地质学报, 24(1): 13-32. Zhang Li, Sun Liqiang, Chen Weifeng, et al, 2018. Study on chlorites and uranium-source minerals of uranium-bearing Changjiang granite in southern Zhuguang composite [J]. Geological Journal of China Universities, 24(1): 13-32.
- 张龙, 2019. 新疆白杨河大型铀矿床热液成矿的精细矿物学示踪[D]. 北京: 中国科学院大学. Zhang Long, 2019. Fine mineralogical tracing of hydrothermal mineralization in Baiyanghe large beryllium-uranium deposit, Xinjiang [D]. Beijing: University of Chinese Academy of Sciences.
- 张宇, 陈琪, 王珂, 等, 2021. 分量化探方法在苗儿山张家铀矿床北部地区铀矿勘查中的应用[J]. 东华理工大学学报(自然科学版), (6): 570-579. Zhang Yu, Chen Qi, Wang Ke, et al, 2021. Application of the partial extraction

geochemical prospecting method for uranium exploration in the northern Zhangjia uranium deposit, Miaoershan [J]. Journal of East China University of Technology (Natural Science), (6): 570-579.

赵欣怡, 欧阳菲, 罗先熔, 等, 2022. 地电化学法在寻找隐伏铀矿中的应用: 以诸广鹿井地区为例 [J]. 金属矿山, 51 (11): 167-178. Zhao Xinyi, Ouyang Fei, Luo Xianrong, et al, 2022. Application of geo-electrochemical methods

to prospecting in the concealed uranium: a case study of Lujing area, Zhuguang [J]. Metal Mine, 51 (11): 167-178.

周新民, 2007. 南岭地区晚中生代花岗岩成因与岩石圈动力学演化 [M]. 北京: 科学出版社. Zhou Xinmin, 2007. Causes of late Mesozoic granitoids and lithospheric dynamics evolution in the Nanling region [M]. Beijing: Science Press.

Application of RaA Radon Gas and Partial Extraction Geochemical Prospecting Combined Measurement Method in the Exploration of Concealed Uranium Deposits in the Libiling Area, Northern Guangdong Province

HU Peng^{1,2}, DING Weicheng², ZHANG Fanying¹, LONG Ziqiang¹, CHEN Junjun¹

1. No.290 Nuclear Industry Research Institute, Shaoguan 512029, Guangdong, China;

2. College of Nuclear Technology and Automation Engineering, Chengdu University of Technology, Chengdu 610059, Sichuan, China

Abstract: The Changjiang mineral concentration area in northern Guangdong is a significant production region for granite-hosted uranium deposits in China, notably housing the Mianhuakeng deposit, the nation's sole super large-scale hard-rock uranium deposit. Uranium mineralization in this area is primarily influenced by near north-south trending fault zones, which are characterized by considerable thickness, high grade, and strong continuity. In order to assess the deep prospecting potential in the northern extension faults of the Changjiang mineral concentration area, the Libiling segment was selected due to its analogous uranium metallogenic conditions to the Mianhuakeng deposit. This segment was subjected to integrated surveys utilizing RaA radon gas measurement and partial extraction geochemical prospecting methods. The aim of this study was to further enhance prospecting outcomes associated with the north-south trending fault zones. The feasibility study of this methodological combination and subsequent exploration practice in the Libiling segment demonstrated the efficacy of integrating RaA radon gas measurement with partial extraction geochemical prospecting methods for predicting deeply concealed uranium deposits. This integrated approach leverages the convenience and immediacy of RaA radon gas measurements alongside the reliability of partial extraction geochemical prospecting in detecting anomalies associated with mineralization. Research indicates that concealed uranium ore bodies are typically situated within composite anomalies of key pathfinder elements, such as uranium (U), radon (Rn), beryllium (Be), and molybdenum (Mo). This pattern is governed by the metallogenic characteristics of hydrothermal uranium deposits, specifically the "synergistic migration and enrichment of multiple elements", which inevitably results in a composite altered geochemical field exhibiting significant spatial correlation with uranium. In response to the presence of weak anomalies of pathfinder elements in some uranium-prospective locations within the area, a comprehensive prediction index (H) for favorable uranium mineralization areas is proposed by the use of a multi-element combination. This index is designed to address potential oversights in identifying favorable mineralization sites that may occur when relying exclusively on uranium (U) and radon (Rn) composite anomalies for targeting concealed ore bodies. The objective is to "enhance weak anomalies and

extract effective information indicative of concealed mineralization”, thereby reducing the likelihood of missing concealed ore bodies in the Libiling segment. Based on the analysis conducted, and with a threshold value of $H \geq 28.1$ for the composite predictive index, four composite anomalies (designated as No. ZH-1 to No. ZH-4) were identified, taking into account the geological context of the study area. Among these, the No. ZH-3 anomaly, which exhibits the largest area and highest concentration, was selected for drilling verification. The results revealed an industrial-grade uranium orebody with a cumulative apparent thickness of 8.80 meters and an average grade of 0.085%. This orebody is closely associated with silicification, hematitization, and purplish-black fluoritization within fault belts No.14 and No.19. These findings not only confirm that the deep part of the Libiling segment possesses considerable uranium prospecting potential but also expand the prospecting space in the northern part of the Changjiang mineral concentration area. Furthermore, it provides a scientific reference for deep uranium prospecting prediction in adjacent regions.

Key words: RaA radon gas measurement; partial extraction geochemical prospecting; concealed uranium deposit; weak anomaly; indication element combination; Libiling area

我国科学家首次在天然植物中发现 稀土元素生物成矿现象

新发现:植物体内不仅有“稀土矿”还有“加工厂”。

我国科研人员在一种名为乌毛蕨的蕨类植物体内,不仅发现大量富集的稀土元素,还首次观测到这些稀土元素在植物组织细胞间“自我组装”,形成了一种名为“独居石”的矿物。

这是科学家首次在天然植物中发现稀土元素的生物成矿现象,为未来稀土资源的可持续利用提供了新路径。相关成果于11月5日在线发表于国际学术期刊《环境科学与技术》。

稀土被誉为“工业维生素”,是人工智能、新能源和国防等重点领域不可或缺的核心战略资源,但传统稀土矿物开采伴随着生态环境破坏。近年来,中国科学院广州地球化学研究所朱建喜研究员团队致力于寻找更清洁、更可持续的稀土获取方式。

此前,科学界已发现乌毛蕨等一批特殊的稀土“超积累植物”,即对稀土元素具有超强富集能力。它们仿佛土壤中的“稀土吸尘器”,能高效吸收并浓缩分散在环境中的稀土元素。

在该研究中,科学家观测到,在乌毛蕨叶片的维管束和表皮组织中,从土壤中吸收的稀土元素会以纳米颗粒形式沉淀,并进一步结晶成一种名叫“独居石”的矿物。进一步研究发现,该过程实际上是一种植物的自我保护机制,就像是植物在体内“打包封存”有毒物质,把可能伤害细胞的稀土离子,稳稳锁进矿物结构中,实现稀土的钝化和自然“解毒”。

研究人员表示,独居石是工业上重要的稀土矿石,主要在岩浆或热液活动等地质过程中形成,但天然独居石中常伴生放射性铀、钍元素,给开采与应用带来挑战。而乌毛蕨在自然生长的常温常压条件下所形成的“生物独居石”,纯净、无辐射,展现出极具潜力的绿色提取前景。

研究人员认为,此次发现不仅为已知超积累植物的研究打开新窗口,还为未来稀土资源的可持续利用打开思路:通过种植乌毛蕨等超积累植物,可在修复污染土壤、恢复稀土尾矿生态的同时,从植物体中回收高价值稀土,真正实现“边修复、边回收”的绿色循环模式。

(来源:科普中国)