

<https://doi.org/10.3799/dqkx.2021.252>



二连盆地土壤微细粒铀地球化学分布特征及找矿方向

严桃桃^{1,2}, 聂兰仕^{1,2*}, 王学求^{1,2}, 张必敏^{1,2}, 刘汉粮^{1,2},
田密^{1,2}, 徐善法^{1,2}, 乔宇^{1,2}, 窦备^{1,2}, 尤景广^{1,2}

1. 自然资源部地球化学探测重点实验室, 中国地质科学院地球物理地球化学勘查研究所, 河北廊坊 065000

2. 联合国教科文组织全球尺度地球化学国际研究中心, 河北廊坊 065000

摘要: 二连盆地是我国砂岩型铀矿的重要产地之一, 已相继发现了多个砂岩型铀矿床。盆地中部赛汉高毕—苏尼特左旗地区南北缘发育大量古—中生代的花岗岩体, 铀源丰富; 且该区发育北东向展布的巴彦乌拉、赛汉高毕等古河道, 为铀矿体的形成和保存提供了有利的构造条件, 具有较好的找矿前景。目前针对该地区砂岩型铀矿的勘查主要是通过地球物理勘探(电法、地震、重力、航磁)和钻探, 常规的地球化学勘查方法在该区效果不理想。为了满足大范围找矿勘查的需求, 基于土壤微细粒分离测量技术在赛汉高毕—苏尼特左旗地区开展 1:25 万区域化探扫面工作。2 821 件土壤样品中 Hg、As、Mo、F、Zr、Sr、Sb、Li、Th、U 等元素既有相对较高的富集系数, 又有相对较大的变异系数。通过元素相关分析和 R 型聚类分析将其分为 Zr-Th-U-Mo 组合和 As-Sb-F-Li-Sr-Hg 组合, 优选 U-Mo 为铀矿的成矿指示元素。依据 U-Mo 衬值地球化学综合异常圈定了 3 个铀矿找矿有利地段, 其中地段 I 和 II 位于盆地次级拗陷内部, 异常与古河道砂体有关, 寻找砂岩型铀矿的潜力较大。

关键词: 砂岩型铀矿; 二连盆地; 地球化学; 土壤微细粒。

中图分类号: P595; P596

文章编号: 1000-2383(2022)08-2809-15

收稿日期: 2021-07-07

Regional Geochemical Distribution of Uranium in Fine-Grained Soil and Prediction of Prospecting in Erlian Basin

Yan Taotao^{1,2}, Nie Lanshi^{1,2*}, Wang Xueqiu^{1,2}, Zhang Bimin^{1,2}, Liu Hanliang^{1,2},
Tian Mi^{1,2}, Xu Shanfa^{1,2}, Qiao Yu^{1,2}, Dou Bei^{1,2}, You Jingguang^{1,2}

1. Key Laboratory of Geochemical Exploration, Ministry of Natural Resources, Institute of Geophysical and Geochemical Exploration, Chinese Academy of Geological Sciences, Langfang 065000, China

2. UNESCO International Centre on Global-Scale Geochemistry, Langfang 065000, China

Abstract: Erlian Basin is one of the most important uranium ore producers in China, in which a series of sandstone-type uranium deposits have been continuously discovered including the Nuheting giant uranium deposit and Saihangaobi medium-sized deposit. A number of Paleozoic to Mesozoic granite intrusions emplaced in the northern and southern margin of Saihangaobi-Sunitezuoqi area, which provided abundant uranium source. In addition, NE-trending Bayanwula and Saihangaobi paleo-channel sand body in this

基金项目: 中国地质调查局地质调查项目(No. DD20190451); 国家重点研发计划穿透性地球化学勘查技术项目(No. 2016YFC0600600)。

作者简介: 严桃桃(1989—), 男, 博士, 工程师, 主要从事矿床与勘查地球化学研究。ORCID: 0000-0002-3153-4959. E-mail: yantao-tao@mail.cgs.gov.cn

* 通讯作者: 聂兰仕, ORCID: 0000-0002-3223-9273. E-mail: nielanshi@163.com

引用格式: 严桃桃, 聂兰仕, 王学求, 张必敏, 刘汉粮, 田密, 徐善法, 乔宇, 窦备, 尤景广, 2022. 二连盆地土壤微细粒铀地球化学分布特征及找矿方向. 地球科学, 47(8): 2809—2823.

Citation: Yan Taotao, Nie Lanshi, Wang Xueqiu, Zhang Bimin, Liu Hanliang, Tian Mi, Xu Shanfa, Qiao Yu, Dou Bei, You Jingguang, 2022. Regional Geochemical Distribution of Uranium in Fine-Grained Soil and Prediction of Prospecting in Erlian Basin. *Earth Science*, 47(8): 2809—2823.

region provided favorable tectonic conditions for the formation and preservation of uranium orebodies. At present, geophysical exploration (electric, seismic, gravity, aeromagnetic) and drilling are the main exploration methods for sandstone-type uranium deposits in this area, while conventional geochemical exploration is seldom carried out in this area, or the effect is not satisfied. Given the development of deep penetrating geochemistry theory, fine-grained soil prospecting method has raised attention in the exploration practice of uranium deposit in sedimentary basins of northern China. To meet the needs of large-scale prospecting, the regional 1: 250 000 geochemical scanning is carried out in the Sihangaobi-Sunitezuoqi area of middle Erlian basin based on fine-grained soil prospecting method in this study. A total of 2 821 samples were collected and analyzed, the results show that Hg, As, Mo, F, Zr, Sr, Sb, Li, Th and U not only have relatively high enrichment coefficients, but also show relatively high variable coefficients. These elements could be divided into two groups including Zr-Th-U-Mo and As-Sb-F-Li-Sr-Hg, and U-Mo are selected as mineralized indicators of uranium deposit based on the element correlation analysis and R-type clustering analysis. The high abundance of U and Mo is closely associated with widely-distributed granitic plutons and paleo-channel sand body. Three favorable prospecting places are delineated based on the U-Mo comprehensive abnormal development area. The No. I and No. II favorable prospecting places are located in the depression of Erlian basin, and the uranium anomalies in this place are caused by the distribution of paleo-channel sand body, indicating that No. I and No. II have great potentials to explore sandstone-type uranium deposit.

Key words: sandstone-type uranium deposit; Erlian basin; geochemistry; fine-grained soil.

0 引言

铀矿是当今世界重要的战略资源与能源矿产,也是核工业发展的基础原料.我国已查明的铀矿资源主要分布于内蒙古、新疆等 23 个省(自治区),铀矿床以砂岩型、花岗岩型、火山岩型和碳硅泥岩型为主(张金带,2008;蔡煜琦等,2015).20 世纪 90 年代以前,我国铀矿资源的勘查重点为花岗岩型和火山岩型铀矿床;而后,随着砂岩型铀矿成矿理论和地浸技术的发展,找矿工作的重心转移至北方砂岩型盆地中(聂逢君等,2010,2015;夏飞勇等,2019;谢惠丽等,2020).由于砂岩型铀矿矿体上覆盖层与矿床源区关系不密切,且通常被后期沉积的岩石和土壤所覆盖,其在地表显示出来的各种与深部铀矿密切相关的地球化学找矿信息十分微弱(刘映东,2018).经典地球化学找矿是基于剥蚀理论,传统的化探采样介质主要为岩石、土壤、水系沉积物等,其反映的异常与矿体具有密切的关系,大多是含矿地质体剥蚀的产物(龚庆杰等,2020).因此,常规化探方法对于深部微弱异常信息的提取能力较为有限,发展能够捕捉深部矿体导致的直接找矿异常信息的深穿透地球化学勘查方法是解决隐伏砂岩型铀矿勘查难题的有效途径之一(Wang *et al.*, 2011, 2016;王学求,1998,2005;王学求等,2012,2016;张必敏等,2016;张必敏和王学求,2018).近十年来,为了适应大范围地球化学勘查的需求,作者所在团队提出了土壤微细粒分离技术并在多种类型矿床上方开展了大量的试验,该技术被成功应用于我国

北方盆地砂岩型铀矿和其他类型多金属矿床的勘查(Wang *et al.*, 2011;姚文生等,2012;张必敏等,2016).例如, Wang *et al.* (2011) 利用该技术在新疆十红滩砂岩型铀矿开展的剖面试验有效地指示了 300 m 盖层以下的铀矿体,并指出铀—钼组合异常是砂岩型铀矿最显著的找矿标志;刘汉粮等(2016)在甘肃柳园花牛山矿区利用土壤微细粒测量技术圈定的成矿元素地球化学异常具有 Pb-Zn-Ag-Au-Sb-As-Cu-Hg 多元素异常组合特征,且异常分布范围与深部矿体较为一致,表明该方法可以有效地指示深部铅锌矿体,可作为覆盖区寻找铅锌矿的有效方法;刘汉粮等(2015)在新疆沙泉子铜镍矿上方开展了岩屑测量和土壤微细粒测量的试验,结果表明两种方法均能有效地指示铜镍矿体,且相比岩屑测量,土壤微细粒测量技术获得的元素含量更高,异常强度更强,更有利于发现和识别弱的矿化信息.

土壤微细粒分离技术是通过物理分离土壤微细粒组分来识别深部矿体引起的地球化学弱异常,采样层位为 15~30 cm 的弱胶结层,即采用富含粘土矿物、铁锰氧化物的土壤微细粒作为采样介质,对深部迁移至地表的矿致异常进行捕获(王学求,1998;谢学锦和王学求,2003).对于砂岩型铀矿,来源于深部的活动性铀元素,通常以铀酰络阳离子等形式向上迁移至地表.由于粘土矿物主要存在于微细粒级土壤组分中,因此物理分离土壤微细粒组分的同时也将富含活动性铀的粘土矿物从土壤中分离出来,从而达到识别深部弱异常信息的目的.另

外,铁锰氧化物在地表疏松物中大量存在,矿物颗粒表面也常常被铁锰氧化物膜所覆盖。土壤样品组分随着样品粒径的变小,其比表面积呈指数增加,比表面积越大,铁锰氧化物膜展开面积就越大,其吸附活动性铀的能力就越强。张必敏等(2020)提出了砂岩型铀矿的垂向迁移模式: U^{6+} 氧化物比 U^{4+} 氧化物更易溶于水,花岗岩中剥蚀氧化出的铀在氧化环境下可以发生长距离的迁移,在还原条件下发生沉淀富集形成铀矿体;近潜水面的地下水携带溶解氧沿岩石中的裂隙或孔隙向下流动,经过含铀矿体时,溶解氧能与矿体中固态 UO_2 发生氧化还原反应,形成铀酰离子($[UO_2]^{2+}$),铀酰离子溶解到地下水中,地下水又进一步沿着岩石中的裂隙或孔洞向上流动重新到达近地表的潜水面位置。

二连盆地位于内蒙古中北部,是我国砂岩型铀矿的重要产出区之一。随着找矿勘查工作的深入,在盆地中部先后发现多个大型—超大型及中小型砂岩型铀矿床,实现了铀矿找矿的重大突破(刘武生等,2013;旷文战等,2014;乔鹏等,2017;童波林等,2017)。目前该地区针对砂岩型铀矿的勘查方法主要是地球物理勘探(电法、地震、重力、航磁)、钻探等方法。随着深穿透理论的发展,穿透性地球化学勘查在该地区逐渐受到重视。Zhang *et al.* (2020)在乌兰察布凹陷的额仁淖尔—赛汉高毕地区开展了土壤微细粒地球化学测量,所显示的铀等地球化学异常与研究区内已知的努和廷、齐哈日格图、赛汉高毕等隐伏铀矿床有较好的空间对应关系。赛汉高毕—苏尼特左旗地区南北缘发育大量古—中生代的花岗岩体,铀源丰富;且该区发育北东向展布的巴彦乌拉、赛汉高毕等古河道,为铀矿体的形成和保存提供了有利的构造条件,具有较好的找矿前景。本次研究针对该地区开展了1:25万土壤微细粒地球化学扫面工作,旨在查明土壤微细粒中铀等元素的地球化学分布特征,为该地区的铀矿勘查工作指明方向。

1 地质背景

1.1 区域地质

二连盆地位于内蒙古中北部,呈北东向展布,东西长约1 000 km,南北宽约20~40 km,其以东为大兴安岭隆起,以北为巴音宝力格隆起,以西为索伦山隆起,以南为温都尔庙隆起(图1;聂逢君等,2010,2015;俞初安,2020)。二连盆地的大地构造位

置位于西伯利亚板块、中朝板块与华北克拉通之间的拼接带,是在天山—兴蒙造山带的基础上,经正向断层强烈拉伸、裂陷,于中生代晚期形成的中—小型盆地群的组合(刘武生等,2013;林效宾等,2020)。盆地属于典型的山间盆地,由川井凹陷、乌兰察布凹陷、马尼特凹陷、乌尼特凹陷、腾格尔凹陷等5个次级凹陷和1个隆起(苏尼特隆起)组成。盆地基底及蚀源区主要由元古界和古生界变质岩、火山碎屑岩及三叠纪和侏罗纪中—酸性侵入岩组成,盖层主要由侏罗系、白垩系、古近系、新近系陆相碎屑岩和火山岩组成(林效宾等,2020)。岩浆岩主要分布于盆地北缘和南缘的过渡带以及苏尼特隆起,以岩基或岩株形式产出,侵入于基底地层中,总体呈北东向展布。其成岩时代主要为元古代、古生代及中生代,岩性主要为安山岩、二长花岗岩、黑云二长花岗岩、花岗闪长岩、花岗岩、流纹岩、石英闪长岩等(刘佳林等,2020)。基底地层及岩体为盆地的沉积提供了丰富的物源及铀源。盆地中的主要含铀目的层为白垩系赛汉组,其次为二连组和腾格尔组(聂逢君等,2015)。

1.2 研究区概况及铀矿化特征

研究区位于盆地中部的赛汉高毕—苏尼特左旗地区,属于乌兰察布凹陷、马尼特凹陷和苏尼特隆起的交汇区域(图1)。区内出露地层为元古界—古生界变质岩—火山碎屑岩、侏罗系阿拉坦合力群和兴安岭群中—基性火山岩及火山碎屑岩,白垩系腾格尔组砂泥岩、古近系呼尔井组、通古尔组和新近系宝格达乌拉组碎屑沉积岩以及第四系砂土(图2)。岩浆岩呈北东—北东东向出露于研究区南北缘,岩性以石炭纪闪长岩、花岗闪长岩和花岗岩,二叠纪石英闪长岩、花岗闪长岩和花岗岩、三叠纪和侏罗纪花岗岩为主,少量出露泥盆纪超基性岩(图2)。

二连盆地主要发育两类铀矿:一类是研究区西部乌兰察布凹陷内发育的以努和廷超大型铀矿为代表的沉积成岩型铀矿,矿化主要发育于上白垩统二连组;另一类是古河道型铀矿床,由北向南以巴彦乌拉、赛汉高毕和齐哈日格图铀矿床为代表,矿化主要发育于下白垩统赛汉组上段古河道砂体中(旷文战等,2014;Zhang *et al.*, 2020)。古河道砂体呈北东向带状展布,岩性主要为成熟度低、富含有机质和黄铁矿等还原物质的灰色粗碎屑,具备有利的成矿条件,是二连盆地今后找矿的主要方向(刘

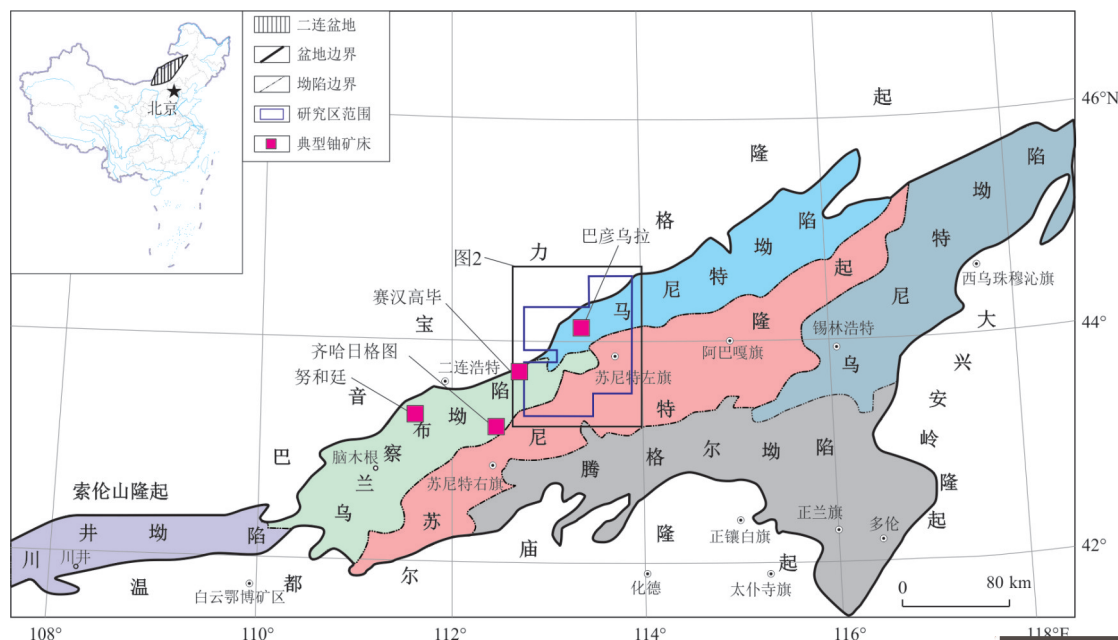


图1 二连盆地及研究区位置示意图

Fig.1 Schematic map of the Erlian basin, showing the location of studying area
据聂逢君等(2015);角图审图号:GS(2016)1549号

武生等,2013;旷文战等,2014).

2 样品采集与测试方法

本次研究首先对二连盆地某已知砂岩型铀矿床上部的10件土壤样品进行了粒级筛分,分别筛分为20~40目、40~80目、80~120目、120~200目和-200目5个粒级.不同粒级土壤样品中元素U含量平均值如图3a所示.由图3a可知,随着粒度逐渐降低铀元素含量逐渐增加.这是由于土壤微细粒组分中粘土矿物的含量较高,铀易被粘土矿物所吸附.Mo通常作为砂岩型铀矿的伴生元素,不同粒级样品中Mo的含量特征如图3b所示,结果显示Mo和U具有相似的地球化学特征,细粒级样品中Mo含量总体高于粗粒级样品.

选取-200目作为研究区土壤微细粒采样工作的采样粒级,在二连盆地赛汉高毕—苏尼特左旗地区开展了面积约11 300 km²的1:25万深穿透地球化学扫面工作.每4 km²采集1件土壤样品,同时在研究区内均匀采集重复样,重复样采样比例超过5%,共采集样品2 821件.由于该地区地势起伏较小,采样时尽量选择4 km²范围内相对低洼区域,采样层位为15~30 cm的弱胶结层,在有小型汇水域的地方采集地表的孔泡结皮样品,使得样品尽量具备代表性.在野外直接用200目尼龙筛子筛取-200

目微细粒土壤样品.

样品分析测试工作由河南省岩石矿物测试中心完成,每件样品分析32项元素,主要采样的分析仪器为XSERIES2电感耦合等离子体质谱仪(ICPMS)、BAF-2000原子荧光光度计(AFS)、ZSXPrimus II X射线荧光光谱仪(XRF)、iCAP7400 Radial等离子体发射光谱仪(ICP-AES)、PXJ-1B极谱仪(ISE).具体测试方法如表1所示.标准物质和监控样测试结果的合格率为100%,各元素报出率均为100%.分析质量指标均按照多目标区域地球化学调查规范(1:250 000)的样品分析质量要求完成.

3 测试分析结果

2 821件土壤样品中各项元素的地球化学统计参数(包括最大值、最小值、中位数、平均值和标准差)和元素相对中国东部出露地壳(EC)元素丰度的富集系数以及变异系数见表2.

3.1 元素含量分布特征

由表2可知,与中国东部出露地壳丰度相比,研究区内元素富集系数最高值为3.28,最低值为0.43.其中微量元素富集系数介于3~10的有Zr;介于2~3的有As、Sb;介于1~2的有Hg、Cr、Cu、Li、Th、Mo、V、Cd、Pb、La、U、Co、Nb、Ba、Ni、Sr、F、Zn.即

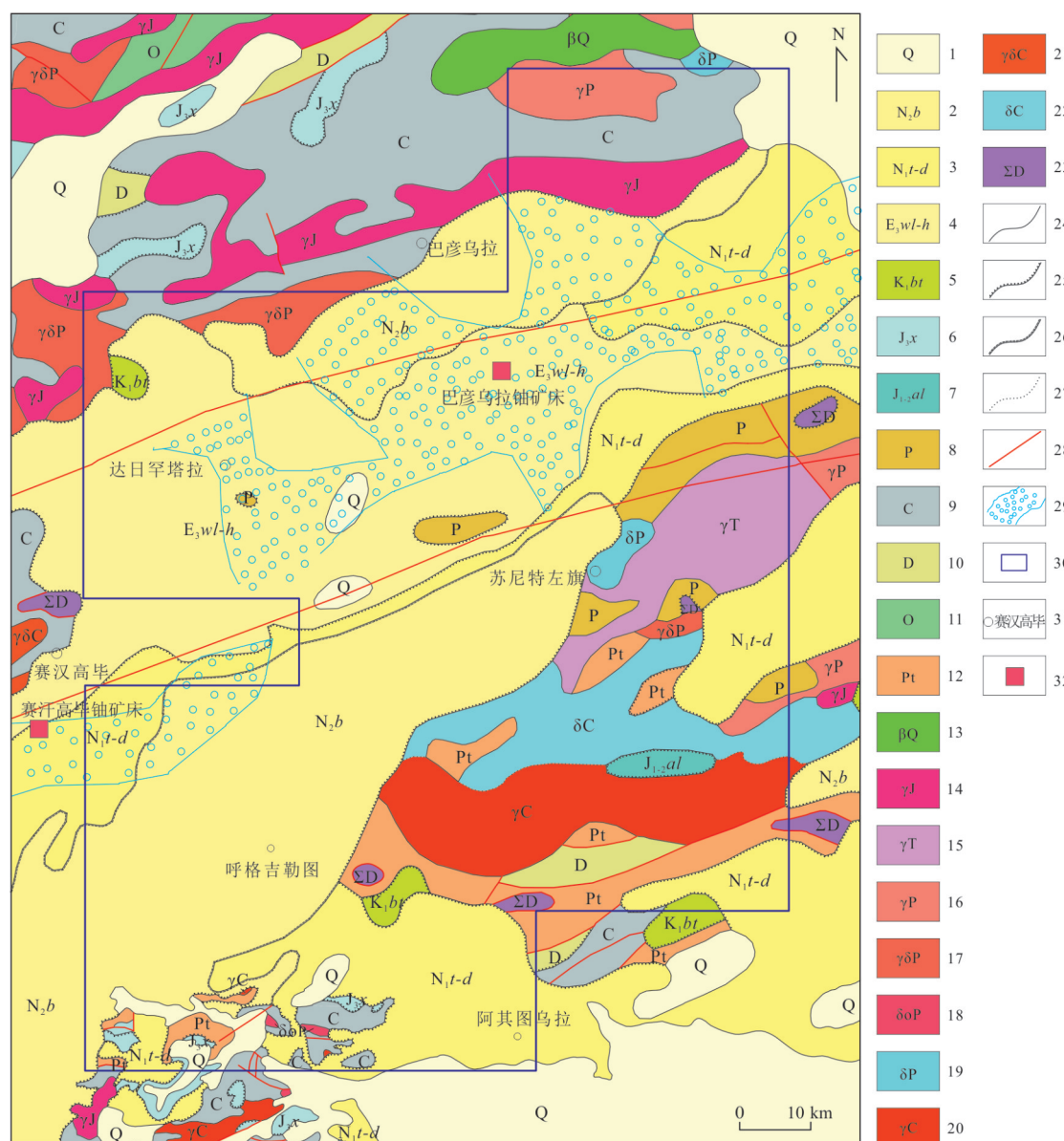


图2 研究区地质

Fig. 2 Geology of the studying area

1. 第四系冲、洪积砂砾岩、粘土岩建造;2. 宝格达乌拉组:砖红色砂质泥岩、砂岩、砂砾岩、局部含钙质结核;3. 通古尔组、大庙并层:黄色、灰白色含砾粗砂岩、砂岩、泥岩;4. 乌兰戈楚组、呼尔井组并层:下部灰白色砂岩、灰绿色泥岩,上部灰白、桔黄色砂砾岩、粗砂岩夹泥岩;5. 腾格尔组:浅灰色、灰绿色砂泥岩互层,中部夹深灰色泥岩及油页岩;6. 兴安岭群:酸、中、基性火山岩及火山碎屑岩;7. 阿拉坦合力群泥岩、砂砾岩及煤层;8. 二叠系:上部为灰黑、灰绿色粉砂岩、板岩、砂岩,下部为变质砂岩、砾岩夹安山岩、板岩、泥灰岩;9. 石炭系:灰黑、灰黄色中酸性火山岩、火山碎屑岩,局部为灰绿色粉砂岩、杂砂岩及灰岩,见浅变质岩;10. 泥盆系:灰黄色、黄绿色、黄褐色碎屑岩、板岩,底部发育生物碎屑岩及火山岩;11. 奥陶系:灰绿色、灰黑色中基性、中酸性火山岩、火山碎屑岩,过渡为正常碎屑岩,底部见轻变质碎屑岩及结晶灰岩;12. 元古宇:砂砾岩、灰岩、白云岩、片岩、板岩、千板岩、大理岩、石英岩、变质玄武岩和辉长岩类;13. 第四纪玄武岩;14. 侏罗纪花岗岩;15. 三叠纪花岗岩;16. 二叠纪花岗岩;17. 二叠纪花岗闪长岩;18. 二叠纪石英闪长岩;19. 二叠纪闪长岩;20. 石炭纪花岗岩;21. 石炭纪花岗闪长岩;22. 石炭纪闪长岩;23. 泥盆纪超基性岩;24. 地质界线;25. 角度不整合线;26. 平行不整合线;27. 岩相界线;28. 断层;29. 推测古河道;30. 土壤微细粒采样范围;31. 地名;32. 铀矿床;据核工业北京地质研究所1:50万地质图修编

大于1的微量元素共计21项,包括:Mo、Cu、Pb、Zn、Cd、As、Sb、Hg等热液成矿元素;热液运矿元素F;Li、Sr、Ba等造岩微量元素有;La、Zr、Nb、Th、U等酸性微量元素;V、Cr、Co、Ni等基性微量元素。主量

元素除 SiO_2 、 Al_2O_3 、 Fe_2O_3 和Mn的富集系数大于1以外,其余介于0.43~0.93之间,体现贫化特征,可能是该地区地表土壤样品受风成沙混入的影响。目前二连盆地内已发现有铜、钼、铀等矿床,研究区

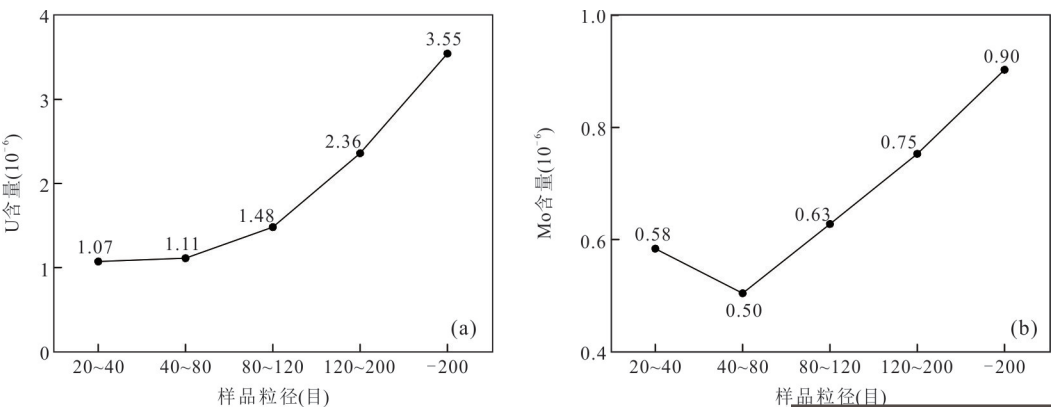


图3 不同粒径土壤中U元素和Mo元素含量分布
Fig. 3 The distribution of U and Mo content in different grain-size soil

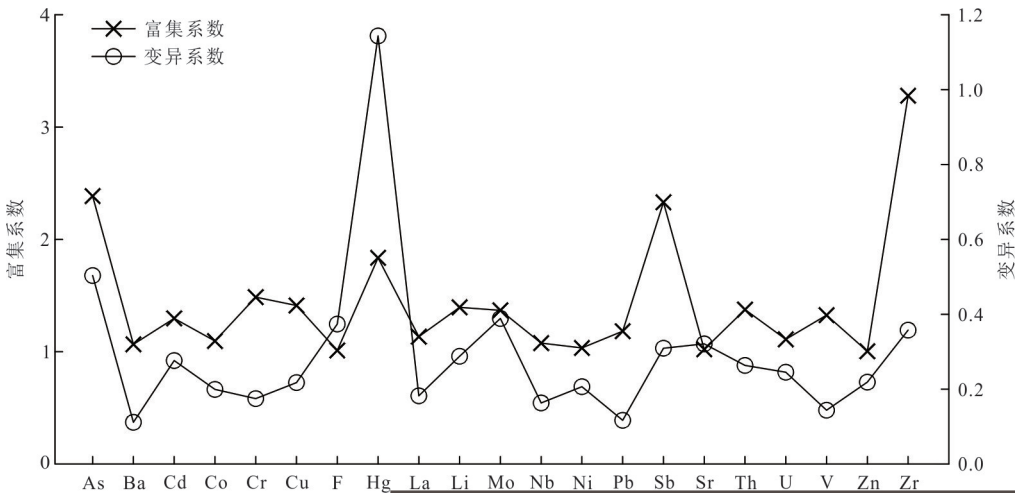


图4 元素富集系数和变异系数折线图
Fig. 4 Line chart of element enrichment coefficient and variation coefficient

表 1 样品测试分析方法		
Table 1 Elements determined and analytical methods used.		
序号	测试项目	测试方法
1	Li Co Ni Cu Zn Mo Cd Pb Th U	ICP-MS
2	As Sb Hg	AFS
3	MgO Al ₂ O ₃ SiO ₂ Fe ₂ O ₃ CaO Ti Cr Zr Nb	XRF
4	K ₂ O Na ₂ O V Sr Mn P Ba La	ICP-AES
5	FeO	VOL
6	F	ISE

Cu、Mo、U的富集系数分别为1.41、1.37和1.11。由于化探样品数量大,元素种类多且各元素含量水平存在量纲差异性,通常采用变异系数对其离散特征进行描述。本次研究采用标准偏差和平均值的比值来表示变异系数。一般认为元素变异系数越大,其含量离散程度越大,成矿的可能性就越大。反之,变异系数越小,元素含量离散程度越小,在区域

内分布就比较均匀,成矿的可能性相对较小。由表2可知,变异系数大于0.5的微量元素有Hg和As,二者均为亲硫元素,显示研究区可能存在热液活动。变异系数在0.25~0.5间的元素有Mo、F、Zr、Sr、Sb、Li、Cd、Th、U,表明上述元素含量在研究区内分布不均匀,在地球化学图上呈现局部异常或高背景。变异系数小于0.25的元素为Zn、Cu、Ni、Co、La、Cr、Nb、V、Pb、Ba,这些元素在研究区内均匀分布且含量变化不大。

综合元素的富集系数和变异系数的分析结果(图4)来看,Hg、As、Mo、F、Zr、Sr、Sb、Li、Th、U等元素及既有相对较高的富集系数,又有相对较大的变异系数,优选上述10项元素作为该地区成矿和找矿指示元素的潜力元素。

3.2 元素组合特征

由于地球化学性质的差异,不同元素在地质过

表 2 二连盆地研究区 1:25 万区域化探元素含量统计参数

Table 2 Statistical parameters of regional 1:250 000 geochemical survey in the studying area of Erlian basin

元素	As	Ba	Cd	Co	Cr	Cu	F	Hg	La	Li	Mo
最大值	183	1 638	0.43	39	154	64	4 000	1 406	116	179	8.52
最小值	1.89	292	0.03	2.96	19	5.11	177	4.03	18.0	13.5	0.34
中位数	9.61	616	0.11	9.78	63	21	442	23	40.1	28.1	0.82
平均值	10.3	615	0.11	9.97	62	21	476	24	40.8	29.3	0.85
标准差	5.16	69	0.03	1.99	10.9	4.61	178	27.3	7.44	8.43	0.33
EC	4.30	577	0.09	9.1	42	15	471	13	36	21	0.62
富集系数	2.39	1.07	1.30	1.10	1.49	1.41	1.01	1.84	1.13	1.40	1.37
变异系数	0.50	0.11	0.28	0.20	0.17	0.22	0.37	1.14	0.18	0.29	0.39
元素	Nb	Ni	Pb	Sb	Sr	Th	U	V	Zn	Zr	SiO ₂
最大值	42.9	82.5	70.8	6.09	1416	49.0	14.6	189	386	2 580	75.2
最小值	6.14	6.69	14.0	0.20	148	4.14	0.93	28.7	23.6	154	32.3
中位数	14.9	22.5	21.1	0.75	219	13.2	2.39	84.1	63.0	556	63.3
平均值	15.1	22.7	21.3	0.77	237	13.8	2.44	83.5	63.3	587	62.5
标准差	2.46	4.70	2.49	0.24	76.0	3.62	0.60	12.0	13.8	210	4.23
EC	14	22	18	0.33	232	10	2.2	63	63	179	61.7
富集系数	1.08	1.03	1.18	2.33	1.02	1.38	1.11	1.33	1.00	3.28	1.01
变异系数	0.16	0.21	0.12	0.31	0.32	0.26	0.25	0.14	0.22	0.36	0.07
元素	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	FeO	K ₂ O	Na ₂ O	CaO	MgO	Ti	P	Mn	
最大值	18.9	7.82	3.28	3.98	9.46	24.2	8.78	10 520	1 834	1 943	
最小值	3.88	1.23	0.13	1.34	0.69	0.88	0.57	2 004	177	228	
中位数	13.7	4.21	1.19	2.79	2.17	1.63	1.69	4 695	469	646	
平均值	13.5	4.20	1.20	2.77	2.13	2.65	1.83	4 672	480	652	
标准差	1.12	0.62	0.30	0.26	0.38	2.33	0.65	563	115	106	
EC	12.84	2.19	1.66	3.04	2.56	6.18	2.15	2 880	514	561	
富集系数	1.05	1.92	0.72	0.91	0.83	0.43	0.85	1.62	0.93	1.16	
变异系数	0.08	0.15	0.25	0.09	0.18	0.88	0.36	0.12	0.24	0.16	

注:主量氧化物单位为 $\times 10^{-2}$,微量元素单位 $\times 10^{-6}$;富集系数=平均值/东部出露地壳丰度(EC),EC数据引自迟清华和鄯明才(2007).

程中往往以不同的形式迁移,地球化学性质相似的元素往往具有相同或相似的地球化学行为,彼此互为伴生元素(Carlson,1991).通过相关性分析和聚类分析可以探究元素间的组合特征,从而提取区域内发生的地质作用和地球化学信息(徐伟等,2020).

在对元素进行相关性分析和聚类分析前首先对元素进行对数比变换,对数比变换不仅可以使地球化学数据实现正态分布,而且能够克服成分数据因闭合效应产生的元素之间的伪相关.对数比转换方法有加法对数比转换、中心化对数比转换和等角对数比转换等多种方法(Thió-Henestrosa and Martín-Fernández,2005),本文使用加法对数比变换.加法对数比变换(ALR)首先要求选择一个成分分量 x_D 作为除数,然后其他的成分分量 x_i 除以该成分分量,最后取自然对数.如果选择成分向量中的最后一个成分分量 x_D 作为除数,则ALR变换的数

学表达式(Aitchison,1986)如下:

$$ALR(x) \sim \left[\ln \frac{x_1}{x_D}, \ln \frac{x_2}{x_D}, \dots, \ln \frac{x_{D-1}}{x_D} \right]. \quad (1)$$

经过加法对数比变换后的成分向量可用于经典的统计分析.本文选择Ti作为除数(Thió-Henestrosa and Martín-Fernández,2005,2006),采用CoDaPack软件完成ALR对数比变换.

对研究区内的2 281样品上述10项微量元素加法对数比变换后的数据进行相关分析及R型聚类分析,结果见表3和图5.

根据元素相关性统计结果(表3)可知,U和Mo具有显著的正相关性,相关系数为0.57.二者地球化学行为相似,互为伴生元素,可以作为该研究区寻找砂岩型铀矿的指示元素.

从R型聚类分析树状图(图5)可知,以皮尔逊(Pearson)相关系数 $R=0.25$ 为界限,元素组合可以

表 3 研究区特征元素相关系数表

Table 3 The correlation coefficient of characteristic element in the studying area

	As	Sb	F	Sr	Li	Mo	Th	U	Zr	Hg
As	1.00									
Sb	0.92	1.00								
F	0.61	0.61	1.00							
Sr	0.30	0.25	0.65	1.00						
Li	0.65	0.68	0.85	0.50	1.00					
Mo	0.46	0.45	0.49	0.35	0.49	1.00				
Th	-0.09	-0.12	-0.12	-0.13	-0.09	-0.02	1.00			
U	0.30	0.27	0.38	0.38	0.36	0.57	0.35	1.00		
Zr	-0.53	-0.55	-0.68	-0.31	-0.74	-0.29	0.35	-0.09	1.00	
Hg	0.49	0.51	0.31	-0.04	0.37	0.13	-0.10	0.00	-0.43	1.00

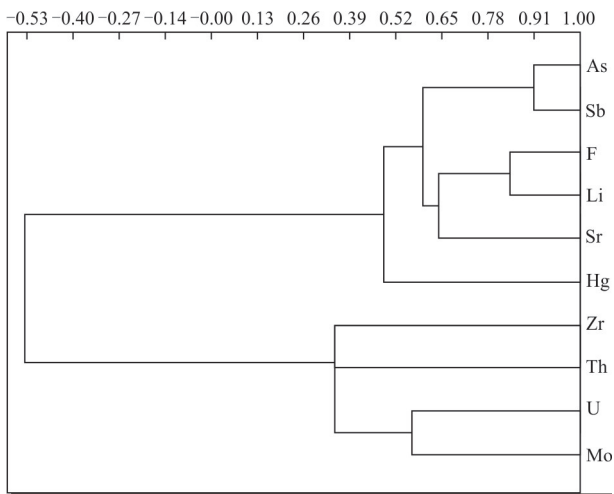


图 5 R 型聚类分析树状图

Fig. 5 Tree diagram of R-type cluster analysis

分为 2 组,分别为 As-Sb-F-Li-Sr-Hg 组合、Zr-Th-U-Mo 组合。其中,Zr-Th-U-Mo 为高场强元素,代表着研究区与酸性岩浆岩有关的地质过程;As-Sb-F-Li-Sr-Hg 为大离子亲石元素和亲硫元素,可能代表研究区与酸性岩浆岩有关的热液成矿活动。U-Mo 为铀矿的成矿指示元素,说明 U 矿化与酸性岩浆岩关系密切。研究区内广泛发育的酸性岩浆岩为砂岩型铀矿提供了成矿物质来源(聂逢君等,2015)。

4 讨论

4.1 元素地球化学空间分布特征

根据元素含量和组合特征优选 U、Mo 作为该地区铀矿床的找矿指示元素。使用中国地质调查局发展研究中心开发的 GeoExpl 软件绘制元素的地球化学图和地球化学异常图。对离散数据进行网格化,采用指数距离加权法插值,搜索半径设置为 6.25 km。地球化

学图采用 19 级色阶,色阶值采用累频法,累频分段为 0%~0.5%~1.2%~2%~3%~4.5%~8%~15%~25%~40%~60%~75%~85%~92%~95.5%~97%~98%~98.8%~99.5%~100%。色阶图例标注对应频段的元素含量值,U 和 Mo 的地球化学图如图 6 所示。

研究区内 U 的高背景主要分布于花岗岩体出露的地区,例如在巴彦乌拉东北部 U 的高背景主要分布于侏罗纪和二叠纪的花岗岩区,在苏尼特左旗的东部和南部 U 的高背景与石炭纪和三叠纪的花岗岩出露区具有较好的套合关系。另外,U 的高含量还分布在新近纪、古近纪和白垩纪的沉积层中,例如宝格达乌拉组(N_2b)砖红色砂质泥岩、砂岩、砂砾岩中;通古尔组和大庙组并层(N_1t-d)黄色、灰白色含砾粗砂岩、砂岩、泥岩中;乌兰戈楚组和呼尔井组并层(E_3wl-h)灰白色砂岩、灰绿色泥岩中;腾格尔组(K_1bt)浅灰色、灰绿色砂泥岩、深灰色泥岩及油页岩中。Mo 的地球化学分布特征与 U 相似,一部分主要分布于花岗岩出露区,另一部分主要分布在新近系、古近系和白垩系砂—泥岩地层中(图 6)。

为了更直观的研究区内 U、Mo 元素的异常分布,采用累频 85%、92.5%、97.5% 对应的元素含量值分别作为外带、中带和内带绘制 U 和 Mo 的地球化学异常图(图 7)。U 和 Mo 的地球化学异常分布特征表现为:(1)异常均呈北东向展布,与区域构造线的方向一致;(2)沉积岩分布区(E_3wl-h 、 N_1t-d)U 和 Mo 元素相关性最强,异常吻合较好;(3)花岗岩分布区 U 和 Mo 的相关性弱,异常存在解耦,这可能受控于 U 和 Mo 在花岗岩风化过程中不同的元素行为。另外,研究区北部的巴彦乌拉铀矿床具有耦合的 U-Mo 异常,表明 U、Mo 可以作为该地区铀矿床

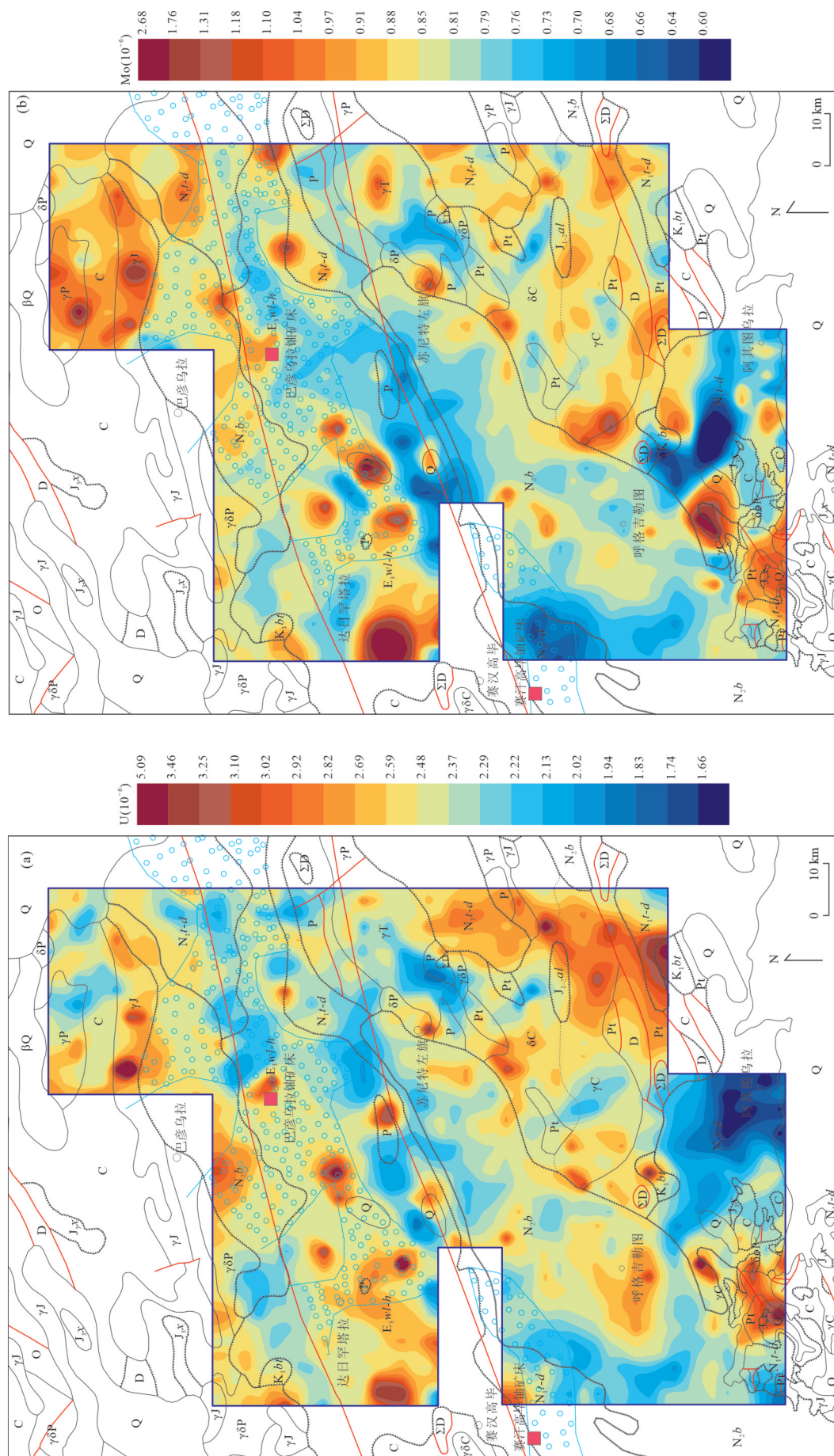


图 6 研究区 U 和 Mo 的地球化学图

Fig. 6 Geochemical distribution of U and Mo in the studying area

表 4 不同地质体单元上土壤中 U 和 Mo 元素含量特征统计表
Table 4 The contents of U and Mo in soils from different tectonic units

序号	地质单元	样品数	U		Mo	
			中位数	平均值	中位数	平均值
1	Q	64	2.35	2.50	0.82	0.97
2	N ₂ b	747	2.38	2.40	0.81	0.81
3	N ₁ t-d	485	2.26	2.32	0.81	0.84
4	E ₃ wl-h	625	2.36	2.44	0.79	0.85
5	K ₁ bt	18	2.35	2.60	0.79	0.84
6	J ₃ x	4	2.09	2.14	0.86	0.87
7	J ₁₋₂ al	15	2.56	2.67	0.87	0.89
8	P	81	2.36	2.42	0.80	0.80
9	C	96	2.39	2.37	0.87	0.87
10	D	26	2.59	2.56	0.87	0.91
11	Pt	118	2.51	2.59	0.84	0.87
12	γJ	57	2.56	2.79	0.90	1.04
13	γT	109	2.39	2.37	0.81	0.82
14	γP	37	2.53	2.58	0.88	1.02
15	γδP	43	2.58	2.60	0.86	0.86
16	δoP	2	4.01	4.01	1.01	1.01
17	δP	14	2.46	2.65	0.85	0.94
18	γC	149	2.59	2.64	0.84	0.88
19	δC	122	2.42	2.51	0.83	0.84
20	ΣD	9	2.37	2.35	0.85	0.94

注:地质单元符号与图 2 注释一致,元素单位 $\times 10^{-6}$ 。

的找矿指示元素,两种元素地球化学异常同时出现的地区可能具有较好的找矿前景。

4.2 铀-钼综合异常分析

在进行异常评价时,考虑到研究区面积大,地质背景复杂,既有花岗岩集中区,又存在沉积岩分布区,不同地质体背景差异大,而土壤微细粒异常强度弱,为了更好的提取弱异常,将各单样对应的 U (Mo) 含量值除以该样品所在地质单元(子区)背景,求得该采样点元素衬度值(标准化值),进而圈定异常。本次研究采用不同地质单元土壤样品元素含量中位数(如表 4)计算衬度值。

根据 U 衬度值的三级异常,结合累频 85% 圈定的 Mo 衬度值异常区绘制二者的综合异常图(图 8)。图 8 中标注了浓度大且具有多层套合关系的铀异常 25 处。结合图 1,图 2 和图 8 可以看出,铀异常 1 和 2 位于巴音宝力格隆起内,是侏罗纪花岗岩的出露区,异常与花岗岩的高 U 背景值有关;异常 3~16 位于乌兰察布坳陷和马尼特坳陷内,出露于古近系乌兰戈楚组 and 呼尔井组并层(E₃wl-h)、新近系宝格达

乌拉组(N₂b)和通古尔组和大庙组并层(N₁t-d)地层中,总体上沿赛汉高毕—巴彦乌拉古河道砂体分布,其中异常 4 与巴彦乌拉铀矿床有很好的对应关系,异常 7~11 位于赛汉高毕古河道内,异常 12 与赛汉高毕矿床有关;异常 17~22 位于苏尼特隆起内,呈串珠状分布,这些异常与区内广泛出露的古生代—中生代花岗岩体、闪长岩体密切相关,其分布特征可能与该区域基岩出露,地势上呈现水平起伏有关;异常 23~25 位于乌兰察布坳陷和苏尼特隆起的交界部位,区内出露的通古尔组和大庙组并层(N₁t-d)地层中铀异常浓度大,异常分布特征可能与北东和近东西的断层有关。

本次利用 U 和 Mo 的衬值综合异常及其地质条件圈定铀矿的有利找矿地段。选择有利找矿地段的依据为:(1)具有 U 和 Mo 综合异常,其中 U 异常具有明显的异常浓集中心和多层异常套合,多个地球化学异常集中出现;(2)异常位于坳陷或古河道内,其地质条件有利于矿体的保存。据此,圈定 I、II 和 III 3 个铀矿找矿有利地段(图 8)。

地段 I 和地段 II 分别由铀异常 3~6 和铀异常 7~11 组成,二者在空间上与前人推测下伏古河道砂体具有较好的对应关系,其东西两侧已发现赛汉高毕和巴彦乌拉 2 个铀矿床。古河道砂体是该地区砂岩型铀矿的主要赋矿地质体,近年来沿古河道实施了钻探工程,已揭露多个铀矿工业孔(刘武生等, 2013; 旷文战等, 2014; 乔鹏等, 2017),表明成矿有利地段 I 和 II 具有较大的铀矿找矿潜力。地段 III 由铀异常 23~25 组成,与高 U 背景的砂—泥岩地层有关,该区位于乌兰察布坳陷和苏尼特隆起的交界部位,从构造位置和地球化学异常结果看,也具备寻找铀矿的可能性。

4.3 铀地球化学异常的成因机理

研究区位于北纬 40 度附近的干旱—半干旱荒漠地区,该纬度地区发育了世界上主要的砂岩型铀矿,例如美国西部盆地、北非地区、俄罗斯和中亚地区(聂逢君等, 2015)。区内干旱的气候条件使得铀源体发生强烈的剥蚀氧化,铀转入水体,有利于含氧含铀地下水沿高渗透的砂岩层向深部迁移,发育层间氧化带,从而使铀充分迁移并发生后生富集;矿体形成后部分铀元素被矿体析出,形成铀络酰离子([UO₂]²⁺),并由深部的上升作用向地表迁移。该迁移的方式受多种作用影响,如地气的上升作用,地下水的毛细作用,及在岩层构造裂隙由压力向上

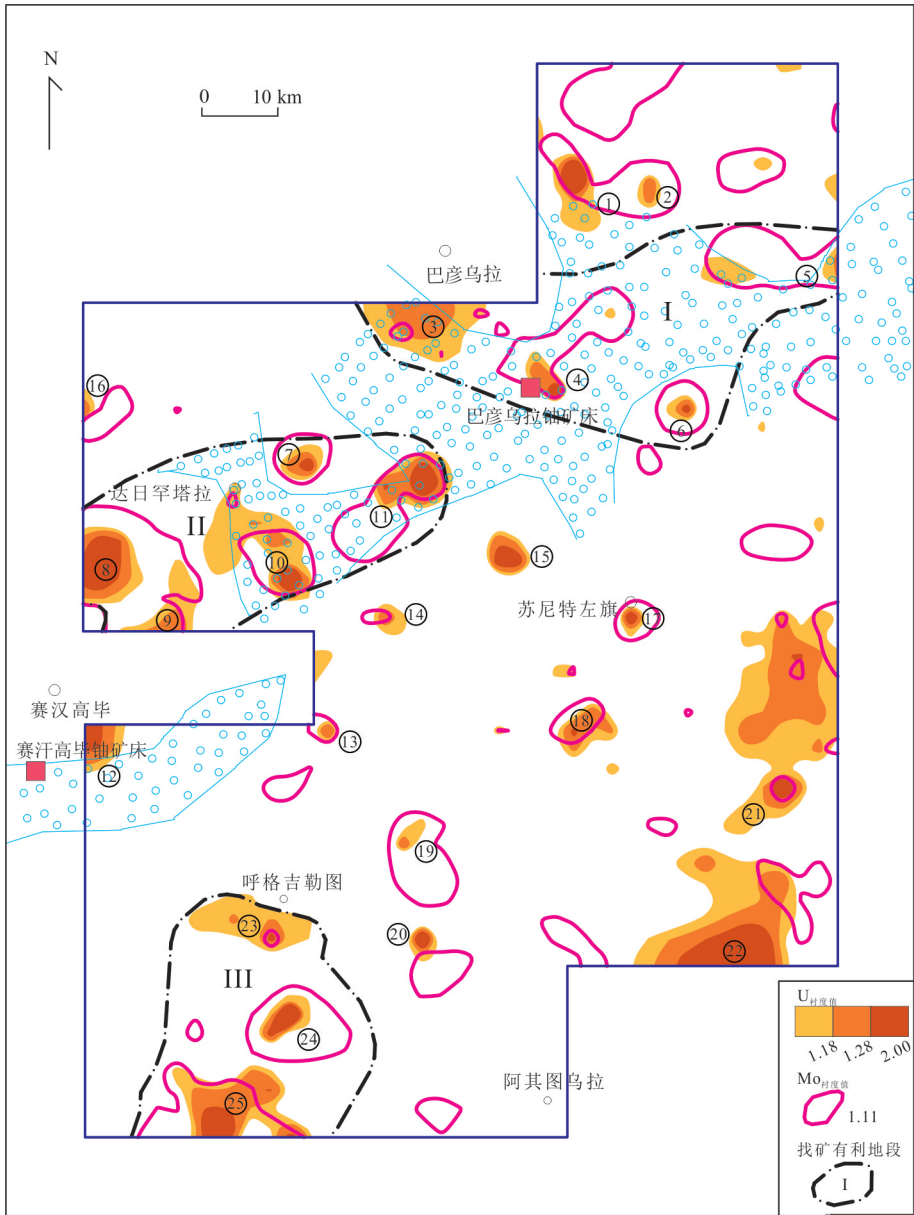


图8 研究区U-Mo综合异常图

Fig. 8 Comprehensive geochemical anomaly map of U and Mo in the studying area

迁移的渗透作用等(刘映东,2018).二连盆地已探明多个砂岩型铀矿,包括努和廷超大型矿床、赛汗高毕中型矿床等. Zhang *et al.*(2020)在努和廷矿床的方法试验已证明在隐伏矿体上方确实存在活动性铀元素异常,说明铀元素的垂向迁移行为是必然存在的. 因此,尽管研究区深部的铀矿体往往被上覆地层和风成沙所覆盖,深部U微弱异常仍然可以通过地质营力穿过上覆盖层到达地表. 这些来自深部的U异常最终被地表富含粘土矿物等土壤微细粒形成的地球化学障所捕获. 通过物理分离土壤细粒组分可以将富含U的粘土矿物从土壤中分离出来,

从而达到识别深部U微弱异常的目的. 土壤微细粒分离测量技术有望成为一种高效率、低成本的勘查技术应用于该地区砂岩型铀矿的勘查实践中.

5 结论

(1)二连盆地中部赛汗高毕—苏尼特左旗地区土壤微细粒样品中 Hg、As、Mo、F、Zr、Sr、Sb、Li、Th、U 等元素既有相对较高的富集系数,又有相对较大的变异系数. 通过元素相关分析和R型聚类分析将其分为 Zr-Th-U-Mo 组合和 As-Sb-F-Li-Sr-Hg 组合,分别代表研究区与酸性岩浆岩有关的地质过

程和热液成矿作用。

(2) 优选 U-Mo 为铀矿的成矿指示元素, U 和 Mo 的地球化学图显示 U 和 Mo 的高含量与该区广泛发育的花岗岩体和古河道砂体关系密切。依据 U-Mo 地球化学综合异常圈定了 3 个铀矿找矿有利地段, 其中地段 I 和 II 位于盆地次级拗陷内部, 异常与古河道砂体有关, 寻找砂岩型铀矿的潜力较大。

(3) 土壤微细粒分离测量技术有望成为一种高效率、低成本的勘查技术应用于二连盆地砂岩型铀矿的勘查实践中。

致谢: 感谢审稿人提出的修改建议。感谢核工业北京地质研究所王勇高级工程师、王东升工程师在论文完成过程中给与的帮助和支持。感谢中国地质大学(北京) 龚庆杰教授对本文提出的宝贵意见和建议。

References

- Aitchison, J., 1986. The Statistical Analysis of Compositional Data. Chapman and Hall, London.
- Cai, Y.Q., Zhang, J.D., Li, Z.Y., et al., 2015. Outline of Uranium Resources Characteristics and Metallogenetic Regularity in China. *Acta Geologica Sinica*, 89(6):1051—1069(in Chinese with English abstract).
- Carlson, C.A., 1991. Spatial Distribution of Ore Deposits. *Geology*, 19(2): 111. [https://doi.org/10.1130/0091-7613\(1991\)019<0111:sdood>2.3.co;2](https://doi.org/10.1130/0091-7613(1991)019<0111:sdood>2.3.co;2)
- Chi, Q.H., Yan, M.C., 2007. Handbook of Elemental Abundance for Applied Geochemistry. Geological Publishing House, Beijing (in Chinese).
- Gong, Q.J., Xia, X.Q., Liu, N.Q., 2020. Research Progress of Applied Geochemistry during the Decade of 2011 to 2020 in China. *Bulletin of Mineralogy, Petrology and Geochemistry*, 39(05): 927—944(in Chinese with English abstract).
- Kuang, W.Z., Cai, T., Yan, Z.B., 2014. Characteristic in Cretaceous and Types of Uranium Mineralization in Ulanabuh Depression, Erlian Basin, Inner Mongolia. *Journal of East China Institute of Technology(Natural Science)*, 37(2): 111—121(in Chinese with English abstract).
- Lin, X.B., Li, X.D., Liu, W.S., 2020. Metallogenic Types and Spatiotemporal Distribution Characteristics of Uranium Deposits in Erlian Basin. *Uranium Geology*, 37(6):1013—1026 (in Chinese with English abstract).
- Liu, H.L., Wang, X.Q., Zhang, B.M., et al., 2015. The Application of Debris and Soil Geochemical Measurement Methods to the Shaquanzi Cu-Ni Deposit, Xinjiang. *Geophysical and Geochemical Exploration*, 39(2):228—233. <https://doi.org/10.11720/wtyht.2015.2.03>.
- Liu, H.L., Zhang, B.M., Liu, D.S., et al., 2016. The Application of Soil Geochemical Measurement Method to the Huaniushan Pb-Zn Deposit, Gansu Province. *Geophysical and Geochemical Exploration*, 40(1): 33—39. <https://doi.org/10.11720/wtyht.2016.1.06>.
- Liu, J.L., Liu, W.S., Yu, H., et al., 2020. Zircon U-Pb ages and Hf Isotopic Compositions of the Granites from Bayanwula Area and Their Geological Significance. *Geological Bulletin of China*, 39(8): 1285—1295(in Chinese with English abstract).
- Liu, W.S., Kang, S.H., Jia, L.C., et al., 2013. Characteristics of Paleo-Valley Sandstone-Type Uranium Mineralization in the Middle of Erlian Basin. *Uranium Geology*, 29(6): 328—335(in Chinese with English abstract).
- Liu, Y.D., 2018. Study of Fine-Grained Soil Geochemical Exploration Technology to Sandstone Type Uranium in the Erenhot Basin(Dissertation). College of Geoscience Guilin University of Technology, Guilin, 1—64(in Chinese with English abstract).
- Nie, F.J., Chen, A.P., Peng, Y.B., et al., 2010. Paleo-Valley Sandstone-Type Uranium in Erlian Basin. Geological Publishing House, Beijing, 1—226(in Chinese).
- Nie, F.J., Li, M.G., Yan, Z.B., et al., 2015. Segmentation of the Targetlayer Saihan Formation and Sandstone-Type Uranium Mineralization in Erlian Basin. *Geological Bulletin of China*, 34(10): 1952—1963(in Chinese with English abstract).
- Qiao, P., Liu, B., Kang, S.H., 2017. Characteristics of Uranium Mineralization and Resource Potential in the Middle-Eastern of Erlian Basin. *Progress Report on China Nuclear Science & Technology*, 5: 508—515(in Chinese with English abstract).
- Thió-Henestrosa, S., Martín-Fernández, J.A., 2005. Dealing with Compositional Data: The Freeware CoDaPack. *Mathematical Geology*, 37(7): 773—793. <https://doi.org/10.1007/s11004-005-7379-3>
- Thió-Henestrosa, S., Martín-Fernández, J.A., 2006. Detailed Guide to CoDaPack: A Freeware Compositional Software. *Geological Society, London, Special Publications*, 264(1): 101—118. <https://doi.org/10.1144/gsl.sp.2006.264.01.08>
- Tong, B.L., Tang, D.W., Liu, B., 2017. Paleo-Valley Tectonic Construction and Uranium Prospecting Model in Wulanchabu Sag, Erlian Basin. *Western Resources*, 2:21—25(in Chinese).
- Wang, X.Q., 1998. Deep Penetration Exploration Geochem-

- istry. *Geophysical and Geochemical Exploration*, 22(3): 166—169(in Chinese with English abstract).
- Wang, X.Q., 2005. Conceptual Model of Deep-Penetrating Geochemical Migration. *Geological Bulletin of China*, 24 (10—11): 892—896. (in Chinese with English abstract).
- Wang, X.Q., Zhang, B.M., Yao, W.S., et al., 2012. New Evidences for Transport Mechanism and Case Histories of Geochemical Exploration through Covers. *Earth Science*, 37(6): 1126—1132(in Chinese with English abstract).
- Wang, X.Q., Zhang, B.M., Ye, R., 2016. Nanogeochemistry for Mineral Exploration through Cover. *Bulletin of Mineralogy, Petrology and Geochemistry*, 35: 43—51(in Chinese with English abstract).
- Wang, X.Q., Xu, S.F., Zhang, B.M., et al., 2011. Deep-Penetrating Geochemistry for Sandstone-Type Uranium Deposits in the Turpan-Hami Basin, North-Western China. *Applied Geochemistry*, 26(12): 2238—2246. <https://doi.org/10.1016/j.apgeochem.2011.08.006>
- Wang, X.Q., Zhang, B.M., Lin, X., et al., 2016. Geochemical Challenges of Diverse Regolith-Covered Terrains for Mineral Exploration in China. *Ore Geology Reviews*, 73: 417—431. <https://doi.org/10.1016/j.oregeorev.2015.08.015>
- Xia, F.Y., Jiao, Y.Q., Rong, H., et al., 2019. Geochemical Characteristics and Geological Implications of Sandstones from the Yaojia Formation in Qianjiadian Uranium Deposit, Southern Songliao Basin. *Earth Science*, 44(12): 4235—4251(in Chinese with English abstract).
- Xie, H.L., Jiao, Y.Q., Liu, Z.Y., et al., 2020. Occurrence and Enrichment Mechanism of Uranium Ore Minerals from Sandstone-Type Uranium Deposit, Northern Ordos Basin. *Earth Science*, 45(5): 1531—1543(in Chinese with English abstract).
- Xie, X.J., Wang, X.Q., 2003. Recent Developments on Deep-Penetrating Geochemistry. *Earth Science Frontiers*, 10(1): 225—238 (in Chinese with English abstract).
- Xu, W., Jiang, H., Zhu, J., et al., 2020. Characteristics of Soil Geochemistry in Uranium-Polymetallic Metallogenic Prospect Area at Dajishan, Southwestern Guizhou. *Uranium Geology*, 36(06):89—102(in Chinese with English abstract).
- Yao, W.S., Wang, X.Q., Zhang, B.M., et al., 2012. Pilot Study of Deep-Penetrating Geochemical Exploration for Sandstone-Type Uranium Deposit, Ordos Basin. *Earth Science Frontiers*, 19(3): 167—176(in Chinese with English abstract).
- Yu, R.A., Wu, Z.J., Sima, X.Z., et al., 2020. Geochronology and Geological Significance of Sandstone Detrital Zircons from Saihantala Formation in Southern Manite Depression, Erlian Basin. *Earth Science*, 45(5): 1609—1621(in Chinese with English abstract).
- Zhang, B.M., Wang, X.Q., Xu, S.F., et al., 2020. The Research and Application of Deep-Penetrating Geochemical Exploration Technology in the Survey of Concealed Sandstone-Type Uranium Deposits. *Acta Geoscientia Sinica*, 188(6): 34—48(in Chinese with English abstract).
- Zhang, B.M., Wang, X.Q., 2018. Theory and Technology of Nanogeochemistry for Mineral Exploration. *Earth Science*, 43(5): 1503—1517(in Chinese with English abstract).
- Zhang, B.M., Wang, X.Q., Xu, S.F., et al., 2016. Models and Case History Studies of Deep Penetrating Geochemical Exploration for Concealed Deposits in Basins. *Geology in China*, 43(5): 1697—1709(in Chinese with English abstract).
- Zhang, J.D., Li, Y.L., Jian, X.F., 2008. Situation and Development Prospect of Uranium Resources Exploration in China. *Strategic Study of CAE*, 10(1): 54—60.
- Zhang, B.M., Wang, X.Q., Zhou, J., et al., 2020. Regional Geochemical Survey of Concealed Sandstone-Type Uranium Deposits Using Fine-Grained Soil and Groundwater in the Erlian Basin, North-East China. *Journal of Geochemical Exploration*, 216(5): 106573. <https://doi.org/10.1016/j.gexplo.2020.106573>

附中文参考文献

- 蔡煜琦, 张金带, 李子颖, 等, 2015. 中国铀矿资源特征及成矿规律概要. *地质学报*, 89(6): 1051—1069.
- 迟清华, 鄢明才, 2007. 应用地球化学元素丰度数据手册. 北京: 地质出版社, 1—148.
- 龚庆杰, 夏学齐, 刘宁强, 2020. 2011~2020 中国应用地球化学研究进展与展望. *矿物岩石地球化学通报*, 39(05): 927—944.
- 旷文战, 蔡彤, 严兆彬, 2014. 内蒙古二连盆地乌兰察布坳陷白垩系特征及铀成矿类型. *东华理工大学学报(自然科学版)*, 37(2): 111—121.
- 林效宾, 李西得, 刘武生, 2020. 二连盆地铀矿床成矿类型及时空分布特征. *铀矿地质*, 37(6):1013—1026.
- 刘汉粮, 王学求, 张必敏, 等, 2015. 岩屑测量和土壤微细粒测量在沙泉子铜镍矿的应用. *物探与化探*, 39(2): 228—233.
- 刘汉粮, 张必敏, 刘东盛, 等, 2016. 土壤微细粒全量测量在甘肃花牛山矿区的应用. *物探与化探*, 40(1): 33—39.
- 刘佳林, 刘武生, 虞航, 等, 2020. 二连盆地巴彦乌拉铀矿区花岗岩锆石 U-Pb 年龄和 Hf 同位素特征及地质意义. *地质通报*, 39 (08):165—175.
- 刘武生, 康世虎, 贾立城, 等, 2013. 二连盆地中部古河道砂岩型铀矿成矿特征. *铀矿地质*, 29(6): 328—335.

- 刘映东, 2018. 二连盆地砂岩型铀矿土壤微细粒分离技术找矿研究(博士毕业论文). 桂林: 桂林理工大学, 1—64.
- 聂逢君, 陈安平, 彭云彪, 等, 2010. 二连盆地古河道砂岩型铀矿. 北京: 地质出版社, 1—226.
- 聂逢君, 李满根, 严兆彬, 等, 2015. 内蒙古二连盆地砂岩型铀矿目的层赛汉组分段与铀矿化. 地质通报, 34(10): 1952—1963.
- 乔鹏, 刘波, 康世虎, 等, 2017. 二连盆地中东部铀成矿特征及潜力评价. 中国核学会2017年学术年会, 5:508—515.
- 童波林, 唐大伟, 刘波, 2017. 二连盆地乌兰察布凹陷古河谷构造建造及铀矿找矿模式. 西部资源, 2:21—25.
- 王学求, 1998. 深穿透勘查地球化学. 物探与化探, 22(3): 166—169.
- 王学求, 2005. 深穿透地球化学迁移模型. 地质通报, 24(10—11): 892—896.
- 王学求, 张必敏, 姚文生, 等, 2012. 覆盖区勘查地球化学理论研究进展与案例. 地球科学, 37(6): 1126—1132.
- 王学求, 张必敏, 叶荣, 2016. 纳米地球化学与覆盖区矿产勘查. 矿物岩石地球化学通报, 35: 43—51.
- 夏飞勇, 焦养泉, 荣辉, 等, 2019. 松辽盆地南部钱家店铀矿床姚家组砂岩地球化学特征及地质意义. 地球科学, 44(12): 4235—4251.
- 谢惠丽, 焦养泉, 刘章月, 等, 2020. 鄂尔多斯盆地北部铀矿床铀矿物赋存状态及富集机理. 地球科学, 45(5): 1531—1543.
- 谢学锦, 王学求, 2003. 深穿透地球化学新进展. 地学前缘, 10(1): 225—238.
- 徐伟, 蒋宏, 朱剑, 等, 2020. 黔西南大际山铀多金属成矿远景区土壤地球化学特征. 铀矿地质, 36(6): 89—102.
- 姚文生, 王学求, 张必敏, 等, 2012. 鄂尔多斯盆地砂岩型铀矿深穿透地球化学勘查方法实验. 地学前缘, 19(3): 167—176.
- 俞初安, 吴兆剑, 司马献章, 等, 2020. 二连盆地马尼特坳陷南缘赛汉塔拉组砂岩碎屑锆石年龄及其地质意义. 地球科学, 45(5): 1609—1621.
- 张必敏, 王学求, 2018. 矿产勘查的纳米地球化学理论与方法. 地球科学, 43(5): 1503—1517.
- 张必敏, 王学求, 徐善法, 等, 2016. 盆地金属矿穿透性地球化学勘查模型与案例. 中国地质, 43(5): 1697—1709.
- 张必敏, 王学求, 徐善法, 等, 2020. 穿透性地球化学勘查技术在隐伏砂岩型铀矿调查中的应用研究. 地球学报, 188(6): 34—48.
- 张金带, 李友良, 简晓飞, 2008. 我国铀资源勘查状况及发展前景. 中国工程科学, 10(1): 54—60.