

DOI:10.19751/j.cnki.61-1149/p.2019.03.012

新疆东天山玉海铜矿外围浅覆盖区 1:5 万化探方法技术及应用

段星星¹, 黑欢¹, 梁楠¹, 张钊熔², 刘拓¹

(1. 中国地质调查局西安地质调查中心/西北地质科技创新中心, 自然资源部岩浆作用成矿与找矿重点实验室, 陕西 西安 710054; 2. 长安大学地球科学与资源学院, 陕西 西安 710054)

摘 要:采用车载风动正循环潜孔锤+合金刮刀钻进工艺, 提出了一套适用于盖层厚度小于 100 m、地下水埋深大于 100 m 的浅覆盖区 1:5 万化探方法技术, 方法技术包括采样粒级、采样层位、采样网度、样品收集等内容。选择玉海外围等具有找矿潜力的覆盖区开展方法技术有效性验证工作, 覆盖区内圈定的异常不仅很好的反映了已知隐伏矿床, 而且依据覆盖区内圈定的异常, 开展异常查证工作实现玉海矿区外围覆盖区内取得找矿新突破, 新圈定铜矿体 5 条, 扩大了矿床规模。研究提出的 1:5 万车载浅钻化探方法技术组合在新疆东天山玉海地区以侵入岩为赋矿岩体的覆盖区内找矿是有效的。

关键词:覆盖区; 新疆东天山; 车载浅钻; 化探方法技术

中图分类号: P632

文献标志码: A

文章编号: 1009-6248(2019)03-0143-08

1 : 50, 000 Geochemical Prospecting Techniques and their Applications in Shallow Covered Area outside the Yuhai Copper Deposit in East Tianshan Mountains, Xinjiang

DUAN Xingxing¹, HEI Huan¹, LIANG Nan¹, ZHANG Zhaorong², LIU Tuo¹

(1. Key Laboratory for the Study of Focused Magmatism and Giant Ore Deposits, MNR, Xi'an Center of China Geological Survey/Northwest China Center for Geoscience Innovation, Xi'an 710054, Shaanxi, China;

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

Abstract: By adopting the drilling technology of six-wheel drive vehicle pneumatic positive circulation DTH hammer + alloy scraper, a set of 1 : 50, 000 geochemical exploration method has been proposed for the shallow overburden area with the thickness of cap layer less than 100m and the depth of groundwater more than 100m. This method includes sampling size, horizon, grid and sample collection. In this paper, the covered area of ore-prospecting potential surrounded the Yuhai deposit has been chosen to carry out the validation work. The results show that the delineated abnormal in covered area not only well reflects the known concealed ore deposit, but also has new prospecting breakthrough in the periphery covered area of the Yuhai deposit based on the anomaly verification work, where 5 new copper ore-bodies has been delineated and the scale of the

收稿日期: 2019-02-01; 修回日期: 2019-04-09

基金项目: 中国地质调查局基础性公益性地质矿产调查“天山-北山成矿带那拉提-营毛沱地区地质矿产调查”(DD20160009), 新疆地质勘查基金“新疆东天山重要成矿带浅覆盖区 1:5 万化探示范”(T14-1-LQ34)联合资助

作者简介: 段星星(1983-), 男, 硕士, 高级工程师, 主要从事勘查地球化学和矿床勘查工作。E-mail: duanxx@foxmail.com

Yuhai deposit expands. Therefore, the 1 : 50, 000 vehicle-mounted shallow drilling geochemical exploration method and technology combination proposed in this study are effective in prospecting in the overburden area with intrusive rock as host rock mass in Yuhai area, east Tianshan Mountains, Xinjiang.

Keywords: covered area; east Tianshan Mountains; Xinjiang; vehicle-mounted shallow drilling; geochemical prospecting techniques

东天山位于塔里木板块北部边缘,经历了复杂的大陆裂解和洋-陆转化过程,期间岩浆活动频繁,构造复杂,形成了大量的有色金属和贵金属矿产,是中国重要的成矿区带之一(周军等,2017;刘生荣等,2018)。近年来,地质找矿工作在东天山地区的山盆过渡带、山间盆地、河谷两侧的基岩区与覆盖区的过渡地带新发现玉海中型铜(钼)矿、白鑫滩中型铜镍矿、阿齐山大型铅锌矿、路北小型铜镍矿、沙西铜铅锌矿点、哈西金矿点等,找矿新突破显示覆盖区内也具有很好的找矿潜力。遥感解译显示,除去吐哈和塔里木盆地北缘厚大覆盖区之外,东天山有近 3 万 km^2 中新界覆盖区(段星星等,2018)。覆盖区在以往基础性地质调查工作中,常常重视不够或被忽略,尤其是常规化探工作不够。因此,优选经济有效的采样技术方法,探索提出一套适用于东天山覆盖区内的 1:5 万化探方法技术,对于开辟东天山地区新的找矿空间,实现找矿新突破具有重要意义。

提高浅覆盖区或基岩出露差的地区化探工作质量,越来越受到地质工作者重视,在浅覆盖区及隐伏矿体使用地球化学勘查方法技术取得不少进展(马维等,2014;王翰等,2018;孙彬彬等,2018;段星星等,2018;韩志轩等,2017;王学求等,2012)。2008 年以来,中国地质科学院物化探研究所等单位选择新疆哈密市南部南湖戈壁开展化探工作,其地球化学景观属干旱荒漠戈壁残山 II 级景观区,采用车载机动浅钻空气反循环冲击器钻进取样技术,采集残积层样品,完成了 1 600 km^2 的区域化探扫面工作,密度是 1 孔/4 km^2 ,圈定了 6 处铜、金、铀、稀土矿等重要的地球化学异常。2014 年以来,中国地质调查局西安地质调查中心项目结合东天山优势矿种及找矿潜力,优选玉海斑岩型叠加热液改造型铜钼矿、白鑫滩铜镍硫化物矿床(李鑫等,2014)、石英滩低温热液型金矿(陈文等,2011)、阿奇山火山沉积-热液叠加改造型铅锌矿等(夏冬等,2018),开展完成了采样粒级、采样层位、采样网度等方法技术试验,采用车

载风动正循环潜孔锤+合金刮刀钻进工艺,提出了一套适用于盖层厚度小于 100 m、地下水埋深大于 100 m 的浅覆盖区 1:5 万化探方法技术。同时选择玉海外围等具有找矿潜力的覆盖区开展方法技术有效性验证工作,依据圈定的异常,开展异常查证取得了较好的找矿成果。

1 研究区概况

研究区大地构造位置位于东天山觉罗塔格晚古生代岛弧带中的哈尔里克-大南湖晚古生代岛弧带内,康古尔深大断裂带北缘。沿该带已发现有土屋-延东铜矿、玉海铜(钼)矿、三岔口铜钼矿。区内出露地层自老到新有下石炭统盐池组(C_{1y})、上石炭干墩组(C_{2g})、新近系葡萄沟组(N_2p)、第四系冲洪积物(Qh)(图 1)。下石炭统盐池组分布于研究区西南部,为一套区域变质斜长角闪片岩和变粒岩;上石炭干墩组分布于研究区东部,为一套浅变质碎屑岩;新近系由葡萄沟组及其上覆桃树园组构成,主要位于研究区北部,其中桃树园组为一套砖红色黏土质粉砂岩及黏土,葡萄沟组为一套红色钙质砂砾岩;第四系位于研究区中部。区内岩浆岩侵入活动频繁,以中-酸性岩体为主,主要为晚石炭世灰白-肉红色二长花岗岩和中志留世浅灰绿色石英闪长(玢)岩、花岗闪长岩、花岗闪长玢岩等,岩体受区域北东东向构造控制,呈近东西向展布,玉海铜(钼)矿赋矿岩体为志留世石英闪长和石英闪长玢岩(刘帅杰,2018),三岔口铜(钼)矿赋矿岩体为志留世石英闪长玢岩、花岗闪长岩、花岗闪长斑岩(秦克章等,2009;王超等,2015)。

研究区属干旱荒漠戈壁残山 II 级景观,70% 岩体被第四系、新近系桃树园组和葡萄沟组覆盖。其中,第四系厚度为 0~41 m,平均厚度为 4.0 m;新近系葡萄沟组厚度为 4~40 m,平均为 15.8 m;新近系桃树园组厚度为 8.5~41 m,平均为 21.9 m。

岩多保持原岩的颜色。另外,钻进松软的第四系和风化残积层时,粉尘量偏大,进尺快;钻进坚硬完整岩层时,粉尘量偏小,进尺慢。

三是察,观察样品特征。为确保随携带出来的样品能在第一时间得到准确、安全的观察,钻进施工过程中,自开孔钻取第一个样品起,按每 0.5 m 进尺分别采集一个样品,并搬至距离钻台 10 m 以外处,按顺序依次摆放整齐,供逐个仔细观察。通常盖层中含有一定数量的具有一定磨圆度,且大小、颜色、成分不一的岩石颗粒,另含部分泥土、盐碱颗粒等;而合格的样品则通常表现成分基本单一、棱角分明、颜色总体一致。

2.3 浅钻样品收集

机动浅钻化探在国内目前尚处在摸索发展阶

段,其配套产品还处于研发改良阶段。项目选用的空气正循环钻进工艺施工过程中,需要收集随风循环带出的颗粒状样品,当前尚无此类专门的样品收集装置。在现实生产过程中,前人往往直接采用铁铲或其他物件在孔口收集随风带出的颗粒状样品。近距离使用铁铲或其他物件去收集随高压风带出来的样品,容易对采样人造成伤害,存在严重的安全隐患。笔者为克服上述缺点,发明了一种浅钻样品收集器(申请号:CN201520053211.1)。所有样品进入样品收集器后,有利于技术人员开展颜色、样品成分等方面的观察,确保采样层位科学合适。

2.4 样品采集

依据盖层厚度,样品采集分别选择人工和车载浅钻完成(图 2)。

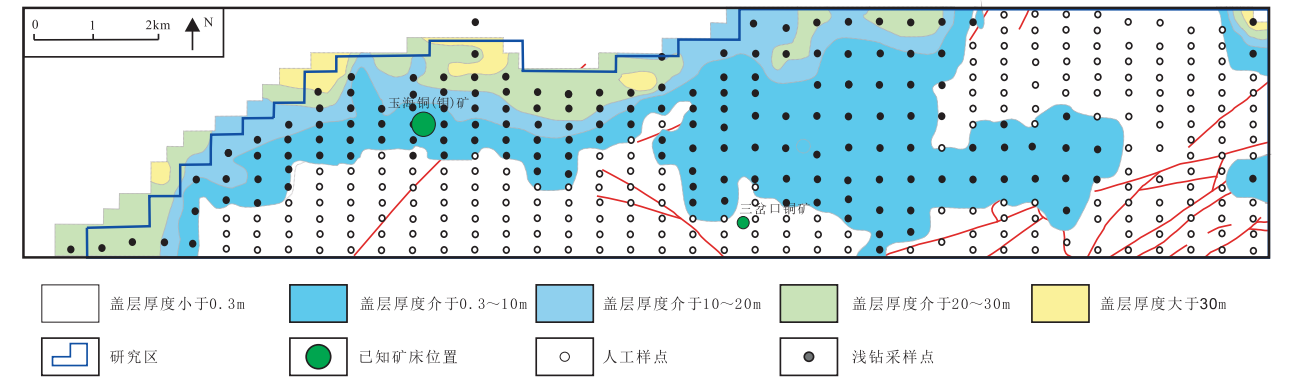


图 2 新疆哈密玉海铜(钼)矿区盖层厚度及施工示意图

Fig. 2 Schematic diagram of thickness of caprock in Xinjiang Hami Yuhai copper (molybdenum) mining area

2.4.1 盖层厚度小于 0.3 m

采样方式:常规土壤(岩屑)取样。
采样网度:500 m×250 m。
采样粒级:—4~+20 目。
采样方法:人工采集 3~4 个子样,组合成 1 个样品。

2.4.2 盖层厚度介于 0.3~100m

采样方式:车载机动浅钻设备取样。
采样网度:500 m×500 m。依据地球化学普查规范(DZ/T0011-2015)第四系浅覆盖区采用机动钻采样,具体采样密度应视勘查目标确定。
采样粒级:—4~+80 目(段星星等,2018)。
采样方法:车载浅钻单孔单样,缩分采集进尺 1 m 内的样品。

3 地球化学特征

3.1 元素富集特征

元素地球化学特征主要反映元素在区内的富集与变化规律,从而指导找矿(孙社良等,2018)。数据处理工作,使用金维地学信息处理研究应用系统(GeoIPAS)软件求得玉海地区的 15 种元素平均值、标准离差、变异系数等,其中背景值采用元素平均值代替,富集系数=平均值/沁城幅平均值(表 1)。

与沁城幅 1:25 万区域化探背景值比较,Cu, W, Co, Mo, Ni, Zn, Ag, Au, Cr 等元素富集系数均大于 1,为富集元素。其中,Cu, W 等元素富集系数分别达到 5.39 和 3.91,呈现明显的富集状态;Cu,

表 1 玉海地区地球化学参数表
Tab. 1 Geochemical parameters of yuhai area

元素	最小值	最大值	平均值	标准离差	变异系数	沁城幅	富集系数	异常下限
铬	259	27. 5	37. 3	1. 36	259	26. 13	1. 05	76. 6
汞	65	8	3	0. 41	65	8. 50	0. 94	8. 1
金	16	0. 9	1. 2	1. 31	16	0. 70	1. 29	1. 4
镍	416	16. 2	27. 4	1. 69	416	10. 71	1. 51	43. 3
铅	26. 1	6. 9	3. 1	0. 45	26. 1	13. 66	0. 51	11. 3
砷	20. 5	4. 4	3. 4	0. 79	20. 5	5. 09	0. 86	9. 7
锑	1. 2	0. 22	0. 13	0. 59	1. 2	0. 39	0. 56	0. 43
铜	1 643	84	140	1. 67	1643	15. 59	5. 39	200. 0
钨	530	3. 4	33. 25	9. 78	530	0. 87	3. 91	2
锡	40. 2	1. 4	2	1. 48	40. 2	1. 65	0. 85	1. 8
锌	290	68. 4	35. 9	0. 53	290	46. 23	1. 48	113
银	669	60. 304	53. 17	0. 88	669	45. 54	1. 32	104
钴	88. 8	13. 6	9. 9	0. 72	88. 8	7. 01	1. 94	27. 5
钼	8. 43	1. 22	1. 2	0. 98	8. 43	0. 77	1. 58	2. 7
铋	2. 55	0. 12	0. 19	1. 61	2. 55	0. 16	0. 75	0. 26

注: Au、Ag 含量为 10⁻⁹, 其他含量为 10⁻⁶。

Ag,Cr,W,Ni 标准离差均大于 27,Cu 元素达到 140,属强分异元素,说明其在次生富集成晕过程中易于形成地球化学异常(蓝天等,2017)。

3.2 元素相关性特征

为更深入的了解研究区各元素之间的联系,使用 SPSS 软件对原始数据进行因子分析。开展研究区样品 15 种元素因子分析(表 2),使用 bartlett 和 KMO 检验方法(赵少卿等,2012)对数据的相关性进行检验。采用正交旋转因子载荷矩阵来确定元素组合,剔除绝对值小于 0.5 的因子载荷(袁和等,2017)。按照特征值>1 和累计方差贡献>50%为阈值,得到因子 5 组。F1 因子由 Au、Cu、Mo 元素组成,高背景区与中酸性侵入体相吻合,表明区内具有寻找与中酸性侵入体有关的斑岩和热液矿床潜力,高值异常区与区内已有的三岔口铜矿和玉海铜钼矿相吻合,未封闭的异常同时也暗示玉海铜钼矿往西北方向具有较好的找矿潜力;F2 因子元素组合 Ni、Cr、Co;F3 因子元素组合 As、Sb、Pb;F4 因子元素组合 Sn、Bi,反映的是与中酸性侵入体有关的高温热液活动,分布特征与 F1 因子基本一致;F5 因子由独立的 W 高温元素组成,反应的是酸性岩浆后期热液活动,也是区内主要的热液活动;F6 因子由独

立的 Hg 低温元素组成,与区内构造对应较好。分析表明,研究区主成矿元素为 Cu、Mo、Au、Ni、Cr、Co、W,找矿指示元素为 Sn、Bi。

表 2 玉海地区样品 15 种元素因子分析成果表
Tab. 2 Results of analysis of 15 elements in Yuhai area

	F1	F2	F3	F4	F5	F6
Ni	0. 913					
Cr	0. 898					
Co	0. 758					
Ag						
As		0. 852				
Sb		0. 765				
Pb		0. 510				
Zn						
Cu			0. 789			
Au			0. 682			
Mo			0. 599			
Sn				0. 825		
Bi				0. 611		
W					0. 962	
Hg						0. 933

5 结论

应用示范成果表明,研究提出的1:5万车载浅钻化探方法技术组合在新疆东天山玉海地区的覆盖区内找矿是有效的,不仅很好的反映了已知隐伏矿床,而且依据覆盖区内圈定的异常,开展异常查证工作实现玉海矿区外围覆盖区内取得找矿新突破,新圈定铜矿体5条,扩大了矿床规模。

但受该方法技术是通过单个钻孔采集1 m进尺样品制约,其在盖层下部风化层大于1 m时,如侵入岩等,样品代表性好;反之,如碳酸岩等,1 m长的样品中容易混入部分基岩样品,代表性相对较差。另外,空气正循环取样工艺容易受地下水影响,而无法采集到合格的样品。

综上所述,研究提出的1:5万车载浅钻化探方法技术组合,适用于以侵入岩为赋矿岩体的覆盖区1:5万及更大比例尺化探普查,暂不宜大面积推广使用。

参考文献(References):

周军,任燕,田江涛. 新疆东天山成矿带地球化学勘查进展[J]. 西北地质, 2017, 50(4): 18-22.

ZHOU Jun, REN Yan, TIAN Jiangtao. Geochemical Exploration Progress of East Tianshan Metallogenic Belt in Xinjiang[J]. Northwestern Geology, 2017, 50(4): 18-22.

周军,彭峰,刘亚楠,等. 适用于东天山地区的区域化探工作方法与找矿效果——以新疆哈密市清白山铅锌矿为例[J]. 物探与化探, 2017, 41(01): 1-8.

ZHOU Jun, PEN Feng, LIU Yanan, et al. The result of applying the regional geochemical method to the East Tianshan Mountains: A case study of the Qingbaishan lead-zinc deposit in Hami area[J]. Geophysical & Geochemical Exploration, 2017, 41(01): 1-8.

段星星,刘拓,董会,等. 东天山玉海浅覆盖区机动浅钻化探方法技术研究[J]. 西北地质, 2018, 51(3): 192-199.

DUAN Xingxing, LIU Tuo, DONG Hui, et al. Research and Application of Motorized Shallow Drilling Geochemical Exploration in Yuhai Shallow Overburden Area, East Tianshan[J]. Northwestern Geology, 2018, 51(03): 192-199.

马维,侯静,胡卫星,等. 地物化综合方法在草原覆盖区找矿中的应用——以内蒙古努如大坂钼铅锌银多金属矿勘查为例[J]. 地质与资源, 2014, 23(Z1): 113-121.

MA Wei, HOU Jing, HU Weixing, et al. Application of geological geophysical and geochemical integrative methods in prospecting of grassland coverage areas: A Case Study of the Nurudaban Mo-Pb-Zn-Ag Polymetallic Deposit in Inner Mongolia[J]. Geology and Resources, 2014, 23(S1): 113-121.

王翰,向武,于桑,等. 超声波纳米提取测量法——一种覆盖区找矿新技术:在拜仁达坝铅锌矿区的实践[J]. 地质与勘探, 2018, 54(5): 968-978.

WANG Han, XIANG Wu, YU Sang, et al. A New Method of Ultrasonic Nanoparticles Extraction for Geochemical Exploration in the Bairendaba Mine of Inner Mongolia[J]. Geology and Exploration, 2018, 54(5): 968-978.

孙彬彬,曾道明,刘占元,等. 风成砂覆盖区地电化学提取前后土壤中元素赋存状态变化研究[J]. 物探与化探, 2018, 42(3): 518-527.

SUN Binbin, ZENG Daoming, LIU Zhanyuan, et al. Variation of modes of occurrence of elements in soil before and after the geo-electrochemical extraction in eolian sand covered area[J]. Geophysical and Geochemical Exploration, 2018, 42(3): 518-527.

韩志轩,廖建国,张丰隆,等. 穿透性地球化学勘查技术综述与展望[J]. 地球科学进展, 2017, 32(8): 828-838.

HAN Zhixuan, LIAO Jianguo, ZHANG Yulong, et al. Review of Deep-Penetrating Geochemical Exploration Methods[J]. Advances in Earth Science, 2017, 32(08): 828-838.

王学求,张必敏,姚文生,等. 覆盖区勘查地球化学理论研究进展与案例[J]. 地球科学-中国地质大学学报, 2012, 37(06): 1126-1132.

WANG Xueqiu, ZHANG Bimin, YAO Wensheng, et al. New evidences for transport mechanism and case histories of geochemical exploration through covers[J]. Earth Science, 2012, 37(6): 1126-1132.

李鑫,王敦科,赵树铭,等. 哈密白鑫滩岩漿型铜镍硫化物矿床的发现[J]. 新疆地质, 2014, 32(4): 466-469.

LI Xin, WANG Dunke, ZHAO Shuming, et al. The Discovery of Baixintan Magmatic Ni-Cu Sulfide Deposits in Hami Area, Xinjiang[J]. Xinjiang Geology, 2014, 32(4): 466-469.

陈文,李华芹,张彦,等. 低硫型浅成低温热液型金矿床成矿时代研究方法——以新疆石英滩金矿为例[J]. 矿物学报, 2011, (s1): 561-562.

- CHEN Wen, LI Huaqin, ZHANG Yan, et al. Methods for metallogenic age of low sulfur shallow temperature hydrothermal gold deposits: a case study of quartz beach gold deposit in xinjiang [J]. *Acta Mineralogica Sinica*, 2011, (s1): 561-562.
- 夏冬, 彭玉旋, 朱志新, 等. 新疆鄯善县阿奇山铅锌(铜)矿床地质地球化学与成因探讨[J]. *地质与勘探*, 2018, 54(1): 41-51.
- XIA Dong, PENG Yuxuan, ZHU Zhixin, et al. *Geology, Geochemistry and Genesis of the Aqishan Pb-Zn(Cu) Deposit in Shanshan County, Xinjiang*[J]. *Geology & Exploration*, 2018, 54(1): 41-51.
- 刘帅杰, 余金杰, 王铁柱, 等. 新疆东天山玉海铜(钼)矿床流体包裹体和稳定同位素研究[J]. *矿床地质*, 2018, 37(2): 371-386.
- LIU Shuaijie, YU Jinjie, WANG Tiezhu, et al. Fluid inclusions and stable isotope study of Yuhai copper-(molybdenum) deposit in eastern Tianshan Mountains, Xinjiang [J]. *Mineral Deposits*, 2018, 37(2): 371-386.
- 刘帅杰, 余金杰, 王铁柱, 等. 新疆东天山玉海铜钼矿区志留纪侵入体岩石成因及构造意义[J]. *矿床地质*, 2018, 37(03): 535-555.
- LIU Shuaijie, YU Jinjie, WANG Tiezhu, et al. Petrogenesis of Silurian intrusions in Yuhai Cu-Mo deposit in eastern Tianshan Mountains, Xinjiang, and its tectonic implications [J]. *Mineral Deposits*, 2018, 37 (03): 535-555.
- 秦克章, 张连昌, 丁奎首, 等. 东天山三岔口铜矿床类型、赋矿岩石成因与矿床矿物学特征[J]. *岩石学报*, 2009, 25(4): 845-861.
- QIN Kezhang, ZHANG Lianchang, DING Kuishou, et al. Mineralization type, petrogenesis of ore-bearing intrusions and mineralogical characteristics of Sanchakou copper deposits in Eastern Tianshan[J]. *Acta Petrologica Sinica*, 2009, 25(4): 845-861.
- 王超, 陈斌, 马星华, 等. 东天山三岔口地区早、晚古生代岩体成因及其对康古尔缝合带演化的意义[J]. *地球科学与环境学报*, 2015, 37(05): 52-70.
- WANG Chao, CHEN Bin, MA Xinghua, et al. Petrogenesis of Early and Late Paleozoic Plutons in Sanchakou Area of East Tianshan and Their Implications for Evolution of Kangur Suture Zone[J]. *Journal of Earth Sciences and Environment*, 2015, 37(05): 52-70.
- 孙社良, 冯增会, 黄孝波, 等. 新疆汉水泉地区水系沉积物测量地球化学特征及找矿方向[J]. *物探与化探*, 2018, 42(6): 1116-1124.
- SUN Sheliang, FENG Zenghui, HUANG Xiaobo, et al. Geochemical characteristics and ore-search prospects of Hanshuiquan area in Xinjiang based on stream sediment survey[J]. *Geophysical and Geochemical Exploration*, 2018, 42(6): 1116-1124.
- 蓝天, 罗先熔, 陈晓青, 等. 地电化学方法在浙江江山——长台地区寻找隐伏铀矿的应用[J]. *世界地质*, 2017, (03): 324-336.
- LAN Tian, LUO Xianrong, CHEN Xiaoqing, et al. Application of geo-electro-chemical methods in searching hidden uranium deposits in Jiangshan-Changtai area of Zhejiang[J]. *Global Geology*, 2017, (03): 324-336.
- 赵少卿, 魏俊浩, 高翔, 等. 因子分析在地球化学分区中的应用: 以内蒙古石板井地区 1:5 万岩屑地球化学测量数据为例[J]. *地质科技情报*, 2012, 31(2): 27-34.
- ZHAO Shaoqing, WEI Junhao, GAO Xiang, et al. Factor Analysis in the Geochemical Subdivisions: Taking 1:50 000 Debris Geochemical Survey in the Shibanjing Area of Inner Mongolia as An Example[J]. *Geological Science & Technology Information*, 2012, 31(2): 27-34.
- 袁和, 罗先熔, 李武毅, 等. 西藏邦卓玛地区土壤地球化学特征及找矿预测[J]. *地质与勘探*, 2017, 53(3): 472-481.
- YUAN He, LUO Xianrong, LI Wuyi, et al. Geochemical Characteristics of Soil and Prospecting Prediction of the Bangzhuoma Region, Tibet[J]. *Geology and Exploration*, 2017, 53(03): 472-481.