

doi: 10. 11720/wtyht. 2023. 2540

陈熙,安朝,张文权,等. 柴北缘中段地球化学特征及铬的成矿潜力评价[J]. 物探与化探, 2023, 47(2): 353–364. [http://doi.org/10. 11720/wtyht. 2022. 2540](http://doi.org/10.11720/wtyht.2022.2540)

Chen X, An Z, Zhang W Q, et al. Geochemical characteristics and Cr metallogenic potential evaluation of the middle section of the northern margin of the Qaidam Basin[J]. Geophysical and Geochemical Exploration, 2023, 47(2): 353–364. [http://doi.org/10. 11720/wtyht. 2022. 2540](http://doi.org/10.11720/wtyht.2022.2540)

柴北缘中段地球化学特征及铬的成矿潜力评价

陈熙¹, 安朝², 张文权², 徐云甫³, 马瑛⁴, 史连昌², 陶志华⁵

(1. 中国冶金地质总局一局, 河北 三河 065201; 2. 青海省地质调查局, 青海 西宁 810100; 3. 青海省地质调查院, 青海 西宁 810100; 4. 青海省第五地质勘查院, 青海 西宁 810100; 5. 青海省有色第二地质勘查院, 青海 西宁 810100)

摘 要: 本文在提取柴北缘中段不同比例尺(1:5万水系沉积物测量、1:2.5万地球化学测量)59 238 个原始数据的基础上,进行了数理指标统计和多元统计的叠加分析,以期从区域角度寻找元素组合关系以及判断主成矿元素,为后续矿产工作提供基础支撑。根据统计显示,该区 Au、W、Cr 3 种元素各项数理指标显示了较强的成矿潜力,结合多元统计分析及区内已有的成矿事实,认为该区除了构造蚀变岩型、热液型金矿的产出外,寻找镁质超基性岩有关的铬矿潜力巨大。考虑到局部 Cr 整体背景值较高等因素,以传统 $X+2\sigma$ (129×10^{-6}) 或累积频率 85% (142.9×10^{-6}) 的异常下限划分方法不能满足该区局部异常的圈定需求,故引用 1/4 浓幅分位值 (234×10^{-6}) 提高异常下限,不仅圈定出浓集中心具有明显带状分布的异常多处,而且剔除了多数弱小异常。综合地、物、化成果,推断出进一步寻找铬矿的有利地段,划分出了 4 个成矿有利地段及 5 个找矿靶区。

关键词: 1:2.5 万地球化学测量; Cr; 数理统计分析; 成矿潜力; 柴北缘中段

中图分类号: P632

文献标识码: A

文章编号: 1000-8918(2023)02-0353-12

0 引言

柴北缘缝合带位于柴达木陆块和南祁连陆块拼接缝合部位,早加里东期的主碰撞造山运动叠加了晚华力西期—印支期的碰撞造山作用以及中生代板内盆山演化等构造事件^[1-2],使得该区形成诸多不同类型的矿床,其中滩间山金矿^[3-4]、青龙沟金矿^[5-6]、细晶沟金矿以及锡铁山铅锌矿较为典型^[7]。

为了扩大找矿成果,针对柴达木盆地周缘高原荒漠化—深切割山地^[8]进行的大比例尺(1:2.5万)地球化学测量成果相对于 1:5万水系沉积物测量成果来说,不仅进一步提高了元素识别“像素”,更是精准定位了找矿靶区^[9-16]。2017 年青海省省

级地质勘查专项资金在柴北缘丁字路口至锡铁山一线部署了 5 项大比例尺地球化学测量工作,其成果不仅起到了支撑、服务矿产工作的目的,同时也更新了柴北缘地球化学数据库,为今后柴北缘地质、矿产的研究工作奠定了扎实的基础。

大比例尺地球化学测量工作虽然加大了点位密度,提高了精准度,但由于项目周期、工作量等因素造成了工作区面积小、综合研究不深入以及小范围样本数据无法满足元素带状分布规律的研究等问题。故本文选择柴北缘中段地区为研究区,以 36 157 个大比例尺(1:2.5 万)地球化学测量原始样本数据为基础,叠加前人 1:5 万水系沉积物测量项目中的 23 081 个原始样本数据,采用多元统计分析等方法进行了系统的研究,以期寻找柴北缘中段更加精准的表生地球化学特征,进一步揭示这一地区

收稿日期: 2021-09-26; 修回日期: 2022-07-27

基金项目: 青海省地质勘查基金项目“青海省柴周缘主要矿集区矿产资源深部勘查方法技术示范研究”(2019048001ky001)

第一作者: 陈熙(1989-),男,2012年毕业于防灾科技学院,获学士学位,地质工程师,现主要从事地质矿产方面的研究工作。Email: 397777581@163.com

通讯作者: 安朝(1990-),男,硕士,物化探工程师,从事勘查地球化学方面的研究工作。Email: anzhaoli234@163.com

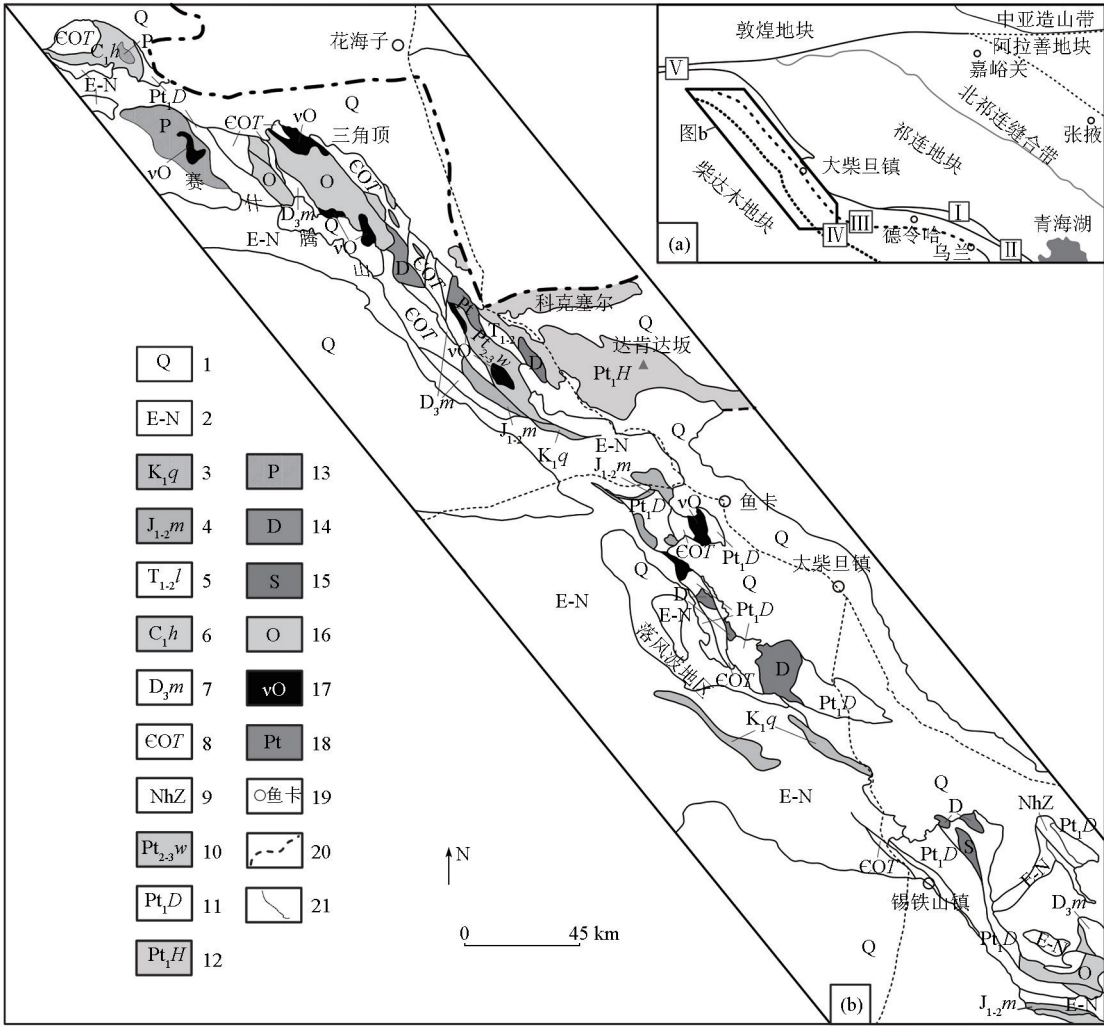
的成矿规律,并为下一步找矿工作提供更为详实准确的基础研究资料。

1 区域地质概况

研究区位于柴达木盆地北缘赛什腾山—锡铁山一线,属柴北缘缝合带。地层分区属秦祁昆地层亚区的柴达木北缘小区,多期次的断裂构造发育使得多数地层、岩体之间多以断层接触为主。北部赛什腾山至滩间山主要发育下石炭统怀头他拉组、古元古界达肯达坂群以及寒武—奥陶系滩间山火山岩群

等地层,岩浆岩主要以加里东期侵入岩为主,基性—超基性岩体(奥陶纪辉长岩)较中酸性岩体发育;南部绿梁山至锡铁山一线主要为古元古界达肯达坂超高压变质岩群,榴辉岩呈包体产于片麻岩及片岩中,岩浆岩以加里东期中酸性侵入岩为主,少见寒武—奥陶系辉长岩体。区域上主要发育 5 条大断裂,由北向南依次为阿尔金走滑断裂、拉脊山—中祁连南缘断裂、宗务隆—青海南山断裂、乌兰—鱼卡断裂以及柴北缘断裂,均为 NW 向^[17],具体分布情况见图 1。

区内蛇绿岩套主要由超基性岩、辉长岩及滩间



1—第四系沉积物;2—古近-新近系;3—下白垩统犬牙沟组;4—下-中侏罗统大煤沟组;5—下-中三叠统隆务河组;6—下石炭统怀头他拉组;7—上泥盆统牦牛山组;8—寒武—奥陶系滩间山群;9—南华系全吉群;10—中元古界万洞沟群;11—古元古界达肯达坂群;12—古元古界化隆群;13—二叠纪岩体;14—泥盆纪岩体;15—志留纪岩体;16—奥陶纪岩体;17—奥陶纪辉长岩;18—古元古代环斑花岗岩;19—地名;20—道路;21—地层界线;I—拉脊山—中祁连南缘断裂;II—宗务隆—青海南山断裂;III—乌兰—鱼卡断裂;IV—柴北缘断裂;V—阿尔金走滑断裂
1—Quaternary sediments; 2—Paleogene-Neogene; 3—lower Cretaceous Quanyagou formation; 4—lower-middle Jurassic Dameigou formation; 5—lower-middle Triassic Longwuhe formation; 6—lower Carboniferous Huaitoutala formation; 7—upper Devonian Maoniushan formation; 8—Cambrian-Ordovician Tanjianshan group; 9—Nanhua period Quanji group; 10—middle Proterozoic Wandonggou group; 11—Paleoproterozoic Dakendaban group; 12—Paleoproterozoic Hualong group; 13—the Permian rock mass; 14—the Devonian rock mass; 15—the Silurian rock mass; 16—the Ordovician rock mass; 17—the Ordovician gabbro; 18—the Paleoproterozoic ringspot granite; 19—place names; 20—road; 21—stratigraphic boundary; I—the southern margin of Lajiishan-middle Qilian fault; II—Zongwulong-Qinghainanshan fault; III—Wulan-Yuka fault; IV—the fault of the north Chaidamu basin; V—Altun strike-slip fault

图 1 柴达木北缘区域构造单元 (a)^[17] 和研究区地质简图 (b)^[18]

Fig. 1 Regional tectonic unit in the northern margin of Qaidam Basin (a) and geological map of the region (b)

山群火山岩组成,总体上由西至东分布,但局部地段缺失,辉长岩一般呈岩脉状产出,与滩间山群火山岩呈侵入接触关系,而超基性岩与滩间山群火山岩组成 NW 向断层接触,并且接触带附件糜棱岩化及劈理化现象普遍,形成了大量的变质分泌成因石英脉。

研究区内水系沉积物中微量元素地球化学异常衰减模式多是保留型,土壤中次生碳酸盐化钙积层明显,钙过饱和。区域地球化学特征显示,研究区所属丁字口—滩涧山—锡铁山 Cu、Ba、Sr、Ni、Mo 异常亚带,绿岩残片特征(Ni、Cr、Ti、Cu)明显,有长英质岩浆(Mo、Nb、Y、F)和后期热液(Pb、Ba)参与,Sr 异常暗示泻湖相生境灾变造煤。研究区所属柴达木北缘 Pb-Zn-Mn-Cr-Au-白云母成矿带,区内已发现金矿、铅锌矿、钴矿多处,成矿潜力较大。

2 样品测试及数据分析

2.1 样点布设及分析质量

研究区涉及 20 幅 1:5 万标准图幅,已全部完成 1:5 万化探扫面工作,采样介质为水系沉积物,密度 4~8 个/km²,本次工作提取 23 081 个原始点位数据;研究区完成的大比例尺(1:2.5 万)地球化学测量工作共 5 项,采样介质以微沟系水系沉积物为主,

土壤为辅,采样平均密度 20 个/km²,本次工作提取 36 157 个原始点位数据,共计 59 238 个原始点位数据。

由于各项目分析测试元素的不同,本文仅提取 Ag、As、Au、Co、Cr、Cu、Mo、Ni、Pb、Sb、W、Zn 等 12 种相同测试元素进行分布规律总结及成矿规律探讨。不同比例尺的分析测试工作均由自然资源部西宁矿产资源监督检测中心承担,分析方法为:Ag 采用发射光谱法(ES),As、Sb 采用原子荧光法(AFS),Zn、Pb、Cu、Cr 采用荧光光谱法(XRF),Au、Co、Mo、W、Ni 采用等离子质谱法(ICP-MS),各分析质量监控指标符合相关规范要求,数量级满足叠加分析条件。

2.2 元素数理指标分析

由于原始数据的不均一性,分布状态基本都不满足正态分布规律,大量的分析方法都是围绕在是否使用拉依达法则(剔除 3σ)使得原始数据满足正态分布规律的基准上建立。无论是丰度、浓集系数^[19-20]和剔除比率^[21]的对比,还是浓幅分位的判定^[22-23],亦或是变异系数、叠加强度^[24]的拟合,都是为了体现元素整体分布规律,寻找可能成矿的元素(主成矿元素)。以 $X \pm 3\sigma$ 为基准对原始数据反复剔除后,峰度及偏度均小于 1,样本数据基本满足了元素背景数据的分析条件(表 1)。

表 1 原始数据数理指标叠加分析统计
Table 1 Statistical table for superposition analysis of mathematical indexes of original data

参数	Ag	As	Au	Co	Cr	Cu	Mo	Ni	Pb	Sb	W	Zn
青海省丰度 ^[18]	70.00	16.89	1.38	10.05	53.13	20.24	0.70	24.09	24.03	0.92	1.67	59.85
柴北缘丰度 ^[18]	69.00	6.04	1.45	10.93	72.34	24.89	0.60	25.98	25.00	0.34	1.34	55.80
最大值	10100	1668	11300	222	27567	1358	95	16212	6457	382	735	10283
丰度 X_1	49.77	7.23	1.92	15.59	113.20	30.75	0.85	40.80	21.37	0.38	1.89	61.33
标准差 S_1	70.40	16.45	54.00	11.00	438.50	27.00	1.32	107.10	41.40	1.69	9.14	71.33
变异系数 C_{V1}	1.41	2.28	28.13	0.71	3.87	0.88	1.55	2.63	1.94	4.45	4.84	1.16
背景值 X_2	45.42	4.11	0.88	14.45	55.90	26.50	0.60	24.90	18.71	0.26	0.98	58.43
标准差 S_2	11.88	2.47	0.45	8.50	34.60	17.00	0.32	16.40	6.87	0.14	0.52	23.42
变异系数 C_{V2}	0.26	0.60	0.51	0.59	0.62	0.64	0.53	0.66	0.37	0.54	0.53	0.40
剔除数 N_h	2423	7449	6481	1728	6303	3175	5650	5600	2136	6195	6262	1027
剔除比率 R	0.04	0.13	0.11	0.03	0.11	0.05	0.10	0.09	0.04	0.10	0.11	0.02
浓集系数 N_1	0.71	0.43	1.39	1.55	2.13	1.52	1.21	1.69	0.89	0.41	1.13	1.02
浓集系数 N_2	0.72	1.20	1.32	1.43	1.56	1.24	1.42	1.57	0.85	1.12	1.41	1.10
叠加强度 D	6.49	11.72	261.8	1.40	25.66	1.84	5.84	10.70	6.88	17.64	33.90	3.20

注: Au、Ag 含量单位为 10⁻⁹,其余元素为 10⁻⁶;总样本数 $n=59238$;剔除比率 $R=剔除数 N_h/样本数 n$;浓集系数=区内丰度/青海省或柴北缘丰度;叠加强度 $D=(X_1/X_2) \times (S_1/S_2)$ 。

2.2.1 丰度及剔除比率特征

研究区丰度与背景值的拟合(X_1/X_2)与柴北缘、青海省丰度的对比(N_1/N_2)清楚显示了该区元素丰度的变化特征(图 2),就浓集系数 N_1 和区域浓集系数 N_2 而言, Au、Co、Cr、Cu、Mo、Ni、W、Zn 等均大于 1,其中 Cr 大于 2.0,就丰度与背景值的拟合曲

线而言, Au、Cr、Ni、W 等均出现了波峰,相对值较高,其中 Au、Cr、W 在 2 上下波动,显示良好的富集特征。高于 3σ 的剔除值与全区样本数的比值可反映出元素高强数据的占比,一般的剔除数据越多,越容易成矿, As、Au、Cr、Mo、Ni、Sb、W 等元素剔除比率相对较大。

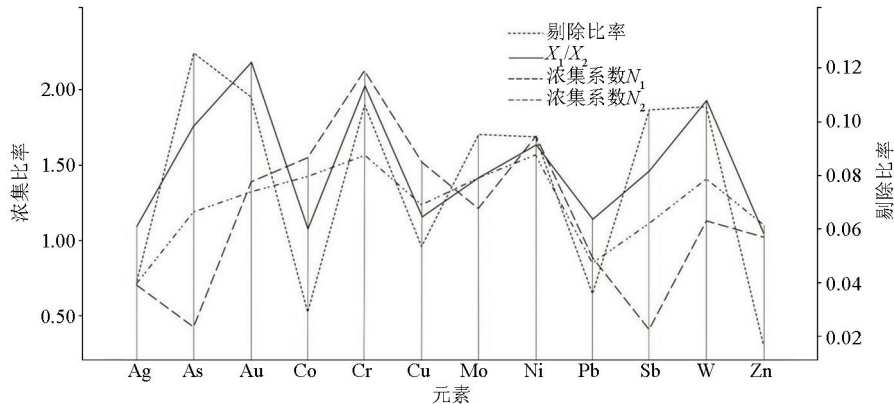


图 2 浓集系数、丰度及剔除比率拟合曲线

Fig. 2 Fitting curves of concentration coefficient, abundance and rejection ratio

2.2.2 浓幅分位、变异系数及叠加强度特征

浓幅分位的应用,综合考虑了背景值和边界品位两种因素,以标准化的方法使不同元素的浓幅分位具有相似的地球化学涵义表征^[22-23],从而更易寻找成矿元素(图 3)。研究区样本数据范围广,Au、Cr、W、Ni、Pb、Co、Zn 等均超过了 1 分位(工业品味),显示了良好的局部成矿潜力,其余元素也都达到了 1/2 分位,大于 1/2 点位个数分别为 Ag-17、As-8、Au-150、Co-568、Cr-684、Cu-52、Mo-61、Ni-1014、Pb-97、Sb-3、W-407、Zn-33,其中 Au、Co、Cr、Ni、W 尤胜。

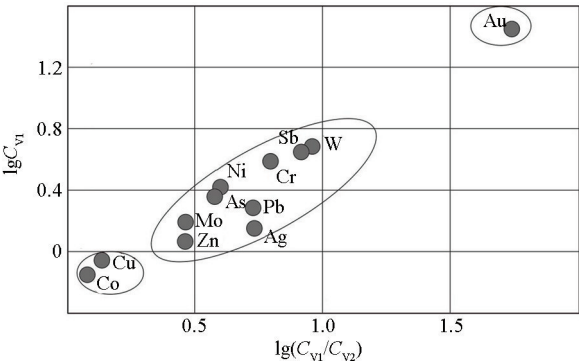


图 4 变异系数拟合

Fig. 4 Fitting graph of variation coefficients

相对较弱,但部分地区仍出现了极高值,不排除局部成矿或指示成矿的可能性,Cu、Co 等第三梯队元素离散数值最弱,成矿潜力不大。

叠加强度是元素含量分布偏离正态强度的一种度量,在地质体上反应后期矿化作用叠加的强度,赋矿地层接受矿化与进一步富集成矿的可能性与程度。矿床的形成均要经过成矿元素的活化、迁移或后期改造等多种地质作用的叠加(图 5a),前人将其划分为 4 个阶段,即改造型、叠加型、强叠加型以及极强叠加型元素。研究区叠加强度均值较大的主导因素为样本范围过大导致,前人的研究基于小范围区域的研究结果,大范围数据集的叠加强度域有待进一步划分。研究区 Au、W、Cr 叠加强度大于 20,属极强叠加元素,显示了良好的成矿潜力;As、Sb、Ni 等叠加强度在 10~20 之间,属强叠加元素,对极强叠加元素反馈了指示关系;其余大都为改造型元素。

综上所述,Au、W、Cr 各项数理指标均有较强的显示:与构造蚀变岩型金矿有关的 Au、As、Sb 等元素组合中,Au 各项数理指标均有较强的显示,As、Sb 作为伴生元素,其剔除比率与叠加强度也有次一级的显示,加之研究区已有的青龙沟金矿和滩间山金矿的出现,Au 可划分为第一类成矿主元素;由岩体

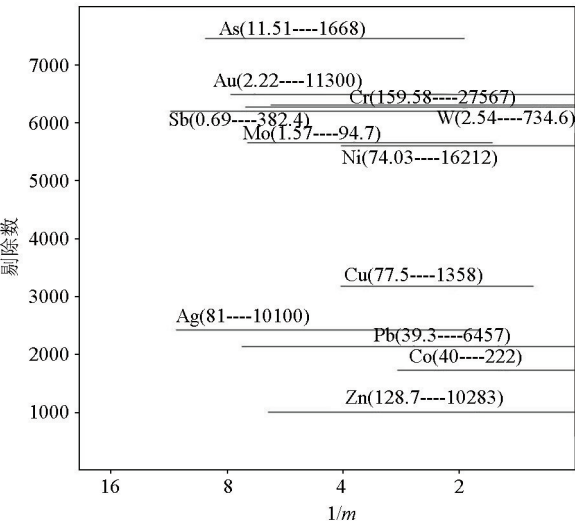


图 3 浓幅分位图

Fig. 3 The diagram of rich quantile

变异系数拟合图(图 4)的出现主要是为了消除测量尺度与量纲在背景数据集与原始数据集离散程度比较中的影响,并且应用于元素成矿性的评价效果显著^[16,25-26],研究区 Au 较之于其他元素具有较高的离散分布特征,成矿潜力较大;W、Cr、Ni、As、Bi、Mo、Pb、Cd、Sb、Ag 等第二梯队元素虽离散分布

的发育程度而决定的高温热液元素组合中仅 W 元素显示了相对较高的数理指标,Mo 未见明显的特征显示,并且研究区岩浆岩发育程度不高,但断裂发育极强,加之研究区细晶沟金矿为热液型金矿,中—温元素、高温元素均有较强的显示,推断 W 在全区可作为热液成矿的指示元素;伴随基性—超基性岩而发育的 Cr、Co、Ni、Cu 等元素仅 Cr、Ni 有较强的显示,其中仅显示了高剔除比率的 Ni 是区内大面积发育基性—超基性岩的反映,而 Cr 显示的高丰度、多剔除值、强变异系数和叠加强度是大规模成矿的必要条件,但目前仅发现一处小型铬铁矿床,因此 Cr 可划分为第二类成矿主元素,并且可继续扩大找矿

成果(见后文);Pb、Zn 等低温元素各项指标相对于其他元素未见有较强的显示,但区内发育的锡铁山铅锌矿床说明 Pb、Zn 等低温元素具有局部“就矿成矿”的可能性,可划分为第三类成矿主元素。

2.3 多元统计分析、元素组合及空间分布特征

R 型聚类分析及因子分析被广泛应用于化探数据处理阶段,用来体现元素和元素组合之间的亲疏关系,从而揭示区域成矿地质作用和地球化学环境中可能的元素聚合趋势及内在的成因联系^[16]。聚类树状图谱显示(图 5b),当 $r = 0.77$ 时,研究区元素可分为 4 簇:①Co、Cu、Cr、Ni;②W;③Pb、Zn、Ag、Mo;④Au、As、Sb。

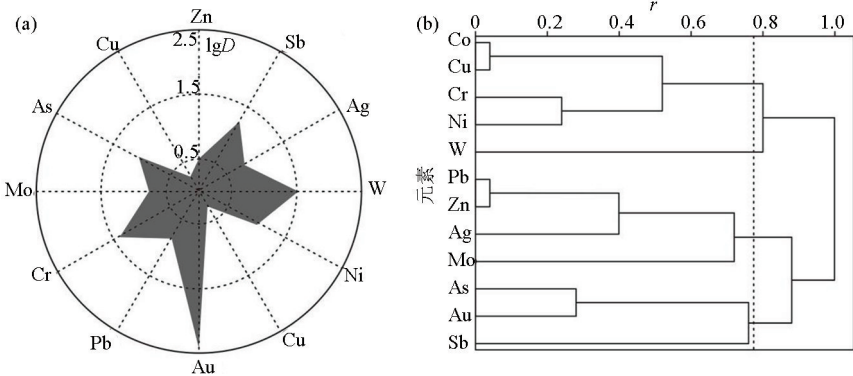


图 5 叠加强度图(a)和聚类树状图(b)

Fig. 5 Superposed intensity (a) and cluster tree (b)

因子分析中,Bartlett’s 球形检验显示 KMO 取样适切性量数为 0.588,大于 0.5 的判别标准,Sig (检验概率 P 值)小于 0.05,原始数据样本满足因子分析条件。采用最大方差法,累积方差贡献率 75%以上,得到 6 个因子(表 2),结合聚类分析结果显示:代表中—低温热液元素的 F1 因子对应了聚类分

析第 3 簇,代表了基性—超基性岩元素的 F2、F4 因子对应了聚类分析第 1 簇,代表了构造蚀变岩型 Au 的成矿因子 F3、F6 因子对应了聚类分析第 4 簇,代表了高温热液元素的 F5 因子对应了聚类分析第 2 簇。因此,研究区主要分为 4 组元素组合: Au、As、Sb;Cr、Co、Ni、Cu;Pb、Zn、Ag 以及 W、Mo 等。

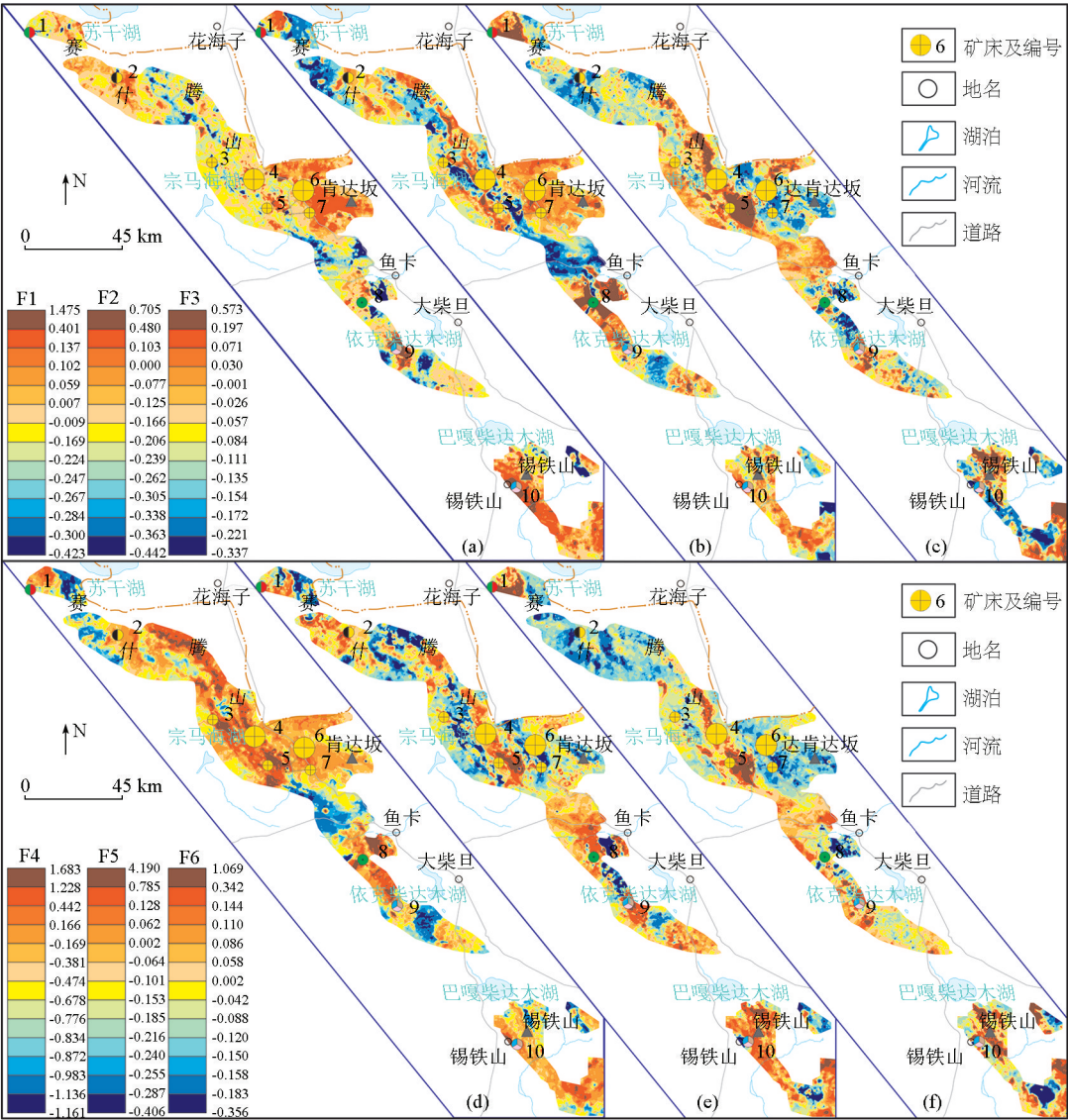
表 2 旋转因子主成分分析
Table 2 Principal components of rotation factor analysis

元素	F1	F2	F3	F4	F5	F6
Ag	0.573	0.004	0.471	-0.049	0.000	-0.062
As	0.155	-0.018	0.793	0.144	0.151	0.156
Au	-0.060	0.027	0.868	-0.038	-0.054	-0.014
Co	0.025	0.573	0.004	0.726	-0.006	-0.012
Cr	0.010	0.853	-0.001	0.032	-0.003	0.004
Cu	0.068	0.027	0.037	0.927	0.016	-0.001
Mo	0.113	-0.160	0.179	0.344	0.497	0.098
Ni	0.005	0.846	0.012	0.085	0.002	0.007
Pb	0.901	-0.010	0.021	-0.064	0.059	0.036
Sb	0.075	0.011	0.087	0.002	0.011	0.981
W	-0.009	0.088	-0.033	-0.104	0.897	-0.040
Zn	0.829	0.032	-0.025	0.243	0.012	0.102
特征值	2.468	2.036	1.379	1.181	1.025	0.951
方差贡献率/%	20.563	16.964	11.495	9.843	8.539	7.923
累积方差贡献率/%	20.563	37.528	49.023	58.866	67.405	75.328

使用因子得分绘制出的因子计量图(图 6),首先显示了不同比例尺数据叠加成图的适用性,数据

叠加成图,图面清晰,与地质特征对应较好,未出现阶梯,其异常对以往 1:5 万水系沉积物综合异常进

行了重现及分解,显示了较高的“像素”。其次显示了该区元素空间分布更为明显的规律性:



a—F1 因子 (Pb-Zn-Ag) 得分图;b—F2 因子 (Cr-Ni) 得分图;c—F3 因子 (Au-As) 得分图;d—F4 因子 (Ca-Co) 得分图;e—F5 因子 (W-Mo) 得分图;f—F6 因子 (Sb) 得分图;1—赛什腾山铜矿床;2—野骆驼泉金钴矿床;3—红柳沟金矿;4—青龙沟金矿;5—龙柏沟金矿;6—滩间山金矿;7—细晶沟金矿;8—落凤坡铬铁矿;9—双口山铅银锌矿床;10—锡铁山铅锌矿床
a—F1 factor (Pb-Zn-Ag) score chart;b—F2 factor (Cr-Ni) score chart;c—F3 factor (Au-As) score chart;d—F4 factor (Ca-Co) score chart;e—F5 factor (W-Mo) score chart;f—F6 factor (Sb) score chart;1—the Saishitengshan copper deposit; 2—the Yeluotuoquan gold-cobalt deposit; 3—the Hongliugou gold deposit; 4—the Qinglonggou gold deposit; 5—the Longbaigou gold deposit; 6—the Tanjianshan gold deposit; 7—the Xijinggou gold deposit; 8—the Luofengpo chromitite deposit; 9—the Shuangkoushan Pt-Ag-Zn deposit; 10—the Xitieshan Pt-Zn deposit

图 6 因子计量图

Fig. 6 Factor measurement charts

- ①所有元素沿构造线呈 NW 向带状分布特征明显;
- ②Ag-Zn-Pb 等低温元素组合全区基本呈背景分布,古元古界托赖群和达肯达坂群中呈高背景分布,绿梁山中部及锡铁山地区的高压变质场中出现极高值分布区域,为低温元素成矿的主要区域;
- ③Au-As-Sb 等反映构造蚀变岩型金矿的元素

- 组合 F3、F6 因子随着滩间山岩浆弧分布趋势明显,高值区与现有的多处大中型金矿床对应性较好,是 该区主要的成矿元素组合,中部滩间山至绿梁山一 线工作程度较高,南部锡铁山地区产出铅锌矿中伴 生有金的显示,但品位不具有工业价值,北部苏干湖 以南地区可作为主要突破地区;
- ④W-Mo 等代表了高温元素组合的 F5 因子极

值区多分布于沉积建造中,指示着热液成矿作用,与中—低温元素已有的成矿事实有不同程度的伴生,因此该类组合可作为指示元素组合,但不排除部分高值区域成矿的可能性;

⑤Cr-Ni-Co-Cu 等基性—超基性岩元素组合,随着基性—超基性岩体的发育而伴生的高值区明显,但 F2 因子较 F4 因子在赛什腾山一线出现了带状分异,富镁铁质矿物及造岩元素在重力下的沉降作用,表现在条带状大面积发育的基性辉长岩与部分地区出露的超基性橄榄岩在区域中形成一种类似韵律层的现象,综合前人找矿程度及各项数理指标、空间分异特征来看,该类元素组合在扩大找矿成果、寻找原生矿产地方面最具潜力。

3 铬的成矿潜力评价

由于不锈钢产业的快速发展,我国已成为世界最大铬矿消费国,郑明贵等^[27]基于灰色神经网络模型的拟合,预测出未来十几年我国铬矿需求仍将持续增长,增长率达 6.87%。一直以来,研究区的找矿工作一直围绕着热液型的金、银、铅、锌等矿种,而对铬矿的关注度一直较低,绿梁山落凤坡小型铬铁矿是区内唯一发现的铬矿产地,矿床主要产于超镁铁质岩体内,岩体以橄榄岩、辉石橄榄岩、含榴辉石岩为主,岩体北段呈 SN 向展布,南段呈 NW 向展布,含矿岩体主要有 3 种,岩性主要为黄绿色纯橄榄岩、灰绿色蛇纹石化纯橄榄岩以及灰黑色蛇纹石化

橄榄岩,Cr₂O₃ 平均含量分别为 1.08%、0.86%、0.86%,M/F 分别为 8.4、9.9、9.0。矿床属于蛇绿岩堆晶岩中的似层状铬铁矿,为早期岩浆矿床,是岩浆分馏结晶作用的产物。地球化学异常特征显示,基岩裸露区的 Cr 异常呈现大面积的极高值区,而水系沉积物中的异常点达矿石品位的多达 10 个,异常整体沿 NW 向构造展布,北部异常出现分叉,与超镁铁质岩体分布一致。物探异常特征显示,矿床出露地区地磁异常不明显,但向东南部延伸,且显示出幅值较高的正磁异常,上延 1 000~2 000 m 后仍有异常显示,证实了超镁铁质杂岩体向深部显著延伸,成矿远景较好,值得进一步工作。

本次工作引用不同比例尺原始数据的叠加成图处理,在 Cr 局部高背景的前提下,引用了 90% 的累积频率值(182.23×10^{-6})作为异常下限值,在柴北缘圈定出 436 km² 的异常,通过对异常的筛选,划分出了 4 个成矿有利地段(图 7),自北向依次为马海地区、马海北地区、落凤坡地区及黑石山地区,5 个找矿靶区分别位于上述成矿有利地段,其中马海北地区圈定了 2 个找矿靶区(图 8、表 3),不仅显示了 Cr 的整体分布规律,还精准地定位了找矿靶区。

北部赛什腾山至宗马海湖东一线 Cr 高、低值区域整体沿区域断裂方向呈相间条带状展布,与基性—超基性岩体对应性较好;地层、中酸性岩体以及基性—超基性岩体表现出明显的分异性,在这一区域内,确定了马海和马海北两个成矿有利地段和 3 个找矿靶区;中部达肯达坂地区整体发育的化隆岩

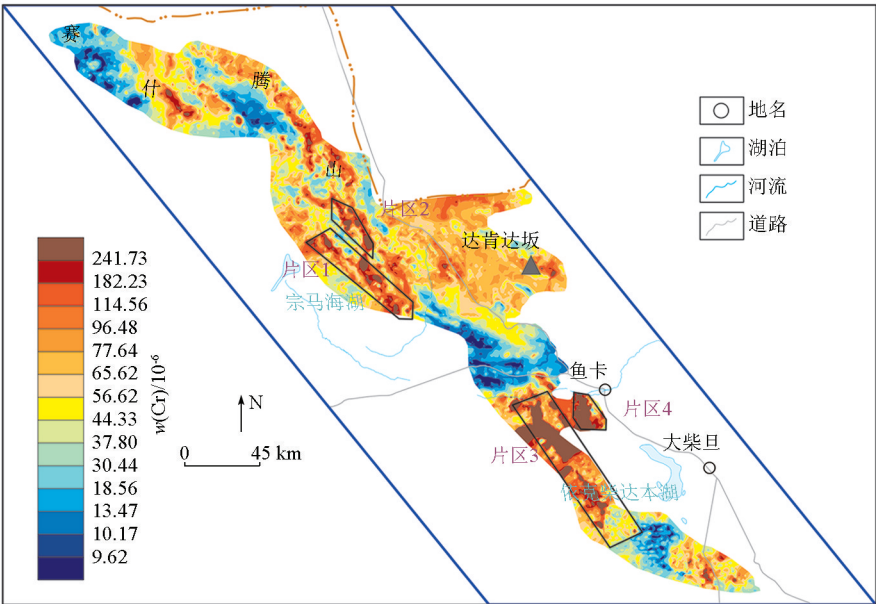


图 7 铬元素地球化学分布
Fig. 7 Geochemical map of chromium

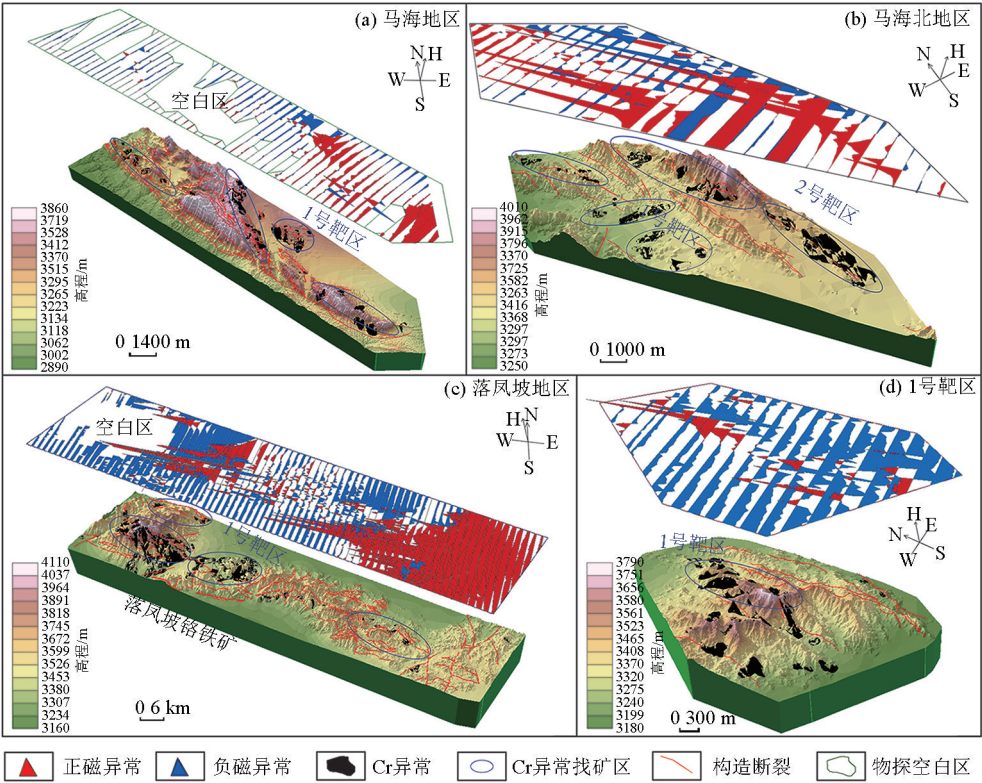


图 8 异常区三维地形及物探平剖面图

Fig. 8 3D topography and geophysical section plan of abnormal area

表 3 研究区铬铁矿靶区划分统计

Table 3 Division of prospecting target areas of chromium element in the study area

地区	靶区	地质特征	化探特征	物探特征	已发现的矿化点	成矿评价
马海	1号	大面积分布的滩间山岩群与牦牛山组呈断层接触,强蚀变辉长岩、辉长岩大面积发育,发育多组北西向断裂构造	圈定2处Cr为主的异常,伴生有Ni、Au等,峰值达 803×10^{-6} ,均具3级浓度分带,规模大,规律性强,重砂异常显示有铬铁矿重晶石的出现	极值在-344~554nT之间,化极延伸不强	暂未发现	具蛇纹石化、褐铁矿化的强蚀变辉长岩的出现是引起物化探异常的主要原因,是铬镍成矿的有利地段
马海北	1号	大面积分布的滩间山岩群与牦牛山组呈断层接触,发育多组NW—SE向断裂构造,第四系覆盖较厚,偶见辉绿玢岩脉发育,第四系覆盖较厚	圈定7处Cr为主的异常,伴生有Ni、Au等,异常峰值在 $(2000\sim 5455)\times 10^{-6}$ 之间,3级浓度分带,规模大,沿NE向次级断裂展布	极值达2000nT,化极上延1000m仍有异常反应	暂未发现	物化探异常峰值高、规模大,整体随构造方向呈现明显的规律性,地表偶见的超基性岩株出露,推断深部可能存在一条NW向的基性—超基性岩韵律层,是寻找深部超基性岩型铬铁矿的有利地段
	2号	基性辉长岩大面积侵入于万洞沟群千枚岩段中,发育一条长约9.3km、宽约100~200m的超基性蛇纹石化橄榄岩,韵律明显,NW向构造为主,NE向次级断裂次之	圈定6处Cr为主的异常,伴生有Ni、Au、As、Hg、Ag、W、Pb等,峰值在 $(2000\sim 3441)\times 10^{-6}$ 之间,3级浓度分带,规模大	极值-138~1549nT之间,强度高,梯度陡,化极上延1000m仍有反映	2处石棉矿化点,1处铬铁矿化点	断裂构造发育,热液活动强烈,成矿物质来源丰富,是寻找超基性岩型铬铁矿的有利地段
落凤坡	1号	辉长岩、辉长岩大面积侵入于达肯达坂岩群中,NW向断裂发育,NE向次之	圈定2处Cr为主的异常,伴生有Cu、Co、Ni、Pb、W、Bi等,峰值达 8591×10^{-6} ,3级浓度分带,规模大	2处物探磁异常显示-2179~1104nT,化极上延800m仍有反映	1处铬铁矿点	蛇纹石化的辉长岩、辉长岩反应的规模强度均较高的物化探异常,显示了该区是寻找超基性岩型铬矿的有利地段
黑石山	1号	侵入到滩间山岩群之中的辉长岩大面积发育,西侧与达肯达坂岩群呈断层接触,接触带上见有超镁铁质岩呈不连续的脉状产出,多见玄武岩包体和蛇纹石化辉长岩包体	圈定的9处Cr异常伴生有W、Mo、Bi、Hg、Au等异常,异常峰值达 1729×10^{-6} ,具三级浓度分带,规模大	幅值在-2179~1104nT之间,正磁异常	金、铜、铬铁、石棉等矿(化)点5处	成矿物质较为丰富,区域构造作用对成矿形成了促进到破坏再到促进的循环模式,不仅热液型元素成矿潜力较大,铬镍等基性—超基性元素成矿也较为有利

群中,Cr 未在区域变质和叠加韧性剪切带作用下发生较大变化,基本表现为背景值,这一区域内不存在潜在成矿地段;滩间山地区的极值区域多出露于纯橄榄岩及斜辉橄榄岩发育地区,依旧表现为 NW 向展布特征;南部绿梁山地区,除了落凤坡铬铁矿床形成的极高值区域外,鱼卡附近的黑石山辉长岩发育地区也表现出较高的背景显示,这一区域内,划定了落凤坡和黑石山两个成矿有利地段和两个成矿靶区。

为了证实上述成矿有利地段和找矿靶区划分的准确性,本次工作利用 1:5 000 地、物、化剖面对马海北 1 号地区进行了查证工作(图 9),地球化学剖面中圈定 Cr 高含量段 2 处,第一段由 5 件样品控制,Cr 含量 $(1\,824\sim2\,388)\times10^{-6}$ 之间,Ni 含量在 $(622\sim1\,163)\times10^{-6}$ 之间,物探异常显示宽约 130 m, ΔT 极

大值为 2 916 nT,磁电异常呈“低电阻、高极化率、强磁性”特征,该段对应岩性辉橄岩与辉长岩的接触带,岩石具强蛇纹石化、绿帘石化、绿泥石化以及褐铁矿化;第二段由 8 件样品控制,Cr 含量在 $(820\sim2\,530)\times10^{-6}$ 之间,Ni 含量在 $(211\sim718)\times10^{-6}$ 之间,物探异常显示宽约 70 m, ΔT 极大值为 2 094 nT,磁电异常呈“低电阻、高极化率、强磁性”特征,该段对应岩性为蛇纹石化辉橄岩,岩石具蛇纹石化、碳酸盐化、弱褐铁矿化。两处高含量段经化极上延处理,浅部浅部磁性体引起的磁异常被压制,深部磁性体引起的磁异常得以显现,并且两处高含量段在深部合为一处,可以确定这一地区 Cr 具有较高的成矿前景。

同时,其余各靶区 Cr 异常规模较强,物探特征显著,并且不同程度地发育铬铁矿点及石棉矿点,均

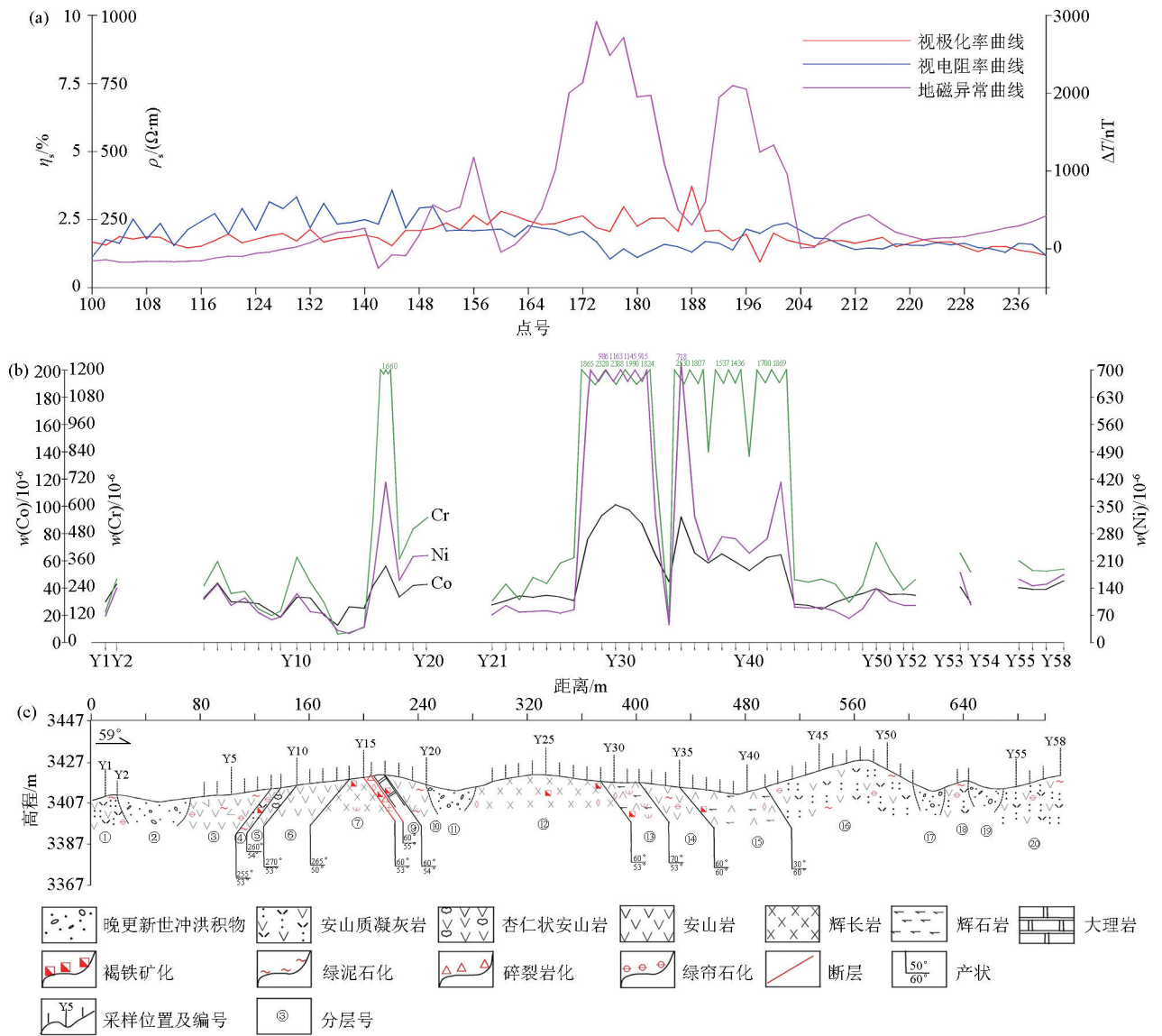


图 9 马海北 1 号靶区 1:5 000 物探 (a)、化探 (b)、地质 (c) 剖面

Fig. 9 1:5 000 geophysical (a), geochemical (b) and geological (c) profile of Mahaibei No. 1 target area

为 Cr 成矿的有利地区。在后续工作中,可进一步采用中—深部控制手段进行追索控制。

4 结论及讨论

1) 本次研究以 1:5 万尺度及 1:2.5 万尺度的数据集成为研究对象,采用数理指标统计和多元统计相叠加的方法,有效解决了大比例尺地球化学测量中的一些常见问题。

2) 研究区已有成矿事实的 Au 等元素表现出强丰度背景拟合值、高剔除比率、高离散分布、强叠加等特征,是区内主要的成矿元素,多元统计显示的元素组合特征不仅显示了构造蚀变作用成金的地球化学特征,结合 W-Mo 等高温元素的指示,还显示出热液型金矿的地球化学特征;Cu-Cr-Co-Ni 等元素组合中 Cr 元素数理指标相对较高,Cr-Ni 与 Cu-Co 各项特征中有明显的分异性,结合区内已有的成矿事实显示,Cr-Ni 等元素是区内第二类成矿元素,成矿潜力较大;Pb、Zn、Ag 等元素具有相对较弱的数理指标显示,但局部峰值较高,且已有相关的成矿事实,是区内第三类成矿元素。

3) 对全区 Cr 异常的再圈定,划分出 4 个成矿有利地段,对比前人对该矿床的研究成果,圈定 5 个成矿靶区,为今后扩大铬矿规模、寻找新矿产提供了基础性的研究资料。

参考文献 (References):

[1] 陈炳蔚,王彦斌,左国朝. 青藏高原北部地体划分及其构造演化[J]. 地球物理学报,1995,38(S2):98-113.
Chen B W, Wang Y B, Zuo G C. Terrain subdivision of the northern Qinghai-Xizang(Tibet) plateau and its tectonic evolution [J]. Chinese Journal of Geophysics, 1995, 38(S2): 98-113.

[2] 殷鸿福,张克信. 中央造山带的演化及其特点[J]. 地球科学, 1998, 23(5): 438-442.
Yin H F, Zhang K X. Evolution and characteristics of the Central Orogenic Belt [J]. Earth Science, 1998, 23(5): 438-442.

[3] 于凤池,马国良,魏刚锋,等. 青海滩间山金矿床地质特征和控矿因素分析[J]. 矿床地质,1998,17(1):47-56.
Yu F C, Ma G L, Wei G F, et al. Geological characteristics and ore-controlling factors of the Tanjianshan gold deposit, Qinghai Province [J]. Mineral Deposits, 1998, 17(1): 47-56.

[4] 姜芷筠,赵呈祥,李碧乐,等. 柴北缘滩间山金矿田细晶沟花岗岩锆石 U-Pb 年龄与 Hf 同位素特征及其与金矿化的关系[J]. 黄金,2020,439(5):7-14.
Jiang Z Y, Zhao C X, Li B L, et al. U-Pb age, Hf isotope of zircons from granite porphyry in Xijinggou, Tanjianshan Gold Field, Northern margin of Qaidam Basin, and their relations to the gold mineralization [J]. Gold, 2020, 439(5): 7-14.

[5] 杨佰慧. 青海金龙沟金矿床地质特征及矿床成因研究[D]. 吉林: 吉林大学, 2019.
Yang B H. Geological characteristics and genesis of Jinlonggou gold deposit in Qinghai [D]. Jilin: Jilin University, 2019.

[6] 呼格吉勒,马国栋,邓元良,等. 滩间山地区青龙沟金矿床成矿条件及模式[J]. 西北地质,2018,51(3):155-160.
Hu G J L, Ma G D, Deng Y L, et al. Metallogenic conditions and modes of the Qinglonggou gold deposit in Tanjianshan area, Qinghai [J]. Northwestern Geology, 2018, 51(3): 155-160.

[7] 冯志兴,陈正乐,李正明,等. 柴北缘锡铁山铅锌矿床控矿构造特征及找矿预测[J]. 地质力学学报,2020,26(3):329-344.
Feng Z X, Chen Z L, Li Z M, et al. Characteristics of ore-controlling structures and oreprospecting of the Xitieshan lead-zinc deposit, Northern edge of the Qaidam basin, NW China [J]. Journal of Geomechanics, 2020, 26(3): 329-344.

[8] 李明喜,张文秦. 青藏高原水系沉积物地球化学衰减模式与区域地球化学勘查对策[J]. 青海地质,1996(1):53-72.
Li M X, Zhang W Q. The discuss of the geochemical attenuation pattern and regional exploration countermeasure in stream sediments on Qinghai-Tibet Plateau [J]. Geological of Qinghai, 1996(1): 53-72.

[9] 王富春,王贵仁. 1:2.5 万水系沉积物测量在柴达木周边地区金矿找矿工作中的应用及其效果[J]. 青海地质,2001(S1):36-40.
Wang F C, Wang G R. Application of 1:25000 stream sediment survey to gold-prospecting around Qaidum Basin and its effect [J]. Geological of Qinghai, 2001(S1): 36-40.

[10] 李革委. 青海省格尔木红土沟—红石山一带元素地球化学特征及化探找矿效果[D]. 北京: 中国地质大学(北京), 2015.
Li G W. Element geochemical characteristics and geochemical prospecting effect of Hongtugou-Hongshishan area in Golmud, Qinghai Province [D]. Beijing: China University of Geosciences (Beijing), 2015.

[11] 王晓云,马忠贤,李文君,等. 青海省沟里地区金矿地质特征及控矿因素分析[J]. 中国锰业,2017,35(6):45-48,54.
Wang X Y, Ma Z X, Li W J, et al. An analysis on geological characteristics and ore-controlling factors of gold deposits in Gouli region of Qinghai Province [J]. China's Manganese Industry, 2017, 35(6): 45-48, 54.

[12] 赵娟,许光,杨宝荣,等. 青海东昆仑地区 1:2.5 万地球化学测量方法技术及应用成果[J]. 西北地质,2018,51(1):209-217.
Zhao J, Xu G, Yang B R, et al. Technique and application result of 1:25000 geochemical survey in East Kunlun, Qinghai Province [J]. Northwestern Geology, 2018, 51(1): 209-217.

[13] 袁海彪,陈健,祁永爱. 1:2.5 万地球化学测量在青海省都兰县尕斯之麻—约尔根地区找矿中的应用[J]. 世界有色金属,2018,514(22):42-42.
Yuan H B, Chen J, Qi Y A. Application of 1:25000 geochemical survey to prospecting in Gazhima-Yorgenarea, Dulan County, Qinghai Province [J]. World Nonferrous Metals County, 2018, 514(22): 42-42.

[14] 陈健. 1:2.5 万地球化学测量在青海马利木吾卡地区找矿中的应用[J]. 黄金,2019,40(4):14-18.

Chen J. Application of 1:25000 geochemical survey to ore prospecting in Malimuwuka area of Qinghai [J]. *Gold*, 2019, 40(4): 14-18.

[15] 杨鸿鹏,赵志逸,韩杰,等. 沟系土壤地球化学测量在东昆仑 Au 元素低背景区的应用及成效——以格尔木市深沟地区 1:2.5 万沟系土壤地球化学测量为例[J]. *矿产勘查*, 2019, 10(2): 291-301.

Yang H P, Zhao Z Y, Han J, et al. Application and effect of soil geochemical survey in the Au low background of East Kunlun elements: A case study of soil geochemistry in Shengou area of Geermu City[J]. *Mineral Exploration*, 2019, 10(2): 291-301.

[16] 安朝,杨敏,陈熙,等. 东昆仑东段都兰地区地球化学特征及其成矿意义——基于大比例尺微沟系(土壤)测量工作[J]. *地质与勘探*, 2020, 494(6): 56-67.

An Z, Yang M, Chen X, et al. Geochemical characteristics and metallogenic significance of the Dulan area in the Eastern section of the East Kunlun Mountains derived from large-scale micro channel system(soil) measurement [J]. *Geology and Exploration*, 2020, 494(6): 56-67.

[17] 陈宣华,邵兆刚,熊小松,等. 祁连造山带断裂构造体系、深部结构与构造演化[J]. *中国地质*, 2019, 46(5): 995-1020.

Chen X H, Shao Z G, Xiong X S, et al. Fault system, deep structure and tectonic evolution of the Qilian Orogenic Belt, Northwest China [J]. *Geology in China*, 2019, 46(5): 995-1020.

[18] 青海省矿产资源潜力评价[R]. 青海省地质矿产勘查开发局, 2017.

Evaluation of Mineral Resources Potential in Qinghai Province [R]. Qinghai Provincial Bureau of Geology and Mineral Exploration and Development, 2017.

[19] 肖霞,倪师军,冯德新,等. 水系沉积物测量在西藏夏日多地区找矿中的应用[J]. *有色金属工程*, 2016, 6(1): 71-76.

Xiao X, Ni S J, Feng D X, et al. Application of stream sediment survey in Xiari duo area of Tibet [J]. *Nonferrous Metals Engineering*, 2016, 6(1): 71-76.

[20] 翁望飞,王德恩,王邦民,等. 安徽省祁门—黟县地区水系沉积物地球化学特征及找矿方向[J]. *物探与化探*, 2020, 44(1): 1-12.

Weng W F, Wang D E, Wang B M, et al. Geochemical characteristics of stream sediments and prospecting direction in Qinmen-Yixian area of Anhui Province[J]. *Geophysical and Geochemical Exploration*, 2020, 44(1): 1-12.

[21] 臧金生,王东晓,赵瑞强. 化探异常定量评价[J]. *物探与化探*, 2014, 38(6): 1114-1118.

Zang J S, Wang D X, Zhao R Q. Quantitative evaluation of geochemical anomalies [J]. *Geophysical and Geochemical Exploration*, 2014, 38(6): 1114-1118.

[22] 刘文辉. 应用浓幅分位值对确定区域成矿元素的探讨[J]. *甘肃科技*, 2009, 25(1): 41-44.

Liu W H. Discuss on determining regional metallogenic elements by using concentration quantile value [J]. *Gansu Science and Technology*, 2009, 25(1): 41-44.

[23] 陈健. 浓幅分位确定成矿元素的应用探究[J]. *新疆大学学报*, 2019, 36(2): 192-197.

Chen J. Application of concentrated grading to determine the ore-forming elements [J]. *Journal of Xinjiang University*, 2019, 36(2): 192-197.

[24] 李武俊,唐开金. 区域化探异常研究方法探讨[J]. *陕西地质*, 1991, 9(1): 57-67.

Li W J, Tang K J. A discussion on the research methods of regional anomalies in geochemical exploration [J]. *Geology of Shaanxi*, 1991, 9(1): 57-67.

[25] 崔晓亮,刘婷婷,王文恒,等. 东昆仑布青山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*, 2011, 35(5): 573-578.

Cui X L, Liu T T, Wang W H, et al. Geochemical characteristics and ore search prospects of Buqingshan area in Qinghai Province based on stream sediment survey [J]. *Geophysical and Geochemical Exploration*, 2011, 35(5): 573-578.

[26] 何旺,罗先熔,高文,等. 青海省都兰县五龙沟—高地地区水系沉积物地球化学特征及找矿远景[J]. *矿物岩石地球化学通报*, 2019, 38(5): 1017-1023.

He W, Luo X R, Gao W, et al. Geochemical characteristics of stream sediments in the Wulonggou-Gaodi area, Dulan County, Qinghai Province and their exploration prospective [J]. *Bulletin of Mineralogy, Petrology and Geochemistry*, 2019, 38(5): 1017-1023.

[27] 郑明贵,袁雪梅. 基于灰色神经网络的中国 2020—2030 年铬矿需求预测[J]. *资源开发与市场*, 2018, 34(6): 747-752.

Zheng M G, Yuan X M. Demand forecasting of China's chrome ore from 2020 to 2030 based on grey neural network [J]. *Resource Development and Market*, 2018, 34(6): 747-752.

Geochemical characteristics and Cr metallogenic potential evaluation of the middle section of the northern margin of the Qaidam Basin

CHEN Xi¹, AN Zhao², ZHANG Wen-Quan², XU Yun-Fu³, MA Ying⁴, SHI Lian-Chang², TAO Zhi-Hua⁵
(1. No. 1 Bureau of China Metallurgical Geology Bureau, Sanhe 065201, China; 2. Qinghai Provincial Geological Survey Bureau, Xining 810100, China; 3. Qinghai Geological Survey Institute, Xining 810100, China; 4. The Fifth Geological Exploration Institute of Qinghai Province, Xining 810100, China; 5. The Second Bureau of Qinghai Nonferrous Metals Geological Exploration, Xining 810100, China)

Abstract: This study extracted 59238 pieces of original data on different scales (1:50000 stream sediment surveys and 1:25000 geochemical surveys) of the middle section of the northern margin of the Qaidam Basin. Based on these data, this study conducted the su-

perposition analysis of mathematical index statistics and multivariate statistics, aiming to discover the element association relationship and determine the major metallogenic elements in the region and provide basic support for subsequent mineral work. According to the statistics, the mathematical indexes of Au, W, and Cr in the study area show great metallogenic potential. Combined with the multivariate statistical analysis and existent metallogenic facts, the authors of this study believed that the study area has the great potential for the prospecting of chromium deposits associated with ultramafic rocks besides tectonic altered rock-type and hydrothermal gold deposits. Owing to the relatively high overall background value of local chromium (Cr) element, the traditional method using $X+2\sigma$ (129×10^{-6}) or the cumulative frequency 85% (142.9×10^{-6}) used to delineate the anomaly threshold cannot meet the requirement for delineating local anomalies in the study area. Therefore, this study improved the anomaly threshold using the 1/4 concentration grading value (234×10^{-6}). As a result, many anomalies exhibiting significant zonal distribution in the concentration center were delineated, and most weak anomalies were eliminated. Based on the geological, geophysical, and geochemical results, this study inferred zones favorable for the further exploration of chromium deposits and determined four favorable metallogenic zones and five prospecting areas.

Key words: 1:25000 geochemical survey; Cr; mathematical statistical analysis; metallogenic potential; middle section of northern Qaidam Basin

(本文编辑:蒋实)