

<https://doi.org/10.3799/dqkx.2021.128>



中国钴地球化学异常特征、成因及找矿远景区预测

刘东盛^{1,2,3}, 王学求^{1,2*}, 聂兰仕^{1,2}, 周建^{1,2}, 刘汉粮^{1,2},
张必敏^{1,2}, 王玮^{1,2}, 迟清华^{1,2}, 徐善法^{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
3. 中国地质大学地球科学与资源学院, 北京 100083

摘要: 近年来钴资源的战略地位急剧提升, 钴资源勘查也日益受到重视。但钴的成矿作用特殊, 极低密度地球化学填图能否为钴资源勘查提供可靠依据有待研究。对全国基准计划获得的深层汇水域沉积物钴地化异常开展研究, 建立矿床与异常空间位置指数, 定量评价矿床与异常相对位置关系。发现钴异常的形成主要受(超)基性岩控制, 少数与矿化作用有关, 个别钴异常与泥质岩和次生富集等因素有关。中国与欧洲(FOREGS 计划)结果均表明, 风化型、热液型、岩浆型钴矿床与钴异常空间对应关系依次减弱。在此基础上, 结合中国钴成矿地质背景, 在华南钴成矿带、华北克拉通北缘东段等圈定了若干钴成矿远景区。

关键词: 钴异常; (超)基性岩; 钴矿床; 异常成因; 地球化学。

中图分类号: P596

文章编号: 1000-2383(2022)08-2781-14

收稿日期: 2021-07-07

Cobalt Geochemical Anomalies Characteristics and Genesis in China and Metallogenic Prospecting Areas Prediction

Liu Dongsheng^{1,2,3}, Wang Xueqiu^{1,2*}, Nie Lanshi^{1,2}, Zhou Jian^{1,2}, Liu Hanliang^{1,2},
Zhang Bimin^{1,2}, Wang Wei^{1,2}, Chi Qinghua^{1,2}, Xu Shanfa^{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. International Centre on Global-Scale Geochemistry, United Nations Educational Scientific and Cultural Organization, Langfang 065000, China
3. School of Earth Sciences and Resources, China University of Geosciences, Beijing 100083, China

Abstract: In recent years, the strategic position of cobalt resources has risen sharply, and cobalt resource exploration has also received increasing attention. However, the mineralization of cobalt is special, and whether extremely low-density geochemical mapping can provide a reliable basis for cobalt resource exploration remains to be studied. This paper conducts research on the geochemical anomalies of cobalt in deep catchment sediments obtained by the China Geochemical Baselines project, and finds that cobalt anomalies are mainly controlled by ultrabasic/basic rocks, and a few are related to mineralization. Lesser cobalt anomalies

基金项目: 深部探测专项(No. SinoProbe-04); 地质大调查项目(Nos. DD20190450, DD20190451)。

作者简介: 刘东盛(1985—), 男, 高级工程师, 从事地球化学填图相关研究。ORCID: 0000-0002-0755-9224。E-mail: dopsonliu@sina.com

* 通讯作者: 王学求, ORCID: 0000-0001-7446-2118。E-mail: wangxueqiu@igge.cn

引用格式: 刘东盛, 王学求, 聂兰仕, 周建, 刘汉粮, 张必敏, 王玮, 迟清华, 徐善法, 2022. 中国钴地球化学异常特征、成因及找矿远景区预测. 地球科学, 47(8): 2781-2794.

Citation: Liu Dongsheng, Wang Xueqiu, Nie Lanshi, Zhou Jian, Liu Hanliang, Zhang Bimin, Wang Wei, Chi Qinghua, Xu Shanfa, 2022. Cobalt Geochemical Anomalies Characteristics and Genesis in China and Metallogenic Prospecting Areas Prediction. *Earth Science*, 47(8): 2781-2794.

are related to argillaceous rock sand secondary enrichment. Establishing a spatial correlative index between deposits and anomalies, and quantitatively evaluating the relative spatial relationship between deposits and anomalies. Both China and Europe (FOREGS project) show that the spatial correspondence relationship of anomalies with weathered, hydrothermal, and magmatic type of cobalt deposits gradually weakened. Based on the above understanding, combined with the metallogenic background of China's cobalt, several cobalt metallogenic prospecting areas have been delineated in the South China and the eastern section of the northern margin of the North China Craton cobalt metallogenic belt.

Key words: cobalt geochemical anomalies; ultrabasic/basic rocks; cobalt deposits; anomaly genesis; geochemistry.

勘查地球化学家 1990 年首次提出通过极低密度地球化学填图(采样密度 <1 个点/ $1\ 000\ \text{km}^2$)圈定成矿靶区、再利用更高密度填图逐步缩小靶区的填图策略(Bölviken *et al.*, 1990). 低密度地球化学填图用一件样品代表上百至数千平方千米的地表露物, 必然造成部分信息的弱化甚至丢失, 因此一直以来, 科学家从未停止从原理上证明或质疑极低密度地球化学填图的代表性和再现性(Fordyce *et al.*, 1992; 王学求等, 2005; Feng *et al.*, 2011; Birke *et al.*, 2015; Liu *et al.*, 2020).

通过极低密度地球化学填图指导矿产勘查的理论基础有两点: 一是成矿作用是一个系统过程, 可以形成面积广阔的地球化学省. 尽管矿床的可经济利用范围只有数平方公里, 似乎极低密度地球化学填图对矿产勘查意义不大, 但是如果将成矿作用源—运—聚—散过程中的一系列地质因素作为一个成矿系统来看, 极低密度填图就大有可为了. 因为以矿床为中心的成矿系统空间分布能达到几千至几万平方公里(Knox-Robinson and Wyborn, 1997; 赵新福等, 2019), 形成的面积巨大的地球化学省(Bölviken *et al.*, 1990), 通过极低密度填图被识别出来, 为找矿勘查提供重要信息. 二是地球化学数据具有分形特征. 挪威地球化学家(Bölviken *et al.*, 1992)首次提出地球化学填图数据具有分形特性, 多数元素地球化学模式在 $5\sim 150\ \text{km}$ 区间内具有自相似性, 因此将 $150\ \text{km}$ 作为地球化学填图的采样间距上限. 中国学者研究了全国区域化探扫面数据的自相似区间, 发现铜、铅、锌等元素地球化学模式自相似区间 $2\sim 180\ \text{km}$, 金和银 $2.0\sim 22.5\ \text{km}$ (施俊法等, 2000). 在自相似区间内, 不同密度填图获得的异常具有重现性, 因此可以通过对空白区进行低密度填图, 在异常区使用较高密度填图, 达到快速低成本缩小靶区的目的(王学求等, 2005).

有了坚实的理论支撑, 极低密度填图得以被大量应用于国际地层对比计划(IGCP259)以及中、美、

澳和欧洲等大陆尺度填图计划中(Darnley *et al.*, 1995; Salminen *et al.*, 2005; Wang *et al.*, 2015). 众多填图实践表明极低密度填图能够指示金属成矿作用过程并圈定找矿远景区(Caritat, 2018; Yan *et al.*, 2021).

钴资源是中、美、欧的重要战略资源(自然资源部, 2016; Schulz *et al.*, 2017; Latunussa, 2020), 随着新能源产业和航空航天等高科技产业崛起, 预计未来需求将持续高速增长. 但中国钴资源严重依赖进口, 资源安全形势不容乐观, 近年来国内钴资源勘查研究越来越受到重视(王辉等, 2019; 赵俊兴等, 2019; 王焰, 2020; 张洪瑞等, 2020).

极低密度填图能否为中国钴资源勘查提供有用信息尚存疑问. 原因有二: 一是中国钴资源类型复杂、钴富集程度低(伴生形式为主), 不同类型钴矿床赋存于不同的成矿系统, 其空间分布特征和成矿元素含量等必然有所差异, 这种差异是否能反映到钴地球化学异常中尚不清楚; 二是中国汇水域沉积物中钴的自相似区间上限是否大于采样间距, 决定了极低密度填图能否刻画稳健的、可再现的钴异常. 但目前尚不了解沉积物钴的自相似区间.

本研究利用中国地球化学基准计划获得的未受人类活动影响的深层沉积物样品钴含量数据, 讨论中国汇水域沉积物钴地球化学异常特征及其成因, 揭示钴异常与不同类型钴矿床的空间对应关系, 最后在此基础上预测钴成矿远景区.

1 方法技术

1.1 采样方法

中国的地球化学基准网格是将每个 $160\ \text{km}\times 160\ \text{km}$ 全球网格划分为4个子网格, 每个网格大小为 $80\ \text{km}\times 80\ \text{km}$. 每个网格中选择 $2\sim 4$ 个汇水域部署采样点. 平原区采集泛滥平原沉积物或三角洲沉积物, 山区采集河漫滩沉积物, 沙漠区采集汇水盆地沉积物, 草原区采集季节性湖(淖)积物样品(Wang *et al.*, 2015). 全国共完成 $3\ 382$ 个汇水域采

样,所有点位同时采集表层样品和深层样品,表层样品用于反应人类活动的影响,深层样品用于代表自然地质背景.表层样品采自0~25 cm深度,深层样品采自100 cm深度以下,共采集样品6 617件.采集汇水域内代表性岩石样品12 000余件.

1.2 实验室分析方法与质量控制

样品分析工作在中国地质科学院地球物理地球化学勘查研究所中心实验室完成.称取0.25 g样品用10 mL HF、5 mL HNO₃、2 mL HClO₄消解,至HClO₄冒尽,残渣用8 mL王水溶解后,移至25 mL聚乙烯试管中,定容摇匀.分取1 mL澄清溶液,用2% HNO₃稀释至10 mL(总稀释因子为1 000),以Rh为内标,用等离子体质谱仪测定钴元素(张勤等,2012).质量控制结果见刘东盛等(2020).

1.3 制图方法

地球化学异常图在GEOEXPL2009中绘制.投影方式兰伯特等角割圆锥.插值方法为距离倒数加权,幂指数2,搜索半径120 km,网格尺寸40 km,地球化学图色阶划分依据75%、85%、95%分位值划分.

2 结果

2.1 中国钴矿床特征

目前全球陆地剩余探明钴储量约为690万吨,我国钴资源严重缺乏仅占全球储量的1.1%(王辉等,2019).我国独立钴矿床较少,钴主要以伴生形式赋存在铜、镍、铁等金属矿床中.钴矿床研究受重视程度较低缺乏系统性工作.目前钴矿床划分方案混杂不清,尚无统一标准(丰成友等,2004;王辉等,2019;赵俊兴等,2019).张洪瑞等(2020)总结当前钴矿床划分方案存在如下问题:(1)划分依据不一致,如以赋矿围岩(沉积岩、变质沉积岩)、矿体形态(层状、脉状)、矿床成因(岩浆型、风化型)等为分类依据;(2)各类型之间彼此存在重叠,存在单个矿床同属两种类型的情况;(3)伴生钴矿沿用主矿体类型名称(丰成友和张德全,2002;Horn *et al.*, 2021).

分类标准混乱阻碍钴矿床学研究及钴找矿勘查效果.Gunn(2013)和张洪瑞等(2020)等根据钴富集方式和成矿过程提出了更为科学的钴矿床划分方案:岩浆型、热液型、风化型和化学沉积型.表1

和图1展示了中国58个钴矿床各项指标和空间分布.为便于分类研究,在表1的基础上,按照钴矿床类型分别统计了钴矿床的储量、品位等各项参数(表2),其中相对位置指数“R”含义及其计算方法详见3.2.

岩浆型钴矿床与基性、超基性岩有关(张洪瑞等,2020),其特征是储量较大但品位较低.本文统计中国岩浆型钴矿床19处,达大型规模者3处,其中甘肃金川储量位居中国钴矿床之首.其余基本均达到中型规模.19处矿床中,除新疆图拉尔根和黑龙江五星钴矿床钴以共生形式产出,其他矿床中的钴均为伴生.岩浆型钴矿床主要分布于中国西北的新疆、甘肃、青海和西南的四川、云南等地.

热液型钴矿床是钴元素随热液迁移、富集、沉淀下来形成的,流体来源可能是基性岩浆或沉积盆地(Gunn, 2013),其特征是储量大、品位高,是最重要的钴矿产来源.本文统计中国热液型钴矿床35处,达大型规模者5处,以独立或共生形式产出者20处.中国热液型钴矿床广泛分布于中国中部、东部地区,主要为吉林、辽宁、河北、山西、江西等省,这与其复杂多样的形成环境有关.

风化型钴矿床源于超基性岩甚至是富钴超基性岩矿石的次生富集,其特征是形成于热带地区强风化气候条件下并与镍一起赋存于红土中,因此又称为红土型镍钴矿.风化型钴矿聚集了世界70%钴资源,贡献了40%钴产量(Berger *et al.*, 2011).中国风化型钴矿床数量很少,主要分布于云南和海南等强风化气候区.

2.2 中国钴地球化学异常

在地球化学异常划分中,常以75%分位值作为高值区下限,以85%分位值作为异常区下限.原生钴矿床边界品位(0.02~0.03%)与钴上地壳丰度(0.001%)平均比值为25,而金、铜、铅、锌、钨、锰、铬、锂、铀、钼等常见矿产资源,矿床边界品位与上地壳丰度比值80~1 429,平均为43.钴矿床显著的低富集特征,导致源于矿床的分散流更容易被稀释,因此若以传统85%分位值圈定异常,易将钴矿床排除在异常区之外.同时,中国基性岩分布广泛,容易形成大面积“假钴异常”.因此,考虑到钴成矿作用特殊性和富钴基性岩干扰,为更好地刻画成矿作用与地球化学模式的关系,本文同时绘制了钴高值区、异常区和异常浓集区,各区下限分别为75%、85%、95%百分位值,对应钴含量14.3×

续表1

类型	传统类型	序号	名称	经度(°E)	纬度(°N)	规模	储量(万吨)	品位 (10 ⁻⁶)	赋存 状态	位置指 数 R
		46	河北武安玉石洼 Fe(Co)矿	114.20	36.78	中型	0.28	150	伴生	3
		47	河北武安中关 Fe(Co)矿	114.26	36.90	中型	0.95	180	伴生	3
		48	山东莱芜顾家台 Fe(Co)矿	117.58	36.23	中型	0.50	160	伴生	2
		49	山东莱芜西尚庄 Fe(Co)矿	117.54	36.18	中型	0.66	150	伴生	2
		50	山东淄博金岭北金召 Fe(Co)矿	118.18	36.88	中型	0.41	193	伴生	3
		51	山东淄博金岭侯家庄 Fe(Co)矿	118.13	36.89	中型	0.21	113	伴生	3
		52	青海肯德克 Co-Bi-Au 矿	91.46	36.75	小型	-	380	共生	4
		53	西藏普桑果 Cu-Pb-Zn-Co-Ni 矿	88.59	30.92	小型	-	200	共生	4
	黑色页岩赋矿型	54	广西金秀罗丹 Cu-Co 矿	109.91	23.99	小型	-	1 500	独立	4
风化 型	风化型	55	海南文昌蓬莱钴土矿	110.38	19.47	中型	0.89	350	共生	2
		56	青海元石山 Ni-Fe(-Co)矿	102.00	36.66	中型	0.55	385	伴生	3
		57	云南元江-墨江 Ni-Co 矿	101.29	23.27	中型	1.45	-	伴生	4
		58	玉龙斑岩 Cu-Mo(-Co)矿	96.79	31.61	中型	-	-	伴生	2

表 2 中国钴矿床参数统计

Table 2 Parameter statistics table of China's cobalt deposits

类型 1	类型 2	数量	合计储量 (万 t)	平均储量 (万 t)	平均品位 g (t)	位置指数 R	位置指数 R (欧洲 FOREGS)
岩浆型	岩浆铜镍硫化物型	19	22.5	1.73	435	3.8	3.6
	变质沉积岩型	5	6.1	1.22	309	2.6	3.1
	沉积岩赋矿层控型	7	2.2	0.31	1 115	3.0	4.0
	黑色页岩赋矿型	1			1 500	4.0	4.0
热液型	火山岩块状硫化物型	1	3.1	3.08	850	4.0	1.3
	脉状或热液交代型	7	4.1	0.68	1 210	3.6	
	铁氧化物铜金型	2	3.0	1.50	1 650	3.0	4.0
	矽卡岩型	12	6.1	0.61	188	2.8	
风化型	风化型	4	2.9	0.96	368	2.8	2.5
总计		58	49.9	1.06	615	3.3	3.3

10⁻⁶、16.3×10⁻⁶和 20.8×10⁻⁶。

地球化学省被定义为相对较大范围的一套岩石,这套岩石化学组分与地壳的平均值有显著不同,这个省的位置及其范围可以提供具有相当经济意义的初始勘查靶区,通过填图以地球化学异常的形式呈现出来(Hawkes, 1962)。基于这一概念,本文圈定钴地球化学省 17 个,及其相关钴地球化学异常 37 个,异常面积 79 万 km²(图 2)。

(1) 扬子西南缘地球化学省。扬子西南缘地球化学省位于云、贵、川、渝,形成了中国规模最大的单个钴异常(面积 42 万 km²)。异常内部有 6 处浓集中心。滇西南钴异常浓集中心(1-1)位于临沧永德县至沧源县一带,区内出露大面积三叠纪牛喝塘组和石炭纪鱼塘寨组玄武岩地层。滇西钴异常浓集中

心(1-2)位于保山市,区内出露海西期辉长、辉绿岩体和喜山期碱性辉长岩,石炭纪卧牛寺组玄武岩地层。浓集中心东南有永平厂街中型热液型钴矿床。滇西浓集中心(1-3)位于大理州鹤庆县至弥渡县一带,区内分布大面积的二叠纪峨眉山玄武岩组。川-滇-贵浓集中心(1-4)主体位于滇东和贵西,是中国规模最大的钴浓集中心。向南至中-越边境异常未封闭。该浓集中心的北部,大面积出露二叠纪峨眉山玄武岩组。该浓集中心南部玄武岩出露面积骤减,但仍然形成了大面积的强烈钴异常。浓集中心外围产出四川攀枝花 V-Ti-Fe(-Co)矿、拉拉 Cu-Co-Au 矿、大红山热液型 Fe-Cu-Co 矿和白马寨岩浆型 Ni-Cu(-PGE-Co)矿。滇东南异常浓集中心(1-5),位于云南富宁县滇-桂交界处。区内出露大

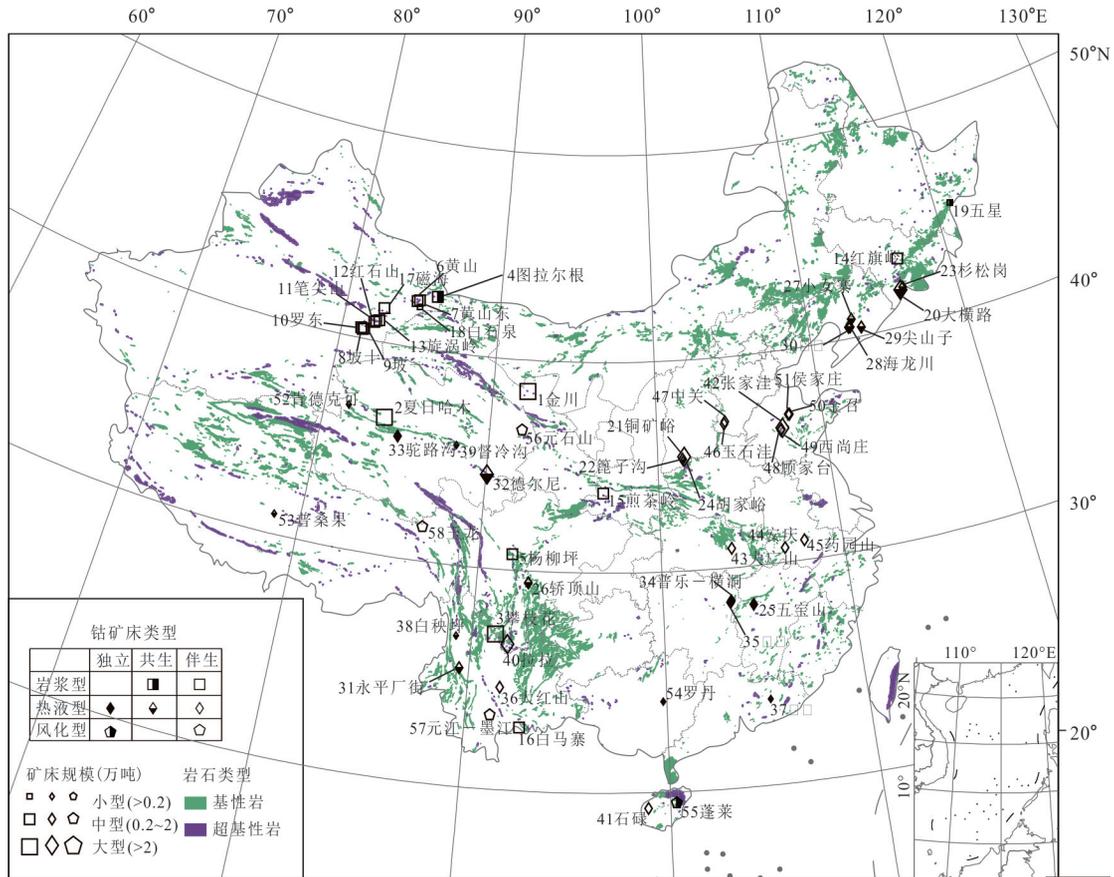


图 1 中国基性、超基性岩和钴矿床分布

Fig.1 Distribution of basic/ultra-basic rocks and cobalt deposits in China

据中国地质调查局(2004);底图审图号:GS(2016)2893号

面积三叠纪(橄榄)辉长岩和辉绿岩体(20万F4804).东北异常浓集中心(1-6),位于贵北道真、务川、正安3县交界一带,区内出露主要为古生代—中生代碳酸盐岩和泥质岩地层,几乎无基性岩出露.

(2)藏北地球化学省.藏北地球化学省呈东西向展布,包括西部(2)和东部(3)两处异常构成.西部异常(2)位于那曲市南东80 km,区内出露主要为晚古生代—中生代碎屑沉积岩地层,及白垩纪花岗岩.异常浓集中心区内无特殊地质体出露.东部异常(3)面积达3.9万 km^2 ,异常呈近等轴状,异常中心位于丁青县,异常浓集中心出露三叠纪—侏罗纪蛇绿岩套.蛇绿岩套呈近北东东向展布,长约100 km,宽2~8 km.异常外围产出玉龙超大型铜矿,矿体风化壳形成中等规模风化型钴矿床.藏北地球化学省西部控制因素不明,东部主要受蛇绿岩带控制.

(3)藏南地球化学省.藏南地球化学省呈东西向展布,包括西部(4)、中部(5)和东部(6)3处异

常.西部(4)异常位于昂仁县至日喀则市一带,异常区内有侏罗纪—白垩纪昂仁蛇绿岩群沿断裂带出露地表(1:25万拉孜幅),蛇绿岩带呈东西走向长度150 km,南北宽2~10 km,昂仁蛇绿岩群的主体为超基性岩段,主要岩性为斜辉辉橄岩、斜辉橄橄岩.蛇绿岩群穿越异常浓集中心.中部异常(5)位于江孜县至浪卡子县一带,区内三叠纪和侏罗纪沉积岩地层中发育较大规模的近东西走向的辉长岩脉和辉绿玢岩脉,基性岩脉主要分布于异常边部(1:25万洛扎幅).西部异常(6)位于隆子县,异常区内出露近东西向、不连续分布的白垩纪超基性岩体,异常北部的外围高值区内断续分布罗布莎蛇绿岩群.该异常不发育浓集中心.藏南地球化学省内无已知钴矿床.该地球化学省西部、中部和东部的主要控制因素是蛇绿岩、基性岩脉和超基性岩体.

(4)东天山地球化学省.东天山地球化学省呈新月形东西向展布(7),位于阜康县至木垒县一带.区内出露较大规模的石炭纪辉绿玢岩.异常内部无浓集中心,无已知矿床.异常位于北天山—准格尔

北缘钴成矿带内。

(5)北天山地球化学省。北天山地球化学省包括2处近等轴状异常(8和9),位于博乐市北东东80 km。两异常内均有浓集中心,中心区内分布大规模蛇绿岩套。

(6)祁连山地球化学省。该地球化学省包括4个沿祁连山断续分布的地球化学异常。异常10位于阿克塞县西侧,呈近等轴状,异常外围分布古生代辉长辉绿岩体和蛇纹岩(斜辉辉橄岩)。异常11位于肃北县东侧,被巨大的钴高值区包围,内部不发育浓集中心。区内零星分布古生代基性、超基性岩。异常外围产出多处磁铁矿床。异常12位于肃南县西侧,异常内分布大面积的古生代基性、超基性岩。产出磁铁矿床。异常12无浓集中心,异常外围高值区内出露大量基性火山岩。异常13位于门源县,呈等轴状,发育浓集中心。浓集中心出露早古生代基性、超基性岩。外围高值区产出2处铜矿床。

(7)东秦岭地球化学省。东秦岭地球化学省包括3处异常(14/15/16)。异常14位于宁强县,区内出露大范围新元古代碧口群含变质中、基性火山岩地层。区内产出金矿床若干处。异常15范围较大,跨越甘、鄂、川、渝4省(市),区内广泛分布元古代一早古生代变质基性火山岩地层。异常内含两个异常浓集中心(15-1, 15-2)。浓集中心15-1位于旬阳县,区内出露地层主要为古生代—中生代沉积岩和副变质岩地层,几乎没有基性、超基性岩体出露。区内产出金、锑、汞、铅锌矿多处。浓集中心15-2位于神农架,出露元古代辉绿岩和细碧岩,区内产出磁铁矿床1处。异常16位于丹凤县至商南县一带,区内广泛出露古生代辉长岩、纯橄岩、橄榄岩岩体,产出锑、铅锌、钒、钛矿床多处。

(8)湖南地球化学省。湘鄂地球化学省位于湖南省大部份区域,形成中国第2大单个钴异常(17)。按异常成因,将该异常的东北角(武汉市及周边)划入长江中下游地球化学省,异常编号“18”(见下段描述)。异常区内广泛分布各时代碳酸盐岩、泥质岩及侏罗纪基性岩脉(娄峰等, 2011)。异常内部有2个浓集中心(17-1, 17-2)。异常浓集中心17-1位于娄底市至益阳县。娄底一带出露下寒武统富钴黑色页岩(20万图幅G4904)。益阳县一带出露寒武统牛角河组碳质板岩(富黄铁矿结核)(20万图幅G4935)。湘鄂地球化学省南部跨入华南钴成矿带范围(丰成友等, 2004),在高值区产出普乐—横洞和

井冲热液型独立钴矿床。

(9)长江中下游地球化学省。该地球化学省位于长江中下游地区,横跨湖北、安徽、江苏3省。形成多处零星分布的钴异常。其中规模较大异常(18)位于武汉市。异常东部产出大量铁矿床和若干铜矿床。另一处较大规模异常(19)位于武穴市至宿松县一带。异常南部产出大量铜矿床。地球化学省与长江中下游钴成矿带的空间分布一致(丰成友等, 2004),区内产出安庆、大广山、药园山热液型Fe-Cu(-Co)矿,大部分钴矿床位于异常区外缘或高值区。

(10)珠三角地球化学省。地球化学省仅有1处异常(20),区内出露主要为珠江搬运沉积形成的第四系沉积物。异常外围无基性、超基性岩出露,但是在珠江上游的贵州、云南境内出露大面积的玄武岩。

(11)桂中北地球化学省。桂中北地球化学省位于广西中部和北部区域,形成4处较大规模异常,分别位于融安(21)、罗城(22)、都安(23)和来宾县(24)。异常21, 22区内出露较大规模中元古代四堡期次基性、超基性岩体。异常23出露少量海西期辉绿岩,异常24区内未见基性超基性岩,地表出露主要为碳酸盐岩和泥质沉积岩。区内产出若干锰矿床。桂中北地球化学省高值区外围产出金秀罗丹热液型独立钴矿床。

(12)晋冀鲁地球化学省。晋冀鲁地球化学省分布于山西南部、华北南部和山东西部一带。地球化学省内有异常2处分别位于章丘县(25)和微山县(26)。异常区内基性、超基性岩出露很少。两异常外围产出多处热液型伴生钴矿床和铁矿床。

(13)胶东地球化学省。地球化学省位于胶东半岛莱阳至高密一带。钴异常(27)位于莱西市,区内出露较大面积的白垩系基性火山岩。

(14)晋冀蒙地球化学省。位于晋冀蒙三省交界一带。包括2处较大规模钴异常(28, 29)。异常28位于呼和浩特市北侧,区内出露太古代桑干群片麻岩地层(夹磁铁石英岩)。异常29位于怀安—天镇一带,地表出露大量太古代右所堡组和瓦窑口组中、基性麻粒岩和片麻岩。

(15)辽中南地球化学省。位于辽宁中南部,有2处较大规模钴异常(30, 31)。30号异常位于海城,区内出露较大规模的元古代变质基性侵入岩体(辉长岩、辉绿岩)。31号异常位于辽阳,区内出露大面积太古代鞍山群,岩性包括中、基性高级变质岩和

磁铁石英岩等. 异常外围产出小女寨等热液型钴矿床 4 处, 密集产出众多铁矿床.

(16)吉林东部地球化学省. 位于吉林省东部, 包括两处较大规模钴地球化学异常(32, 33). 32 号异常位于吉林东南部长白至抚松一带, 区内地表出露物主要为第三纪和第四纪玄武岩, 区内产出大型和中型热液型钴矿床各 1 处, 此外还有金矿床、铋矿床和铁矿床. 33 号异常位于敦化北部, 区内地表出露物主要为第三纪和第四纪玄武岩.

(17)大兴安岭地球化学省. 位于大兴安岭中段, 包括 4 处钴地球化学异常(34-37), 各异常内均广泛分布白垩纪玄武岩组. 37 号异常内产出金、银、铜、铅锌、钼矿床.

3 讨论

3.1 中国钴地球化学异常成因

沉积物/土壤中钴的赋存形式主要有残渣态、

铁锰氧化物结合态和有机结合态 3 种. 众多研究表明残渣态是沉积物/土壤中钴的最主要赋存形式 (Tessier *et al.*, 1979; 王敬国, 1995; 罗泽娇等, 2019). 残渣态代表矿物晶格中的钴 (Tessier *et al.*, 1979), 因此沉积物钴含量主要受源区岩石或矿体控制.

受风化影响, 部分矿物晶格中的钴离子被释放, 表生迁移过程中被铁锰氧化物或有机质所吸附, 导致钴的次生富集 (Chao and Theobald, 1976). 因此在某些特殊环境下, 次生富集作用可能对沉积物钴含量产生一定影响.

3.1.1 (超)基性岩相关钴异常 不同类型岩石中钴含量差异显著 (图 3). 由于 Co^{2+} 离子交换指数与 Ni^{2+} 、 Mg^{+} 、 Fe^{2+} 、 Mn^{2+} 、 Cu^{2+} 、 Cr^{2+} 相近, 因此岩石中钴多以类质同象形式进入镁铁质暗色矿物中, 钴含量随岩石基性程度增加、暗色矿物增加而增加. 不同类型岩石中钴含量: 超基性岩 > 基性岩 > 中性岩 > 泥质岩 > 中酸性岩 > 碎屑岩 > 酸性岩 > 碳酸盐

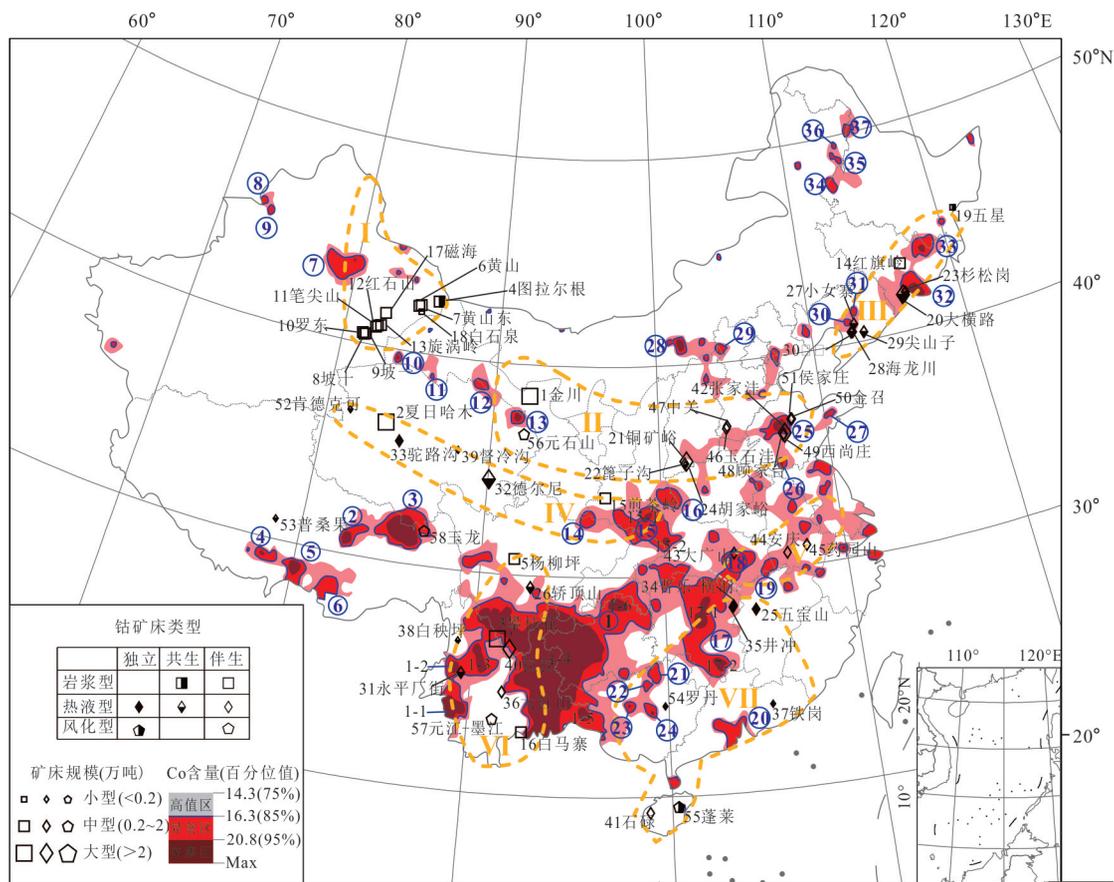


图 2 中国基准值计划汇水域沉积物深层钴地球化学异常图

Fig.2 Geochemical anomaly map of cobalt of deep sediments from CGB project

钻成矿带: I 准格尔北缘—北山; II 华北克拉通北缘; III 华北克拉通北缘东段; IV 昆仑—秦岭; V 长江中下游; VI 扬子西南缘; VII 华南(丰成友等, 2004);底图审图号:GS(2016)2893号

表 3 中国钴地球化学省及异常特征统计表
Table 3 Statistic table of China's cobalt geochemical provinces and characteristic

地球化学省编号	位置	异常编号	异常面积(km ²)	地表出露岩石	钴矿床	其他矿床	已知钴成矿带
1	扬子西南缘	(1)	42 0739	石炭纪—三叠纪玄武岩	岩浆型 2 处 热液型 5 处 风化型 1 处	铁、铜、金、银、铅、锌	扬子西南缘
2	藏北	(2)	9 855	晚古生代—中生代碎屑沉积岩	风化型 1 处		—
		(3)	39 378	怒江—班公湖蛇绿岩带		铜、矿	
		(4)	5 682	蛇绿岩			—
3	藏南	(5)	10 856	辉长岩脉、辉绿玢岩脉			
		(6)	12 009	白垩纪超基性岩体		铬	
4	东天山	(7)	20 078	辉绿玢岩			准葛尔北缘—北天山
5	北天山	(8)	1 388	蛇绿岩			—
		(9)	1 280	蛇绿岩			
6	祁连山	(10)	1 351	基性、超基性岩	岩浆型 1 处 风化型 1 处		—
		(11)	301	基性、超基性岩		金	
		(12)	3 118	基性火山岩		铁	
		(13)	4 526	基性、超基性岩		铜	
7	东秦岭	(14)	5 221	元古代碧口群含变质中、基性火山岩	岩浆型 1 处	金	
		(15)	44 256	元古代—早古生代变质基性火山岩		铁、钛、锰、金、银铅锌、锡	昆仑—秦岭
		(16)	10 297	古生代辉长岩、纯橄岩、橄榄岩岩体		钛矿、锑等	
8	湖南	(17)	98 893	侏罗纪基性岩脉, 碳酸盐岩, 泥质岩	热液型 3 处	铁矿、钨锡矿、锑、锰、锌	华南
9	长江中下游	(18)	19 695	第四系沉积物	热液型 1 处	铁矿、铜矿	长江中下游
		(19)	5 524	第四系沉积物		铜矿、铁矿	
10	珠三角	(20)	12 708	珠江三角洲沉积物		铅锌	华南
11	桂北	(21)	4 836	中元古代四堡期次基性、超基性岩体		锡、银、锌、镉	
		(22)	1 795	中元古代四堡期次基性、超基性岩体			华南
		(23)	2 526	少量海西期辉绿岩		锰	
		(24)	3 756	碳酸盐岩和泥质沉积岩		锰	
12	晋冀鲁	(25)	11 549	古生代沉积岩, 太古代变质岩, 花岗岩	热液型 5 处	铜、铁	华北克拉通中段
		(26)	2 367	古生代沉积岩, 太古代变质岩, 花岗岩	热液型 1 处	铜、铁	
13	胶东	(27)	1 584	白垩系基性火山岩			—
14	晋冀蒙	(28)	4 614	太古代片麻岩(夹磁铁石英岩)		铁	华北克拉通中段
		(29)	2 506	太古代中、基性麻粒岩和片麻岩			
15	辽中南	(30)	1 135	元古代变质基性侵入岩	热液型 3 处	铁	华北克拉通北缘东段
		(31)	1 187	太古代变质岩(含磁铁石英岩)		铁	
16	吉林东部	(32)	12 396	新生代玄武岩	热液型 2 处	金、锑、铁	华北克拉通北缘东段
		(33)	10 107	新生代玄武岩		铁	
17	大兴安岭	(34)	3 606	白垩纪玄武岩			—
		(35)	1 634	白垩纪玄武岩			
		(36)	556	白垩纪玄武岩			
		(37)	2 510	白垩纪玄武岩		金、银、铜、铅锌、钼	

岩(图 3), 基性、超基性岩钴含量中位值分别为 89.4×10^{-6} 和 43.6×10^{-6} , 远高于所有类型岩石中

位值 6.49×10^{-6} (刘东盛等, 2020).

依据全国 1:250 万地质图绘制了全国基性、超

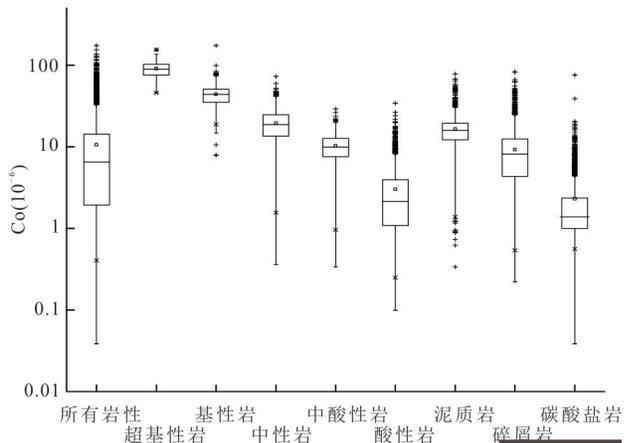


图3 主要岩石类型钴含量

Fig.3 Content of cobalt of primary rock types

据刘东盛等(2020)

基性岩分布图(图1),与钴异常图(图2)对比可发现,钴异常与基性、超基性岩体具有较好空间对应关系.欧洲农牧区土壤地球化学填图计划(GEMAS)揭示,极低密度钴地球化学异常与基性、超基性岩空间对应关系好(Albanese *et al.*, 2015).中国37处钴异常,其中25处出露较大规模(超)基性岩,基性岩相关钴异常总面积约70万 km^2 ,占中国钴异常总面积的88%.单个异常面积巨大,平均2.8万 km^2 .当然,因为钴的矿化作用与基性、超基性岩体密切相关,其中部分钴异常可能还叠加了矿化作用的影响.

(超)基性岩相关异常中,蛇绿岩带有关的6处,如异常(3)、(4)、(8)分别与雅鲁藏布江蛇绿岩带、怒江—班公湖蛇绿岩带和天山蛇绿岩带有关.与基性火山岩有关的10处,如异常(1)和(15)分别与玄武岩和变质基性火山岩有关.基性岩体或基性岩脉有关的9处,如异常(7)和(17).

3.1.2 矿致钴异常 在矿体中,由于钴的亲硫特性,钴主要以砷化物、硫化物、砷硫化物等独立钴矿物形式存在(Hamilton, 1994).内生钴矿床的工业品位下限是 $(200\sim 300)\times 10^{-6}$,本文统计的全国58个钴矿床中,钴矿体平均钴含量 600×10^{-6} ,其中热液型钴矿床钴含量最高,平均为 720×10^{-6} .

一些异常区内无富钴岩石发育,但有钴矿床产出,因此推测这些异常与钴矿化作用有关.5处与钴矿化作用有关的钴异常平均面积1.1万 km^2 ,远小于基性岩相关钴异常.异常(18)、(25)和(30)分别产出大广山Fe-Cu(-Co)矽卡岩型钴矿床、山东莱芜尚庄矽卡岩型Fe(Co)矿、小女寨沉积岩赋矿层

控型Cu-Co矿等热液型钴矿床.

3.1.3 其他成因钴异常 另外7处异常成因较复杂,异常面积普遍较小,平均0.47万 km^2 .

异常(20)位于珠三角,珠江上游源区云南、贵州境内出露大面积的玄武岩,其中富钴的镁铁质矿物经风化剥蚀后形,以细粒级形式被长距离搬运至珠江入海口处,因地形渐平缓河流流速减慢水动力条件减弱,富钴的细粒级物质沉淀下来,形成了富钴的第四纪沉积物.同时注意到,珠三角地区是中国电池产业高度集中地区,截止2007年已有数十家产值过亿的知名电池企业.因此,该异常的可能与次生富集和人为污染叠加有关.

异常(23)、(24)位于广西中部,属于风化较强烈地区,区内铝土矿较发育.异常内出露岩石主要为泥质岩和碳酸盐岩,泥质岩相对较富钴,碳酸盐岩在强烈的风化条件下易发生次生富集,推测此异常是相对富钴地质体叠加强烈风化作用形成.

异常(28)、(29)、(31)可能与磁铁石英岩有关.因为 Co^{2+} 与 Fe^{2+} 易发生类质同象替换富集在磁铁矿中,而这些异常内均有大面积的含磁铁石英岩的太古代变质岩地层出露.

总体来看,中国基准值计划获得的汇水域沉积物钴异常,大多均与基性、超基性岩(主要为玄武岩、基性岩体、蛇绿岩)有关,异常数量多且面积巨大.基性、超基性岩是中国钴异常形成的最主要控制因素.另外一部分钴异常与钴矿化作用有关,形成的异常面积远小于前者.其他钴异常由富钴地质体如泥质岩、次生富集(包括强烈风化和搬运沉积)、人为污染等多种因素叠加形成.

理论上异常样品中的矿物组合可有效区分不同成因钴异常.与基性岩有关的异常常沉积物样品富集橄榄石、辉石、角闪石等富钴的暗色矿物,同时可能伴随Mg、Ti、Ni、Fe等元素异常;与矿化成因有关的钴异常样品富集富钴硫化物矿物,如辉钴矿、黄铁矿等,同时伴随相关成矿元素的富集;与泥质岩有关的钴异常样品富集粘土矿物,可伴随Al、K等元素异常;与次生富集有关的钴异常样品可能富集有机质、铁锰氧化物等,伴随有机碳、Fe、Mn等元素富集;与人为污染有关的钴异常则相对复杂,因污染源不同而具有不同的元素矿物组合特征.

3.2 不同类型钴矿床与钴异常空间关系

为量化评价矿床与异常相对位置关系,建立矿床与异常相对位置指数 R ,定义规则如下:当矿

床位于异常浓集中心、异常区、高值区、高值区外时,分别定义 $R=1,2,3$ 和 4 (表1和表2). R 值越小,说明矿床与异常空间对应关系越好.反之,对应关系越差.

岩浆型钴矿床共19处,矿床-异常相对位置指数 $R=3.8$,只有攀枝花和白马寨钴矿床位于异常区内,其他17处岩浆型钴矿床均位于高值区以外.热液型钴矿床共35处,矿床-异常相对位置指数 $R=2.75$.其中变质沉积岩型、矽卡岩型、铁氧化物铜金型位置指数 R 较小 $2.6\sim 3.0$,该类矿床多位于异常区或高值区,黑色页岩赋矿型和火山岩块状硫化物型 R 值均为4位于高值区以外.风化型钴矿床4处,矿床-异常相对位置指数 $R=2.75$,其中文昌和玉龙钴矿床位于异常区内,其他则位于高值区或其以外.

上述数据表明,热液型钴矿床与异常空间对应关系较好,特别是变质沉积岩型和矽卡岩型.而岩浆型钴矿床与异常空间对应关系较差,其原因可能是:(1)大量的岩浆型钴矿床位于荒漠戈壁区,采样点汇水域范围较小,因此可能漏掉矿化信息;(2)部分岩浆型钴矿床品位较低,落在异常外部的岩浆型钴矿床平均品位 323×10^{-6} 落在异常内部的品位 $1\ 600\times 10^{-6}$;3)与矿化特征有关,矽卡岩型钴矿床平均虽然品位较低(162×10^{-6}),但是与异常对应关系却很好($R=2.6$),这体现了矿化特征对异常形成也具有显著影响;(3)岩浆型钴矿床成因上与幔源(超)基性岩浆作用(结晶分异、熔离)有关,受后期热液流体改造影响小(汤中立,1996).因此其矿化主要受控于含矿岩浆的空间分布.含矿(超)基性岩体多呈岩墙状、脉状或透镜状产出,分布范围小(多小于 1 km^2)、就位深度深(甘肃金川为 $10\sim 15\text{ km}$)(汤中立,1996),导致了岩浆型钴矿化不容易被地表沉积物地球化学填图所反映.因此,在圈定岩浆型钴矿床成矿靶区时应注意,一要了解区域基性岩浆活动情况,二要对地球化学异常外围区域也要引起重视.

FOREGS计划采用了与中国基准值计划相近的采样介质和采样密度进行了欧洲钴地球化学填图(Salminen *et al.*, 2005).将欧洲钴矿床拟合到地球化学图上(Horn *et al.*, 2021),清晰展示了钴矿床与异常对应关系(图4),并统计各类钴矿床相对位置指数 R (表2).

对比中国基准值计划与欧洲FOREGS计划发

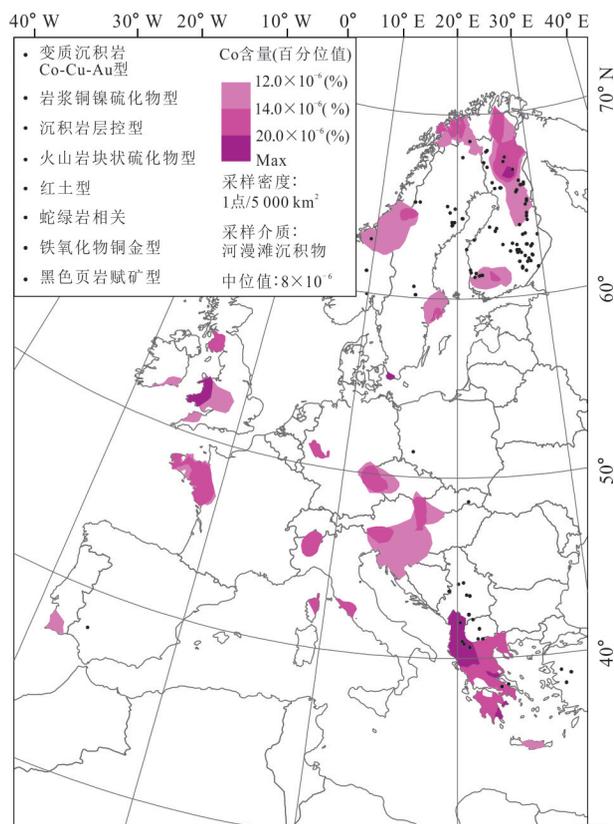


图4 欧洲FOREGS泛滥平原沉积物钴地球化学异常与钴矿床分布

Fig.4 Cobalt geochemical anomalies and distribution of cobalt deposits in the sediments of the FOREGS floodplain in Europe

现,二者岩浆型、热液型和风化型3个大类别 R 指数均接近,即在两个填图计划中,热液型钴矿床与异常对应关系最好,风化型次之,岩浆型最差.两填图计划也存在差异.在热液型钴矿床中,与中国基准计划相比,FOREGS的块状硫化物钴矿床与异常对应关系更好.而铁氧化物铜金型和沉积岩赋矿层控型钴矿床与异常对应关系更差.这种差异可能与该类矿床数量过少导致统计的偶然性有关.

3.3 钴成矿远景区预测

丰成友等(2004)根据中国区域成矿规律和地质背景,划分出7个钴成矿带,已知钴矿床几乎均位于成矿带内(图2).但钴成矿区带范围巨大,如能缩小范围,可为钴矿勘查提供更加有意义的信息.钴地球化学异常形成受基性岩出露、次生富集和人为污染等因素影响,大部分钴异常都与成矿作用无关.因此,应将钴成矿带与钴异常结合,来预测钴成矿远景区.位于钴成矿带内、同时又无已知矿床产出的钴异常应受到关注.

异常(7)位于准格尔北缘—北天山成矿带,成矿带内还产出白石泉等一系列岩浆型钴矿床.异常(12)、(13)位于华北克拉通中段钴成矿带的,附近产出巨型金川铁镍硫化物型钴矿床和元石山钴矿床.异常(14)、(15)、(16)位于昆仑—西秦岭钴成矿带,异常外围产出煎茶岭钴矿床.异常区域化探扫面资料显示,上述异常在1:20万水系沉积物填图中具有较好的重现性,区域异常具有多级分带特征,其中异常(7)和异常(12)异常浓集中心钴含量高达 $(22\sim 26)\times 10^{-6}$, (谢学锦等, 2012). 上述6个异常区基性岩浆活动强烈,同时又位于已知钴成矿带内,显示出较好的岩浆型钴矿成矿地质条件. 综上所述认为上述异常具有寻找与基性、超基性岩有关的岩浆型钴矿床的潜力.

钴异常(17)、(21~24)位于华南钴成矿带,在异常外围产出井冲、普乐—横洞、七宝山、罗丹等多处热液型钴矿床.钴异常(33)位于华北克拉通北段东段钴成矿带,异常南部产出大横路、杉松岗等热液型钴矿床.区域化探扫面资料显示,上述异常在1:20万水系沉积物填图中具有较好重现性,特别是异常(33),区域异常多级分带明显,异常浓集中心钴含量超过 40×10^{-6} . 上述异常区内构造、岩浆及热液活动强烈,具有寻找热液型钴矿床的潜力.

通过对比若干极低密度和区域尺度钴异常,初步发现钴异常在两种密度填图中具有较好重现性,沉积物钴异常的用实例验证了沉积物钴数据具有分形特征,且标度不变性范围可能覆盖2~40 km, 这为极低密度钴地球化学填图提供了理论支撑.

4 结论

本文利用中国基准值计划汇水域沉积物深层样品,总结归纳中国钴地球化学异常分布及其成因,探讨钴异常与钴矿床的空间对应关系,获得如下结论:

(1)中国钴异常主要受(超)基性岩控制,形成的异常数量多、面积大,相关钴异常面积占全国88%(部分可能叠加了矿化作用).少数钴异常与矿化作用有关.个别钴异常由泥质岩出露、次生富集和人为污染等多种因素叠加形成.

(2)中国钴异常与岩浆型、热液型、风化型的空间相对位置指数分别为 $R=3.8$ 、 $R=3.1$ 和 $R=2.8$.与欧洲FOREGS计划结果高度一致.大多数热液型钴矿床位于异常或高值区内,而多数岩浆型钴矿

床位于异常以外.钴异常与钴矿床空间关系,可能受到地理景观和矿化特征的影响.

(3)根据钴成矿带和钴异常的空间分布,结合区内地质条件,认为钴异常(7)(12)、(13)(14)、(15)、(16)具有寻找岩浆型钴矿床的潜力,异常(17)、(21~24)、(33)具有寻找热液型钴矿床潜力.

(4)极低密度钴地球化学填图获得的钴异常能够指示(超)基性岩,反映某些热液型和风化型钴矿床的存在.对空白区的钴资源找矿勘查具有重要意义.

References

- Berger, V. I., Singer, D. A., Bliss, J. D., et al., 2011. Ni-Co Laterite Deposits of the World-Database and Grade and Tonnage Models. U. S. Geological Survey, Virginia, 1-3.
- Birke, M., Rauch, U., Stummeyer, J., 2015. How Robust are Geochemical Patterns? a Comparison of Low and High Sample Density Geochemical Mapping in Germany. *Journal of Geochemical Exploration*, 154(6): 105-128. <https://doi.org/10.1016/j.gexplo.2014.12.005>
- Bölviken, B., Kullerud, G., Loucks, R. R., 1990. Geochemical and Metallogenic Provinces: A Discussion Initiated by Results from Geochemical Mapping Across Northern Fennoscandia. *Journal of Geochemical Exploration*, 39(1/2): 49-90. [https://doi.org/10.1016/0375-6742\(90\)90069-m](https://doi.org/10.1016/0375-6742(90)90069-m)
- Bölviken, B., Stokke, P. R., Feder, J., et al., 1992. The Fractal Nature of Geochemical Landscapes. *Journal of Geochemical Exploration*, 43(2): 91-109. [https://doi.org/10.1016/0375-6742\(92\)90001-o](https://doi.org/10.1016/0375-6742(92)90001-o)
- Caritat, P. D., 2018. Continental-Scale Geochemical Surveys and Mineral Prospectivity: Comparison of a Trivariate and a Multivariate Approach. *Journal of Geochemical Exploration*, 188: 87-94. <https://doi.org/10.1016/j.gexplo.2018.01.014>
- Chao, T. T., Theobald, P. K., 1976. The Significance of Secondary Iron and Manganese Oxides in Geochemical Exploration. *Economic Geology*, 71(8): 1560-1569. <https://doi.org/10.2113/gsecongeo.71.8.1560>
- China Geological Survey, 2004. Geological Map of the People's Republic of China (1:2 500 000). Sino Maps Press, Beijing (in Chinese).
- Darnley, A. G., Bjorklund, A., Bolviken, B., et al., 1995. A Global Geochemical Database for Environmental and Resource Management: Final Report of IGCP Project 259. United Nations Educational, Scientific and Culture Organization, Paris, 37-45.

- Latunussa, C. E., Georgitzikis, K., Matos, C. T., et al., 2020. Study on the Review of the List of Critical Raw Materials - Critical Raw Materials Factsheets. In: European Commission, Critical Raw Materials Factsheets. 133—156. <https://doi.org/10.2873/92480>
- Feng, C. Y., Qi, F., Zhang, D. Q., et al., 2011. China's First Independent Cobalt Deposit and its Metallogenic Mechanism: Evidence from Fluid Inclusions and Isotopic Geochemistry. *Acta Geologica Sinica-English Edition*, 85(6): 1403—1418. <https://doi.org/10.1111/j.1755-6724.2011.00595.x>
- Feng, C. Y., Zhang, D. Q., 2002. Cobalt Mineral Resources in the World and Advance of the Research on Cobalt Deposits. *Geological Review*, 48(6): 627—633(in Chinese with English abstract).
- Feng, C. Y., Zhang, D. Q., Dang, X. Y., 2004. Cobalt Resources of China and Their Exploitation and Utilization. *Mineral Deposits*, 23(1): 93—100(in Chinese with English abstract).
- Fordyce, F. M., Green, P. M., Simpson, P. R., 1992. Simulation of Regional Geochemical Survey Maps at Variable Sample Density. *Journal of Geochemical Exploration*, 49(1/2): 161—175. [https://doi.org/10.1016/0375-6742\(93\)90043-1](https://doi.org/10.1016/0375-6742(93)90043-1)
- Gunn, G., 2013. Critical Metals Handbook. British Geological Survey, Nottingham, 123—132. <https://doi.org/10.1002/9781118755341>
- Hamilton, E. I., 1994. The Geochemistry of Cobalt. *Science of the Total Environment*, 150(1—3): 7—39. [https://doi.org/10.1016/0048-9697\(94\)90126-0](https://doi.org/10.1016/0048-9697(94)90126-0)
- Hawkes, H. E., Webb, J. S., 1962. Geochemistry in Mineral Exploration. *Soil Science*, 95(4): 283. <https://doi.org/10.1097/00010694-196304000-00016>
- Horn, S., Gunn, A. G., Petavratzi, E., et al., 2021. Cobalt Resources in Europe and the Potential for New Discoveries. *Ore Geology Reviews*, 130(3): 103915. <https://doi.org/10.1016/j.oregeorev.2020.103915>
- Knox-Robinson, C. M., Wyborn, L. A. I., 1997. Towards a Holistic Exploration Strategy: Using Geographic Information Systems as a Tool to Enhance Exploration. *Australian Journal of Earth Sciences*, 44(4): 453—463. <https://doi.org/10.1080/08120099708728326>
- Liu, D. S., 2021. Comparison of Geochemical Patterns from Different Sampling Density Geochemical Mapping in Altay, Xinjiang Province, China. *Journal of Geochemical Exploration*, 228(6): 106761. <https://doi.org/10.1016/j.gexplo.2021.106761>
- Liu, D. S., Wang, X. Q., Zhou, J., et al., 2020. Characteristics of China's Cobalt Geochemical Baselines and Their Influence Factors. *Acta Geosci Sinica*, 41(6): 807—817(in Chinese with English abstract).
- Lou, F., Ma, H. M., Liu, Y. Y., et al., 2011. Time-Space Distribution and Formation Mechanism of the Mesozoic Mafic Dikes in Southeast China. *Earth Science Frontiers*, 18(1): 15—23(in Chinese with English abstract).
- Luo, Z. J., Xia, M. F., Huang, W. Y., 2019. The Migration and Transformation of Cobalt in Soil-Plant System and Its Toxicity. *Asian Journal of Ecotoxicology*, 14(2): 81—90(in Chinese with English abstract).
- Ministry of Natural Resources, 2016. National Mineral Resources Planning (2016-2020). http://www.mnr.gov.cn/gk/ghjh/201811/t20181101_2324927.html(in Chinese).
- Salminen, R., Batista, M., Bidovec, M., et al., 2005. FOREGS Geochemical Atlas of Europe, Part I: Background Information, Geochemical Atlas of Europe. Geological Survey of Finland, Espoo.
- Schulz, K. J., DeYoung, J. H., Seal, R. R., et al., 2017. Critical Mineral Resources of the United States: Economic and Environmental Geology and Prospects for Future Supply. <https://pubs.er.usgs.gov/publication/pp1802>
- Shi, J. F., Xiang, Y. C., 2000. The Scale Invariance of Geochemical Anomalies and Wide-Spaced Geochemical Mapping. *Geology and Prospecting*, 36(1): 68—74 (in Chinese with English abstract).
- Tang, Z. L., 1996. The Main Mineralization Mechanism of Magma Sulfide Deposits in China. *Acta Geologica Sinica*, 70(3): 237—243(in Chinese with English abstract).
- Tessier, A., Campbell, P. G. C., Bisson, M., 1979. Sequential Extraction Procedure for the Speciation of Particulate Trace Metals. *Analytical Chemistry*, 51(7): 844—851. <https://doi.org/10.1021/ac50043a017>
- Wang, X. Q., Sun H. W., Chi, Q. H., et al., 2005. Reproducibility and Comparison of Geochemical Anomalies. *Geology in China*, 32(1): 135—140(in Chinese with English abstract).
- Wang, X. Q., Chi, Q. H., Zhou, J., et al., 2015. Reprint of “China Geochemical Baselines: Sampling Methodology”. *Journal of Geochemical Exploration*, 154(1): 17—31. <https://doi.org/10.1016/j.gexplo.2015.04.005>
- Wang, J. G., 1995. Soil Chemistry of Plant Nutrition. Beijing Agricultural University Press, Beijing, 183(in Chinese).
- Wang, Y., 2020. Genetic Classification, Distribution and Ore Genesis of Major PGE, Co and Cr Deposits in China: A Critical Review. *Chinese Science Bulletin*, 65(33): 3825—3838(in Chinese with English abstract).
- Wang, H., Feng, C. Y., Zhang, M. Y., 2019. Characteristics and Exploration and Research Progress of Global Cobalt

- Deposits. *Mineral Deposits*, 38(4): 739–750(in Chinese with English abstract).
- Xie, X. J., Ren, T. X., Sun, H. Z., 2012. Geochemical Atlas of China. The Geological Publishing House, Beijing (in Chinese with English abstract).
- Yan, T. T., Wang, X. Q., Liu, D. S., et al., 2021. Continental-Scale Spatial Distribution of Chromium (Cr) in China and its Relationship with Ultramafic-Mafic Rocks and Ophiolitic Chromite Deposit. *Applied Geochemistry*, 126(4): 104896. <https://doi.org/10.1016/j.apgeochem.2021.104896>
- Zhang, Q., Bai, J. F., Wang Y., 2012. Analytical Scheme and Quality Monitoring System for China Geochemical Baseline. *Earth Science Frontiers*, 19(3): 33–42(in Chinese with English abstract).
- Zhang, H. R., Hou, Z. Q., Yang, Z. M., et al., 2020. A New Division of Genetic Types of Cobalt Deposits: Implications for Tethyan Cobalt-Rich Belt. *Mineral Deposits*, 39(3): 501–510(in Chinese with English abstract).
- Zhao, J. X., Li, G. M., Qin, K. Z., et al., 2019. A Review of the Types and Ore Mechanism of the Cobalt Deposits. *Chinese Science Bulletin*, 64(24): 2484–2500(in Chinese with English abstract).
- Zhao, X. F., Li Z. K., Zhao S. R., et al., 2019. Early Creaceous Regional Scale Magmatic - Hydrothermal Metallogenic System at the Southern Margin of the North China Craton. *Earth Science*, 40(1): 52–68(in Chinese with English abstract).
- Zou, S., Zou, F., Ning, J., et al., 2017. A Stand-Alone Co Mineral Deposit in Northeastern Hunan Province, South China: Its Timing, Origin of Ore Fluids and Metal Co, and Geodynamic Setting. *Ore Geology Reviews*, 92: 42–60. <https://doi.org/10.1016/j.oregeorev.2017.11.008>
- 质论评, 48(6): 627–633.
- 丰成友, 张德全, 党兴彦, 2004. 中国钴资源及其开发利用概况. *矿床地质*, 23(1): 93–100.
- 刘东盛, 王学求, 周建, 等, 2020. 中国钴地球化学基准值特征及影响因素. *地球学报*, 41(6): 807–817.
- 娄峰, 马浩明, 刘延勇, 等, 2011. 中国东南部中生代基性岩脉时空分布与形成机理. *地学前缘*, 18(1): 15–23.
- 罗泽娇, 夏梦帆, 黄唯怡, 2019. 钴在土壤和植物系统中的迁移转化行为及其毒性. *生态毒理学报*, 14(2): 81–90.
- 施俊法, 向运川, 2000. 地球化学异常标度不变性与超低密度地球化学填图. *地质与勘探*, 36(1): 68–74.
- 汤中立, 1996. 中国岩浆硫化物矿床的主要成矿机制. *地质学报*, 70(3): 237–243.
- 王学求, 孙宏伟, 迟清华, 等, 2005. 地球化学异常再现性与可对比性. *中国地质*, 32(1): 135–140.
- 王敬国, 1995. 植物营养的土壤化学. 北京: 农业大学出版社, 183.
- 王焰, 2020. 我国铂族元素、钴和铬主要矿床类型的分布特征及成矿机制. *科学通报*, 65(33): 3825–3838.
- 王辉, 丰成友, 张明玉, 2019. 全球钴矿资源特征及勘查研究进展. *矿床地质*, 38(4): 739–750.
- 谢学锦, 任天祥, 孙焕振, 2012. 中国地球化学图集. 北京: 地质出版社, 43.
- 张勤, 白金峰, 王焯, 2012. 地壳全元素配套分析方案及分析质量监控系统. *地学前缘*, 19(3): 33–42.
- 张洪瑞, 侯增谦, 杨志明, 等, 2020. 钴矿床类型划分初探及其对特提斯钴矿带的指示意义. *矿床地质*, 39(3): 501–510.
- 赵俊兴, 李光明, 秦克章, 等, 2019. 富含钴矿床研究进展与问题分析. *科学通报*, 64(24): 2484–2500.
- 赵新福, 李占轲, 赵少瑞, 等, 2019. 华北克拉通南缘早白垩世区域大规模岩浆-热液成矿系统. *地球科学*, 44(1): 52–68.
- 中国地质调查局, 2004. 中华人民共和国地质图(1: 2 500 000). 北京: 中国地图出版社.
- 自然资源部, 2016. 全国矿产资源规划(2016–2020), 自然资源部. http://www.mnr.gov.cn/gk/ghjh/201811/t20181101_2324927.html

附中文参考文献

丰成友, 张德全, 2002. 世界钴矿资源及其研究进展述评. 地