

DOI: 10.16788/j.hddz.32-1865/P.2023.07.006

引文格式: 黄加忠, 杨明龙, 王晓龙, 白平雁. 2024. 四川省瓦岗地区水系沉积物地球化学特征及找矿方向[J]. 华东地质, 45(3): 332-344. (HUANG J Z, YANG M L, WANG X L, BAI P Y. 2024. Geochemical characteristics of stream sediments and prospecting directions in Wagang area of Sichuan Province[J]. East China Geology, 45(3): 332-344.)

四川省瓦岗地区水系沉积物地球化学特征 及找矿方向

黄加忠^{1,2}, 杨明龙^{1,2}, 王晓龙¹, 白平雁¹

- (1. 中国地质调查局昆明自然资源综合调查中心, 云南 昆明 650000;
2. 自然资源部自然生态系统碳汇工程技术创新中心, 云南 昆明 650000)

摘要: 四川省瓦岗地区位于川西南—滇东北地区的结合部位, 所处的乌蒙山区是我国著名的扬子式铅锌矿带的核心区, 也是全国重要的磷成矿带, 具有较好的找矿潜力。文章通过开展瓦岗地区 1:5 万水系沉积物地球化学测量工作, 结合研究区地质背景, 对区内与优势矿种相关的 11 种元素(Pb、Zn、Ag、Cd、P、F、Mn、Au、As、Sb、Hg)的地球化学特征进行研究, 通过聚类分析和因子分析确定元素组合异常, 进而圈定成矿综合异常。结果表明: 区内磷、铅、锌元素异常高值点较多, 离散程度高, 异常高值与赋矿地层套合较好, 具有较大的成矿潜力; 主攻矿种为沉积型磷矿, 兼顾铅锌矿和锑矿, 其中磷矿主要产于震旦纪—寒武纪渔户村组中谊村段, 铅锌矿主要赋存于渔户村组上部; 区内共圈定 6 个综合异常, 可为下一步找矿工作提供依据。

关键词: 水系沉积物; 地球化学特征; 找矿方向; 瓦岗地区; 四川

中图分类号: P596; P618.3

文献标识码: A

文章编号: 2096-1871(2024)03-332-13

水系沉积物地球化学测量是一种以地质找矿为目标的工作方法(孙社良等, 2017; 谢学锦等, 2009; 唐志敏等, 2023), 适用于地形切割深、水系发育较好的中低山区和丘陵山区, 主要用于调查评价阶段。该方法通过系统采集水系沉积物样品并测定其中的元素含量, 研究元素的分布情况, 结合地质背景来分析成矿作用有关的地层、岩体或构造等的地球化学特征, 进而圈定地球化学异常, 可迅速、有效地缩小找矿靶区, 为后续地质找矿工作提供数据参考(王学求, 2013; 程银行等, 2024)。

乌蒙山区行政区划跨云南、贵州和四川三省, 是我国著名的扬子式铅锌矿带的核心区, 也是全国重要的磷成矿带。瓦岗地区处于乌蒙山区腹地, 位于川滇磷成矿带中部, 在早寒武世梅树村期为康滇古构造隆起带和川黔碳酸盐浅水台地之间的川滇潮坪海湾, 是磷矿沉积的有利场所(薛天星

等, 2011)。区内卡哈洛磷矿已探明磷矿资源储量达 12 285.10 万 t, 具有较好的寻找磷矿的前景(邓小林等, 2010)。另一方面, 研究区位于川西南—滇东北地区的结合部位(刘军省, 2020), 为中高山地貌, 沟谷深切, 水系发育, 是水系沉积物地球化学测量找矿的理想区域。但是, 由于山高坡陡, 通行不便, 区域性的矿产调查工作投入较少, 因此新发现的矿床也较少。本文通过在瓦岗地区开展 1:5 万水系沉积物地球化学测量工作, 利用聚类分析、因子分析等方法, 对区内水系沉积物中与优势矿种相关的 11 种元素的地球化学特征进行研究, 结合地质背景和元素组合规律, 圈定综合异常, 指出区内下一步的找矿方向, 对于邻区寻找类似矿床也具有较好的指示意义, 可为区域开展新一轮找矿突破战略行动提供地球化学数据支撑。

* 收稿日期: 2023-07-08 修订日期: 2023-10-25 责任编辑: 谭桂丽

基金项目: 中国地质调查局“乌蒙山岩溶石山区昭通—毕节地区区域地质调查(编号: DD20191012)”项目资助。

第一作者简介: 黄加忠, 1986 年生, 男, 工程师, 本科, 主要从事地球化学工作。Email: 496473164@qq.com。

通信作者简介: 杨明龙, 1988 年生, 男, 工程师, 本科, 主要从事矿产勘查工作。Email: 351008671@qq.com。

1 地质概况

瓦岗地区大地构造位置属于扬子陆块区之扬子陆块南部的碳酸盐台地,主要涉及威宁—昭通褶-冲带。

地层分区上,研究区属于华南地层大区扬子地层区之峨眉—昭通地层小区(图1(a)),出露地层由老到新依次为震旦系、寒武系、奥陶系、志留系、二叠系和三叠系(图1(b))。出露最广泛的地层为二叠系,主要包括晚二叠世宣威组,峨眉山玄武岩组和中二叠世茅口组、栖霞组、梁山组,岩性主要为峨眉山玄武岩、灰岩、页岩和粉砂岩;出露最古老的地层为震旦系,仅分布于研究区东北部,主要为震旦纪—寒武纪渔户村组和晚震旦世灯影组,岩性主要为白云岩。寒武系主要分布于瓦岗向斜两翼,自下而上依次划分为寒武纪—奥陶纪娄山关组,晚寒武世西王庙组、陡坡寺组,中寒武世龙王庙组、沧浪铺组和筇竹寺组,各地层组之间为整合接触,与下伏晚震旦世灯影组为整合接触,岩性主要为砂岩、粉砂岩、石英砂岩、泥岩和碳酸盐岩等(金灿海等,2019)。

区内断裂和褶皱较发育,断裂主要有比波断裂(F_1)、金阳断裂(F_2)、大岩洞断裂(F_3)和拉租断裂(F_4)。研究区东部构造线以NNW向为主,西部构造线以NNE向为主。褶皱主要有瓦岗向斜、卡哈洛向斜、立布觉向斜、瓦尼觉背斜和马切洛布向斜。出露的岩浆岩主要为峨眉山玄武岩组,规模较大,分布于研究区中部和东北部。

研究区属于扬子陆块西南缘的川滇黔成矿区(韩润生等,2022),以沉积型矿产为主,其次为火山岩型矿产。优势矿种为磷矿和铅锌矿,具有一定规模的有卡哈洛磷块岩矿,主要产于震旦纪—寒武纪渔户村组中谊村段。

2 样品采集与分析测试

2.1 样品采集

本次化探工作主要采用1:50 000水系沉积物测量方法,严格执行《DZ/T 0011—2015 地球化学普查规范》(中华人民共和国国土资源部,2015)要求。样品主要布设在一级水系中,确保每个采样单元(0.25 km^2)均有1个以上采样点控制。在

设计采样点沿水系上下20~30 m内进行多点取样,混合成1件组合样,主要在河床底部或河道岸边与水面接触的部位采集水系沉积物样品,样品介质为细砂或粉砂。瓦岗地区共采集正样1 633件,重复样40件,采样密度为 $4.08\text{ 个点}/\text{km}^2$ 。

2.2 分析测试

样品自然风干后,经粗加工过60目不锈钢筛,缩分成重量 $>150\text{ g}$ 的正样和副样,正样送至化验室分析。样品分析测试工作在中国地质调查局昆明自然资源综合调查中心分析测试实验室完成,分析指标包括Pb、Zn、Ag、Cd、P、F、Mn、Au、As、Sb、Hg等元素,分析设备主要有氟离子计、电感耦合等离子体质谱仪、原子荧光分光光度计、电感耦合等离子体发射光谱仪、X射线荧光光谱仪和发射光谱仪(表1)。所有元素的检出限均达到或超过规范要求,报出率 $>99\%$,异常抽查样合格率 $>98\%$ 。重复样合格率均在85%以上,说明分析结果可靠,可用于后续研究。

3 地球化学特征

3.1 元素地球化学参数特征

3.1.1 元素背景特征

研究区背景值为剔除特异值后的平均值,富集系数为该元素背景值与区域(或全国)背景值的比值,体现了元素在区内的丰缺程度。相对于川滇黔成矿区和全国,区内各元素含量平均值(X_2)均大于川滇黔成矿区和全国的水系沉积物背景值(史长义等,2016)(表2)。

由表2可知,Hg、Cd含量高于川滇黔成矿区背景值2倍以上,其余元素含量高于川滇黔成矿区背景值1倍以上;Hg、Cd含量高于全国背景值4倍以上,P、Ag、Au含量高于全国背景值2倍以上,Sb、Pb、Mn、Zn、As、F含量高于全国背景值1倍以上。以上表明,这些元素相对于川滇黔成矿区和全国水系沉积物的背景值,均发生了不同程度的富集。

变化系数 C_v 是标准差与平均值的比值,体现了数据的变异程度,其值越大反映元素在地质活动中不均匀分配越强烈,找矿潜力也越大(戴慧敏等,2012)。研究区Hg、Sb、Pb、Zn、Cd、As、P、Ag、F的变化系数均 >1 ,为强变异。其中Hg的

表 1 样品分析方法配套方案
Table 1 Analysis parameters and methods

分析元素	仪器设备	规范检出限 μg/g	实测检出限 μg/g
F	氟离子计	100	72
Au	电感耦合等离子体 质谱仪	0.000 3	0.000 14
As	原子荧光分光 光度计	1	0.9
Sb	原子荧光分光 光度计	0.2	0.15
Hg	原子荧光分光 光度计	0.000 5	0.000 5
P	电感耦合等离子体 发射光谱仪	100	5
Mn	电感耦合等离子体 发射光谱仪	30	30
Cd	电感耦合等离子体 质谱仪	0.1	0.04
Pb	X射线荧光光谱仪	5	3
Zn	X射线荧光光谱仪	15	2
Ag	发射光谱仪	0.03	0.008

变化系数最大, Sb 和 Pb 的变化系数次之, 表明这些元素数据波动剧烈, 元素活动性较强, 在成矿有利部位极易富集成矿。Au、Mn 变化系数为 0.1~1.0, 属于中等变异, 元素活动性较差。

表 2 瓦岗地区地球化学特征参数
Table 2 Geochemical characteristic parameters in Wagang area

元素		Ag	As	Au	Cd	F	Hg	Mn	P	Pb	Sb	Zn
原始数据	M ₁	0.12	8.80	2.00	0.41	810	0.11	972.50	1 318	35.10	0.92	99.50
	S ₁	0.35	39.47	2.19	2.05	1 062.10	2.38	916.85	5 338	337.74	21.41	590.94
	Cv ₁	1.85	3.08	0.84	3.49	1.04	10.44	0.77	2.15	6.04	8.72	4.71
	max	9.80	1 482	38.60	78.30	13 548	91.90	10 399	68 779	10 310	828	23 386
	min	0.01	0.50	0.02	0.025	149	0.006	53.70	50	2.50	0.10	7.50
剔除离群数据	X ₁	0.19	12.83	2.59	0.59	1 019	0.23	1 195.48	2 485	55.93	2.46	125.48
	M ₂	0.11	8.46	1.90	0.39	762	0.10	933	1 235.50	34.10	0.88	98.55
	S ₂	0.09	5.78	1.26	0.26	412.28	0.09	512.09	760.17	17.62	0.67	36.35
	Cv ₂	0.61	0.58	0.57	0.59	0.51	0.72	0.50	0.55	0.46	0.64	0.36
	X ₂	0.14	9.91	2.22	0.45	814	0.13	1 030.79	1 390	38.13	1.05	101.35
川滇黔成矿区背景值		0.078	6.40	1.50	0.20	506	0.041	945.44	775.75	24.64	0.63	88.40
全国背景值		0.069	8.00	1.10	0.11	460	0.027	622	535	22	0.60	65
富集系数K ₁		1.79	1.55	1.48	2.25	1.61	3.17	1.09	1.79	1.55	1.67	1.15
富集系数K ₂		2.03	1.24	2.02	4.09	1.77	4.81	1.66	2.60	1.73	1.75	1.56

注: 除Au含量单位为10⁻⁹外, 其余元素含量单位为10⁻⁶, M为中位数, 研究区背景值为剔除特异值后的平均值(X₂), 变化系数(Cv)为标准离差(S)与平均值(X)的比值, 富集系数K₁为研究区背景值(X₂)与川滇黔成矿区水系沉积物背景值的比值, 富集系数K₂为研究区背景值(X₂)与全国水系沉积物背景值的比值, N=1 633; 川滇黔成矿区和全国背景值引自文献(史长义等, 2016)。

由变化系数解释分异程度图(图 2)可知: 区内 Hg、Sb、Pb、Zn 的数据波动剧烈, 分异程度强, 成矿潜力巨大, 表明在某种地质作用下使其在局部地段富集或分散所引起; Cd、As、P、Ag 在研究区内数据波动性较强, 分异程度中等, 有一定的成矿潜力; F、Au、Mn 在研究区内数据波动性较弱, 分异程度较弱, 成矿可能性较小。

3.1.2 各地层元素含量对比

用逐步剔除迭代法, 剔除特异值后求得元素在各地层的平均含量(表 3)。

将全区各地层样品元素含量进行对比分析,

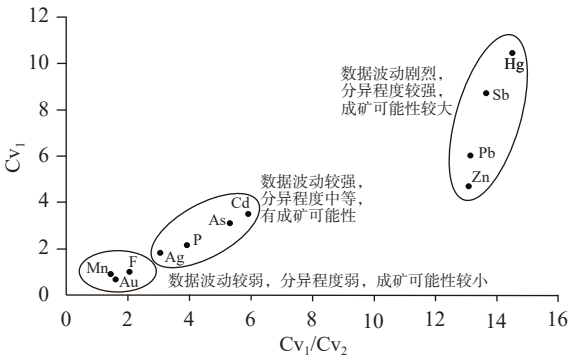


图2 变化系数解释分异程度图(戴慧敏等, 2012)

Fig. 2 Differentiation degree explanation from variation coefficients(Dai et al., 2012)

表 3 各地层元素平均含量统计结果
Table 3 Background value of different elements in different geological units

元素	震旦系 (N=126)	寒武系 (N=311)	奥陶系 (N=170)	志留系 (N=328)	二叠系 (N=482)	三叠系 (N=216)	全区 (N=1 633)
Ag	0.27	0.23	0.13	0.11	0.13	0.09	0.14
As	21.44	15.06	12.01	9.57	7.32	6.03	9.91
Au	1.32	1.65	2.14	2.46	3.03	1.58	2.22
Cd	0.61	0.47	0.51	0.53	0.37	0.28	0.45
F	1 562.19	1 231.98	985.45	916.34	479.66	548.98	814.11
Hg	0.20	0.12	0.09	0.09	0.17	0.11	0.13
Mn	1 171.45	963.31	1 173.69	989.68	1 151.83	926.39	1 030.79
P	4 753.96	1 453.05	969.22	1 151.80	1 709.09	1 153.93	1 390.00
Pb	40.53	39.32	41.25	36.78	38.53	34.44	38.13
Sb	4.94	1.49	1.11	0.91	0.84	0.70	1.05
Zn	96.61	88.92	97.17	106.64	111.88	94.31	101.35

注：除Au含量单位为 10^{-9} 外，其余元素含量单位为 10^{-6} 。

得到了不同地层水系沉积物元素相对丰度图(图3)。与其他地层相比,Ag、As、F、P、Sb的平均含量在震旦系中较高,说明这些元素在震旦系中有较大的成矿潜力,这与震旦系中碳酸盐岩建造、含石膏的镁质碳酸盐岩建造和含磷层位有关,其中Ag、As、Sb是热水沉积的标识元素(黄彬等,2013)。三叠系中各元素相对全区普遍贫化,成矿潜力较低。奥陶系、志留系中各元素含量与全区相对持平,二叠系中Au含量相对较高。

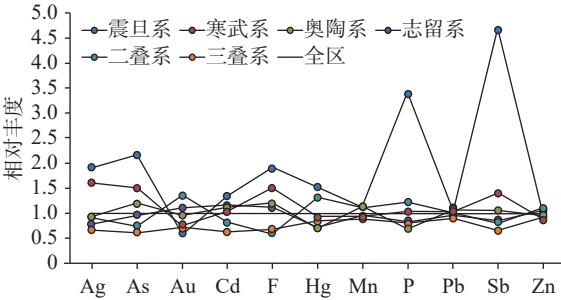


图3 不同地层水系沉积物元素相对丰度图
Fig. 3 Relative abundance of elements in stream sediments from different geological units

3.2 异常的圈定

异常下限的确定方法采用累积频率法。以原始数据累积频率 90% 的值为基础,经人为调试后确定区内各元素的水系沉积物异常下限值。以 1 倍、2 倍、4 倍异常下限值分别划分异常浓度外带、中带、内带,圈定单元元素异常图。

本文利用 11 种元素圈定了 257 个单元元素异

常(表4)。异常显示最好的元素为 P、Sb, 主要分布在研究区东北部依罗阿莫—元宝山—岩脚乡一带,具有异常面积大、强度高以及内、中、外三浓度带分带明显的特点。其中 P 异常 11 个,浓集中心明显,异常最大值为 $68\,779 \times 10^{-6}$,单个异常规模较大,异常中心与区域磷矿赋矿层位渔户村组位置相吻合,与区内已知的卡哈洛磷矿吻合程度较高(邓小林等,2010),对此类矿床具有较好的指示意义。Sb 异常 17 个,浓集中心明显,异常最大值为 828×10^{-6} ,具有较好的寻找锑矿的前景。异常显示较好的元素为 Ag、As、F、Hg、Zn,异常强度中等,多为外、中浓度分带。

表 4 单元元素异常统计表
Table 4 Statistics of single-element exception

元素	下限值	异常数量/个	一级浓/度分带	二级浓/度分带	三级浓/度分带	异常面积/km ²
Ag	0.35	19	5	8	6	37.67
As	25	16	5	7	4	24.39
Au	4.5	26	6	18	2	29.72
Cd	1	23	10	7	6	29.02
F	2 000	14	7	3	4	27.79
Hg	0.28	33	18	8	7	34.84
Mn	2 000	34	15	15	4	33.52
P	6 000	11	2	3	6	28.27
Pb	75	25	14	5	6	24.06
Sb	5	17	4	2	11	27.72
Zn	150	39	26	8	5	30.70

注：除Au含量单位为 10^{-9} 外，其余元素含量单位为 10^{-6} ，N=1 633。

3.3 元素组合特征

3.3.1 R 型聚类分析

选择同类元素确定成矿指示元素组合,相关系数为 0.7 时,区内 11 种元素可分成 4 类(图 4)。

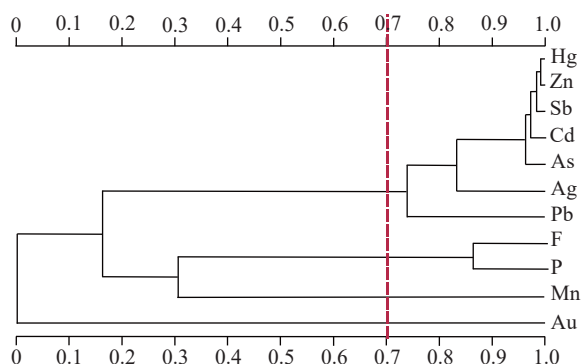


图4 聚类分析谱系图

Fig. 4 Cluster analysis diagram of elements from stream sediments

(1)第一大类为 Hg-Zn-Sb-Cd-As-Ag-Pb, 成矿作用主要为中-低温热液活动, 该类元素又分成 2 个亚类: 第一亚类为 Pb-Zn-Ag, 为中低温成矿带元素组合^[13]; 第二亚类为 As-Sb-Hg-Cd, 为低温成矿带元素组合。

(2)第二大类为 P-F, 与化学沉积和生物沉积有关, 主要体现为区内震旦系、寒武系的含磷生物碎屑沉积。

(3)第三大类为 Mn, 具有独立性, 反映其成矿潜力不大。

(4)第四大类为 Au, 与区内二叠系峨眉山玄武岩关系密切, 具有独立性。玄武岩形成过程中为金矿体提供了原始矿源层(吴治君等, 2020)。在凝灰质、黏土质及有机质的吸附作用下, Au 在玄武岩内部及附近初步富集, 形成背景值相对较高的原始含金矿源层建造。

3.3.2 因子分析

对区内 11 种元素分析结果进行因子分析, 经正交旋转后获得全部特征值及累积百分比(表 5)。选取初始特征值 > 1 的因子作分析, 可得到 3 个因子, 累积方差解释率为 85.17%。以因子载荷值绝对值 > 0.4 作为该因子的主要载荷元素, 得出各因子元素组合(表 6)。

(1)F1 因子组合。该组合包括 As、Sb、Hg、Zn、Pb、Cd、Ag, 为一套热液成矿元素组合, 各元

素间相关性较好, 方差解释率为 56.46%, 代表的信息较丰富, 是研究区的重要因子。

(2)F2 因子组合。该组合包括 P、F、Mn, 方差解释率为 18.66%。P、F、Mn 的富集可能与凝灰岩、磷块岩等有关, 主要反映了与含磷生物碎屑有关的沉积环境。

(3)F3 因子组合。该组合包括 Au、Mn, 方差解释率为 10.05%, 倾向于在峨眉山玄武岩分布区及外围富集, 与基性岩浆喷发期后的热液叠加有关(王旭辉, 2009; 写熹等, 2022)。

表 5 因子分析特征参数统计结果

Table 5 Characteristic parameters of factor analyses

成分	特征值	方差解释率/%	累积方差解释率/%
F1	6.21	56.46	56.46
F2	2.05	18.66	75.12
F3	1.11	10.05	85.17
F4	0.71	6.41	91.58
F5	0.48	4.33	95.91
F6	0.24	2.18	98.09
F7	0.13	1.22	99.31
F8	0.04	0.37	99.69
F9	0.02	0.14	99.83
F10	0.01	0.12	99.94
F11	0.01	0.06	100

表 6 因子载荷系数表

Table 6 Table of factor loading coefficients

元素	因子载荷系数			公因子方差
	F1	F2	F3	
F	0.19	0.91	-0.12	0.88
Au	0.06	-0.22	0.85	0.78
As	0.99	0.01	-0.02	0.98
Sb	0.98	-0.08	-0.04	0.97
Hg	0.97	-0.15	-0.03	0.97
P	0.19	0.92	-0.01	0.88
Mn	0.082	0.49	0.60	0.62
Zn	0.99	-0.15	-0.01	0.96
Pb	0.78	0.015	-0.02	0.60
Cd	0.96	-0.12	-0.01	0.94
Ag	0.88	0.112	0.03	0.79

3.3.3 元素组合分析

综合 R 型聚类分析和因子分析结果, 结合元素组合规律和研究区地质背景, 将研究区内 11 种元素分为 4 类组合。

(1)Sb-As-Hg。在聚类分析中为第一大类第二亚类, 各元素相关系数达 0.97 以上, 相关程度较高。在因子分析中为 F1 因子的一部分, 系低温成矿元素组合, 异常多集中分布在断层附近。该组合主要与断层及局部岩浆活动有关, 是找寻锑矿、汞矿的重要指示组合, 其中 Sb 为内、中、外三带异常, As、Hg 多数为外、中两带异常, 浓集中心明显, 有富集成矿的可能性。

(2)Pb-Zn-Cd-Ag。在聚类分析中为第一大类第一亚类, 各元素相关系数达 0.75 以上, 相关程度高。在因子分析中为 F1 因子的一部分, 系亲硫成矿元素, 是一套中低温成矿元素组合。各单元异常仅有外、中两带异常, 组合异常多分布于构造发育部位, 受构造控制明显。

(3)P-F。在聚类分析中为第二大类, 因子分析中为 F2 因子。主成矿元素为 P, P 和 F 异常分布特征相似, 具有规模大、强度高、浓集中心明显等特点。该组合元素含量的高值区与震旦系、寒武系套合较好, 指示该组元素在震旦系、寒武系富集。

(4)Au-Mn。在聚类分析中为第三大类, 因子分析中为 F3 因子。主成矿元素为 Au, 迁移、富集规律明显异于其他元素, 主要分布于二叠纪峨眉山玄武岩及其接触带附近, 受地层影响较大。

3.4 重要异常解释推断与评价

根据单元素异常、组合异常和矿化点信息, 共圈定 6 个成矿综合异常(图 5、表 7)。其中甲类异常 1 个, 乙类异常 4 个, 丙类异常 1 个。本文选择排序靠前的卡哈洛 HS-2-甲₁ 磷锑氟银异常和银厂沟 HS-3-乙₁ 铅锌银磷异常进行解释及推断。

3.4.1 卡哈洛 HS-2-甲₁ 磷锑氟银异常

该异常位于瓦岗地区东北角卡哈洛乡北部, 呈 NNW 向带状展布(图 6), 异常面积 21.38 km², 北部不封闭, 推测可能向北延伸至研究区外的一定区域。含 P、Sb、Ag、F 等 4 种单元素异常(表 8), 4 种元素浓集中心套合较好。P、Sb 均具有内带、中带、外带异常显示, 异常浓集中心明显, 面积广, 规模大, 异常极值较高。出露的地层为震旦纪灯

影组、渔户村组和寒武纪筇竹寺组、沧浪铺组。褶皱主要为 NW 向立布觉向斜和近 SN 向卡哈洛向斜, 断层为近 SN 向拉租断层及其次级断层。异常受含矿地层和断裂控制明显, 具有较好的磷矿找矿前景。

(1)异常查证。以追索法对异常进行踏勘检查, 在异常高值区的震旦纪—寒武纪渔户村组中发现了多种含磷矿石(图 7), 主要赋矿层位为震旦纪—寒武纪渔户村组中谊村段(金灿海等, 2019), 岩性主要为黑色中厚层-块状磷块岩, 条带状构造, 厚数米至数十米。沿走向厚度及品位均较稳定, 上顶及下顶底板沿走向可变为含胶磷矿条带的含磷白云岩。磷块岩呈中-厚层状, 水平条带状构造明显, 碎屑粒状结构, 条带由深灰色、黑色的胶磷矿与浅灰白色的含磷白云岩相间而成, 单层厚 0.5~6 cm, 个别单层厚 10 cm。异常南部分布有卡哈洛大型磷矿床, 推测为矿致异常。

(2)异常成因。研究区磷成矿作用与早寒武世梅树村期磷块岩、碳酸盐岩建造沉积有关, 矿床类型为沉积型磷矿, 具有层位稳定、质量优、规模大的特点。早寒武世梅树村期, 瓦岗地区处于康滇古构造隆起带和川黔碳酸盐浅水台地之间由 SN 向古断裂控制的相对坳陷带(川滇潮坪海湾)南部之次一级 EW 向坳陷(东川—会泽海湾)的西部, 半封闭的海湾环境为磷块岩沉积提供了极为有利的古地理环境和聚磷场所(邓小林等, 2010; 金灿海等, 2019; 刘军省, 2020)。

3.4.2 银厂沟 HS-3-乙₁ 铅锌银磷异常

该异常位于瓦岗地区东部卡哈洛乡以南大岩洞乡—白马岩一线, 呈 SN 向不规则条带状展布(图 8), 异常面积 16.76 km², 含 P、Pb、Zn、Sb、Ag 等 7 种单元素异常(表 9), 异常区中东部分布元宝山银厂沟铅锌矿。其中 P、Sb、F 具有内带、中带、外带异常, 异常浓集中心明显, 套合较好, 面积较大, 异常极值较高。Pb、Zn、Ag、As 具有中带、外带异常, 其中 Pb、Zn 异常规模大, 异常峰值高。异常区内褶皱、断层发育, 异常形态明显受大岩洞断裂和拉租断裂控制。异常东南部已发现元宝山银厂沟铅锌矿, 有较好的磷矿、铅锌矿找矿潜力。

(1)异常查证。由于异常区工作程度较高, 因

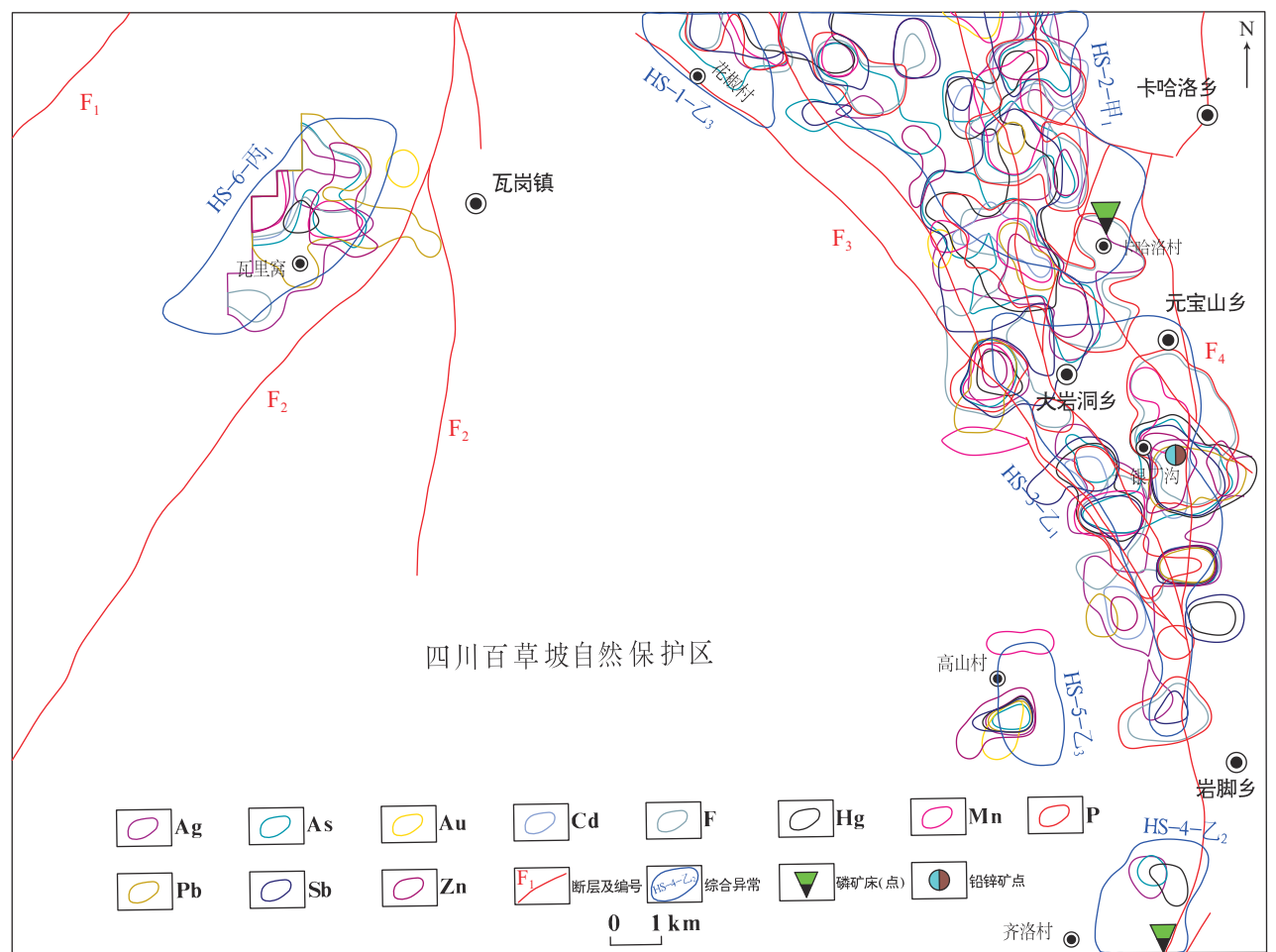


图5 瓦岗地区综合异常图

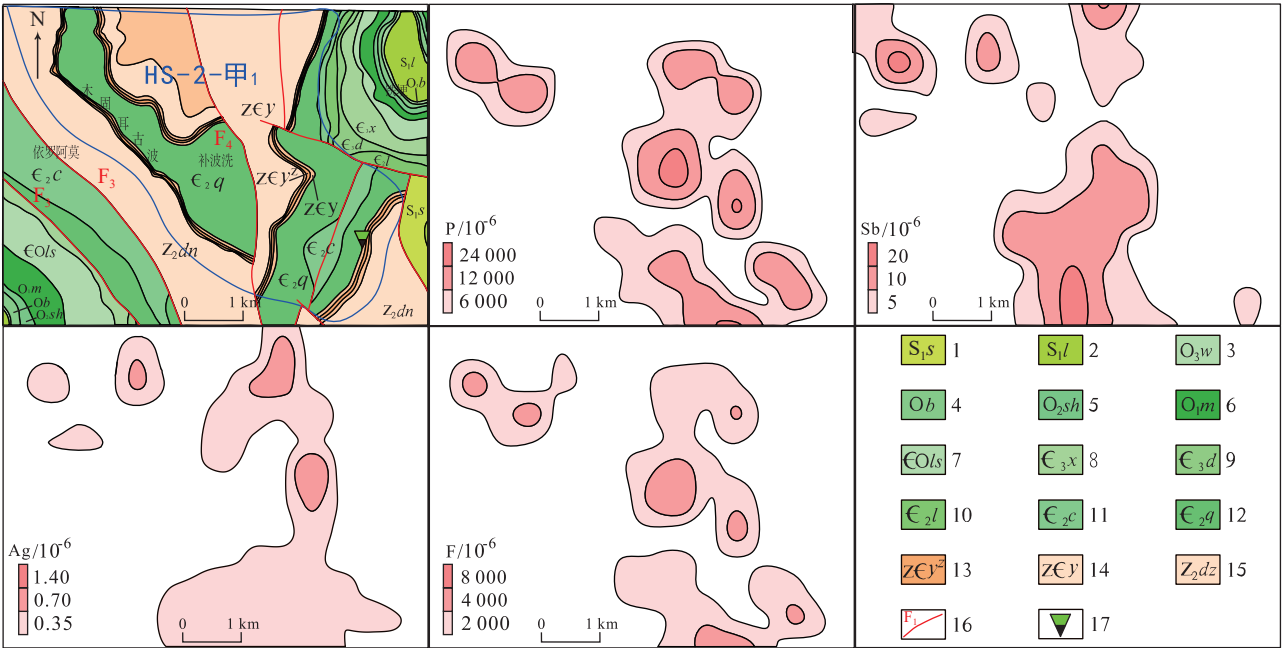
Fig. 5 Distribution of geochemical anomalies in Wagang area

表 7 瓦岗地区综合异常汇总表

Table 7 Summary of consolidated anomalies in Wagang area

编号	名称	分类	主元素	其他元素	面积/km ²	已知矿床(点)	异常原因
HS-1	花椒村	乙 ₃	P	Ag	3.48		沉积型磷矿及后期热液活动, 受构造控制
HS-2	卡哈洛	甲 ₁	P、Sb	Ag、F	21.38	大型磷矿床	生物-生物化学聚磷成因的海相磷块岩矿床, 为矿致异常
HS-3	银厂沟	乙 ₁	Pb、Zn	P、Ag、Sb	16.76	铅锌矿化点	沉积型磷矿及后期热液活动, 为矿致异常
HS-4	齐洛村	乙 ₂	P	F、Mn	3.75	磷矿化点	沉积型磷矿及后期热液活动
HS-5	高山村	乙 ₃	Pb	Zn、Ag	2.57		中低温热液活动, 铅锌矿主要赋矿层位为寒武纪—奥陶纪娄山关组
HS-6	瓦里窝	丙 ₁	Pb	Zn、Ag	9.34		中低温热液活动, 铅锌矿主要赋矿层位为寒武纪—奥陶纪娄山关组

此本文以资料收集为主。研究表明, 区内元宝山银厂沟铅锌矿为燕山期中-低温热液矿床, 主要赋存于震旦纪—寒武纪渔户村组和晚震旦世灯影组上部, Pb、Zn 主要赋存于灰色-灰白色中-厚层状细晶白云岩夹白云质灰岩和泥质白云岩中, 伴生元素以 Ag、As 为主(陈大和吴林峰, 2012)。同时, 震旦纪—寒武纪渔户村组中谊村段为区域磷矿的主要赋矿层位。



1. 早志留世嘶风崖组; 2. 早志留世龙马溪组; 3. 晚奥陶世五峰组; 4. 晚奥陶世宝塔组; 5. 中奥陶世十字铺组; 6. 早奥陶世涪潭组; 7. 寒武纪—奥陶纪娄山关组; 8. 晚寒武世西王庙组; 9. 晚寒武世陡坡寺组; 10. 中寒武世龙王庙组; 11. 中寒武世沧浪铺组; 12. 中寒武世筇竹寺组; 13. 震旦纪—寒武纪渔户村组中谊村段; 14. 震旦纪—寒武纪渔户村组; 15. 晚震旦世灯影组; 16. 断层及编号; 17. 磷矿床

图6 卡哈洛 HS-2-甲₁ 磷锑氟银异常剖析图

Fig. 6 Characteristics of HS-2 comprehensive anomaly in Kahaluo area

表 8 卡哈洛 HS-2-甲₁ 磷锑氟银单元素异常参数

Table 8 Statistics of single-element exception in HS-2 comprehensive anomaly

异常元素	平均值/ 10^{-6}	衬度	面积/ km^2	峰值/ 10^{-6}	规模	异常下限/ 10^{-6}	浓度分带
P	8 126.78	1.35	10.66	60 386	14.44	6 000	外、中、内
Sb	7.30	1.46	14.59	50.2	21.29	5	外、中、内
F	2 125.50	1.06	13.24	11 472	14.07	2 000	外、中
Ag	0.38	1.08	7.92	2.2	8.56	0.35	外、中

注：N=86。

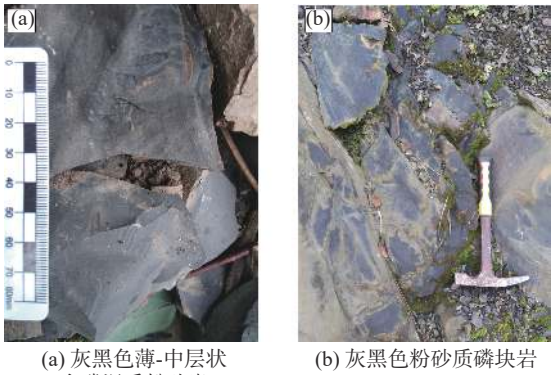
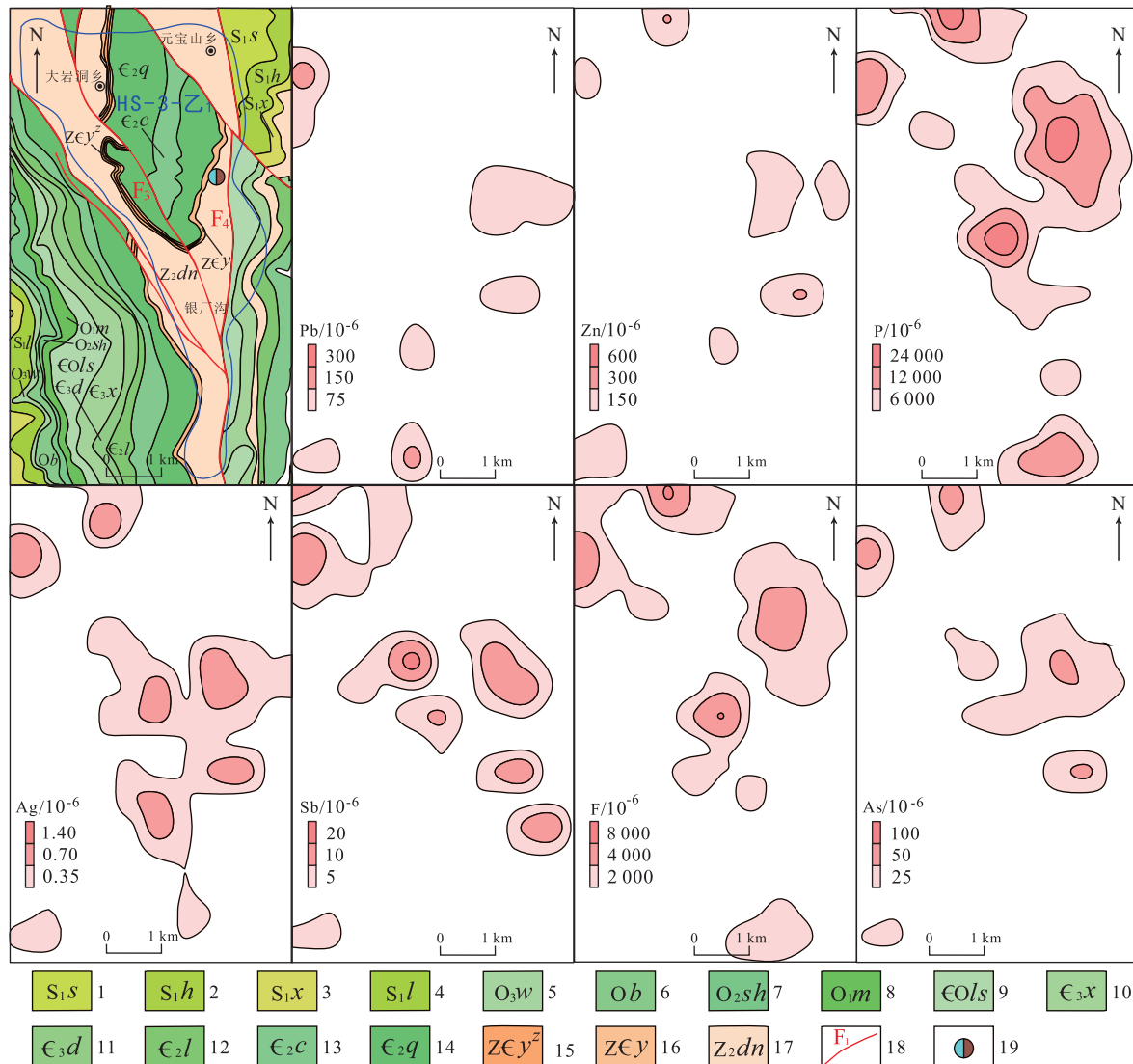


图7 卡哈洛地区含磷矿物野外照片
Fig. 7 The photos of phosphorous mineral in the outcrops of Kahaluo

(2)异常成因。区内铅锌矿主要赋存于震旦纪灯影组碳酸盐岩中,严格受层位和构造控制。下震旦统及基底地层的火山活动富集了大量的铅锌物质,形成该区初始地球化学块体,为后期元素向上演化提供了物质基础。震旦纪灯影期,康滇古陆风化淋滤形成的 Pb、Zn 向震旦纪盆地富集,同时海底热水沉积作用带出了基底地层中的 Pb、Zn,为铅锌矿床成矿提供了部分物源(陈大和吴林峰,2012; 张建明,2021)。构造为矿(化)体的运移提供了空间和通道。P 主要赋存于震旦纪—寒武纪渔户村组中谊村段地层中,与研究区的古沉积环境有关。



1. 早志留世嘶风崖组; 2. 早志留世黄葛溪组; 3. 早志留世新滩组; 4. 早志留世龙马溪组; 5. 晚奥陶世五峰组; 6. 晚奥陶世宝塔组; 7. 中奥陶世十字铺组; 8. 早奥陶世湄潭组; 9. 寒武纪—奥陶纪娄山关组; 10. 晚寒武世西王庙组; 11. 晚寒武世陡坡寺组; 12. 中寒武世龙王庙组; 13. 中寒武世沧浪铺组; 14. 中寒武世第竹寺组; 15. 震旦纪—寒武纪渔户村组中谊村段; 16. 震旦纪—寒武纪渔户村组; 17. 晚震旦世灯影组; 18. 断层及编号; 19. 铅锌矿点

图8 银厂沟 HS-3-乙₁ 铅锌银磷异常异常剖析图

Fig. 8 Characteristics of HS-3 comprehensive anomaly in Yinchanggou area

表9 银厂沟 HS-3-乙₁ 铅锌银磷单元元素异常参数表

Table 9 Statistics of single-element exception in HS-3 comprehensive anomaly

异常元素	平均值/ 10^{-6}	衬度	面积/ km^2	峰值/ 10^{-6}	规模	异常下限/ 10^{-6}	浓度分带
Pb	357.91	4.77	5.29	10 310	25.24	75	外、中
Zn	500.49	3.34	5.89	23 386	19.65	150	外、中
P	8 849	1.47	16.72	44 408	24.66	6 000	外、中、内
Ag	0.56	1.59	20.43	9.8	32.55	0.35	外、中
Sb	18.44	3.69	15.35	828	56.61	5	外、中、内
F	2 290	1.15	12.32	8 769	14.11	2 000	外、中、内
As	49.34	1.97	8.15	1 482	16.09	25	外、中

注: N=64。

4 找矿方向

根据元素组合、成矿综合异常和已知矿点信息,对比不同地层单元的元素含量,认为研究区主攻矿种应以沉积型磷矿为主,兼顾热液型铅锌多金属矿,这些优势矿种主要分布于瓦岗地区东北部卡哈洛—大岩洞乡附近。其中,磷矿主要赋存于震旦纪—寒武纪渔户村组中谊村段,含矿岩性为黑色中厚层-块状磷块岩,受构造控制明显,主要呈 SN 向不规则带状展布,可在卡哈洛磷矿外围震旦纪—寒武纪渔户村组中谊村段继续扩大磷矿勘查工作。铅锌矿主要赋存于渔户村组上部,为燕山期中-低温热液矿床,含矿岩性为重晶石脉及其两侧的白云岩,呈 SN 向不规则条带状展布。

5 结论

(1)瓦岗地区 Pb、Zn、Ag、Cd、P、F、Mn、Au、As、Sb、Hg 等 11 种元素的背景值均高于全国水系沉积物的背景值。Ag、Cd、P、Hg 的变化系数及富集系数均相对较高,指示这些元素在研究区内具有较好的找矿潜力。

(2)综合 R 型聚类分析和因子分析结果,结合元素组合规律和地质背景,将瓦岗地区元素分成 4 类组合:代表低温成矿带元素的 Sb-As-Hg 组合、代表中低温成矿带元素的 Pb-Zn-Cd-Ag 组合、代表化学沉积和生物沉积的 P-F 组合以及与二叠系峨眉山玄武岩关系密切的 Au-Mn 组合。

(3)相比其他地层,Ag、As、Cd、F、Hg、P、Sb 在震旦系中的平均含量较高,Mn、Pb 在奥陶系中的平均含量较高,Au、Zn 在二叠系中的平均含量较高。

(4)圈定了 6 个重要异常区,其中卡哈洛—大岩洞乡一带具有较好的找矿前景,可以沿卡哈洛磷矿外围震旦纪—寒武纪渔户村组中谊村段扩大磷矿勘查工作,主攻矿种为沉积型磷矿,兼顾铅锌矿和铋矿。

References

CHEN D, WU L F. 2012. Distribution and metallogeny of Pb-Zn deposits in the Sichuan-Yunnan-Guizhou border

region[J]. *Acta Geologica Sichuan*, 32(3): 304-308 (in Chinese with English abstract).

CHENG Y H, JIN R S, CUNEY M, PETROV V A, MIAO P S. 2024. The strata constraint on large scale sandstone-type uranium mineralization in Meso- Cenozoic basins, northern China[J]. *Acta Geologica Sinica*, 98(7): 1953-1976. (in Chinese with English abstract).

DAI H M, DAI Y J, MA Z D, YANG Z F, GONG C D, SUN Z R. 2012. Geochemical characteristics of stream sediments and prospecting direction in the Chabaqi area of Da Hinggan Mts[J]. *Geoscience*, 26(5): 1043-1050 (in Chinese with English abstract).

DENG X L, JIN T, TIAN S P, JIANG X H, LIU J S, LI B J, ZHANG L, WEI X S, NIU G Z. 2010. Exploration report of phosphate rock in Kahaluo mining area, Leibo County, Sichuan Province[R]. Beijing: Geology Institute of China Chemical Geology and Mine Bureau, 1-50 (in Chinese).

HAN R S, WU P, ZHANG Y, HUANG Z L, WANG F, JIN Z G, ZHOU G M, SHI Z L, ZHANG C Q. 2022. New research progress in metallogenic theory for rich Zn-Pb-(Ag-Ge) deposits in the Sichuan-Yunnan-Guizhou Triangle (SYGT) area, southwestern Tethys[J]. *Acta Geologica Sinica*, 96(2): 554-573 (in Chinese with English abstract).

HUANG B, LI F L, ZHOU L Y, LIU R, ZHANG S. 2013. Geochemical characteristics and geological implication of the Sinian deposits in Yinshan, Western Zhejiang Province[J]. *Geological Science and Technology Information*, 32(4): 64-75 (in Chinese with English abstract).

JIN C H, REN G M, ZHANG Y, GUO Y, YANG B, LIU J Q, PANG W H, ZHOU B G, WANG Z Z, CUI X L, DENG M, ZHANG J H. 2019. The report of regional geological survey in the Wumeng Mountains[R]. Chengdu: Chengdu Center, China Geological Survey, 30-50 (in Chinese).

LIU J X. 2020. Study on hydrogeology and mining conditions of Karhalo phosphorus mine in Leibo County[J]. *Geology of Chemical Minerals*, 42(3): 257-263 (in Chinese with English abstract).

MINISTRY OF LAND AND RESOURCES OF THE PEOPLE'S REPUBLIC OF CHINA. 2015. DZ/T 0011-2015 Specification of geochemical reconnaissance survey (1: 50 000)[S]. Beijing: Geology Press, 1-35 (in Chinese).

SHI C Y, LIANG M, FENG B. 2016. Average background values of 39 chemical elements in stream sediments of China[J]. *Earth Science*, 41(2): 234-251 (in Chinese with English abstract).

SUN S L, CHEN S H, LI Y M, YANG X H, ZHU C J, NIU J Z, ZENG F M. 2017. Application of soil geochemical survey

- in exploration of the Liangkeng Mo-W ore district in north-eastern Jiangxi Province[J]. *East China Geology*, 38(4): 279-287 (in Chinese with English abstract).
- TANG Z M, ZHANG X D, ZHANG M, ZHOU M, TIAN F J, WANG S X, MA Q S, WANG C, ZHANG J, NIU X N, ZONG L L, HUANG D L. 2023. Geochemical characteristics of soil elements in Xin'an River Basin: constraints from rock formation types[J]. *East China Geology*, 44(2): 172-185. (in Chinese with English abstract).
- WANG X H. 2009. Sieving and evaluation of geochemical anomalies of stream sediments in Yixian sheet, Liaoning Province[D]. Changchun: Jilin University, 30-80 (in Chinese with English abstract).
- WANG X Q. 2013. Landmark events of exploration geochemistry in the past 80 years[J]. *Geology in China*, 40(1): 322-330 (in Chinese with English abstract).
- WU Z J, ZHAO M F, WANG X H. 2020. Discussion on the relationship between Sandaogou gold deposit and Emeishan basalt in southwestern Guizhou[J]. *West-China Exploration Engineering*, 32(9): 121-124 (in Chinese with English abstract).
- XIE X, BAI R Y, ZHAO H R. 2022. Geochemical characteristics of stream sediments and ore-prospecting in Qiaomuwan area, Anhui Province[J]. *East China Geology*, 43(2): 205-216 (in Chinese with English abstract).
- XIE X J, REN T X, XI X H, ZHANG L S. 2009. The implementation of the regional geochemistry-national reconnaissance program (RGNR) in China in the past thirty years[J]. *Acta Geoscientica Sinica*, 30(6): 700-716 (in Chinese with English abstract).
- XUE T X, XIONG X X, TIAN S P. 2011. Discussion on the principal phosphorite-concentrated districts and the resource potential in China[J]. *Geology of Chemical Minerals*, 33(1): 9-20 (in Chinese with English abstract).
- ZHANG J M, XIAO T, CHENG P S, WANG Z S, LI Z, DU D X. 2021. Geochemical characteristics of primary halo of Xiwan lead-zinc deposit, northeastern margin of Luzong Basin and its significance to orebody delineation[J]. *East China Geology*, 42(3): 350-358 (in Chinese with English abstract).
- 陈大, 吴林峰. 2012. 川滇黔相邻区铅锌矿床分布特征及成矿规律[J]. *四川地质学报*, 32(3): 304-308.
- 程银行, 金若时, CUNEY M, PETROV V A, 苗培森. 2024. 中国北方盆地大规模铀成矿作用: 地层篇[J]. *地质学报*, 98(7): 1953-1976.
- 戴慧敏, 代雅键, 马振东, 杨忠芳, 宫传东, 孙中任. 2012. 大兴安岭查巴奇地区水系沉积物地球化学特征及找矿方向[J]. *现代地质*, 26(5): 1043-1050.
- 邓小林, 金涛, 田升平, 江新华, 刘军省, 李博昀, 张亮, 魏祥松, 牛桂芝. 2010. 四川省雷波县卡哈洛矿区磷矿勘探报告[R]. 北京: 中化地质矿山总局地质研究院, 1-50.
- 韩润生, 吴鹏, 张艳, 黄智龙, 王峰, 金中国, 周高明, 石增龙, 张长青. 2022. 西南特提斯川滇黔成矿区富锕铅锌矿床成矿理论研究新进展[J]. *地质学报*, 96(2): 554-573.
- 黄彬, 李方林, 周乐尧, 刘荣, 张爽. 2013. 浙西银山震旦系沉积岩的地球化学特征及其地质意义[J]. *地质科技情报*, 32(4): 64-75.
- 金灿海, 任光明, 张珂, 郭阳, 杨斌, 刘建清, 庞维华, 周邦国, 王子正, 崔晓亮, 邓敏, 张景华. 2019. 乌蒙山区地质矿产综合调查二级项目成果报告[R]. 成都: 中国地质调查局成都地质调查中心, 30-50.
- 刘军省. 2020. 雷波县卡哈洛磷矿水文地质与开采条件研究[J]. *化工矿产地质*, 42(3): 257-263.
- 史长义, 梁萌, 冯斌. 2016. 中国水系沉积物 39 种元素系列背景值[J]. *地球科学*, 41(2): 234-251.
- 孙社良, 陈士海, 李永明, 杨细浩, 朱昌杰, 牛建忠, 曾凡森. 2017. 土壤地球化学测量在赣东北良坑钨钼矿区勘查中的应用[J]. *华东地质*, 38(4): 279-287.
- 唐志敏, 张晓东, 张明, 周墨, 田福金, 王尚晓, 马青山, 王冲, 张洁, 牛晓楠, 宗乐丽, 黄丁伶. 2023. 新安江流域土壤元素地球化学特征: 来自岩石建造类型的约束[J]. *华东地质*, 44(2): 172-185.
- 王旭辉. 2009. 辽宁省义县幅水系沉积物地球化学异常筛选及评价[D]. 长春: 吉林大学, 30-80.
- 王学求. 2013. 勘查地球化学 80 年来重大事件回顾[J]. *中国地质*, 40(1): 322-330.
- 吴治君, 赵明峰, 王小洪. 2020. 黔西南三道沟金矿与峨眉山玄武岩成矿关系初探[J]. *西部探矿工程*, 32(9): 121-124.
- 写熹, 白茹玉, 赵华荣. 2022. 安徽乔木湾地区水系沉积物地球化学特征及找矿远景[J]. *华东地质*, 43(2): 205-216.
- 谢学锦, 任天祥, 奚小环, 张立生. 2009. 中国区域化探全国剖面计划卅年[J]. *地球学报*, 30(6): 700-716.
- 薛天星, 熊先孝, 田升平. 2011. 中国磷矿主要矿集区及其资源潜力探讨[J]. *化工矿产地质*, 33(1): 9-20.
- 张建明, 肖涛, 程培生, 王芝水, 李壮, 杜东旭. 2021. 庐枞盆地北东缘西湾铅锌矿床原生晕地球化学特征及其对矿体圈连的指示意义[J]. *华东地质*, 42(3): 350-358.
- 中华人民共和国国土资源部. 2015. DZ/T 0011—2015 地球化学普查规范(1: 50 000)[S]. 北京: 地质出版社, 1-35.

附中文参考文献

Geochemical characteristics of stream sediments and prospecting directions in Wagang area of Sichuan Province

HUANG Jiazhong^{1,2}, YANG Minglong^{1,2}, WANG Xiaolong¹, BAI Pingyan¹

(1. Kunming General Survey of Natural Resources Center, China Geological Survey, Kunming 650000, Yunnan, China; 2. Technology Innovation Center for Natural Ecosystem Carbon Sink, Ministry of Natural Resources, Kunming 650000, Yunnan, China)

Abstract: The Wagang area is located on the border of southwestern Sichuan and northeastern Yunnan, belonging to Wumeng Mountain, which is the famous core area of the Yangtze platform, as well as an important phosphorus metallogenic belt in China with good prospecting potential. Based on the 1:50 000 stream sediment survey in the Wagang area, this paper described geochemical characteristics of 11 elements such as Pb, Zn, Ag, Cd, P, et al. Cluster analysis and factor analysis were utilized to determine the combined anomalies and the comprehensive anomalies. The results show that: there are many highly dispersive abnormal high value points of phosphorus, lead and zinc elements in the Wagang area. The abnormal high values are well matched with the ore bearing strata, and have great mineralization potential. The main type of minerals is sedimentary phosphorus ore, coupling with lead-zinc and antimony ores. Phosphorite is mainly occurred in the middle Yicun section of the Aurginacian-Cambrian Yuhucun Formation, while lead-zinc ores are developed in the upper part of the Yuhucun Formation. Combined with elements assemblages, abnormal characteristics and the ore-forming geological settings, the authors delineated 6 geochemical anomalies, which can provide important evidences for further prospecting.

Key words: stream sediment; geochemical characteristics; prospecting direction; Wagang area; Sichuan