

山东莱州曲家金矿原生晕地球化学 分带性研究及地质意义

杨德平¹⁾, 于学峰¹⁾, 王林钢²⁾, 熊玉新¹⁾, 朱学礼²⁾,
舒磊¹⁾, 宋英昕¹⁾, 刘鹏瑞¹⁾, 迟乃杰¹⁾

1) 山东省地质科学研究院, 自然资源部金矿成矿过程与资源利用重点实验室,
山东省金属矿产成矿地质过程与资源利用重点实验室, 山东济南 250013;

2) 山东黄金地质矿产勘查有限公司, 山东莱州 261400

摘要: 曲家金矿位于胶东焦家成矿带中段, 为新城金矿和马塘金矿的深部延深, 矿体赋存深度300~1300 m。对区内32个钻孔岩心样品进行了取样, 获得了34个元素的分析数据, 研究了各元素的浓度分带及成分分带。发现多元素在此深度范围内除沿矿体轴向有迁移成晕外, 在垂向上也有迁移和成晕现象, 这对于穿透性地球化学和原生晕找矿机理研究有重要意义。同时发现成矿元素在成矿带轴向和垂向上的扩散受多种因素影响, 包括矿体部位, 成矿热液中元素浓度、热液的温度压力、围岩化学活性和可渗透性等, 在空间分布上具有复杂性。原生晕的高浓度带主要沿断裂蚀变带分布。用格里戈良法和重心法确定的轴向成分分带, 在深部有头晕元素与尾晕元素的叠加, 预示深部仍存在隐伏金矿体, 这与西部邻近招贤勘查区深部发现金矿体的勘查结果相符。垂向上从浅到深成分分带性存在差异, 垂向上易在浅部浓集的元素为Se、Cd、Mo、Hg、Bi、S、F、Cu、Ag, 成矿带附近浓集的元素为Sb、As、Au、W等, As、Sb在垂向上的迁移能力弱, 主要沿轴向迁移。当浅部多个元素同时达到 $K_2O \geq 4.57 \times 10^{-2}$, $Au \geq 0.8 \times 10^{-9}$, $Ag \geq 0.057 \times 10^{-6}$, $Cu \geq 2.5 \times 10^{-6}$, $Bi \geq 0.08 \times 10^{-6}$, $Hg \geq 17 \times 10^{-9}$, $S \geq 0.0583 \times 10^{-2}$, $Mo \geq 0.74 \times 10^{-6}$, $W \geq 0.55 \times 10^{-6}$ 时, 指示深部发现金矿体的可能性较大, $Hg \cdot Ag / (As \cdot W)$ 、 $Bi \cdot Hg / (As \cdot Au)$ 指数可用来判断金矿体的埋深。

关键词: 山东; 焦家金成矿带; 曲家金矿; 原生晕; 地球化学分带

中图分类号: P595 文献标志码: A doi: 10.3975/cagsb.2020.022201

A Study of Geochemical Zonation of Primary Halos in the Qujia Gold Deposit, Laizhou, Shandong Province, and Its Geological Significance

YANG De-ping¹⁾, YU Xue-feng¹⁾, WANG Lin-gang²⁾, XIONG Yu-xin¹⁾, ZHU Xue-li²⁾,
SHU Lei¹⁾, SONG Ying-xin¹⁾, LIU Peng-rui¹⁾, CHI Nai-jie¹⁾

1) Shandong Institute of Geological Sciences, Key Laboratory of Gold Mineralization Processes and Resource Utilization of Ministry of Natural Resources, Key Laboratory of Metallogenic Geological Processes and Resource Utilization in Shandong Province, Jinan, Shandong 250013;
2) Shandong Gold Geology and Mineral Exploration Co. Ltd., Laizhou, Shandong 261400

Abstract: The Qujia gold deposit lies in the middle of the Jiaodong Jiaoja metallogenetic belt and is the deep extension of the Xincheng and Matang gold deposits. The orebodies occur at the depths from 300 m to 1300 m and the deposit has reached exploration stage. Systematic sampling for 32 borehole cores in this area was conducted and 34 elements of the samples were analyzed. A study of the data obtained has revealed that multiple elements migrated not only in the axial direction of the orebody but also in the vertical direction within this depth range, which formed

本文由国家重点研发项目(编号: 2016YFC0600600)和国家自然科学基金项目(编号: 41672084; 41772076; 41372086; 41503038; 41140025)联合资助。

收稿日期: 2019-10-27; 改回日期: 2019-11-22; 网络首发日期: 2020-02-24。责任编辑: 张改侠。

第一作者简介: 杨德平, 男, 1963年生。研究员。从事地质矿产研究工作。E-mail: 1062319799@qq.com。

primary geochemical halos that is of great significance for the study of penetrating geochemistry and the primary halo prospecting mechanism. At the same time, it has been found that the axial and vertical diffusion of metallogenic elements in the metallogenic belt is affected by a variety of factors, such as location of orebodies, concentrations of elements, temperature and pressure of metallogenic hydrothermal fluids, chemical activity and permeability of wall rocks, which are complex in spatial distribution. The high concentration zone of primary halos is distributed mainly along the fault-alteration zone. The superposition of head halos upon the tail halos of elements in the deep part from axial compositional zonation determined by Gregorian and barycenter methods suggests that hidden orebodies may exist at the deep level, which is consistent with the exploration results of the adjacent Zhaoxian exploration area in the west. A vertical difference of compositional zonation from shallow to deep level is present. The elements with strong vertical migration capability and easy concentration in the shallow level are Se, Cd, Mo, Hg, Bi, S, F, Cu and Ag. The elements with high concentrations near the mineralization belt are Sb, As, Au, W, etc. When multiple elements at the shallow level simultaneously reach the concentrations $K_2O \geq 4.57 \times 10^{-2}$, $Au \geq 0.8 \times 10^{-9}$, $Ag \geq 0.057 \times 10^{-6}$, $Cu \geq 2.5 \times 10^{-6}$, $Bi \geq 0.08 \times 10^{-6}$, $Hg \geq 17 \times 10^{-9}$, $S \geq 0.0583 \times 10^{-2}$, $Mo \geq 0.74 \times 10^{-6}$, and $W \geq 0.55 \times 10^{-6}$, gold orebodies are likely to be found at deep level. The indexes of $Hg \cdot Ag / (As \cdot W)$ and $Bi \cdot Hg / (As \cdot Au)$ can be used to judge the buried depth of the gold orebody.

Key words: Shangdong Province; Jiaojia gold metallogenic belt; Qujia gold deposit; halo; geochemical zoning

热液矿床的原生晕是普遍存在的，由热液活动与围岩的相互作用产生。近年来发展起来的穿透性地球化学又提出了元素以纳米粒子的形式垂向迁移(Wang et al., 1997)，也可能对原生晕的形成和元素分带产生影响。

自从格里戈良等人提出热液矿床原生晕典型综合分带序列(Beus and Grigorian, 1975)以来，国内外学者对原生晕分带性进行了广泛的研究(邵跃, 1984; 朴寿成, 1996, 2006; 李惠等, 1998, 1999a, b, 2012, 2013, 2016; 王建新等, 2008)。研究表明，热液矿床原生晕分带序列具有相似性和普遍性，原生晕的成分和浓度分带既与岩石的元素背景含量有关，又与后期经历的改造及含矿热液活动的叠加等因素有关。金矿床原生晕的分带序列、分带模型及地球化学预测标志的建立，对金矿成矿作用研究，预测金矿体赋存深度和剥蚀程度，指导找矿发挥了重要作用。

目前由于缺乏系统的大深度岩心实物材料，对矿体埋藏深度超过千米的原生晕特征及浓度分带和成分分带的关系研究较少；对原生晕的研究多集中于沿控矿断裂的轴向分带研究，而垂向分带研究较少，而这对于找矿更具意义；原生晕研究目前多局限于表观描述，而定量模型还较少。

为了开展国家重点研发项目“穿透性地球化学勘查技术”之“蚀变岩型金矿立体地球化学探测试验示范”课题，我们在近年来焦家金矿带中段发现的曲家金矿开展了钻孔岩心采样分析，对这一金矿的原生晕特征和元素扩散成晕机制进行了研究。这对于研究土壤活动态异常和原生晕关系，建立地球化学立体模型及开展深部金矿地球化学探测技术研究具有重要意义。

1 地质概况

焦家断裂为胶西北最密集的成矿构造带，自南向北大致分为3段，分别为寺庄段、马塘—新城段、新城—高家庄子段，长约60 km，走向30°~50°，倾向北西，倾角为30°~50°，局部可达78°，最宽处可达1 000 m(图1)。以主裂面为界，构造岩基本对称分带。金矿体主要赋存于缓倾斜断裂带中，主要产于主裂面的下盘，浅部矿体常与深部矿体连为一体或表现为走向、倾向上的尖灭再现。以黄铁绢英岩化蚀变岩和浸染状或细脉浸染状矿化为特征。近年来在焦家断裂的中南段连续发现了寺庄深部、焦家深部、朱郭李家、南吕—欣木、纱岭、前陈等大型-超大型金矿床，目前已累计查明金资源储量近1400 t(于学峰等, 2016)。

曲家金矿位于焦家金成矿带的中段，是新城、马塘金矿向深部的延伸，受北北东—北东向焦家断裂构造控制，主断裂两侧发育有大量次级断裂、节理、裂隙及矿化蚀变带。蚀变带在平面和剖面上均呈舒缓波状延伸。区内地表第四系广泛分布，第四系以下分布有中生代燕山早期玲珑序列崔召单元二长花岗岩和燕山晚期郭家岭序列斑状花岗闪长岩，郭家岭序列在矿区北部及深部有揭露，侵入于玲珑序列崔召单元内，矿区东部为新太古代五台—阜平期马连庄序列变辉长岩，分布于焦家断裂带上盘，揭露深度为0~370 m，侵入于玲珑序列崔召单元(山东黄金地质矿产勘查有限公司, 2016)。

焦家金矿带矿石中有益组分以金为主，伴生组分以银、硫为主，其他组分含量低，金属矿物以黄铁矿为主，少量黄铜矿、方铅矿、闪锌矿，脉石矿物主要为长石、石英、绢云母、绿泥石。矿石类型

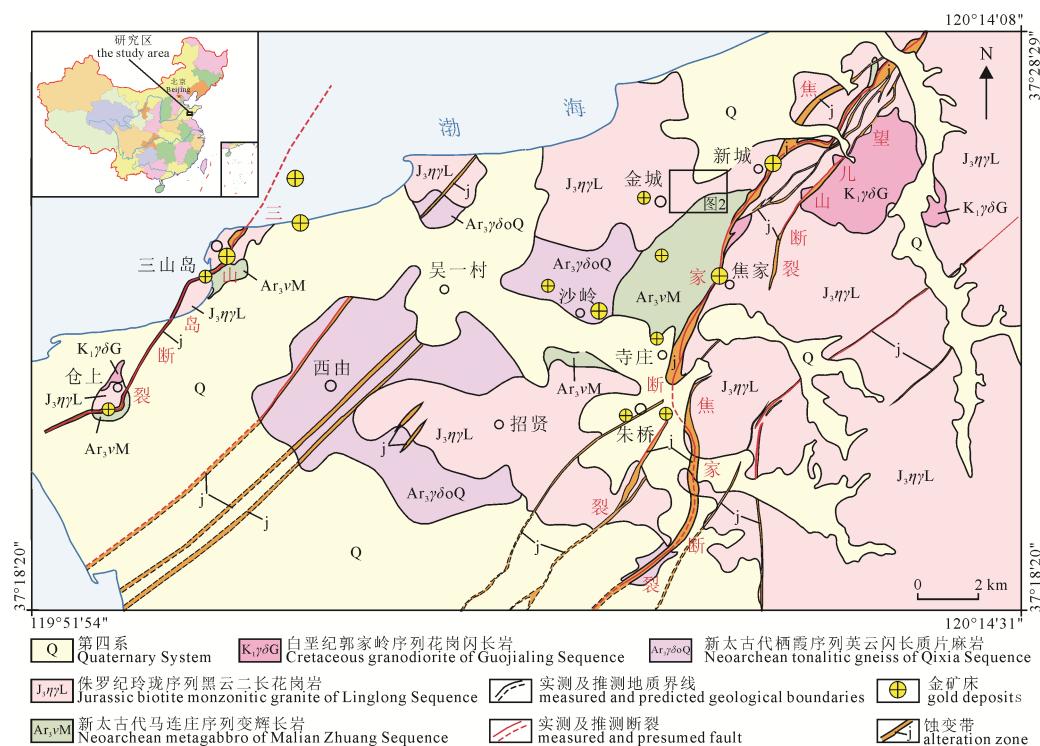


图 1 焦家金矿带区域地质简图(于学峰等, 2019)

Fig. 1 Regional geological map of the Jiaoja gold metallogenic belt(after YU et al., 2019)

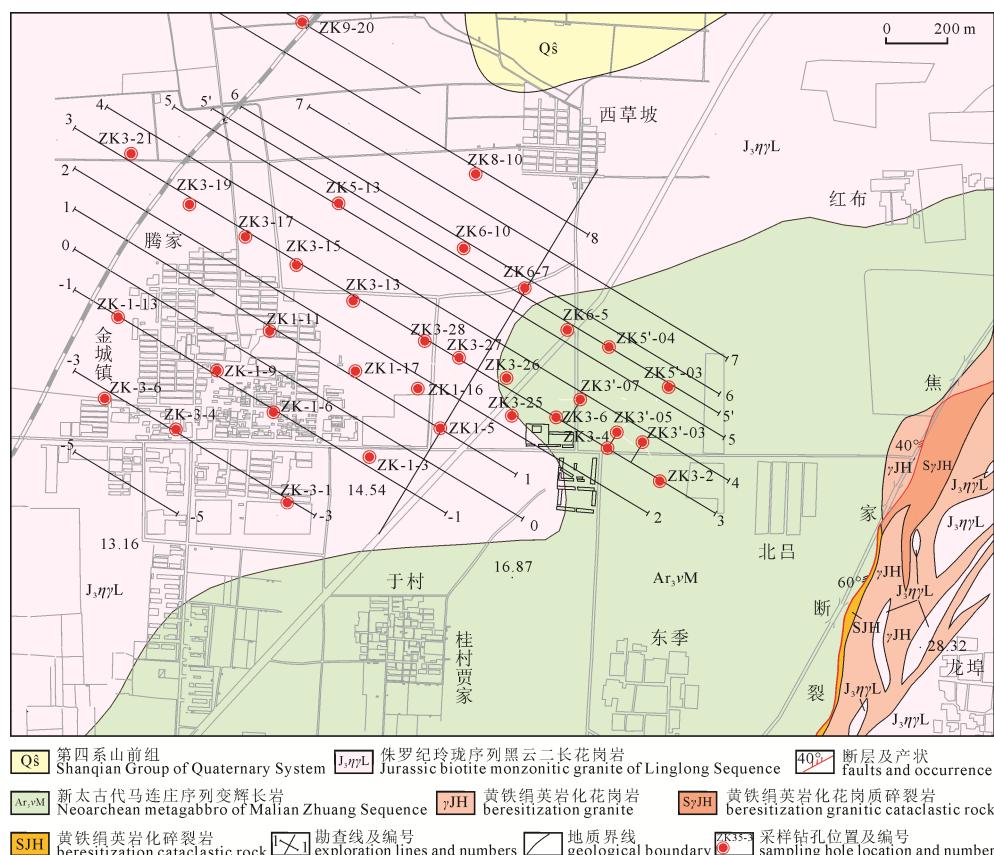


图 2 曲家试验区原生晕采样钻孔分布图

Fig. 2 Distribution of primary halo sampling boreholes in the Qujia test area

主要有 3 种: ①黄铁绢英岩化碎裂岩型矿石: 呈灰绿色-灰黑色, 其赋存岩石为黄铁绢英岩、黄铁绢英岩化碎斑岩、碎粒岩、碎粉岩等, 主要产于破碎蚀变带中心部位。②黄铁绢英岩化花岗质碎裂岩型矿

石: 呈灰色、灰白色-淡肉红色, 其赋存岩石为花岗质碎裂岩。黄铁绢英岩化蚀变不均匀且较弱, 常残留花岗岩。黄铁矿、石英细脉或黄铁绢英岩细脉充填于裂隙中。③黄铁绢英岩化碎裂状花岗岩型矿石:

呈淡肉红色-灰白色，其赋存岩石为碎裂状二长花岗岩，花岗岩特征和钾化现象明显，具变余花岗结构(于学峰等, 2019)。

金矿的形成主要与含矿热液沿断裂蚀变带活动有关，断裂破碎带及其中的各类构造岩既是含矿热液运移的通道和矿质沉淀成矿的场所，也是原生晕垂向迁移的起点。

2 样品的采集与分析

2.1 样品的采集

在曲家金矿区南部(滕家Ⅱ号矿体)选取32个钻孔(图2)，采集907件原生晕样品进行了分析测试。平面上按勘探线选取钻孔，线距160 m，孔距100 m。岩心样品围岩按每50 m垂深1个组合样采取。为了保证所采集样品的代表性，采用连续捡块的方法，每10 m采取1个子样，5个样合并成1个组合样。矿化蚀变带内按每10 m垂深1个组合样采取，每2 m垂深采取1个子样。为了保证每个子样的权重一致，要求子样的质量要一致，组合后样品重量不少于300 g，同一组合样内的子样岩性一致，按自然分层采集，避免跨层样品的组合和不同岩性样品的组合。矿层部分以化学样副样代替。为建立原生晕立体地球化学模型，每个钻孔中的采样点位置根据钻孔倾斜情况进行标准化，使其处于统一标高水平上。

2.2 样品分析

样品分析采用X射线荧光光谱法分析Cl、Na₂O、MgO、Al₂O₃、SiO₂、P、K₂O、CaO、Ba、Ti、V、Cr、Mn、Fe₂O₃、Br、Sr，电感耦合等离子体质谱法分析Co、Ni、Cu、Zn、Mo、Cd、W、Pb，石墨炉原子吸收法分析Au，原子荧光光度法分析As、Sb、Bi、Hg、Se，发射光谱法分析Ag、Sn，离子选择性电极法分析F，燃烧碘量法分析S。分析质量符合《地质矿产实验室测试质量管理规范》(DZ/T0130.4-2006)的质量要求。用国家一级标准物质GBW07401、GBW07309、GBW07310、GBW07311进行分析监控。统计表明标准物质标准值与分析平均值之间对数误差 $\Delta \lg C(\text{GBW})$ 、相对误差RE、相对标准偏差RSD均符合分析方法的准确度和精密度控制限。精密度的监控通过重复性样品分析进行，重复分析值与基本分析值的相对偏差(RD)均小于允许限，分析方法检出限(C_L)满足要求(表1)，所有元素的报出率符合要求。

3 元素的相关性及地质含义

3.1 区内岩石元素含量及主要参数

区内地表及深部岩石主要有变辉长岩、二长花

岗岩、黄铁绢英岩化花岗岩、黄铁绢英岩化花岗质碎裂岩、黄铁绢英岩化碎裂岩、绢英岩化花岗岩、绢英岩化花岗质碎裂岩、绢英岩化碎裂岩、似斑状花岗闪长岩等，907件钻孔岩石样品统计的元素平均含量及主要地球化学参数见表2。区内岩石与中国东部出露地壳相比强烈富集的元素是Au、Ag、S，较强富集的元素有Pb、Bi、Ba、Br、Sr，较强贫化的元素有Fe₂O₃、MgO、TiO₂、P₂O₅、MnO、As、Sb、Se、Cr、Co、Ni、Cu。

3.2 聚类分析

曲家金矿试验区907件原生晕样品的34种元素的R型聚类分析表明(图3)：在相关系数R=0.45水平下，可分为10个元素组群：第1组群Cu、Au；第2组群W、K₂O、Ag、Bi、MnO、F、CaO、S、Se、Co、Fe₂O₃、MgO、Cr、Ni、P₂O₅、V、TiO₂、Sr、Ba；第3组群Sb、As；第4组群Mo；第5组群Pb、Zn、Cd；第6组群Sn；第7组群Hg；第8组群Al₂O₃；第9组群Na₂O、SiO₂；第10组群Br、Cl。这一地区由于存在多期岩浆和热液活动，岩浆侵入、同化混染及热液蚀变作用发育，因此元素组合复杂。第1组群代表与Au最为密切的元素为Cu，说明Au元素具有独立性，与其密切相关的元素少，含量变化大，分布不均匀；Au与S元素不组成一群，说明S含量高时不一定Au含量高，黄铁矿具有多期性，不一定都与Au成矿有关；第2组群复杂，代表多个因素的复合，包括早期中基性岩浆活动，金银成矿期的热液活动及晚期富含Sr、Ba的热液活动，区内中基性岩浆活动产物可能富含S；第3组群代表Sb、As元素活动；第4组群Mo，代表Mo活动有独立性；第5组群Pb、Zn、Cd，代表富含Pb、

表1 分析方法检出限/ 10^{-6}

Table 1 Detection limits/ 10^{-6} of the analytical method

元素	检出限	元素	检出限
Au	0.0002	Mn	8
Ag	0.02	Cd	0.02
Cu	0.6	Ba	8
Pb	1.0	Sr	2
Zn	2	Se	0.01
As	0.4	SiO ₂	100
Sb	0.03	Al ₂ O ₃	100
Bi	0.03	Fe ₂ O ₃	100
Hg	0.003	MgO	400
W	0.2	CaO	100
Mo	0.1	Na ₂ O	400
Sn	0.5	K ₂ O	100
Cr	3	F	30
Co	0.2	Cl	7
Ni	0.6	Br	1.0
V	4	S	40
Ti	10		

Zn、Cd 的热液活动; 第 6 组群 Sn, 第 7 组群 Hg, 代表 Sn、Hg 元素活动有独立性; 第 8 组群 Al_2O_3 , 代表花岗岩的高岭石化或绢英岩化、黄铁绢英岩化过程; 第 9 组群 Na_2O 、 SiO_2 , 代表中酸性岩浆活动或热液硅化过程; 第 10 组群 Br、Cl, 代表富含 Br、Cl 挥发份的热液活动。在相关系数 $R=0.75$ 水平下, Au-Cu, S-Ba-Sr 为同一组群, 说明 Au、Cu 具有较高的相关性, 而 S 元素中的一部分(氧化态)与 Ba、Sr 有较高的相关性; 在相关系数 $R=0.80$ 水平下, Fe_2O_3 -MgO-TiO₂-P₂O₅-Ni-V-Co-Cr 为同一组群, 代表区内的基性岩浆岩的活动; 在相关系数 $R=0.88$ 水平下, Cd-Zn 为同一组群, 在相关系数 $R=0.94$ 水平下, Sr-Ba 为同一组群, 代表 Cd、Zn 元素之间, Sr、Ba 元素之间具有高度相关性, 为同一热液活动期

产物。

3.3 因子分析

因子分析可以用来分析元素的组合特征及所代表的地质地球化学意义, 是一种从多变量数据中提取若干公因子的方法, 用来获取数据内部的相关性, 基本的方法是获取初始因子载荷矩阵, 再得到各因子的得分。因子分析可将公共因子表示为原始变量的线性组合, 进而分析解释其代表的地质地球化学含义。通常为了对公因子更好地进行解释, 可通过因子旋转的方法使一个或几个公因子具有更大载荷。因子分析计算时, 累计方差贡献值不宜取得过高或过低, 过低失去有意义的信息, 过高又会使信息过于分散, 选择适当的累计方差贡献值, 提取恰当数目的公因子数, 才能较好地揭示地质地球

表 2 曲家试验区岩心样品元素含量及地球化学参数

Table 2 Element content and geochemical parameters of drilling core samples in the Qujia test area

元素	数据个数	最小值	几何平均值	算术平均值	中位数	最大值	标准离差	异常下限	富集系数	变异系数
SiO_2	907	42.06	69.40	69.51	70.37	90.61	3.74	77.00	1.02	0.05
Al_2O_3	907	4.47	14.90	14.94	14.90	19.83	0.95	16.84	1.04	0.06
Fe_2O_3	907	1.22	1.82	1.91	1.73	10.82	0.80	3.50	0.79	0.42
CaO	907	0.67	1.83	1.99	1.71	10.45	0.99	3.97	1.16	0.50
MgO	907	0.01	0.25	0.42	0.21	7.36	0.72	1.86	0.28	1.73
K_2O	907	1.36	4.63	4.69	4.56	7.83	0.73	6.15	1.39	0.16
Na_2O	907	0.26	3.48	3.62	3.80	5.04	0.76	5.13	1.26	0.21
TiO_2	907	0.037	0.208	0.233	0.206	2.446	0.153	0.540	0.23	0.66
P_2O_5	907	0.018	0.043	0.055	0.039	0.901	0.076	0.207	0.05	1.38
S	907	0.002	0.036	0.125	0.028	2.350	0.242	0.609	8.90	1.94
MnO	907	0.021	0.053	0.057	0.052	0.580	0.033	0.124	0.06	0.57
Ag	907	0.100	0.429	0.532	0.546	0.999	0.281	1.094	8.87	0.53
Au	907	0.1	1.9	52.6	0.9	10 800.0	417.6	887.8	61.90	7.90
Cd	907	0.001	0.036	0.096	0.031	5.180	0.371	0.838	1.21	3.84
W	907	0.02	0.60	1.43	0.40	24.52	2.54	6.51	1.47	1.78
As	907	0.00	0.70	2.30	0.50	55.30	5.20	12.60	0.52	2.29
Sb	907	0.00	0.07	0.09	0.07	0.89	0.09	0.27	0.26	1.00
Hg	907	5	15	16	15	94	6	27	1.33	0.35
F	907	131	423	476	408	5 934	343	1 161	0.98	0.72
Pb	907	3.8	29.5	40.3	28.9	1 531.0	83.4	207.2	2.12	2.07
Sn	907	1.1	1.5	1.5	1.5	2.0	0.2	2.0	0.73	0.16
Bi	907	0.00	0.06	0.35	0.04	46.62	1.80	3.95	1.92	5.22
Se	907	0.00	0.02	0.03	0.02	0.60	0.03	0.09	0.40	1.35
Cl	907	5	40	52	42	415	44	141	0.79	0.84
Ba	907	333	1 567	1 676	1 602	24 069	933	3 543	2.64	0.56
V	907	11.3	20.7	23.3	18.6	172.7	17.9	59.1	0.34	0.77
Cr	907	1.0	10.9	16.4	9.8	377.4	32.2	80.8	0.36	1.97
Br	907	0.0	0.46	0.56	0.50	2.60	0.34	1.24	2.24	0.61
Sr	907	100	462	511	461	11 020	463	1 436	2.27	0.91
Co	907	0.3	1.2	2.1	0.9	43.2	4.1	10.4	0.21	1.96
Ni	907	0.6	3.0	6.2	2.6	188.3	16.3	38.8	0.25	2.65
Cu	907	0.2	2.1	7.5	1.6	873.9	38.8	85.1	0.44	5.17
Zn	907	2.6	30.1	48.5	32.3	1 201.0	92.9	234.4	0.71	1.92
Mo	907	0.13	0.71	0.96	0.68	62.01	2.69	6.34	1.55	2.79

注: 元素含量单位: SiO_2 、 Al_2O_3 、 Fe_2O_3 、 CaO 、 MgO 、 K_2O 、 Na_2O 、 TiO_2 、 P_2O_5 、S、 MnO 为 10^{-2} , Au、Hg 为 10^{-9} , 其它元素为 10^{-6} 。参考值为中国东部出露地壳(去碳酸盐岩)元素丰度值(迟清华和鄢明才, 2007)。

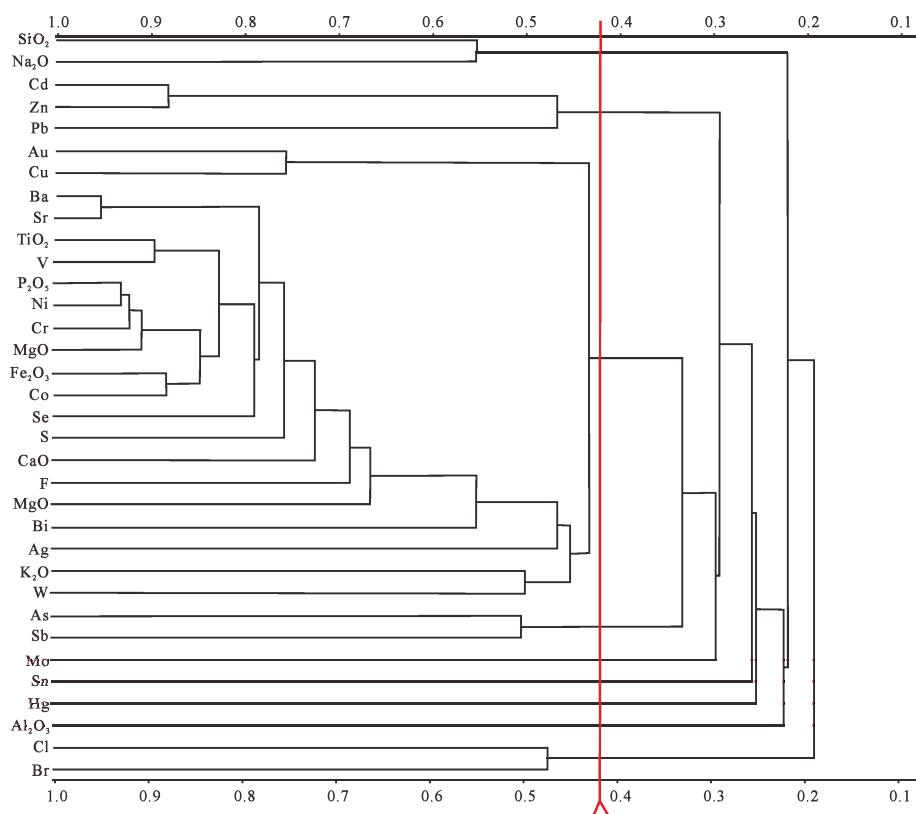


图 3 聚类分析谱系图(横坐标为相关系数, 组群划分标准 $R=0.45$)

Fig. 3 Pedigree diagram of cluster analysis (abscissa is the correlation coefficient, group classification standard $R=0.45$)

化学内在规律, 提取主因子的原则是特征值大于 1 且非单因素因子(刘如英等, 1988)。

通过因子分析及正交旋转载荷矩阵, 提取了 6 个主因子, 累计方差贡献率 61.95%(表 3, 表 4), F1 主因子由 SiO₂、Fe₂O₃、CaO、MgO、TiO₂、P₂O₅、F、Se、V、Cr、Co、Ni、MnO 元素组成, 方差贡献率 29.69%, 但 SiO₂ 与其它元素的作用相反(负值), 代表重要的地质作用, 根据元素组合判断, 代表新太古代马连庄序列变辉长岩的侵入作用; F2 由 K₂O、S、W、Ag、Au、Bi 元素组成, 方差贡献率 12.86%, 代表金成矿作用和有关的主成矿期热液活动; F3 由 Cd、Pb、Zn、MnO 元素组成, 方差贡献率 7.99%, 代表单独的一期热液活动, 该期热液活动与金成矿作用关系小, 代表晚期以 Pb、Zn 为主的热液活动; F4 由 Ba、Sr 元素组成, 方差贡献率 4.35%, 代表与 Ba、Sr 有关的热液活动; F5 由 Cl、Br 元素组成, 方差贡献率 4.11%, 代表矿化剂元素的活动; F6 由 As、Sb 元素组成, 方差贡献率 2.95%, 代表 As、Sb 元素的活动, 而且影响较小。

4 元素的空间分布特征

4.1 地质分带的元素分布特征

4.1.1 各地质分带的元素含量

曲家金矿区按地质特征从浅到深可分为变辉长岩(Z1)、二长花岗岩(Z2)、黄铁绢英岩化花岗岩(Z3)、

表 3 初始因子及方差贡献表
Table 3 Original factors and variance contribution

	F1	F2	F3	F4	F5	F6
特征值	10.10	4.37	2.72	1.48	1.40	1.00
方差/%	29.69	12.86	7.99	4.35	4.11	2.95
累积的/%	29.69	42.55	50.54	54.90	59.00	61.95
	F7	F8	F9	F10	F11	F12
特征值	0.99	0.97	0.94	0.85	0.83	0.74
方差/%	2.92	2.84	2.77	2.51	2.43	2.17
累积的/%	64.87	67.72	70.48	72.99	75.42	77.59
	F13	F14	F15	F16	F17	F18
特征值	0.71	0.71	0.55	0.55	0.51	0.51
方差/%	2.08	2.08	1.63	1.63	1.50	1.50
累积的/%	79.68	81.76	83.39	85.02	86.51	88.01
	F19	F20	F21	F22	F23	F24
特征值	0.47	0.45	0.41	0.36	0.34	0.33
方差/%	1.39	1.32	1.19	1.06	1.01	0.97
累积的/%	89.40	90.72	91.92	92.98	93.98	94.95
	F25	F26	F27	F28	F29	F30
特征值	0.29	0.24	0.22	0.21	0.18	0.17
方差/%	0.86	0.69	0.65	0.61	0.54	0.50
累积的/%	95.81	96.50	97.15	97.76	98.31	98.80
	F31	F32	F33	F34		
特征值	0.14	0.13	0.09	0.04		
方差/%	0.40	0.39	0.28	0.13		
累积的/%	99.21	99.60	99.87	100.00		

注: F1—F34 为因子编号。

黄铁绢英岩化花岗质碎裂岩(Z4)、黄铁绢英岩化碎裂岩(Z5)、绢英岩化花岗岩(Z6)、绢英岩化花岗质碎裂岩(Z7)、绢英岩化碎裂岩(Z8)、似斑状花岗闪长岩(Z9)、焦家断裂带下盘二长花岗岩(Z10)、下盘黄铁绢英岩化花岗岩(Z11)、下盘绢英岩化花岗岩(Z12)、下盘绢英岩化花岗质碎裂岩(Z13)、基性脉岩(Z14)等14个地质分带。其中断裂蚀变带常呈不连续或尖灭再现现象,从浅到深厚度由100 m左右逐渐增大到500 m左右(图4)。各地质分带元素含量及变化见表5、图5。从中可以看出,Au、Ag、Pb、As、Sb、Bi、S、Cd、W元素在黄铁绢英岩化花岗岩(Z3)、黄铁绢英岩化花岗质碎裂岩(Z4)、黄铁绢英岩化碎裂岩(Z5)分带中强烈富集,表明这些元素

的富集由热液沿断裂带活动沉淀引起。Cu、Zn、Mo、V、Cr、Ni、Co、Se、Sn、F、P、Ti、Sr在基性脉岩中强烈富集。下盘同类岩石分带元素富集程度明显弱于上盘。

4.1.2 各地质分带的元素富集系数

将各地质分带元素含量与中国东部出露地壳(去碳酸盐岩)元素丰度值(迟清华和鄢明才,2007)相比求得各地质分带元素的富集系数(表6),反映各分带中的元素含量较参考值的富集程度。 SiO_2 、 Al_2O_3 富集系数近于1,表明各分带中 SiO_2 、 Al_2O_3 含量无明显变化,各分带中S、Au元素强烈富集。花岗岩及其蚀变岩石 K_2O 、 Na_2O 、 CaO 、Ag、W、Hg、Pb、As、Bi、Br、Ba、Sr、Mo等元素有较弱

表4 正交旋转载荷矩阵
Table 4 Varimax rotated load matrix

	F1	F2	F3	F4	F5	F6
SiO_2	-0.811 7	-0.092 3	-0.093 4	-0.052 9	-0.036 9	-0.039 6
Al_2O_3	-0.262 0	0.312 4	0.308 3	-0.026 3	-0.008 0	0.120 9
Fe_2O_3	0.894 9	-0.031 2	-0.009 7	0.011 8	0.039 0	-0.004 9
CaO	0.787 4	0.106 1	0.105 4	0.051 1	0.035 9	0.044 6
MgO	0.941 6	-0.032 8	-0.010 2	0.012 4	0.041 1	-0.005 2
K_2O	-0.270 1	0.749 5	0.044 3	-0.007 0	-0.009 2	0.043 6
Na_2O	-0.444 0	-0.575 6	-0.369 3	-0.029 8	-0.023 6	-0.048 4
TiO_2	0.826 6	-0.004 6	-0.039 3	0.418 4	0.037 9	-0.002 7
P_2O_5	0.930 0	-0.032 4	-0.010 1	0.012 2	0.040 5	-0.005 1
S	0.261 7	0.808 9	0.146 4	0.032 1	0.015 3	0.073 7
MnO	0.521 7	0.042 3	0.517 4	0.017 5	0.026 2	0.046 0
Ag	0.096 2	0.588 6	0.104 9	0.022 6	0.010 6	0.036 4
Au	-0.050 7	0.423 3	-0.056 8	0.009 5	-0.000 2	0.127 0
Cd	-0.048 1	0.029 5	0.948 4	-0.038 3	0.002 1	0.072 7
W	0.276 2	0.647 8	-0.031 3	0.043 5	0.013 9	-0.001 9
As	-0.019 1	0.364 2	0.051 7	0.010 5	0.001 0	0.819 4
Sb	0.121 9	0.221 2	0.281 9	0.013 2	0.011 9	0.750 8
Hg	0.187 7	0.023 2	0.022 5	0.017 3	0.008 5	0.006 5
F	0.755 2	-0.004 2	0.006 4	0.050 0	0.033 3	0.003 3
Pb	0.004 0	0.033 8	0.901 3	-0.030 8	0.005 6	0.070 8
Sn	0.045 7	-0.453 9	0.134 1	-0.013 6	0.000 3	-0.131 2
Bi	0.079 3	0.592 9	0.103 9	0.021 0	0.009 4	0.036 0
Se	0.616 0	0.276 6	0.277 6	0.039 3	0.030 3	0.107 1
Cl	0.106 2	0.013 3	0.011 8	0.011 4	0.844 1	0.004 9
Ba	0.079 4	0.075 0	-0.042 3	0.871 0	0.007 7	0.010 4
V	0.941 6	-0.032 8	-0.010 2	0.012 4	0.041 1	-0.005 2
Cr	0.911 7	-0.031 7	-0.009 9	0.012 0	0.039 8	-0.005 0
Br	0.104 1	0.013 1	0.011 6	0.011 2	0.842 2	0.004 8
Sr	0.221 6	0.073 6	-0.034 7	0.825 7	0.013 7	0.009 9
Co	0.900 6	-0.031 4	-0.009 8	0.011 9	0.039 3	-0.005 0
Ni	0.918 5	-0.032 0	-0.010 0	0.012 1	0.040 1	-0.005 1
Cu	0.171 7	0.134 2	0.120 6	0.015 5	0.009 0	0.047 5
Zn	0.056 5	0.042 1	0.961 1	-0.027 1	0.009 9	0.077 2
Mo	0.091 7	0.011 1	0.011 1	0.009 8	0.006 8	0.004 0
主因子方差贡献	9.784 4	3.468 5	3.401 7	1.636 3	1.441 9	1.331 5
方差贡献率/%	29.69	12.86	7.99	4.35	4.11	2.95
累计方差贡献率/%	29.69	42.55	50.54	54.90	59.00	61.95

的富集, TiO_2 、 P_2O_5 、 Fe_2O_3 、 MgO 、 MnO 、 Cd 、 Sb 、 Se 、 Sn 、 V 、 Cr 、 Co 、 Ni 、 Cu 、 Zn 有较强的贫化。变辉长岩、基性脉岩元素富集贫化趋势与花岗岩及花岗岩蚀变岩石有较大差异, 主要表现为 Fe_2O_3 、 CaO 、 MgO 、 S 、 TiO_2 、 V 、 Cr 、 Co 、 Ni 、 Cu 、 Zn 较强或强烈富集。

4.2 原生晕的轴向分布特征

原生晕空间分布特征表现为浓度分带和成分分带, 浓度分带一般按元素浓度的分布差异, 分为外带、中带和内带, 不同元素的高低浓度带与围岩元素背景值和成矿作用、热液活动有关。成分分带与元素特性, 迁移通道及围岩条件有关。早期常采用格里戈良分带指数法来研究, 其在实际应用中存在一些问题, 如对于元素含量数量级及数值范围差异大的数据人为处理为同一数量级, 参与计算元素种类不同等会影响到计算结果(王建新等, 2007)。后有许多学者对其进行了改进, 提出了多种计算方法, 如比重法(赵琦, 1989)、重心法(朴寿成和连长云, 1994)等。为消除元素含量级差异给分带计算带来的影响, 一般先对数据进行正规化, 即转化为最大值为1, 最小值为0的一组数, 将所有元素的数值统一

到[0, 1]的数据区间。

公式:

$$B_{ij} = \frac{C_{ij} - \min_{1 \leq i \leq n} C_{ij}}{\max_{1 \leq i \leq n} C_{ij} - \min_{1 \leq i \leq n} C_{ij}}$$

再用某元素换算后的数值除以该元素所在标高各元素变换后数值之和得分带指数 D_{ij} 。

$$\text{公式: } D_{ij} = \frac{B_{ij}}{\sum_{j=1}^m B_{ij}}$$

$i=1 \cdots n; j=1 \cdots m; n$ 为不同的标高或轴心位置数, m 为元素数。

某元素 $D_{ij}(j=1 \cdots m)$ 最大值所处位置即为该元素浓集中心位置, 对于位置重叠元素采用变化梯度进一步区分, 采用下式计算:

$$G_j = \sum_{i=1}^n \frac{D_{ij}}{\max_{1 \leq i \leq n} D_{ij}}$$

G_j 上为 $\max_{1 \leq i \leq n} D_{ij}$ 以上 G_j 之和, G_j 下为 $\max_{1 \leq i \leq n} D_{ij}$ 以下 G_j 之和。

这里的 G_j 是原格氏法中 G_j 的倒数, G_j 越小表示越向浅部富集(王建新等, 2007)。

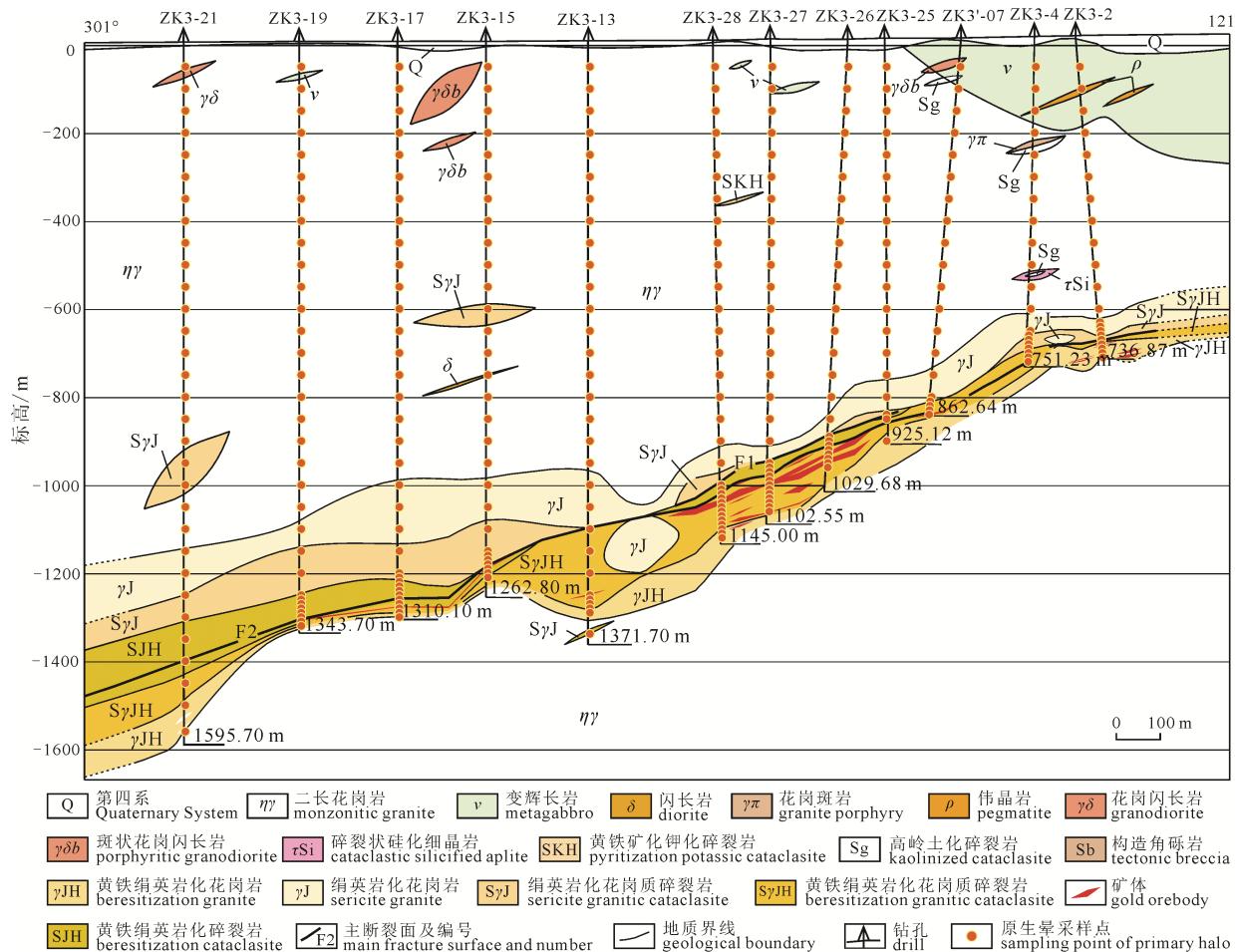


图 4 3号勘探线地质剖面图
Fig. 4 Geological section along No. 3 exploration line

表 5 曲家试验区各地质分带主微量元素含量表

Table 5 Major and trace elements content of different geological zones in the Qujia test area

分带元素	Z1	Z2	Z3	Z4	Z5	Z6	Z7	Z8	Z9	Z10	Z11	Z12	Z13	Z14
SiO ₂	62.17	70.06	69.09	68.53	68.21	70.69	71.11	69.03	68.31	68.40	71.13	68.66	71.38	48.16
Al ₂ O ₃	14.71	14.85	14.83	15.35	15.84	15.03	15.07	15.58	15.43	14.58	14.50	14.45	15.03	12.83
Fe ₂ O ₃	4.21	1.83	1.81	1.89	1.93	1.73	1.70	1.73	1.80	1.88	1.62	2.00	1.45	8.38
CaO	3.28	1.81	2.13	2.30	2.24	1.65	1.68	2.12	2.37	2.37	2.13	2.25	1.60	6.94
MgO	1.75	0.31	0.45	0.47	0.52	0.25	0.20	0.41	0.45	0.54	0.30	0.62	0.23	5.62
K ₂ O	2.89	4.47	5.22	5.46	4.87	4.89	4.67	4.37	3.64	5.07	5.41	5.12	5.87	3.58
Na ₂ O	3.15	3.92	3.42	2.85	3.25	3.65	3.71	4.07	4.06	3.54	3.22	3.19	3.71	2.27
TiO ₂	0.486	0.217	0.283	0.240	0.233	0.180	0.148	0.265	0.354	0.311	0.245	0.358	0.217	1.677
P ₂ O ₅	0.162	0.047	0.059	0.052	0.065	0.037	0.033	0.062	0.076	0.069	0.047	0.078	0.044	0.705
S	0.098	0.031	0.206	0.408	0.215	0.121	0.102	0.129	0.056	0.143	0.230	0.187	0.116	0.174
MnO	0.095	0.056	0.037	0.057	0.089	0.053	0.067	0.052	0.038	0.041	0.044	0.041	0.028	0.164
Ag	0.067	0.075	0.178	0.715	0.418	0.138	0.184	0.102	0.040	0.055	0.112	0.047	0.021	0.232
Au	4.5	3.2	111.4	245.1	29.4	37.9	14.5	47.1	1.8	29.6	23.8	20.4	33.8	3.0
Cd	0.063	0.063	0.029	0.155	0.662	0.052	0.189	0.135	0.020	0.019	0.016	0.024	0.020	0.087
W	1.12	0.41	3.39	3.92	2.42	1.67	0.60	2.77	1.81	5.08	3.14	2.72	2.98	2.53
As	0.8	0.5	3.5	6.4	5.7	2.0	4.4	12.3	0.4	0.6	6.6	3.2	0.5	1.6
Sb	0.09	0.07	0.09	0.15	0.17	0.10	0.10	0.13	0.11	0.06	0.15	0.11	0.11	0.11
Hg	22	16	19	16	15	15	15	15	11	20	18	17	14	19
F	1083	455	349	457	594	413	417	480	583	361	293	419	201	3458
Pb	18.6	34.5	21.1	54.3	149.0	36.3	54.3	29.6	20.1	15.2	17.3	17.4	15.7	23.8
Sn	1.5	1.5	1.1	1.1	1.4	1.4	1.4	1.2	1.1	1.0	1.3	1.2	1.0	1.6
Bi	0.11	0.07	0.52	1.30	0.43	0.37	0.19	0.10	0.07	0.25	0.19	0.57	0.33	0.48
Se	0.09	0.02	0.03	0.04	0.04	0.03	0.02	0.02	0.01	0.03	0.01	0.03	0.02	0.11
Cl	65	46	58	53	95	62	64	65	33	48	98	58	42	139
Ba	940	1663	2237	1839	1446	1464	1224	1792	2393	2508	2159	2705	2201	1578
V	67.1	20.3	28	25	23.3	19.5	17.1	24.7	26.9	29.2	23.1	33.7	23.8	142.6
Cr	73.7	13.0	12.3	15.2	17.5	11.8	11.9	12.8	11.9	11.3	12.3	14.6	8.9	190.3
Br	0.43	0.55	0.62	0.52	0.60	0.53	0.61	0.46	0.63	0.58	0.75	0.70	0.25	1.35
Sr	452	506	612	567	431	379	346	673	938	648	598	687	524	1668
Co	13.0	1.4	2.4	2.5	2.6	2.0	1.0	1.6	1.8	2.2	1.3	2.6	1.0	34.5
Ni	34.4	4.1	5.4	6.0	6.4	3.9	3.1	4.6	4.5	5.2	3.5	6.8	2.7	141.0
Cu	24.2	3.9	16.3	19.7	4.3	5.3	2.5	4.2	1.5	3.0	18.3	3.6	1.8	49.8
Zn	74.4	47.1	15.4	46.4	178.4	30.2	65.0	41.8	19.4	15.0	3.7	22.4	4.1	136.4
Mo	1.42	0.69	0.61	1.37	0.73	1.39	1.55	0.98	0.77	0.65	0.95	0.77	0.65	2.85
样数	16	477	27	153	15	76	81	5	4	17	2	11	2	2

注: 元素含量单位: SiO₂、Al₂O₃、Fe₂O₃、CaO、MgO、K₂O、Na₂O、TiO₂、P₂O₅、S、MnO 为 10⁻², Au、Hg 为 10⁻⁹, 其它元素为 10⁻⁶; Z1—Z14 为分带号。

格里戈良法的一个问题是参与分带计算的元素种类不同会影响到分带结果, 因此, 朴寿成和连长云(1994)、朴寿成等(1996)又提出了重心法, 计算公式如下:

$$H_j = \frac{\sum_1^n B_j \cdot h_i}{\sum_1^n B_j}$$

式中 H_j 为第 j 个元素的浓集重心, B_j 为正规化后的第 i 个标高第 j 个正规化后的元素含量, h_i 为第 i 个标高。

重心法的优点是参加计算的元素的种类或多或少, 均不改变元素在分带序列中的位置, 在部分标高缺少数据的情况下也可以计算分带序列。计算出来的结果代表元素的浓集重心(或中心)在空间上的

分布位置, 数学意义和地球化学意义明确。缺点是元素分布重心不一定与元素的高浓度分布区域一致, 这类似于“哑铃”, 重心在“哑铃把”上, 而质量却集中于“两头”, 当元素含量沿某一方向非单调变化时, 重心可以位于两高含量带之间的低含量带上, 这是重心法的不足之处。选取曲家试验区钻孔较多的 3 号勘探线剖面(图 4)来研究原生晕的空间分布特征。

4.2.1 轴向浓度分布

对于断裂控矿矿床, 热液及其中的元素沿断裂运移并沉淀成矿, 并形成了原生晕的轴向分带。3 号勘探线剖面 12 个钻孔样品分析结果显示了沿断裂蚀变带主要元素的浓度分布情况(图 6)。

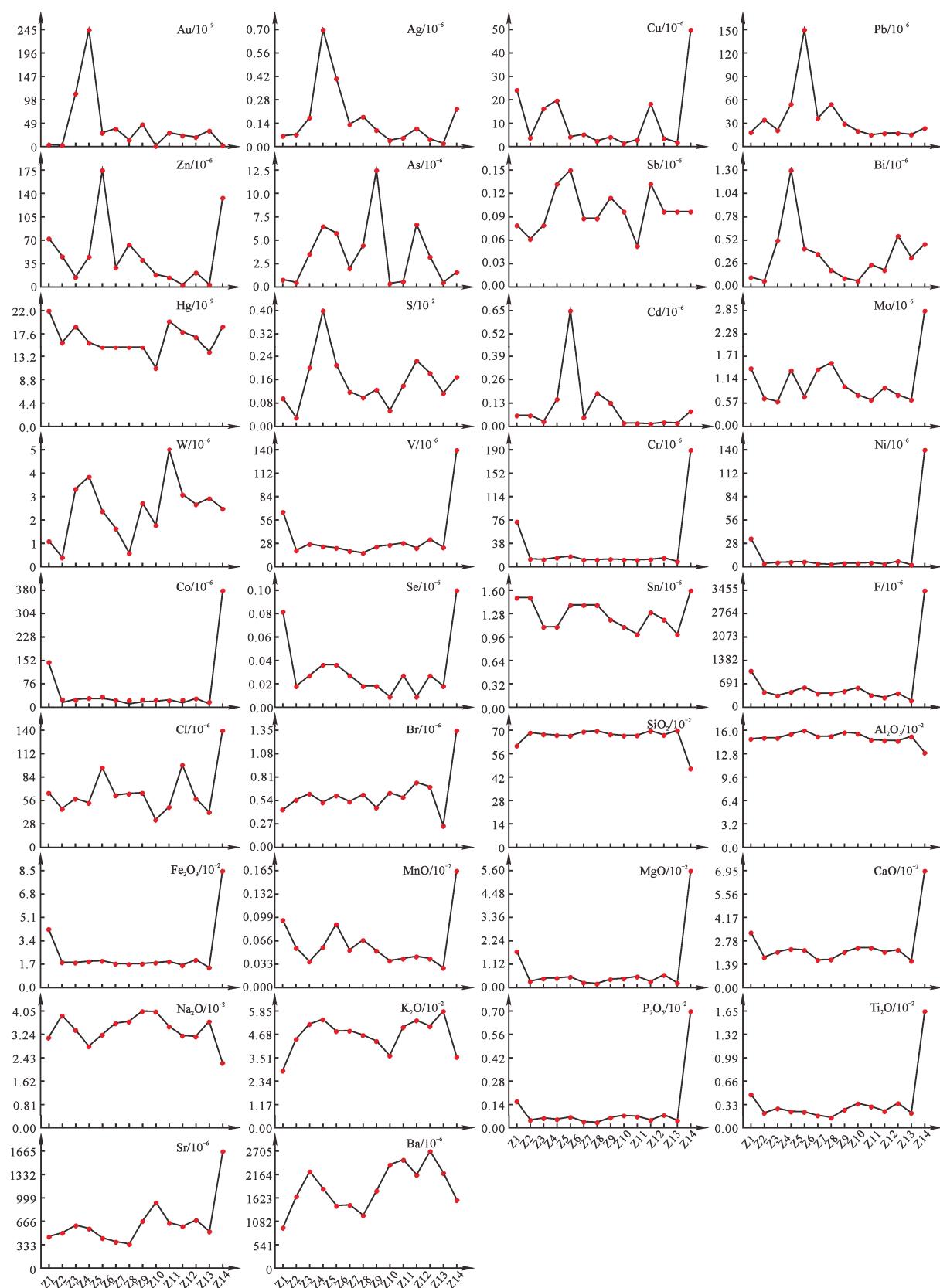


图 5 曲家试验区各地质分带元素含量变异图

Fig. 5 Diagram of element content variations of different geological zones in the Qujia test area

元素含量分布与金成矿作用的活动相关性可用来确定具找矿意义的元素指标。从浓度分带情况看, Au、Ag、Cu、As、Sb、S、Bi、Mo、W 元素的高浓度带分布于矿体周围, 并沿断裂蚀变带分布,

As、Sb 元素轴向扩散能力较强, 一般趋于在矿体浅部浓集。 K_2O 高浓度带受断裂蚀变带控制, 局部也受围岩背景影响, 这些元素明显与成矿作用和含矿热液活动有关, Hg、Se、Sr、Ba、 SiO_2 等元素高浓

度带部分沿断裂蚀变带分布, 但分布不稳定, 同时受围岩的影响, 这些元素在焦家断裂带附近含量迅速增加, 形成明显的梯度带, 而远离断裂带含量缓慢降低。Pb、Zn、Sn、Na₂O 元素沿断裂蚀变带为低值区分布, 其高浓度带不沿断裂蚀变带分布, 表明其与金成矿作用和含矿热液活动关系小。V、Ni、Co、Cr、Cd、Br、F、Cl 高浓度带不沿断裂蚀变带

分布, 或其分布方向与断裂蚀变带大角度相交, 表明其与金成矿作用和含矿热液活动关系小, 常与基性岩体或脉岩分布相吻合, 其分布主要受基性岩浆岩或脉岩活动控制。

4.2.2 轴向成分分带

选取 3 号勘探线剖面断裂蚀变带内的样品分析数据进行格里戈良分带指数计算和重心法计算。

表 6 曲家试验区各地质分带元素富集系数

Table 6 Element enrichment coefficients of different geological zones in the Qujia test area

分带 元素	Z1	Z2	Z3	Z4	Z5	Z6	Z7	Z8	Z9	Z10	Z11	Z12	Z13	Z14
SiO ₂	0.91	1.02	1.01	1.00	1.00	1.03	1.04	1.01	1.00	1.00	1.04	1.00	1.04	0.70
Al ₂ O ₃	1.03	1.04	1.04	1.07	1.11	1.05	1.05	1.09	1.08	1.02	1.01	1.01	1.05	0.90
Fe ₂ O ₃	1.74	0.76	0.75	0.78	0.80	0.72	0.70	0.71	0.74	0.78	0.67	0.83	0.60	3.46
CaO	1.91	1.05	1.24	1.34	1.30	0.96	0.98	1.23	1.38	1.38	1.24	1.31	0.93	4.03
MgO	1.17	0.21	0.30	0.32	0.35	0.17	0.13	0.27	0.30	0.36	0.20	0.41	0.15	3.74
K ₂ O	0.86	1.32	1.55	1.62	1.44	1.45	1.38	1.30	1.08	1.51	1.60	1.52	1.74	1.06
Na ₂ O	1.09	1.36	1.19	0.99	1.13	1.27	1.29	1.41	1.41	1.23	1.12	1.11	1.29	0.79
TiO ₂	0.49	0.22	0.28	0.24	0.23	0.18	0.15	0.27	0.35	0.31	0.24	0.36	0.22	1.68
P ₂ O ₅	0.16	0.05	0.06	0.05	0.06	0.04	0.03	0.06	0.08	0.07	0.05	0.08	0.04	0.71
S	7.04	2.23	14.73	29.18	15.36	8.67	7.26	9.19	4.01	10.24	16.43	13.34	8.32	12.39
MnO	0.09	0.06	0.04	0.06	0.09	0.05	0.07	0.05	0.04	0.04	0.04	0.04	0.03	0.16
Ag	1.11	1.25	2.97	11.91	6.97	2.30	3.07	1.70	0.67	0.92	1.87	0.79	0.35	3.86
Au	5.29	3.75	131.05	288.32	34.65	44.60	17.07	55.44	2.15	34.81	27.94	24.04	39.74	3.47
Cd	0.78	0.79	0.36	1.94	8.28	0.65	2.36	1.69	0.25	0.24	0.19	0.30	0.25	1.09
W	1.15	0.42	3.49	4.04	2.49	1.73	0.62	2.86	1.86	5.24	3.24	2.80	3.08	2.61
As	0.18	0.11	0.80	1.45	1.31	0.46	1.00	2.80	0.09	0.14	1.51	0.72	0.11	0.36
Sb	0.27	0.19	0.27	0.43	0.49	0.30	0.29	0.38	0.32	0.18	0.44	0.34	0.33	0.31
Hg	1.84	1.31	1.55	1.34	1.25	1.24	1.26	1.24	0.91	1.67	1.53	1.45	1.19	1.62
F	2.23	0.94	0.72	0.94	1.22	0.85	0.86	0.99	1.20	0.74	0.60	0.86	0.41	7.13
Pb	0.98	1.82	1.11	2.86	7.84	1.91	2.86	1.56	1.06	0.80	0.91	0.92	0.83	1.25
Sn	0.70	0.71	0.52	0.52	0.64	0.67	0.67	0.56	0.52	0.49	0.61	0.57	0.48	0.75
Bi	0.63	0.36	2.89	7.25	2.39	2.08	1.07	0.56	0.38	1.39	1.06	3.17	1.81	2.69
Se	1.42	0.27	0.50	0.65	0.66	0.46	0.29	0.27	0.18	0.43	0.12	0.43	0.29	1.74
Cl	0.98	0.70	0.88	0.81	1.44	0.94	0.96	0.99	0.51	0.73	1.48	0.89	0.64	2.11
Ba	1.48	2.62	3.52	2.90	2.28	2.31	1.93	2.82	3.77	3.95	3.40	4.26	3.47	2.48
V	0.97	0.29	0.41	0.36	0.34	0.28	0.25	0.36	0.39	0.42	0.34	0.49	0.34	2.07
Cr	1.60	0.28	0.27	0.33	0.38	0.26	0.26	0.28	0.26	0.24	0.27	0.32	0.19	4.14
Br	1.71	2.21	2.47	2.09	2.41	2.12	2.43	1.84	2.50	2.33	3.00	2.82	1.00	5.40
Sr	2.01	2.25	2.72	2.52	1.91	1.68	1.54	2.99	4.17	2.88	2.66	3.05	2.33	7.41
Co	1.30	0.14	0.24	0.25	0.26	0.20	0.10	0.16	0.18	0.22	0.13	0.26	0.10	3.45
Ni	1.37	0.16	0.22	0.24	0.25	0.16	0.12	0.19	0.18	0.21	0.14	0.27	0.11	5.64
Cu	1.42	0.23	0.96	1.16	0.25	0.31	0.15	0.24	0.09	0.18	1.08	0.21	0.11	2.93
Zn	1.09	0.69	0.23	0.68	2.62	0.44	0.96	0.61	0.28	0.22	0.05	0.33	0.06	2.01
Mo	2.29	1.11	0.98	2.22	1.17	2.25	2.50	1.59	1.24	1.05	1.53	1.25	1.04	4.60
样品数	16	477	27	153	15	76	81	5	4	17	2	11	2	2

注: 参考值为中国东部出露地壳(去碳酸盐岩)元素丰度值(迟清华和鄢明才, 2007)。

表 7 3 号勘探线剖面重心法原生晕分带计算结果

Table 7 Calculation results of primary halos by barycenter method along No.3 exploration line

元素	Cd	Cu	Au	Zn	Sb	Ag	Ni	Co
浓度重心/m	-853.18	-873.85	-880.00	-900.16	-903.28	-903.46	-909.66	-922.79
元素	W	Se	Pb	S	Hg	V	Bi	Cr
浓度重心/m	-938.69	-945.57	-947.09	-947.12	-956.24	-956.63	-958.12	-961.62
元素	Ba	Mo	As	F	Br	Cl	Sn	Sr
浓度重心/m	-979.22	-990.22	-999.43	-1 035.75	-1 039.36	-1 087.97	-1 127.45	-1 160.14

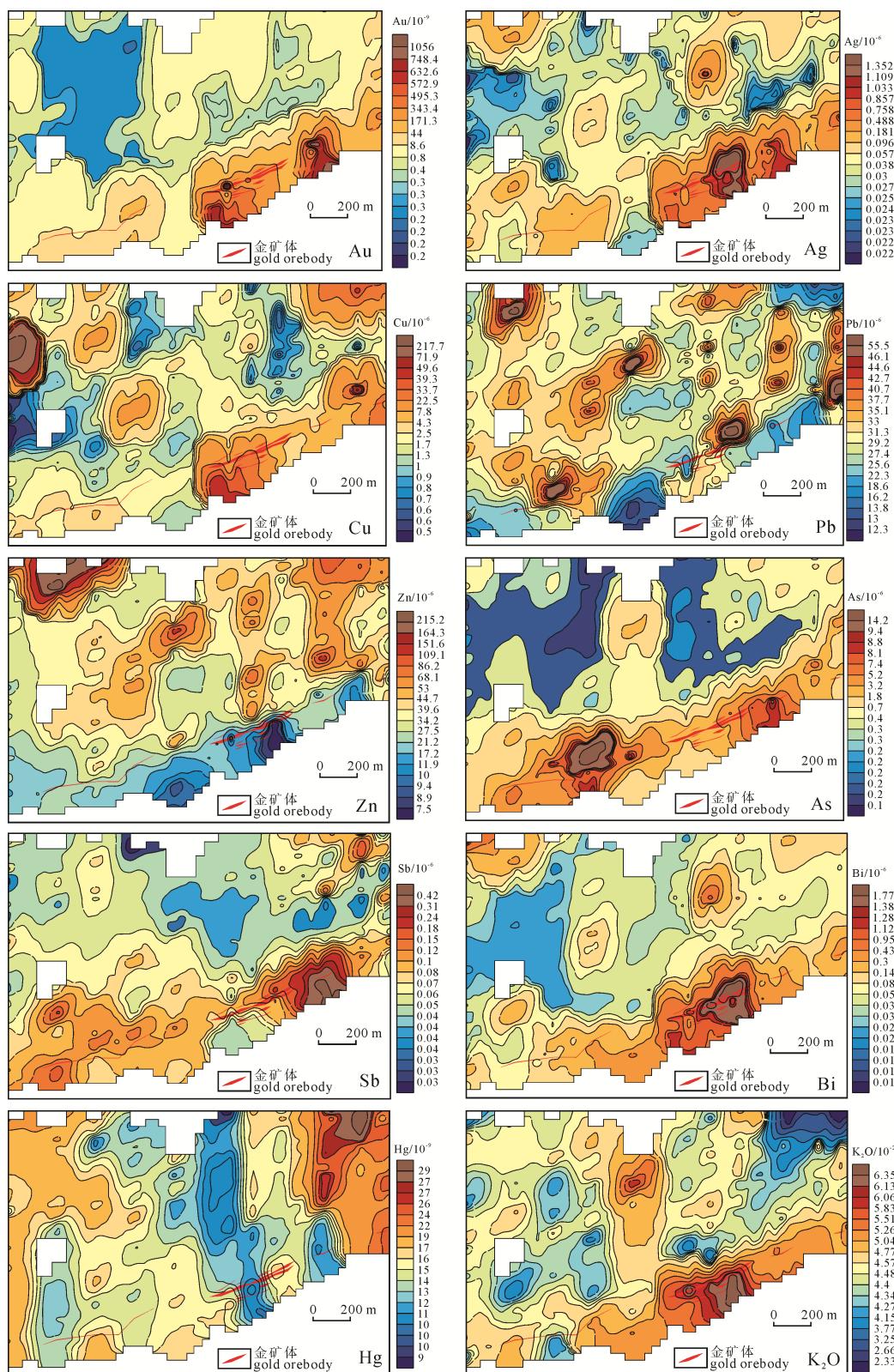
(1) 格里戈良分带指数计算结果(由浅到深):

Cd-Zn-Pb-Hg-W-Au-Ni-Sb-Cr-Ag-Bi-S-Se-Cu-V-Co-Ba-As-Mo-Sn-F-Cl-Br-Sr

(2) 重心法分带指数计算结果(由浅到深):

Cd-Cu-Au-Zn-Sb-Ag-Ni-Co-W-Se-Pb-S-Hg-V-Bi-Cr-Ba-Mo-As-F-Br-Cl-Sn-Sr

元素浓集中心对应标高见表 7。



轴向上, 近矿元素浓度重心位于 $-850\sim -900$ m, 元素为 Cd、Cu、Au、Zn、Ag、Pb, 在其下部出现头晕元素 Hg、As、F、Cl 与尾晕元素 Mo、W、Bi、V、Cr、Ni 的叠加, 预示其深部存在隐伏矿体, 这与西侧邻近招贤勘查区的勘查结果相吻合(祝德成等, 2018)。

图 6 3号勘探线主要成矿元素地球化学剖面图

Fig. 6 Geochemical section of major metallogenic elements along No. 3 exploration line

4.3 原生晕的垂向分布特征

4.3.1 垂向浓度分布

3号勘探线剖面显示的断裂蚀变带上部围岩多个元素含量明显高于参考岩石,说明存在断裂蚀变带内元素的垂向迁移,围岩元素与断裂蚀变带内向上迁移元素叠加形成原生晕。

根据3号勘探线剖面内非断裂蚀变带内样品的数据统计结果(表8),富集系数大于1的元素有 Fe_2O_3 、 CaO 、 K_2O 、 S 、 Ag 、 Au 、 Cd 、 W 、 Hg 、 F 、 Pb 、 Sn 、 Se 、 Br 、 V 、 Cr 、 Sr 、 Ni 、 Cu 、 Zn 、 Mo ,其中富集最明显,富集系数大于2的元素有 S 、 Au 、 Hg 、 Ba 、 Cr 、 Sr 、 Cu ,有明显的原生晕叠加效应。 SiO_2 、 MgO 、 Na_2O 、 As 、 Sb 、 Bi 、 Cl 、 Co 富集系数小于1,无明显原生晕叠加。

沿断裂蚀变带分布的 Au 、 Ag 、 Cu 、 Bi 、 Hg 、 S 、 Mo 、 W 、 F 等高含量元素,在上部围岩中含也明显高于参考岩石,表明其垂向迁移作用明显,浅部易形成具有指示意义的原生晕异常,当这些元素异常同时

出现时,指示深部存在金矿体的可能性大,其中 Hg 元素的垂向扩散能力最强。根据3号勘探线剖面围岩元素含量与矿体对应关系,初步确定当浅部多个元素同时达到 $\text{K}_2\text{O} \geq 4.57 \times 10^{-2}$, $\text{Au} \geq 0.8 \times 10^{-9}$, $\text{Ag} \geq 0.057 \times 10^{-6}$, $\text{Cu} \geq 2.5 \times 10^{-6}$, $\text{As} \geq 0.7 \times 10^{-6}$, $\text{Sb} \geq 0.07 \times 10^{-6}$, $\text{Bi} \geq 0.08 \times 10^{-6}$, $\text{Hg} \geq 17 \times 10^{-9}$, $\text{S} \geq 0.0583 \times 10^{-2}$, $\text{Mo} \geq 0.74 \times 10^{-6}$, $\text{W} \geq 0.55 \times 10^{-6}$,并随深度增加持续升高时,表明已接近断裂蚀变带和成矿部位,指示深部发现金矿体的可能性较大。

从曲家试验区-100~-1300 m原生晕地球化学水平断面图(图7、图8),元素水平叠置图(图9)上可以看出(不同标高用同一色区划分标准),在矿体轴向、垂向、纵向、横向均有扩散成晕效应,其中矿体原生晕在垂向上的扩散有利于形成地表土壤活动态异常。

与金成矿有关元素在垂向上从深到浅浓度趋于降低,并具有变化的连续性,显示元素从深到浅的扩散和成晕,但其浓度和衰减幅度要远小于轴

表8 3号勘探线剖面断裂蚀变带上部围岩地球化学参数

Table 8 Geochemical parameters of the upper wall rock of the fault alteration zone along No. 3 exploration line

元素	数据个数	最小值	几何平均值	算术平均值	最大值	标准离差	变异系数	参考值	富集系数
SiO_2	137	50.06	68.49	68.63	74.10	4.21	0.06	72.07	0.95
Al_2O_3	137	9.74	14.81	14.83	18.06	0.83	0.06	14.05	1.06
Fe_2O_3	137	1.41	1.90	2.04	7.45	1.10	0.54	1.20	1.70
CaO	137	1.10	1.85	2.01	6.91	1.04	0.52	1.30	1.55
MgO	137	0.06	0.26	0.46	5.61	0.85	1.84	0.60	0.77
K_2O	137	1.36	4.29	4.36	6.93	0.69	0.16	4.27	1.02
Na_2O	137	0.33	3.71	3.79	5.04	0.57	0.15	3.82	0.99
TiO_2	137	0.071	0.227	0.257	1.655	0.191	0.74	0.227	1.13
P_2O_5	137	0.021	0.044	0.061	0.777	0.099	1.63	0.065	0.94
S	137	0.002	0.016	0.051	2.350	0.208	4.04	0.007	7.34
MnO	137	0.037	0.057	0.060	0.234	0.027	0.45	0.040	1.50
Ag	137	0.020	0.036	0.057	1.410	0.129	2.24	0.052	1.10
Au	137	0.1	0.6	1.3	50.3	4.4	3.37	0.4	3.42
Cd	137	0.010	0.037	0.063	1.152	0.129	2.06	0.046	1.37
W	137	0.11	0.41	0.51	3.01	0.42	0.82	0.49	1.04
As	137	0.0	0.3	0.4	5.1	0.5	1.26	0.7	0.57
Sb	137	0.00	0.05	0.06	0.25	0.03	0.56	0.12	0.50
Hg	137	7	16	17	33	5	0.30	6	2.83
F	137	206	444	524	3 256	451	0.86	360	1.46
Pb	137	6.8	29.2	30.7	84.5	9.9	0.32	21.0	1.46
Sn	137	1.0	1.4	1.4	3.6	0.3	0.24	1.3	1.08
Bi	137	0.01	0.04	0.08	2.03	0.22	2.66	0.10	0.80
Se	137	0.00	0.02	0.03	0.60	0.06	1.96	0.03	1.11
Cl	137	8	34	46	176	34	0.75	60	0.77
Ba	137	348	1 566	1 779	24 069	1 978	1.11	785	2.27
V	137	12.9	20.8	25.2	132.7	24.2	0.96	20.0	1.26
Cr	137	3.1	11.1	18.7	204.2	34.2	1.83	6.3	2.97
Sr	137	239	495	550	6 712	562	1.02	245	2.24
Co	137	0.5	1.2	2.6	30.9	5.6	2.15	2.9	0.90
Ni	137	0.7	2.8	7.5	148.8	21.0	2.81	4.3	1.74
Cu	137	0.2	1.6	10.5	873.9	74.9	7.12	4.9	2.14
Zn	137	15.5	41.7	51.7	445.4	55.4	1.07	36.0	1.44
Mo	137	0.22	0.65	0.71	5.01	0.45	0.64	0.50	1.42

注: 参考值为华北地台花岗岩元素丰度值(迟清华和鄢明才, 2007); 元素含量单位: SiO_2 、 Al_2O_3 、 Fe_2O_3 、 CaO 、 MgO 、 K_2O 、 Na_2O 、 TiO_2 、 P_2O_5 、 S 、 MnO 为 10^{-2} , Au 、 Hg 为 10^{-9} , 其它元素为 10^{-6} 。

向。元素垂向迁移程度差异较大,部分地段迁移明显,而另外地段则不明显。这与围岩的垂向可通透性有关,受此影响,垂向高含量带可出现间断和转弯。

4.3.2 垂向成分分带

因焦家成矿带为 NW 倾斜,矿体埋深在不同部位存在差异,沿 3 号勘探线剖面选取矿体埋深不同部位的钻孔研究了元素的垂向分带特征(表 9、表 10)。

(1) 小深度部位

ZK3'-03 钻孔的研究结果表明,矿体埋深较小部位的 Cr、Co、Ni、V 等元素浓集明显受浅部马连

庄序列变辉长岩背景值影响。浅部成矿带部位垂向迁移距离较远并在浅部浓集的元素为 F、Sn、Cl、Cu、Mo,成矿带附近浓集的元素为 S、Bi、W、Ag、Au 等,As、Sb 主要沿轴向迁移,垂向迁移能力弱,浓集中心距焦家成矿带中心位置较近,Zn 元素高浓度带由于不沿断裂带分布,因此浅部的高浓度带不能认为是由成矿带元素向上迁移引起。

(2) 中深度部位

ZK3-27 和 ZK3-28 的研究结果表明,矿体埋深中等深度部位垂向迁移距离较远并在浅部浓集的元素为 Sn、Cl、Cd、Pb、Mo,成矿带附近浓集的

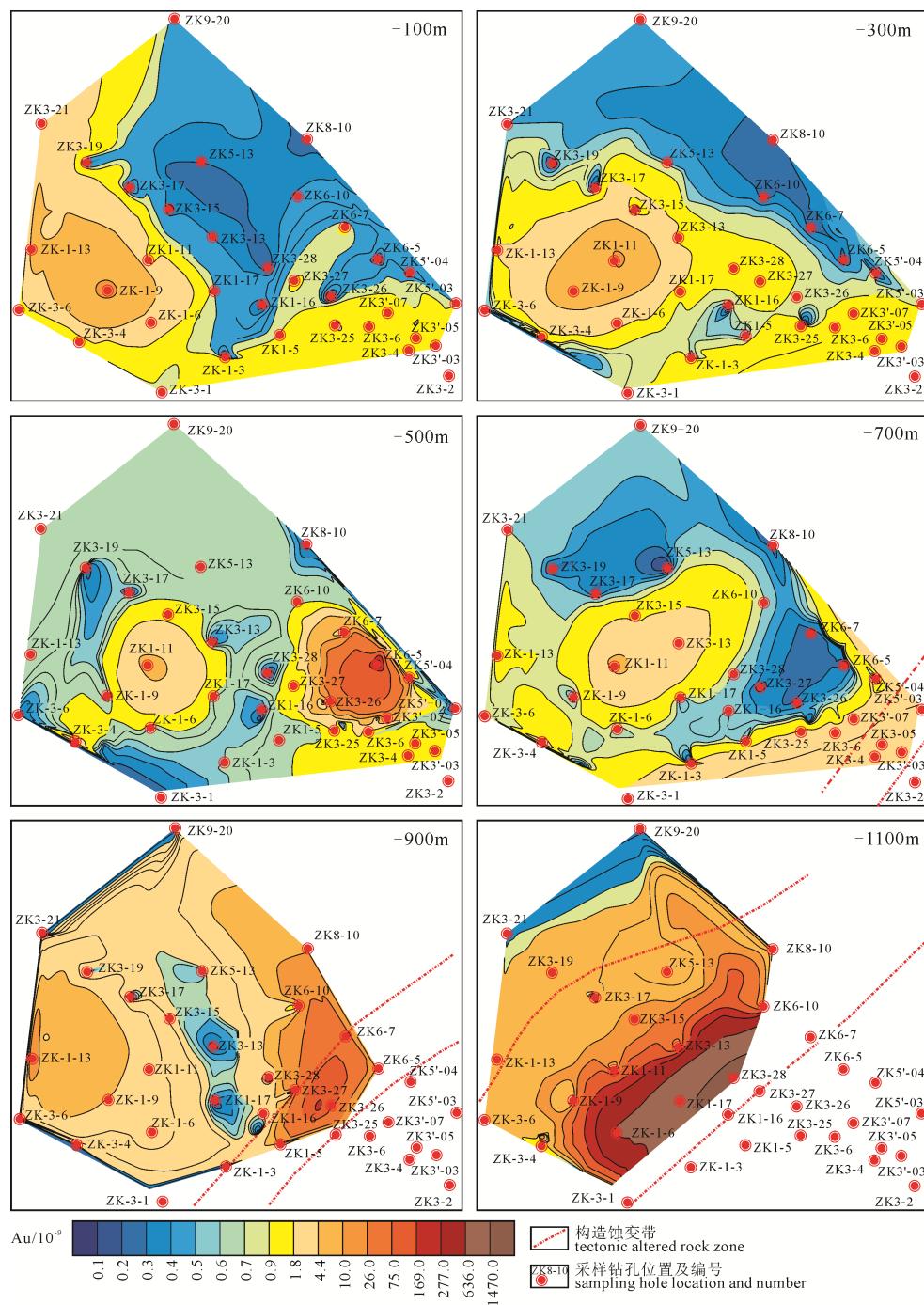


图 7 各标高 Au 元素原生晕水平断面图
Fig. 7 The horizontal section of Au at each elevation

元素为 S、Bi、Cu、Ag、Au、W 等; 一般被认为是头晕元素的 As、Sb 在垂向上的迁移能力弱, 主要沿轴向迁移; Zn 元素高浓度带不沿断裂蚀变带分布, 不能认为浅部的高含量带由深部元素向上迁移引起。

(3) 大深度部位

ZK3-19 和 ZK3-21 的研究结果表明, 矿体埋深大深度部位垂向迁移距离较远并在浅部浓集的元素为 Se、Cd、Mo、Hg、Bi、S、F、Cu、Ag, 成矿带附近浓集的元素为 Sb、As、Au、W 等, 一般被认为是头晕元素的 As、Sb 在垂向迁移能力弱, 主要沿轴向迁移。Zn 元素高浓度带不沿断裂蚀变带分布, 不能认为浅部的高含量带由深部元素向上迁移引起;

Ni、Co、V 元素高浓度带由于不沿焦家成矿带分布, 浅部浓集中心由基性脉岩或包体引起。

5 讨论

5.1 原生晕的形成与影响因素

金矿勘查和研究表明沿焦家断裂带主断裂面向两边岩石破碎和蚀变程度逐渐减弱, 由密集细脉状和稠密浸染状黄铁绢英岩化到沿裂隙稀疏分布的细脉、枝脉状黄铁绢英岩化再到稀疏浸染状黄铁矿化, 岩石类型由黄铁绢英岩、二长花岗质碎裂岩、花岗质碎斑岩逐渐变为碎裂状二长花岗岩, 岩石结构由碎斑、碎粒、碎粉结构逐渐过渡到变余花岗

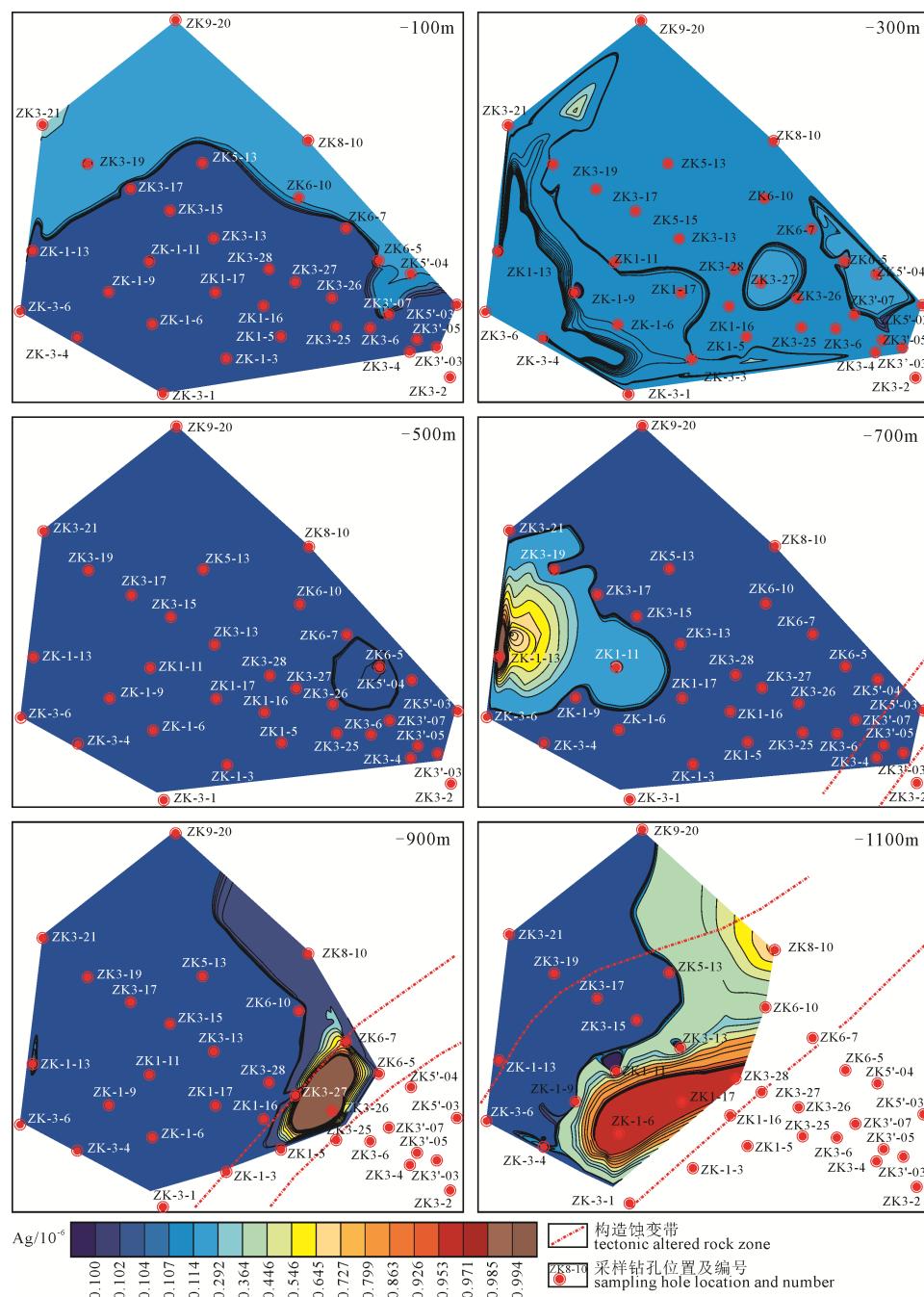


图8 各标高Ag元素原生晕水平断面图
Fig. 8 The horizontal section of Ag at each elevation

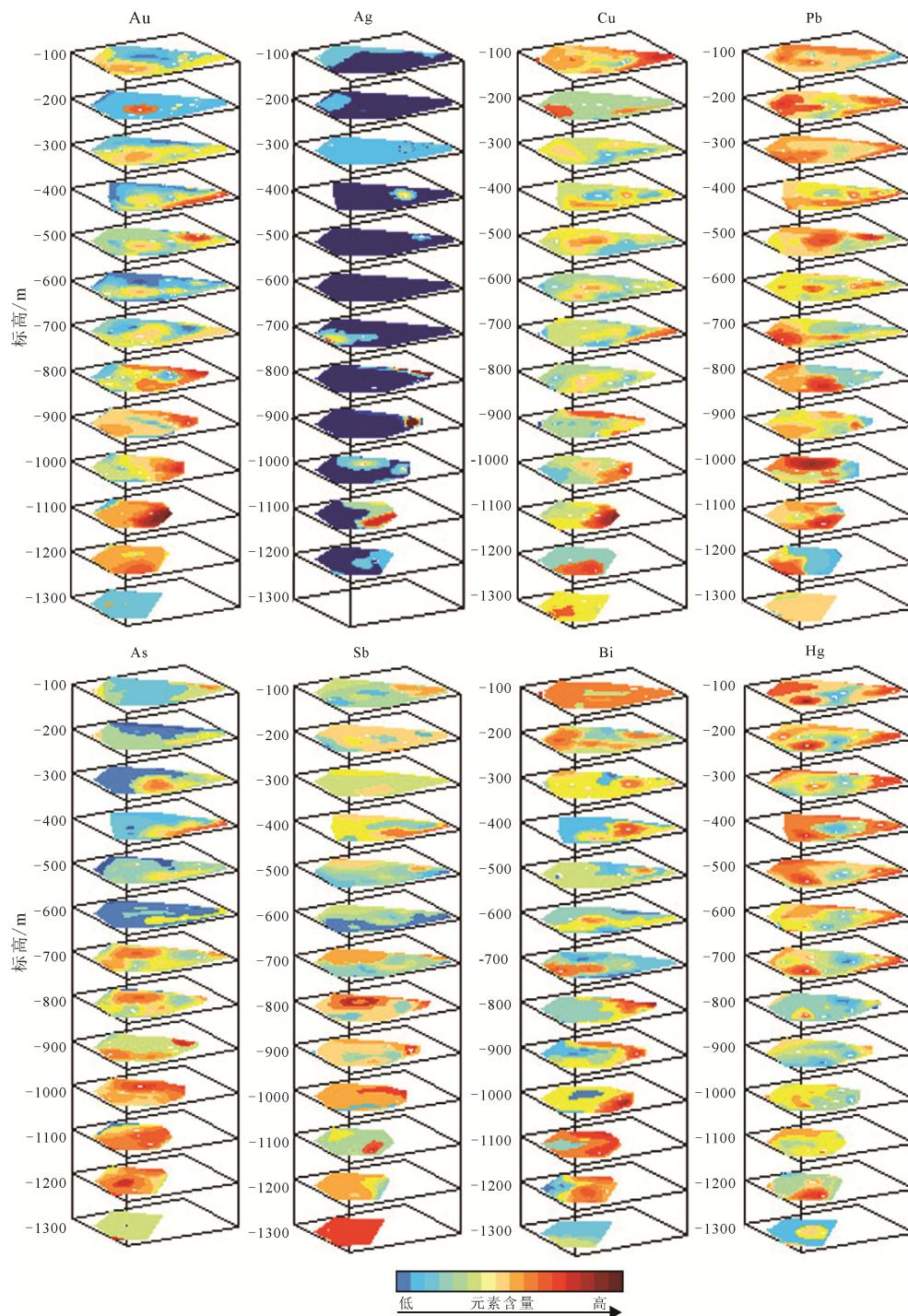


图 9 -100~ -1300 m 标高原生晕水平断面叠置图

Fig. 9 The map of primary halo horizontal section overlay of multi-elements from -100 m to -1300 m elevation

结构, 岩石破碎, 黄铁绢英岩化强烈部位一般是金矿体赋存部位。焦家金矿带发育的蚀变类型主要包括钾化、硅化、黄铁矿化、绢英岩化、黄铁绢英岩化、绿泥石化、碳酸盐化等, 这些蚀变由含矿热液与围岩相互作用形成, 伴随着原岩矿物分解, 蚀变矿物形成及元素的迁移和原生晕的形成。黄铁绢英岩化蚀变与金矿形成有密切关系, 钾化蚀变范围宽, 距蚀变带中心可超过千米, 对于找矿有远程指示意义。焦家断裂带为含矿热液运移提供了通道, 热液体系具有的较高压力、温度和化学活性为元素迁移和

原生晕的形成提供了动力, 另一方面岩石越破碎, 粒度越细, 渗透性越好, 越有利于热液对岩石的蚀变作用, 成矿物质运移及原生晕和金矿的形成(Gammons and William-Jones, 1997; 郭涛等, 2008; 朱永峰和安芳, 2010), 近年来发现成矿物质纳米粒子迁移也是原生晕形成的一个原因(Wang et al., 1997)。

5.2 原生晕元素浓度变化

在轴向上一般在矿体中心部位元素含量高, 向两侧含量降低, 但由于不同元素扩散能力及围岩特性上的差异, 使元素出现分带, 多次成矿作用的叠

加, 会形成复杂的原生晕和构造叠加晕(李惠等, 2012, 2013, 2016)。元素浓度分布受断裂蚀变带内含矿热液活动, 同时受围岩元素含量背景影响。元素在垂向和轴向上的迁移能力存在差异, 一般情况下元素在轴向上的迁移比垂向上迁移要容易得多, 垂向上的元素浓度的衰减速度远大于轴向。显然它受热液物理特性(如温度、压力、元素浓度)和围岩特性(如裂隙发育程度, 化学稳定性, 可渗透性)影响。成矿温度、压力越高, 围岩化学活性越大, 物理特性越疏松破碎, 越有利于元素迁移, 浓度衰减越慢。

设定原生晕在垂向上浓度衰减度=(原生晕最上部元素含量-成矿带中心元素含量)/(成矿带中心样品深度-上部样品深度)×100, 负值表示从深到浅元素浓度降低, 正值表示浓度升高。从曲家试验区原生晕在垂向上浓度衰减情况(表 11)可以看出: S 元素浓

度的衰减度为 $(-0.11\sim-0.02)\times10^{-2}/(100\text{ m})$, 浅部个别部位为正值; Ag 的衰减度 $(-0.19\sim-0.02)\times10^{-6}/(100\text{ m})$, 变化较小; Au $(-0.28\sim-58.81)\times10^{-9}/(100\text{ m})$, 变化大; As $(-1.54\sim-0.00)\times10^{-6}/(100\text{ m})$; Sb $(-0.02\sim-0.00)\times10^{-6}/(100\text{ m})$; Hg $(-0.50\sim-2.79)\times10^{-9}/(100\text{ m})$; Pb $(-3.29\sim-0.66)\times10^{-6}/(100\text{ m})$; Bi $(-0.52\sim-0.01)\times10^{-6}/(100\text{ m})$; Cu $(-12.03\sim-5.12)\times10^{-6}/(100\text{ m})$, Zn $(-2.93\sim-27.72)\times10^{-6}/(100\text{ m})$, Mo 元素 $(-0.19\sim-0.26)\times10^{-6}/(100\text{ m})$ 。表明垂向上 Au 从下向上含量明显衰减, 衰减幅度变化大, S、Ag、As、Sb、Bi 主要表现为衰减, 幅度较小, Pb、Mo、Cu 主要表现为衰减, 局部为升高, Zn 表现为升高, 表明其主要与围岩背景有关, 与深部热液活动关系小。

5.3 原生晕元素成分分带

原生晕在轴向上一般认为分为头晕元素、近矿

表 9 垂向成分分带计算结果表
Table 9 Calculation results of vertical component zonation

部位	钻孔	计算方法	成分分带(从浅到深)											
			成分分带(从浅到深)											
小深度	ZK3'-03	格里戈良法	Se-Cr-Co-Ni-Mo-V-F-Hg-Sn-As-Sb-Sr-Cl-Au-Ag-Pb-Zn-Cd-S-Bi-W-Cu-Br-Ba											
		重心法	Cr-Co-Ni-Mo-F-Se-V-Sn-Zn-Hg-Cl-Cu-Sr-Sb-Br-As-Pb-Ba-S-Cd-Bi-W-Au-Ag											
中深度	ZK3-27	格里戈良法	Pb-Co-Cd-Cl-Br-Hg-Sn-Zn-Ba-V-Sr-Cr-Sb-Ni-As-Cu-Ag-Bi-Mo-F-W-Se-S-Au											
		重心法	Hg-Sn-Zn-Br-Cl-Sr-Cr-Cd-Co-Pb-Ba-F-Ni-V-Sb-Se-Ag-Bi-W-As-S-Cu-Mo-Au											
ZK3-28	格里戈良法	Zn-Sn-Br-Pb-Sr-F-Cl-Sb-Ni-Cr-Co-Se-S-As-W-Cd-V-Ba-Mo-Bi-Ag-Au-Cu-Hg												
	重心法	Sn-Zn-Cl-Sr-Br-Cd-Pb-F-Cr-Mo-Ni-Ba-Sb-Hg-Co-Sn-V-As-W-S-Bi-Cu-Ag-Au												
大深度	ZK3-19	格里戈良法	Sn-Cd-Bi-Ag-Zn-Sr-Ba-Hg-Mo-Pb-Cr-Sb-Br-Cu-Se-S-Cl-F-As-Au-V-W-Ni-Co											
		重心法	Cd-Zn-Hg-Ag-Bi-Sn-Pb-Mo-Sr-Ba-Br-Se-Cr-Cu-F-Cl-Ni-W-V-Co-Sb-S-As-A											
ZK3-21	格里戈良法	S-Bi-Ni-Co-Se-Cr-V-Zn-Sn-F-Cu-Cd-Mo-Pb-Hg-Ag-Cl-As-Br-Sr-Ba-Sb-Au-W												
	重心法	Se-Ni-Co-Bi-S-Cu-Cr-Zn-F-V-Sn-Ag-Pb-Mo-Hg-Ba-Cd-Br-Sb-As-Au-Cl-Sr-W												

表 10 重心法计算的元素浓集中心标高
Table 10 Depth of concentrations of elements calculated by barycentric method

部位	钻孔	元素浓集中心												
		元素	Cr	Co	Ni	Mo	F	Se	V	Sn	Zn	Hg	Cl	Cu
小深度	ZK3'-03	浓集重心/m	-238	-241	-274	-313	-324	-340	-357	-372	-463	-484	-494	-494
		元素	Sr	Sb	Br	As	Pb	Ba	S	Cd	Bi	W	Au	Ag
ZK3-27		浓集重心/m	-499	-506	-509	-522	-544	-556	-571	-580	-608	-624	-628	-633
		元素	Hg	Sn	Zn	Br	Cl	Sr	Cr	Cd	Co	Pb	Ba	F
ZK3-28		浓集重心/m	-544	-545	-572	-613	-619	-634	-639	-645	-666	-673	-718	-726
		元素	Ni	V	Sb	Se	Ag	Bi	W	As	S	Cu	Mo	Au
中深度	ZK3-28	浓集重心/m	-730	-825	-833	-843	-881	-919	-938	-959	-968	-980	-985	-1 011
		元素	Sn	Zn	Cl	Sr	Br	Cd	Pb	F	Cr	Mo	Ni	Ba
ZK3-19		浓集重心/m	-463	-580	-679	-684	-687	-702	-716	-720	-779	-828	-836	-839
		元素	Sb	Hg	Co	Se	V	As	W	S	Bi	Cu	Ag	Au
ZK3-21		浓集重心/m	-844	-880	-892	-894	-904	-1 014	-1 028	-1 042	-1 048	-1 051	-1 052	-1 075
		元素	Cd	Zn	Hg	Ag	Bi	Sn	Pb	Mo	Sr	Ba	Br	Se
大深度	ZK3-19	浓集重心/m	-356	-427	-518	-554	-585	-644	-729	-784	-787	-794	-835	-851
		元素	Cr	Cu	F	Cl	Ni	W	V	Co	Sb	S	As	Au
ZK3-21		浓集重心/m	-897	-934	-942	-952	-990	-992	-999	-1 014	-1 053	-1 191	-1 237	-1 264
		元素	Se	Ni	Co	Bi	S	Cu	Cr	Zn	F	V	Sn	Ag
ZK3-21		浓集重心/m	-338	-369	-372	-405	-423	-472	-481	-495	-557	-606	-669	-712
		元素	Pb	Mo	Hg	Ba	Cd	Br	Sb	As	Au	Cl	Sr	W
		浓集重心/m	-765	-783	-787	-801	-916	-920	-957	-966	-987	-1 036	-1 084	-1 313

表 11 曲家试验区原生晕衰减情况

Table 11 Comparison of concentration decays of primary halos in the Qujia test area

样品编号	标高/m	S	Ag	Au	As	Sb	Hg	Pb	Bi	Cu	Zn	Mo
ZK3'-03-1	-50	0.190	0.093	5.9	0.42	0.02	25	10.7	0.11	42.8	41.5	2.20
ZK3'-03-20	-700	0.043	0.074	9.4	0.40	0.02	25	32.1	0.03	9.5	43.0	0.52
衰减度		0.023	0.003	-0.5	0.00	0.00	0	-3.3	0.01	5.1	-0.2	0.26
ZK3'-05-1	-50	0.100	0.026	4.7	0.19	0.02	29	12.0	0.10	33.6	76.4	0.91
ZK3'-05-20	-720	0.170	0.074	7.9	6.90	0.15	15	7.8	0.10	1.7	7.9	0.78
衰减度		-0.010	-0.007	-0.5	-1.00	-0.02	2	0.6	0.00	4.8	10.2	0.02
ZK3'-07-1	-50	0.190	0.057	0.6	0.59	0.11	32	10.6	0.10	24.3	111.2	1.54
ZK3'-07-19	-830	0.160	0.042	15.8	8.41	0.16	10	12.0	0.05	2.4	25.2	0.45
衰减度		0.004	0.002	-2.0	-1.00	-0.01	3	-0.2	0.01	2.8	11.0	0.14
ZK3-25-1	-50	0.027	0.030	0.6	0.54	0.06	19	32.2	0.04	2.0	32.2	0.49
ZK3-25-18	-850	0.210	0.439	71.8	12.82	0.19	15	35.1	0.17	12.7	55.7	0.92
衰减度		-0.023	-0.051	-8.9	-1.54	-0.02	1	-0.4	-0.02	-1.3	-2.9	-0.05
ZK3-26-1	-50	0.094	0.162	0.6	0.61	0.08	15	41.5	0.08	1.6	26.3	0.67
ZK3-26-23	-940	0.710	0.510	330.0	3.21	0.06	16	23.0	0.89	9.4	4.1	0.88
衰减度		-0.069	-0.039	-37.0	-0.29	0.00	0	2.1	-0.09	-0.9	2.5	-0.02
ZK3-27-1	-50	0.010	0.024	1.3	0.34	0.05	18	29.7	0.04	0.5	38.2	0.91
ZK3-27-24	-1000	1.090	1.793	560.0	4.02	0.07	10	41.4	4.96	64.1	10.0	2.68
衰减度		-0.114	-0.186	-58.8	-0.39	0.00	1	-1.2	-0.52	-6.7	3.0	-0.19
ZK3-28-2	-100	0.008	0.045	0.3	0.34	0.04	9	30.5	0.01	3.0	40.7	0.74
ZK3-28-24	-1040	0.720	1.786	148.0	8.88	0.19	14	24.4	1.58	116.1	10.6	1.24
衰减度		-0.076	-0.185	-15.7	-0.91	-0.02	-1	0.7	-0.17	-12.0	3.2	-0.05
ZK3-13-3	-150	0.008	0.092	0.6	0.24	0.04	11	29.2	0.03	1.5	24.4	0.67
ZK3-13-22	-1100	0.125	0.088	3.3	7.28	0.15	17	30.0	0.10	2.1	23.8	0.74
衰减度		-0.012	0.000	-0.3	-0.74	-0.01	-1	-0.1	-0.01	-0.1	0.1	-0.01
ZK3-15-1	-50	0.006	0.021	0.3	0.18	0.04	15	25.2	0.02	1.0	34.0	0.39
ZK3-15-27	-1190	0.240	0.427	28.2	11.63	0.12	13	55.9	0.46	2.5	24.1	1.30
衰减度		-0.020	-0.036	-2.4	-1.00	-0.01	0	-2.7	-0.04	-0.1	0.9	-0.08
ZK3-17-1	-50	0.043	0.096	1.5	0.27	0.05	19	32.8	0.13	4.8	360.1	0.54
ZK3-17-31	-1270	0.061	0.044	8.1	7.37	0.08	16	34.0	0.02	3.2	21.9	0.86
衰减度		-0.001	0.004	-0.5	-0.58	0.00	0	-0.1	0.01	0.1	27.7	-0.03
ZK3-19-3	-100	0.023	0.310	0.3	0.23	0.04	23	45.2	0.40	1.6	312.8	1.30
ZK3-19-31	-1300	0.066	0.024	7.9	3.53	0.11	12	20.1	0.01	3.1	20.4	0.64
衰减度		-0.004	0.024	-0.6	-0.28	-0.01	1	2.1	0.03	-0.1	24.4	0.05
ZK3-21-1	-50	0.005	0.021	1.2	0.19	0.04	18	25.8	0.03	0.4	27.4	0.73
ZK3-21-27	-1350	0.185	0.231	10.0	1.25	0.11	17	37.1	0.40	3.4	14.4	0.60
衰减度		-0.014	-0.016	-0.7	-0.08	-0.01	0	-0.9	-0.03	-0.2	1.0	0.01

注: 元素含量单位: S: %; Au、Hg: 10^{-9} ; 其它元素 10^{-6} ; 衰减度单位: S: $10^{-2}/(100 \text{ m})$; Au、Hg: $10^{-9}/(100 \text{ m})$, 其它元素 $10^{-6}/(100 \text{ m})$; 表中从上向下钻孔和矿化蚀变带由浅到深

元素和尾晕元素。沿焦家断裂蚀变带的轴向元素含量一般衰减较小，并存在多期，多部位矿体原生晕的叠加，出现头尾晕元素的反转(李惠, 2016)。原生叠加晕理论认为，轴向分带出现“反常、反分带”现象是多次成矿-成晕叠加的结果，且将反分带、前尾晕共存作为预测盲矿的重要标志，上部已知矿体尾部出现前、尾晕叠加共存，是指示深部有盲矿存在的重要标志(李惠, 2016)。经计算，曲家试验区原生晕轴向分带近矿晕以下出现头晕元素 As、Sb、F、Cl 和尾晕元素 Bi、Mo 的叠加，显示存在多阶段成矿作用的叠加，深部仍可能存在金矿体。

高浓度带不沿断裂蚀变带分布的元素不能肯定与含矿热液活动有关，浅部元素浓集中心为围岩元素与矿体元素扩散叠加，浓度应明显高于岩石背

景值，才有可能是叠加了断裂蚀变带内的扩散元素。垂向上元素浓集位置在成矿带不同深度区段的表现差异较大，但也存在一定规律性。As、Sb 在焦家成矿带上部围岩中的平均含量低于参照岩石，浓集中心距焦家成矿带中心位置较近，不能肯定有垂向迁移的成晕效应，或者说其垂向迁移能力弱，主要是轴向迁移。Zn 元素高浓度带由于不沿断裂蚀变带分布，因此浅部的高浓度带不能认为是由成矿带元素向上迁移引起。Ni、Co、V 元素高浓度带不沿焦家成矿带分布，浅部浓集中心由基性脉岩或包体引起。垂向迁移距离较远或者说垂向迁移能力较强元素为 Se、Cd、Hg、F、Ag，其次是 S、Bi、Mo、Cu，成矿带附近浓集的元素为 Sb、As、Au、W 等，因此可用 $\text{Hg} \cdot \text{Ag}/(\text{As} \cdot \text{W})$, $\text{Bi} \cdot \text{Hg}/(\text{As} \cdot \text{Au})$ 指数来判断

金矿体的埋深。

6 结论

(1)曲家金矿 Au、Ag、Cu、As、Sb、S、Bi、Mo、W、K₂O 等元素与成矿作用关系最为密切, 其次为 Hg、Se、Sr、Ba、SiO₂, 而 Pb、Zn、Sn、Na₂O、V、Ni、Co、Cr、Cd、Br、F、Cl 与金成矿作用关系小。

(2)主要成矿元素除沿断裂蚀变带转移外, 还具有垂向迁移能力, 并在成矿带上部围岩中形成原生晕的叠加, 向地表和浅部聚集, 为地表探测深部金矿提供了可能, 但其浓集程度要远弱于轴向。

(3)金矿体不同部位元素垂向分布有较大差异, 其除受热液特性影响外, 还受围岩渗透性和化学活性的影响。

(4)曲家试验区原生晕成分垂向分带在矿体不同埋深处存在差异, 垂向上迁移能力较强并易在浅部浓集的元素为 Se、Cd、Mo、Hg、Bi、S、F、Cu、Ag, 成矿带附近浓集的元素为 Sb、As、Au、W 等, As、Sb 在垂向上的迁移能力弱, 主要沿轴向迁移。当浅部多个元素同时达到 K₂O≥4.57×10⁻², Au≥0.8×10⁻⁹, Ag≥0.057×10⁻⁶, Cu≥2.5×10⁻⁶, Bi≥0.08×10⁻⁶, Hg≥7×10⁻⁹, S≥0.0583×10⁻², Mo≥0.74×10⁻⁶, W≥0.55×10⁻⁶ 时, 指示深部发现金矿体的可能性较大, Hg·Ag/(As·W), Bi·Hg/(As·Au) 指数可用来判断金矿体的埋深。

(5)曲家试验区原生晕成分轴向分带为 Cd-Zn-Pb-Hg-W-Au-Ni-Sb-Cr-Ag-Bi-S-Se-Cu-V-Co-Ba-As-Mo-Sn-F-Cl-Br-Sr(从浅到深)。在尾晕出现头晕元素, 表明深部还存在矿体, 这与邻区在焦家金成矿带深部延伸部位发现金矿体的勘查成果相吻合, 表明戈里格良法和重心法轴向分带计算能够反映出实际矿体分布情况。

致谢:感谢山东黄金地质矿产勘查有限公司、山东省新城金矿等单位有关地质同行在项目实施及成文过程中给予的帮助和支持!感谢两位审稿专家和编辑提出的宝贵意见!

Acknowledgements:

This study was supported by National Program on Key Research Project (No. 2016YFC0600600), and National Natural Science Foundation of China (Nos. 41672084, 41772076, 41372086, 41503038 and 41140025).

参考文献:

迟清华, 鄢明才. 2007. 应用地球化学元素丰度数据手册 [M]. 北京: 地质出版社.

郭涛, 邓军, 吕吉贤, 孙之夫. 2008. 焦家金矿床成矿流体运移

- 的通道、方式及驱动机制 [J]. 地球学报, 29(1): 81-88.
- 李惠, 禹斌, 李德亮, 马久菊, 魏江, 赵佳祥, 孙凤舟, 翟培, 王俊, 王晓, 李上, 张贺然. 2012. 胶东石英脉—蚀变岩型金矿床深部盲矿预测的构造叠加晕模型 [J]. 黄金科学技术, 20(4): 1-6.
- 李惠, 禹斌, 李德亮, 张国义, 马久菊, 张强, 孙凤舟, 李上, 魏江, 赵佳祥, 王俊, 翟培. 2013. 构造叠加晕找盲矿法及研究方法 [J]. 地质与勘探, 49(1): 154-161.
- 李惠, 禹斌, 张国义, 马久菊, 李德亮, 孙凤舟, 李永才, 魏江, 赵佳, 王俊, 王一大, 李上, 张贺然, 魏子鑫. 2016. 从原生晕、原生叠加晕到构造叠加晕: 化探找盲矿法的发展与创新 [J]. 地质找矿论丛, 31(1): 92-98.
- 李惠, 张文华, 刘宝林, 王敬臣, 郭瑞栋. 1999a. 中国主要类型金矿床的原生晕轴向分带序列研究及其应用准则 [J]. 地质与勘探, 35(1): 32-35.
- 李惠, 张文华, 刘宝林, 常凤池. 1999b. 金矿床轴向地球化学参数叠加结构的理想模式及其应用准则 [J]. 地质与勘探, 35(6): 40-43.
- 李惠, 张文华, 刘宝林, 李富国, 王敬臣, 赵可广. 1998. 山东新城金矿床的叠加晕模式 [J]. 地质找矿论丛, 13(1): 1-6.
- 刘如英, 李同军, 童霆. 1988. 区域化探中应用因子分析方法的探讨 [J]. 物探与化探, 12(3): 182-192.
- 朴寿成, 李绪俊, 师磊, 于泽新, 武玉琪, 孙洪礼, 史风江. 2006. 赤峰—朝阳金矿化集中区元素分带特征及其应用 [J]. 地质与勘探, 42(1): 17-20.
- 朴寿成, 连长云. 1994. 一种确定原生晕分带序列的新方法—重心法 [J]. 地质与勘探, (1): 63-65.
- 朴寿成, 杨永强, 连长云. 1996. 原生晕分带序列研究方法综述 [J]. 世界地质, 15(1): 44-48.
- 山东黄金地质矿产勘查有限公司. 2016. 山东省莱州市曲家矿区金矿勘探报告 [R]. 莱州: 山东黄金地质矿产勘查有限公司.
- 邵跃. 1984. 矿床元素原生分带的研究及其在地球化学找矿中的应用 [J]. 地质与勘探, (2): 47-55.
- 王建新, 潘兴运, 郭秀峰, 谢海东, 赵利刚, 孙永杰. 2007. 格里戈良分带指数法的改良 [J]. 吉林大学学报(地球科学版), 37(5): 884-888.
- 王建新, 潘兴运, 谢海东, 赵利刚, 郭秀峰. 2008. 辽宁黑山金铜矿区地球化学垂向分带研究 [J]. 地质与勘探, 44(3): 8-11.
- 于学峰, 宋明春, 李大鹏, 田京祥, 王来明. 2016. 山东金矿找矿突破进展与前景 [J]. 地质学报, 90(10): 2847-2862.
- 于学峰, 杨德平, 李大鹏, 单伟, 熊玉新, 迟乃杰, 刘鹏瑞, 于雷亨. 2019. 焦家金矿带 3000m 深部成矿特征及其地质意义 [J]. 岩石学报, 35(9): 2893-2910.
- 赵琦. 1989. 原生晕垂直分带的元素比重指数计算法 [J]. 物探与化探, (2): 157-159.
- 朱永峰, 安芳. 2010. 热液成矿作用地球化学: 以金矿为例 [J]. 地学前缘, 17(2): 45-52.
- 祝德成, 张文, 王英鹏, 田京祥, 刘汉栋, 侯建华, 高华丽. 2018. 山东省莱州市招贤金矿区矿体特征与找矿前景 [J]. 山东国土资源, 34(9): 14-19.
- ## References:
- BEUS A, GRIGORIAN S V. 1975. Geochemical Exploration Methods For Mineral Deposits[M]. Moscow: Applied Publishing LTD.
- CHI Qing-hua, YAN Ming-cai. 2007. Handbook of element abundance for applied geochemistry[M]. Beijing: Geological Publishing House(in Chinese).
- GAMMONS C H, WILLIAM-JONES A E. 1997. Chemical mobility of gold in porphyry-epithermal environment[J]. Economic

- Geology, 92: 45-59.
- GUO Tao, DENG Jun, LÜ Gu-xian, SUN Zhi-fu. 2008. The Channel way, style and driving mechanism of ore fluid migration in the Jiaoja Deposit[J]. *Acta Geoscientica Sinica*, 29(1): 81-88(in Chinese with English abstract).
- LI Hui, ZHANG Wen-hua, LIU Bao-lin, LI Fu-guo, WANG Jing-chen, ZHAO Ke-guang. 1998. The Model of Superimposed halos in Xincheng gold deposit, Shandong Province[J]. *Contributions to Geology and Mineral Resources*, 13(1): 1-6(in Chinese with English abstract).
- LI Hui, ZHANG Wen-hua, LIU Bao-lin, WANG Jing-chen, GUO Rui-dong. 1999a. The Study on Axial Zonality Sequence of Primary Halo and Some Criteria for the Application of This Sequence for Major Types of Gold Deposits in China[J]. *Geology and Prospecting*, 35(1): 32-35(in Chinese with English abstract).
- LI Hui, ZHANG Wen-hua, LIU Bao-lin, CHANG Feng-chi. 1999b. Ideal Model and Principle of Staching Structure of Axial Geochemical Parameter of Gold Deposit[J]. *Geology and Prospecting*, 35(6): 40-43(in Chinese with English abstract).
- LI Hui, YU Bin, ZHANG Guo-yi, MA Jiu-ju, LI De-liang, SUN Feng-zhou, LI Yong-cai, WEI Jiang, ZHAO Jia, WANG Jun, WANG Yi-da, LI Shang, ZHANG He-ran, WEI Zi-xin. 2016. The development and innovation of blind ore geochemical prospecting method from primary halo and superimposed primary halo to structural superimposed halo[J]. *Contributions to Geology and Mineral Resources Research*, 31(1): 92-98(in Chinese with English abstract).
- LI Hui, YU Bin, LI De-liang, MA Jiu-ju, WEI Jiang, ZHAO Jia-xiang, SUN Feng-zhou, ZHAI Pei, WANG Jun, WANG Xiao, LI Shang, ZHANG He-ran. 2012. Structure Superimposed Halo Model of Deep Blind Ore Forecast for the Quartz Vein-Altered Rock Type Gold Deposits in East Shandong Province[J]. *Gold Sciences and Technology*, 20(4): 1-6(in Chinese with English abstract).
- LI Hui, YU Bin, LI De-liang, ZHANG Guo-yi, MA Jiu-ju, ZHANG Qiang, SUN Feng-zhou, LI Shang, WEI Jiang, ZHAO Jia-xiang, WANG Jun, ZHAI Pei. 2013. Prediction of Blind Ore Bodies Using Structural Superimposed Halo and Research Methods[J]. *Geology and Exploration*, 49(1): 154-161(in Chinese with English abstract).
- LI Hui, YU Bin, ZHANG Guo-yi, MA Jiu-ju, LI De-liang, SUN Feng-zhou, LI Yong-cai, WEI Jiang, ZHAO Jia, WANG Jun, WANG Yi-da, LI Shang, ZHANG He-ran, WEI Zi-xin. 2016. The development and innovation of blind ore geochemical prospecting method from primary halo and superimposed primary halo to structural superimposed halo[J]. *Contributions to Geology and Mineral Resources Research*, 31(1): 92-98(in Chinese with English abstract).
- LIU Ru-ying, LI Tong-jun, TONG Ting. 1988. A tentative discussion on the application of facor analysis to regional geochemical prospecting[J]. *Geophysical and Geochemical Exploration*, 12(3): 182-192(in Chinese with English abstract).
- PIAO Shou-cheng, LIAN Chang-yun. 1994. A New kind of method for determining Zoning Sequence of Primary Halo—The method of barycenter[J]. *Geology and Prospecting*, (1): 63-65(in Chinese with English abstract).
- PIAO Shou-cheng, YANG Yong-qiang, LIAN Chang-yun. 1996. A summary of studying methods in primary halo zoning sequence[J]. *World Geology*, 15(1): 44-48(in Chinese with English abstract).
- PIAO Shou-cheng, LI Xu-jun, SHI Lei, YU Ze-xin, WU Yu-qi, SUN Hong-li, SHI Feng-jiang. 2006. Element zoning and its application in the Chifeng-ChaoYang auriferous Province[J]. *Geology and Prospecting*, 42(1): 17-20(in Chinese with English abstract).
- Shandong Gold Geology Mineral Exploration Co. Ltd.. 2016. Gold exploration report in Qujia mining area, Laizhou city, Shandong Province[R]. Laizhou: Shandong Gold Geology Mineral Exploration Co. Ltd.(in Chinese).
- SHAO Yue. 1984. The study of the metallogenetic zoning of ore deposits and its application in geochemical prospecting[J]. *Geology and Exploration*, (2): 47-55(in Chinese with English abstract).
- WANG Jian-xin, ZANG Xing-yun, GUO Xiu-feng, XIE Hai-dong, ZHAO Li-gang, SUN Yong-jie. 2007. The Improved Gregorian's Zoning Index Calculating Method[J]. *Journal of Jilin University(Earth Science Edition)*, 37(5): 884-888(in Chinese with English abstract).
- WANG Jian-xin, ZANG Xing-yun, XIE Hai-dong, ZHAO Li-gang, GUO Xiu-feng. 2008. Geochemical Vertical Zonation in the Hei Shan gold and Copper Deposit, Hun Chun[J]. *Geology and Prospecting*, 44(3): 8-11(in Chinese with English abstract).
- WANG Xue-qiu, CHENG Zhi-zhong, LU Yin-xiu, XU Li, XIE Xue-jing. 1997. Nanoscale Metals in Earthgas and Mobile Forms of Metals in Overburden in Wide-spaced Regional Exploration for Giant Deposits in Overburden Terrains[J]. *Journal of Geochemical Exploration*, 58: 63-72(in Chinese with English abstract).
- YU Xue-feng, SONG Ming-chun, LI Da-peng, TIAN Jing-xiang, WANG Lai-ming. 2016. Breakthroughs and prospect of gold deposits in Shandong province[J]. *Acta Geologica Sinica*, 90(10): 2847-2862(in Chinese with English abstract).
- YU Xue-feng, YANG De-ping, LI Da-peng, SHAN Wei, XIONG Yu-xin, CHI Nai-jie, LIU Peng-rui, YU Lei-heng. 2019. Mineralization characteristics and geological significance in 3000m depth of Jiaoja gold metallogenic belt[J]. *Acta Petrologica Sinica*, 35(9): 2893-2910(in Chinese with English abstract).
- ZHAO Qi. 1989. Calculation method of element specific gravity index for vertical zonation of primary halo[J]. *Geophysical and Geochemical Exploration*, (2): 157-159(in Chinese with English abstract).
- ZHU De-cheng, ZHANG Wen, WANG Ying-peng, TIAN Jing-xiang, LIU Han-dong, HOU Jian-hua, GAO Hua-li. 2018. Characteristics of ore bodies and prospecting potential of Zhaoxian gold deposit in Laizhou city of Shandong province[J]. *Land and Resources in Shandong Province*, 34(9): 14-19(in Chinese with English abstract).
- ZHU Yong-feng, AN Fang. 2010. Geochemistry of hydrothermal mineralization: Taking gold deposit as an example[J]. *Earth Science Frontiers*, 17(2): 45-52(in Chinese with English abstract).