矿产地质

doi:10.12134/j.dzykt.2025.03.001

论金矿盲矿预测的构造叠加晕指示元素相关性及其意义

李 惠[1],禹 斌[1],任良良[1,2],魏 江[1,2],王 旭[1],张国义[1],
李 上[1],彭 伟[1],要悦稳[1],王希君[1],谢子晨[1]
(1.中国冶金地质总局地球物理勘查院,河北保定 071051;2.中国冶金地质总局矿产资源研究院,北京 101300)

[摘 要] 研究和正确认识找金指示元素间的相关性对构造叠加晕预测金矿盲矿具有重要理论意义和实用价值。有学者认为预测金矿盲矿的指示元素与金正相关,且相关系数越大越好,实际并非完全如此。热液金矿床含矿热液流体带来的成矿及伴生元素沉淀形成的矿体-晕,在理论与宏观上伴生元素与成矿元素金密切相关,晕比矿大,易发现,伴生元素是找金很好的直接指示元素和标志。金矿体-晕有明显轴向分带,每个矿体都有自己的前缘晕、近矿晕和尾晕。理论上,金只与近矿晕元素正相关,与前、尾晕元素并不相关。实际中,计算矿体-晕指示元素相关系数矩阵会出现相关关系混乱,如Au与前缘晕元素Hg、尾晕元素V、Ti等出现相关,显示了金矿多期多阶段叠加后金与伴生元素相关的复杂性。研究还发现这种复杂性很大程度上反映了成矿热液活动的强弱,结合指示元素的异常强度,是判别深部是否存在盲矿的一种有利标志。

[关键词] 构造叠加晕 指示元素 相关的复杂性 预测标志 热液金矿床
[中图分类号] P618; P59 [文献标识码] A [文章编号] 0495-5331(2025)03-0441-09

Li Hui, Yu Bin, Ren Liangliang, Wei Jiang, Wang Xu, Zhang Guoyi, Li Shang, Peng Wei, Yao Yuewen, Wang Xijun, Xie Zichen. The correlation of indicator elements in structural superimposed halos for concealed gold prospecting and its significance[J]. Geology and Exploration, 2025, 61(3): 0441-0449.

0 引言

热液金矿床在其成矿热液流体中成矿及伴生元素是一个整体,所形成矿体-晕,在宏观上伴生元素与成矿元素密切相关,可称为"同源相关",但由于热液矿床形成的矿晕有明显轴向分带,即每个矿体都有自己的前缘晕、近矿晕和尾晕(李惠等,2010,2011,2013,2014a;禹斌等,2010;任良良等,2023a),造成矿体-晕中元素相关性复杂化。计算矿体-晕中成矿元素与伴生元素相关系数得知,前缘晕、近矿晕和尾晕所属元素内部相关,三者所属元素间不相关,称为"正常相关",其中只有近矿晕指示元素与金正相关,而前缘晕和尾晕的指示元素与金不相关,又由于金矿成矿成晕多期多阶段在空间上的叠加,导致了矿体-晕中元素相关性进一步复杂,破坏了上述"正常相关"关系,造成了近矿晕元素、前缘晕元素及尾晕元素内部某些不相关,三者所属元素间某些元素反而相关,称为"反常相关"(李惠等,2011,2014a;任良良等,2023b)。

前人在金矿勘查中也发现了这种"反常相关"现象,但由于指示元素相关关系具有高度复杂性,现有研究多局限于单个矿山且研究的侧重点不同,导致对元素相关关系的阐述缺乏系统性和全局性。本研究基于团队在全国范围内百余个经典金矿区

[收稿日期] 2024-12-31;[改回日期] 2025-04-20;[责任编辑] 郝情情。
[基金项目] 中国冶金地质总局科研项目"构造叠加晕找金预测盲矿的特征指示元素在成矿成晕中的地球化学行为研究"(编号:CMGBK YS202403)资助。
[第一作者] 李 惠(1937年-),男,1964年毕业于北京地质学院,地球化学专业,教授,从事地球化学攻深找盲研究-构造叠加晕找盲矿新方法研究及深部预测。E-mail:lihuibd4@163.com。
[通信作者] 任良良(1987年-),男,2008年毕业于长安大学,地质工程专业,获学士学位,高级工程师,主要从事固体矿产勘查、构造叠加晕找盲矿法研究及深部预测。E-mail:renliangliang@geoexp.cn。

的勘查数据，创新性地在原生晕轴向分带图上，结合热液型矿床的矿体前缘晕、近矿晕和尾晕元素强度分布特征及轴向理想变化趋势，首次建立了基于前缘晕、近矿晕和尾晕元素相关性的分区模型，深入分析多期次成矿叠加作用下金与伴生元素的复杂性，以期为构造叠加晕技术应用于隐伏金矿预测提供系统的理论框架和实践支撑。

1 热液矿床元素晕轴向分带及其指示元素相关性研究

已有研究成果表明，热液矿床每次成矿形成的每个矿体-晕都有明显轴向分带，即每个矿体都有自己的前缘晕、近矿晕和尾晕，金矿共性前缘晕特征指示素是F、Hg、As、Sb、B、Ba、近矿特征指示素为Au、Ag、Cu、Pb、Zn，尾晕特征指示素为Bi、Mo、Mn、Co、Ni、V、Ti、W、Sn（李惠等，2011，2013，2014b，2015，2016）。前缘晕、近矿晕和尾晕所属各元素在矿体-晕分布空间上富集部位不同（图1），前缘晕强异常中心一般在矿体头部之上一定距离的前缘部位，从其强异常中心向上更远前缘和向下靠近矿体都逐渐降低，是找盲矿体的重要标志；成矿及近矿元素晕是以矿体为中心，其浓度随远离矿体逐渐降低；而尾晕元素的强异常中心则在矿体尾部向下一定距离的部位，随远离强异常中心向上靠近矿体和向下远离矿尾下部逐渐降低，尾晕的单独出现则指示深部无矿。由于前缘晕、近矿晕和尾晕元素富集部位不同（图1），导致指示元素间的相关关系的复杂化，计算矿体-晕不同范围指示元素相关性也不同。

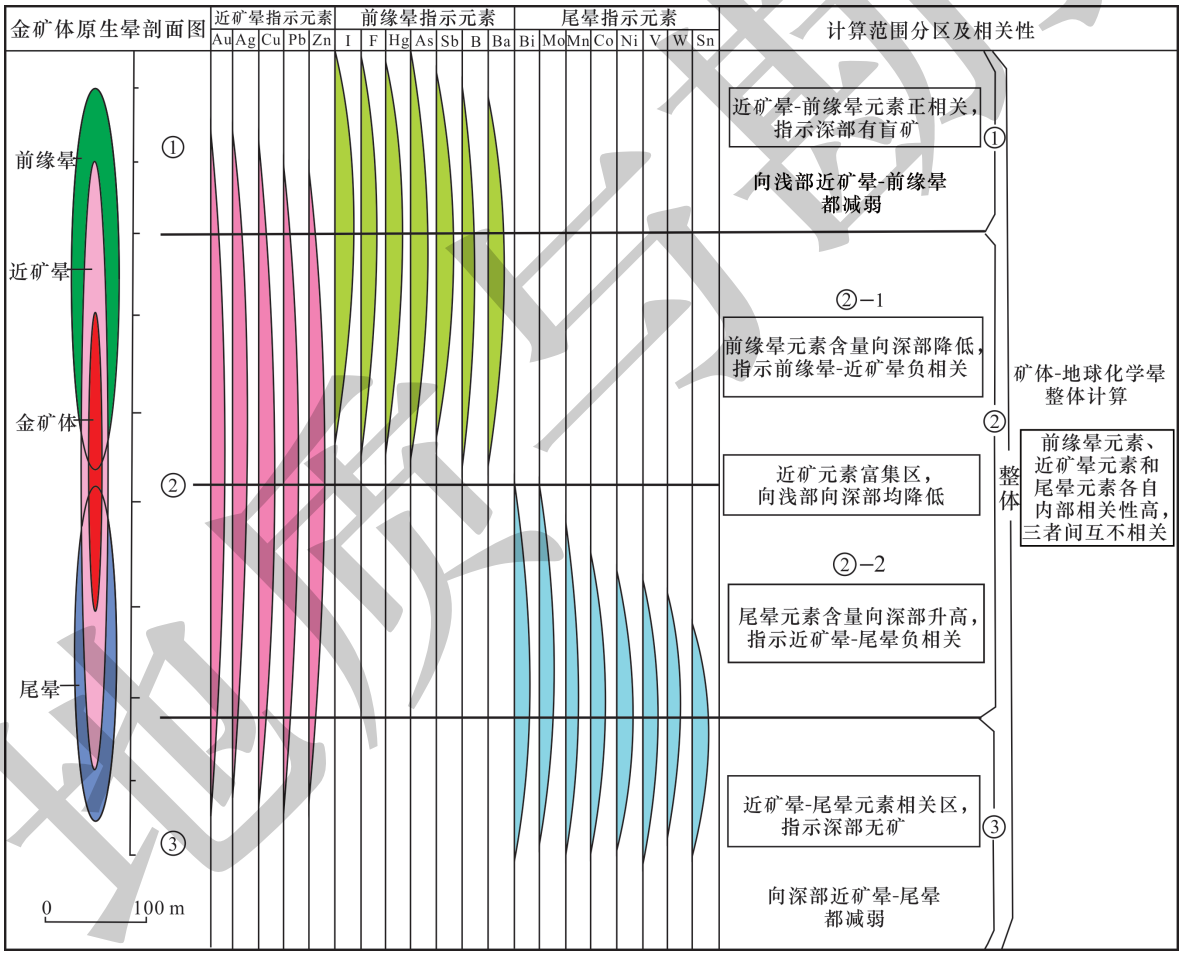

图1 热液金矿原生晕理想轴向分带和不同范围指示元素相关性及其意义

Fig. 1 Ideal axial zoning of primary halos in hydrothermal gold deposits and the correlation of indicative elements in different ranges and their significance

整体计算全区金矿体-晕指示元素相关性得出：前缘晕、近矿晕和尾晕三者所属元素内部相关性高，而三者所属元素之间互不相关，这种相关称为“正常相关”关系，如前缘指示元素间As-Hg正相关，近矿指示元素间Au-Ag正相关，尾晕指示元素间Bi-Mo正相关，而前缘-近矿指示元素（As-Ag），

尾晕-近矿指示元素（Bi-Au）、前缘-尾晕指示元素（Hg-Bi）等均不相关（李惠等，2010，2013，2014b；禹斌等，2010，2017；李成禄等，2023）。图 2 展示了金矿前缘晕、近矿晕和尾晕特征，指示元素理想群分析结果：前缘晕、近矿晕和尾晕所属特征指示元素各为一群。

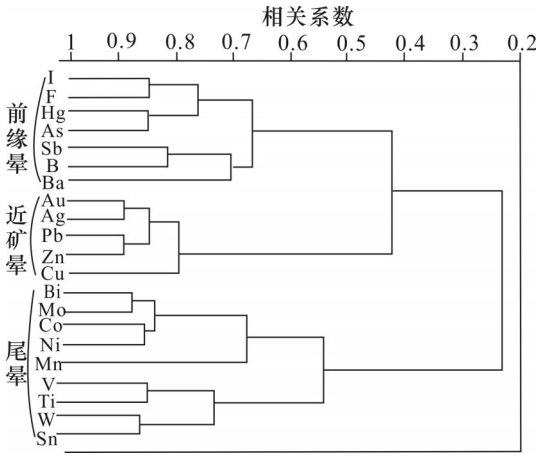

图 2　热液金矿轴向分带与指示元素理想群分析

Fig. 2　Axial zoning of hydrothermal gold deposits and ideal group analysis of indicative elements

根据图 1 中前缘晕、近矿晕和尾晕各元素含量变化趋势可细分为①、②和③三个区，按区范围计算元素相关关系各有特点：

①区：位于矿体前缘上部：区内前缘元素在矿体前缘浓集中心再向上逐渐降低（由中内带→外带异常），该区为近矿元素低含量区（外带异常）向远离矿体仍逐渐降低区，前缘与近矿元素向上同步降低，除近矿晕和前缘晕两者所属内部元素相关外，近矿晕和前缘晕两者所属元素间也相关。前缘晕与近矿元素这种相关为反常相关，是深部盲矿存在的标志。

②区：位于矿体-晕的中部：为前缘晕、近矿晕和尾晕元素含量变化不同步区，或含量呈反常消长区，若计算②区内元素相关系数，除三者内部所属元素相关外，三者间所属元素不相关，或呈反相关：计算②-1 区元素相关系数，前缘与近矿反消长，前缘-近矿元素反相关；计算②-2 区元素相关系数，尾晕与近矿元素反消长，尾晕元素-近矿元素反相关。

③区：位于矿体底部-尾晕区：区内尾晕元素在矿体尾部浓集中心再向下逐渐降低（由中内带→外带），也是近矿元素（外带）自矿体尾部向远离矿体仍逐渐降低部位，尾晕与近矿元素向下同步降低，计算③区元素间相关系数，除近矿晕和尾晕两者各自内部元素相关外，近矿晕和尾晕两者间所属元素也相关-反常，则指示深部无矿。

2　热液矿床矿体-晕叠加对指示元素相关性的影响

叠加成矿使成矿与伴生元素关系更加复杂化：热液金矿床成矿具有多期多阶段叠加特点，不同阶段形成矿体-晕在空间上有同位-近于同位-部分同位叠加，形成了非常复杂的叠加晕。同一次成矿形成相近多个矿体或串珠状上下矿体间前-尾晕也叠加（李惠等，2011，2015；任良良等，2019；魏江等，2023；刘清泉等，2024）。造成了成矿与伴生元素的相关关系更加复杂化，破坏了上述整体计算得出的“正常相关”。当不同阶段形成矿体-晕在空间上有同位-近于同位叠加时，成矿与伴生元素的相关关系与单一次成矿相近，若为部分叠加，则导致成矿与伴生元素的相关关系更加复杂，出现金矿的前缘晕、近矿晕和尾晕各属内部某些元素间的正相关变为不相关，而使前缘晕、近矿晕和尾晕所属某些元素间由不相关变为正相关。这种相关称为“反常相关”。研究表明，叠加后虽然元素间相关性被改变，但并未改变前缘晕元素是预测盲矿标志，尾晕元素是深部无矿的标志（李惠等，2013，2020，2021）。

图 3 展示了热液矿床成矿与伴生元素的“同源相关关系”→原生晕轴向分带与找盲矿的指示元素间的“正常相关关系”和热液金矿多期多阶段叠加后形成的叠加晕，构造叠加晕预测盲矿指示元素间的“反常相关关系”。

计算金矿体-晕（多是叠加后）相关关系意义：一是反映叠加强度，“反常相关”元素对越多，占总元素相关对的比例越大叠加越强（禹斌等，2010；李惠，2010，2011；马久菊等，2012；任良良等，2023b；赵阳等，2024）；二是根据叠加后与金元素正相关关系可预测综合利用伴生元素的储量：如叠加后 Au-Ag 仍相关，可据金储量估算 Ag 储量；三是根据前缘元素-尾晕元素反常相关预测深部盲矿。

实例：内蒙古柴胡栏子金矿为大型蚀变岩型金矿床，区内岩浆活动强烈，且与成矿关系密切，已查明矿体有十几个，成矿成晕具有四个阶段叠加特点（任苗宇等，2021；张宝林等，2021；韩耀徽等，2024）。每期成矿形成的每个矿体都有自己的前缘晕、近矿晕和尾晕，已有研究成果表明：已查明了矿体的共性前缘晕特征指示素为 Hg、As、Sb、B、Ba，近

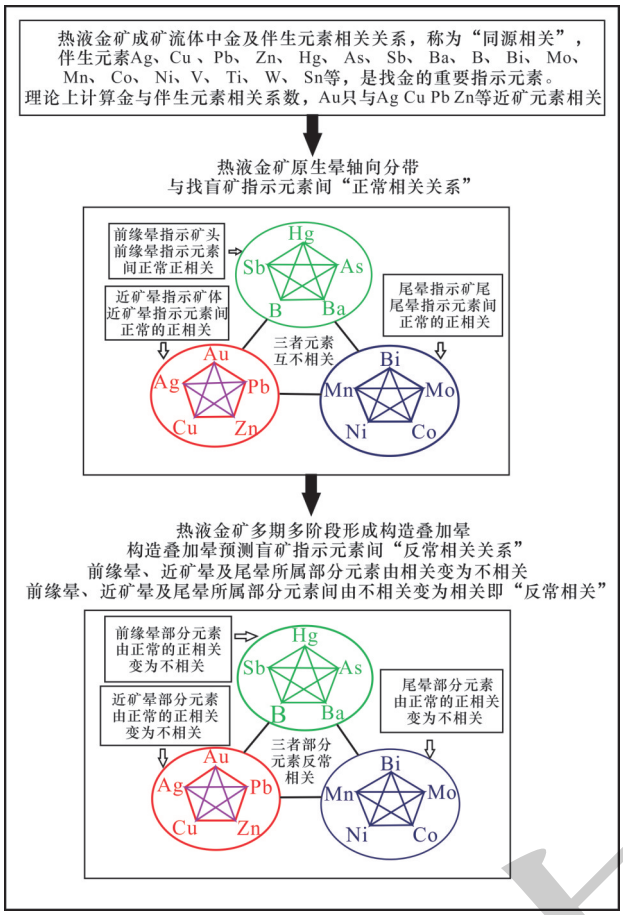

图3　构造叠加晕找金指示元素间相关关系示意图

Fig. 3　Schematic diagram of correlation between indicative elements of structural superimposed halo in gold prospecting

矿特征指示素为Au、Ag、Cu、Pb、Zn，尾晕特征指示素为Bi、Mo、Mn、Co、Ni、Ti、V、W、Sn。

表1、表2、表3分别列出了Ⅰ-1、Ⅰ-2、Ⅰ-3三个矿体多阶段叠加后的元素相关矩阵，展示了不同阶段成矿叠加后的矿体中元素的相关关系①。表4列出了三个矿体元素间相关关系总结对比，以前缘元素，近矿元素和尾晕所属元素内部正相关为正常相关，而将前缘元素-近矿元素-尾晕所属元素间的正相关，视为“反常相关”：如Au-Ag相关为正常相关，而Au-As、Au-Mo、Hg-Mo、As-Bi相关为反常相关，矿体中反常相关数越多，占总元素相关对的比例越大，反映叠加程度越强烈。表4三个矿体反常相关数依次是：Ⅰ-3号矿体22对，占18种指示元素总相关对（81对）的27%（22÷81×100%=27%），即破坏了27%元素关系；Ⅰ-2号矿体18对，占总相关对的22%（18÷81×100%=22%）；Ⅰ-1号矿体18对，占总相关对的22%（18÷81×100%=22%）；结论是：Ⅰ-3号矿体叠加程度要比Ⅰ-1矿体和Ⅰ-2矿体强，这也与实际矿体成矿特征吻合。

根据金矿体中金的储量和与金正相关元素可综合利用的相关关系，可计算能综合利用的元素的储量。如矿体Ⅰ-3银达综合利用指标，可据Au-Ag正相关（相关系数0.82）预测Ag储量，相关系数越大，预测Ag储量越准确；矿体Ⅰ-1号、Ⅰ-2号Au-Ag不相关。矿体Ⅰ-1和Ⅰ-3中Au-Cu正相关，但由于该矿床Cu未达到综合利用指标，故无需评估其经济意义。

表1　内蒙古柴胡栏子金矿床Ⅰ-1号矿体元素相关矩阵

Table 1　Element correlation matrix of I-1 ore body in the Chaihulanzi gold deposit of Inner Mongolia

	Au	Ag	Cu	Pb	Zn	As	Sb	Hg	B	Bi	Mo	Mn	Co	Ni	V	Ti	W	Sn
Au	1.00																	
Ag	0.32	1.00																
Cu	0.47	-0.03	1.00															
Pb	-0.14	0.22	0.00	1.00														
Zn	-0.03	-0.07	-0.06	-0.05	1.00													
As	0.21	-0.12	0.02	-0.08	-0.04	1.00												
Sb	0.24	-0.11	0.05	-0.08	-0.04	0.99	1.00											
Hg	0.61	0.07	0.59	-0.03	0.13	0.56	0.61	1.00										
B	-0.16	0.22	-0.20	0.03	0.30	-0.21	-0.25	-0.25	1.00									
Bi	-0.12	0.00	0.09	0.56	-0.12	0.07	0.05	-0.13	-0.04	1.00								
Mo	-0.13	-0.04	0.07	-0.06	0.00	-0.16	-0.19	-0.31	0.25	0.23	1.00							
Mn	0.24	-0.18	0.30	-0.18	0.01	0.05	0.08	0.31	-0.24	0.07	-0.26	1.00						
Co	0.32	0.00	0.55	0.03	-0.05	0.15	0.18	0.36	-0.14	0.32	0.04	0.34	1.00					
Ni	-0.18	-0.10	0.21	0.12	-0.12	-0.14	-0.17	-0.30	0.43	0.32	0.63	-0.26	0.28	1.00				

续表 1

Continued Table 1

	Au	Ag	Cu	Pb	Zn	As	Sb	Hg	B	Bi	Mo	Mn	Co	Ni	V	Ti	W	Sn
V	0.50	−0.13	0.43	−0.27	0.45	0.22	0.25	0.56	0.00	−0.20	−0.02	0.39	0.40	−0.01	1.00			
Ti	0.58	−0.13	0.68	−0.17	0.02	0.32	0.37	0.80	−0.42	−0.13	−0.30	0.52	0.52	−0.27	0.73	1.00		
W	0.58	−0.01	0.71	−0.11	0.02	0.20	0.24	0.75	−0.34	−0.08	−0.27	0.50	0.49	−0.25	0.60	0.92	1.00	
Sn	0.50	0.07	0.75	−0.11	−0.11	0.11	0.14	0.57	−0.38	0.04	−0.10	0.43	0.46	−0.20	0.39	0.75	0.86	1.00

注：n=25，df=n−2=23，在5%信度下元素相关最低相关系数$R_{a=0.05}$=0.396，表中元素相关系数≥0.396为正相关。

表 2　内蒙古柴胡栏子金矿床Ⅰ−2号矿体元素相关矩阵

Table 2　Element correlation matrix of the ore body I−2 in the Chaihulanzi gold deposit of Inner Mongolia

	Au	Ag	Cu	Pb	Zn	As	Sb	Hg	B	Bi	Mo	Mn	Co	Ni	V	Ti	W	Sn
Au	1.00																	
Ag	0.35	1.00																
Cu	0.13	−0.10	1.00															
Pb	0.02	0.80	−0.16	1.00														
Zn	−0.03	−0.15	−0.13	0.09	1.00													
As	−0.01	−0.24	0.04	−0.20	0.56	1.00												
Sb	−0.21	−0.27	−0.05	−0.10	0.89	0.52	1.00											
Hg	0.52	0.32	0.15	0.06	0.05	0.01	0.16	1.00										
B	−0.28	0.12	−0.28	0.21	0.60	0.13	0.71	0.14	1.00									
Bi	0.32	0.52	0.62	0.47	−0.14	−0.17	−0.21	0.39	−0.17	1.00								
Mo	−0.22	0.10	0.30	0.33	0.67	0.31	0.72	0.14	0.56	0.26	1.00							
Mn	0.48	−0.38	0.38	−0.44	−0.05	0.28	−0.23	0.09	−0.69	0.03	−0.31	1.00						
Co	0.32	−0.15	0.92	−0.28	−0.10	0.24	−0.08	0.25	−0.45	0.54	0.18	0.64	1.00					
Ni	0.03	−0.04	0.97	−0.09	−0.10	0.05	0.01	0.16	−0.17	0.67	0.41	0.21	0.87	1.00				
V	0.21	−0.35	0.37	−0.30	0.08	0.54	−0.07	0.01	−0.56	−0.03	−0.04	0.88	0.62	0.25	1.00			
Ti	0.47	−0.37	0.23	−0.45	−0.06	0.36	−0.22	0.10	−0.69	−0.07	−0.38	0.97	0.55	0.08	0.86	1.00		
W	0.68	0.10	0.09	−0.20	−0.14	−0.11	−0.17	0.65	−0.35	0.13	−0.36	0.53	0.30	0.00	0.25	0.57	1.00	
Sn	0.43	−0.35	0.21	−0.37	−0.04	0.07	−0.19	−0.11	−0.58	−0.06	−0.35	0.70	0.37	0.06	0.50	0.72	0.50	1.00

注：n=25，df=n−2=23，在5%信度下元素相关最低相关系数$R_{a=0.05}$=0.396，表中元素相关系数≥0.396为正相关。

表 3　内蒙古柴胡栏子金矿床Ⅰ−3号矿体元素相关矩阵

Table 3　Element correlation matrix of the ore body I−3 in the Chaihulanzi gold deposit of Inner Mongolia

	Au	Ag	Cu	Pb	Zn	As	Sb	Hg	B	Bi	Mo	Mn	Co	Ni	V	Ti	W	Sn
Au	1.00																	
Ag	0.82	1.00																
Cu	0.73	0.65	1.00															
Pb	0.24	0.37	0.54	1.00														
Zn	−0.11	−0.21	0.09	0.05	1.00													
As	0.00	0.02	−0.14	−0.06	−0.10	1.00												
Sb	0.03	0.04	−0.12	−0.04	−0.09	1.00	1.00											
Hg	0.47	0.40	0.36	0.25	−0.02	0.52	0.53	1.00										
B	−0.15	0.05	−0.25	0.24	−0.15	−0.09	−0.10	0.02	1.00									
Bi	0.73	0.81	0.82	0.53	−0.09	−0.12	−0.09	0.28	−0.12	1.00								
Mo	−0.24	0.01	−0.45	0.16	−0.25	0.27	0.26	0.09	0.53	−0.25	1.00							

地质与勘探

续表 3

Continued Table 3

	Au	Ag	Cu	Pb	Zn	As	Sb	Hg	B	Bi	Mo	Mn	Co	Ni	V	Ti	W	Sn
Mn	0.11	−0.03	0.28	0.03	0.81	−0.35	−0.32	−0.25	−0.35	0.14	−0.50	1.00						
Co	0.37	0.31	0.79	0.73	0.23	−0.10	−0.07	0.25	−0.27	0.58	−0.25	0.33	1.00					
Ni	0.77	0.88	0.85	0.61	0.03	−0.07	−0.05	0.41	−0.03	0.92	−0.17	0.18	0.63	1.00				
V	−0.08	−0.14	0.13	0.17	0.78	−0.02	−0.01	−0.19	−0.27	0.04	−0.22	0.75	0.34	0.08	1.00			
Ti	0.21	0.00	0.48	−0.01	0.68	−0.15	−0.13	−0.17	−0.50	0.21	−0.64	0.83	0.46	0.22	0.74	1.00		
W	0.48	0.25	0.48	−0.14	−0.01	−0.04	−0.01	−0.18	−0.35	0.36	−0.60	0.34	0.23	0.24	0.09	0.58	1.00	
Sn	0.09	0.05	0.61	0.66	0.13	−0.15	−0.13	0.04	−0.27	0.36	−0.22	0.20	0.90	0.38	0.21	0.33	0.19	1.00

注：n=25，df=n−2=23，在5%信度下元素相关最低相关系数$R_{\alpha=0.05}$=0.396，表中元素相关系数≥0.396为正相关。

表4　内蒙古柴胡栏子金矿床Ⅰ-1号、Ⅰ-2号、Ⅰ-3号矿体元素间相关关系

Table 4　Correlation between elements of I-1, I-2 and I-3 ore bodies in Chaihulanzi gold deposit of Inner Mongolia

元素	Ⅰ-1号矿体相关元素	Ⅰ-2号矿体相关元素	Ⅰ-3号矿体相关元素
Au	Cu、*Hg*、*V*、*Ti*、*W*、*Sn*	*Hg*、*Mn*、*Ti*、*W*、*Sn*	Ag、Cu、*Hg*、*Bi*、*Ni*、*W*
Ag		Pb、*Bi*	Au、Cu、*Hg*、*Bi*、*Ni*
Cu	Au、*Hg*、*Co*、*V*、*Ti*、*W*、*Sn*	*Bi*、*Co*、*Ni*	Au、Ag、Pb、*Bi*、*Co*、*Ni*、*Ti*、*W*、*Sn*
Pb	Bi	Ag、*Bi*	Cu、*Bi*、*Co*、*Ni*、*Sn*
Zn	V	*As*、*Sb*、*B*、*Mo*	*Mn*、*V*、*Ti*
As	Sb、Hg	Sb、*Zn*、*V*	Hg
Sb	Hg、As	B、As、*Mo*、*Zn*	Hg
Hg	*Au*、*Cu*、As、Sb、*V*、*Ti*、*W*、*Sn*	*Au*、*W*	*Au*、*Ag*、As、Sb、*Ni*
B	*Ni*	*Mo*、*Zn*、Sb	*Mo*
Bi	*Pb*	*Ag*、*Cu*、*Pb*、Co、Ni	*Au*、*Ag*、*Cu*、*Pb*、Co、Ni
Mo	Ni	*B*、*Zn*、*Sb*、Ni	*B*
Mn	Ti、W、Sn	*Au*、Co、V、Ti、W、Sn	*Zn*、V、Ti
Co	*Cu*、V、Ti、W、Sn	*Cu*、Ni、V、Ti、Bi、Mn	*Cu*、*Pb*、Bi、Ni、Ti、Sn
Ni	*B*、Mo	*Cu*、Bi、Mo、Co	*Au*、*Ag*、*Cu*、*Pb*、*Hg*、Bi、Co
V	*Ag*、*Cu*、*Zn*、*Hg*、Co、Ti、W	*As*、Ti、Sn、Mn、Co	*Zn*、Mn、Ti
Ti	*Au*、*Cu*、*Hg*、Mn、Co、V、W、Sn	*Au*、W、Sn、Mn、Co、V	*Cu*、*Zn*、Mn、Co、V、W
W	*Au*、*Cu*、*Hg*、Mn、Co、V、Ti、Sn	*Au*、*Hg*、Sn、Mn、Ti、	*Au*、*Cu*、Ti
Sn	*Au*、*Cu*、*Hg*、Mn、Co、Ti、W	*Au*、Mn、V、Ti、W	*Cu*、*Pb*、Co

注：前缘元素-近矿元素-尾晕所属元素内部相关为正常相关，如Au与Ag相关为正常相关；前缘元素-近矿元素-尾晕所属元素间相关为反常相关，如Au与前缘晕元素Hg、As相关为反常相关，Au和尾晕元素Mo、Co相关为反常相关。

3　构造叠加晕预测盲矿的某些标志中，指示元素间往往为“反常相关”

在地表发现可能含金的构造带，在有金异常条件下，若前缘元素中-外带异常，无尾晕元素，指示深部有盲矿；若构造带深部有一个坑道（或钻孔）控制且未见矿，但近矿元素和前缘元素浓度由地表到坑道都升高，则指示盲矿可能还在深部。在这种情况下，计算近矿元素和前缘元素为正相关关系-“反常相关”（图Ⅰ-①）。

已知矿体尾部（图Ⅰ-③），近矿元素与尾晕往深部都降低，除两者所属元素内部正常相关外，两者所属元素间也相关，即近矿元素与尾晕元素相关-“反常相关”，指示深部无盲矿；当深部有盲矿前缘晕叠加时，则出现前—尾晕元素异常叠加共存，指示深部有盲矿。在这种情况下计算已知矿体尾部叠加部位上下两个坑道元素相关矩阵，则前—尾晕元素除所属元素正常相关外，两者所属元素间也可能出现正相关—即前—尾晕元素相关-“反常相关”，且这种“反常相关”越复杂，深部有盲矿可能性越大（任良良等，2023b）。

地质与勘探

4　结论

（1）构造叠加晕研究预测盲矿，指示元素与成矿元素的关系并非简单正相关。叠加成矿成晕后，元素间相关关系复杂，多出现“反常相关”，这种复杂性反映了成矿热液多期多阶段叠加活动的特征。

（2）矿体-晕中“反常相关”元素对越多，反映叠加越强烈，越有利于成矿。通过计算矿体-晕指示元素相关系数矩阵，可分析反常相关程度，进而评价已知矿体深部成矿潜力。

（3）在地表发现含矿构造带时，若存在前缘晕异常且无尾晕异常，表现为前-尾晕元素不相关，指示深部有盲矿；在已知矿体尾部，若同时存在前缘晕与尾晕异常，表现为前-尾晕元素相关，指示深部有盲矿，且相关性越复杂，指示深部存在盲矿的可能性越大。

［注　　释］

① 中勘地球物理有限责任公司.2023.内蒙古柴胡栏子金矿床构造叠加晕跟踪研究及深部推进预测成果报告［R］.

［References］

Han Yaohui, Wang Cuizhi, Wu Zhijie, Lü Guxian, Zhang Baolin, Zhang Qipeng. 2024. Remote sensing geological interpretation, alteration information extraction, and mineral prospecting prediction in the Chaihulanzi gold field, Chifeng, Inner Mongolia[J]. Geoscience, 38(4): 1076-1091(in Chinese with English abstract).

Li Chenglu, Fu Anzong, Xu Wenxi, Yuan Maowen, Liu Baoshan, Yang Wenpeng, Zhao Ruijun, Zhao Zhonghai. 2023. Characteristics of structural superimposed halo and deep prospecting prediction of Yongxin gold deposit, Duobaoshan area, Heilongjiang Province[J]. Geoscience, 37(3): 674-689(in Chinese with English abstract).

Li Hui, Zhang Guoyi, Yu Bin, Li Deliang.2010.Structural superimposed halos method for prospecting blind ore body in the deep of ore districts[J]. Earth Science Frontiers, 17(1): 287-293(in Chinese with English abstract).

Li Hui, Yu Bin, Li Deliang. 2011. Blind prospecting by structural super-imposed halos[M]. Beijing: Geological Publishing House: 64-68(in Chinese).

Li Hui, Yu Bin, Li Deliang, Zhang Guoyi, Ma Jiuju, Zhang Qiang, Sun Fengzhou, Li Shang, Wei Jiang, Zhao Jiaxiang, 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, Li Deliang, Zhang Guoyi, Ma Jiuju, Sun Fengzhou, Ren Shuguang, Liu Chunlan, Lv Mingguang, Li Shang, Wei Jiang, Zhao Jiaxiang, Wang Jun, Li Yongcai, Wang Yida. 2014a. The key technique for applying the structural superimposed halo method to the prediction of the blind ore body[J]. Geophysical & Geochemical Exploration, 38(2): 189-193(in Chinese with English abstract).

Li Hui, Yu Bin, Li Deliang, Zhang Guoyi, Ma Jiuju, Sun Fengzhou, Li Yongcai, Wei Jiang. 2014b. Innovation and new breakthrough in blind ore prospecting by structural superimposed halo[J]. Gold Science and Technology, 22(4): 7-13(in Chinese with English abstract).

Li Hui, Yu Bin, Li Deliang, Ma Jiuju, Sun Fengzhou. 2015. Structural superimposed halo model for deep blind ore prediction in different types of gold deposits[J]. Mineral Resources and Geology, 29(5): 648-653, 658(in Chinese with English abstract).

Li Hui, Yu Bin, Zhang Guoyi, Ma Jiuju, Li Deliang, Sun Fengzhou, Li Yongcai, Wei Jiang, Zhao Jia, Wang Jun, Wang Yidai, Li Shang, Zhang Heran, Wei Zixin. 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, Wei Jiang, Li Yongcai, Wang Jun, Wei Zixin, Zhang Heran, Ren Liangliang, Wang Xu, Sun Fengzhou, Peng Wei, Li Shang, Si Shuyun, Yang Yajuan, Luo Xuefei. 2020.A new practical ideal model of structural superimposed halo for prediction of deep blind hydrothermal deposits and its significance[J]. Geology and Exploration, 56(5): 889-897(in Chinese with English abstract).

Li Hui, Yu Bin, Wei Jiang, Li Yongcai, Wang Jun, Wei Zixin, Sun Fengzhou, Wang Xu, Ren Liangliang, Zhang Helan, Peng Wei, Li Shang, Si Shuyun, Yang Yajuan, Luo Xuefei. 2021.Research on prediction of hidden ore bodies at depth in exploration (new) areas using structural superimposed halos and a reference practical ideal model[J]. Geology and Exploration, 57(2): 351-359(in Chinese with English abstract).

Liu Qingquan, Zhang Qingshan, Zeng Yi, Li Jianling, Li Bing, Zhao Hongtao, Chen Xiangyang, Chen Zhaohua, Xiong Yiqu, Shao Yongjun. 2024. Structural superimposed halo and prospecting prediction in Lizigou gold exploration area, Xiong′er Terrane[J]. Mineral Exploration, 15(9): 1711-1719(in Chinese with English abstract).

Ma Jiuju, Zhang Yongqiang, Wang Kailei, Gong Yingjian, Wang Zhao, Li Zhiqiang, Zhao Jiaxiang, Wei Jiang, Yang Yajuan. 2012. Research on the structural superimposed halo and blind ore forecast of Kuangou gold deposit in Tianshui County, Gansu Province[J]. Gold Science and Technology, 20(1): 27-31(in Chinese with English abstract).

Ren Liangliang, Wang Runtao, Zhang Chengyu, Wei Jiang, Tian Hua. 2019. Application of structural superimposed halo prospecting method to deep blind ore prediction in Yang mei tian copper mine[J]. Contributions to Geology and Mineral Resources Research, 34(2): 315-320(in Chinese with English abstract).

Ren Liangliang, Wei Jiang, Li Hui, Ma Xiaohui, Yao Yuewen, Wang Xijun, Lin Manman. 2023a. Study and application of structural superimposed halo method in the western exploration (new) area of Dayao Mountain, Guangxi[J]. Geology and Exploration, 59(6): 1217-1227(in Chinese with English abstract).

Ren Liangliang, Wei Jiang, Qin LianYuan, Wang Xijun, Pan Baoliang, Yan Shifeng. 2023b. Research and discussion on the correlation of

geochemical exploration: A case study of typical deposits on the northeast margin of the Jiaolai Basin[J]. Contributions to Geology and Mineral Resources Research, 38(4): 503-511(in Chinese with English abstract).

Ren Miaoyu, Dai Qinglong, Li Xu, Li Zhitong, Gong Wentao. 2021. Geological characteristics and prospect of deep prospecting in Chaihulanzi gold mine, Inner Mongolia[J]. Geology of Chemical Minerals, 43(3):234 - 240(in Chinese with English abstract).

Wei Jiang, Wang Xin, Ren Liangliang, Yao Yuewen, Wei Zixin, Lian Yong, Wang Xu. 2023. Study and application of the three-dimensional model of structural superimposed halo in the No. 1 altered zone of the Huanaote silver polymetallic mine, Inner Mongolia[J]. Geology and Exploration, 59(5): 1017-1026(in Chinese with English abstract).

Yu Bin, Li Hui, Li Deliang, Zhang Lianfa, Liu Qing, Li Wei, Wang Shanfei, Li Siling, Yang Qingquan, Guo Bin, Qu Weixun, Zhao Dongdong. 2010. The structural superimposed halo model research and deep ore forecast for Sanshandao gold deposit, Shandong Laizhou [J]. Contributions to Geology and Mineral Resources Research, 25(3):260-264(in Chinese with English abstract).

Yu Bin, Li Hui, Li Yongcai, Wei Jiang, Wang Jun, Wang Yidai, Li Shang, Zhao Dan, Ruan Yixiao. 2017. Structural superimposed halo practical model for deep blind ore prediction in typical deposits[J].Gold Science and Technology,25(2):1-6(in Chinese with English abstract).

Zhang Baolin, Lü Guxian, Yu Jianguo, Zhang Qipeng, Shi Xiaoming, Wei Junbin, Wang Cuizhi, Bi Minfeng, Zhang Tengfei, Jiao Jiangang, Lei Wuchao, Su Yanping. 2021. Double-cross-shaped distribution and ore-controlling characteristics of structural traces in Chaihulanzi gold deposit and its surrounding area at Chifeng,northern China[J]. Geoscience, 35(5):1267-1273(in Chinese with English abstract).

Zhao Yang, Huang Yong, Yin Fuguang, Ciren Lamu, Yang Zhonghu, Xiong Tao, Meng Fanhua. 2024. Geochemical characteristics of structural superposition halo and coupling relationship between magma-structure-mineralization in Gaoloushan segment of Yangshan gold deposit, Wenxian County,Gansu Province[J]. Chinese Journal of Geology, 59(2): 484-497(in Chinese with English abstract).

[附中文参考文献]

韩耀徽,王翠芝,吴志杰,吕古贤,张宝林,张启鹏. 2024. 内蒙古赤峰柴胡栏子金矿田遥感地质解译和蚀变信息提取与找矿预测[J].现代地质,38(4):1076-1091.

李成禄,符安宗,徐文喜,袁茂文,刘宝山,杨文鹏,赵瑞君,赵忠海. 2023. 黑龙江多宝山地区永新金矿床构造叠加晕特征及深部找矿预测[J].现代地质,37(3):674-689.

李惠,禹斌,李德亮,马久菊,孙凤舟. 2015. 不同类型金矿床深部盲矿预测的构造叠加晕模型[J]. 矿产与地质,29(5):648-653,658.

李惠,禹斌,李德亮,张国义,马久菊,孙凤舟,李永才,魏江. 2014b. 构造叠加晕找盲矿法的创新与找矿新突破[J]. 黄金科学技术,22(4):7-13.

李惠,禹斌,李德亮,张国义,马久菊,孙凤舟,任曙光,刘春岚,吕明光,李上,魏江,赵佳祥,王俊,李永才,王一大. 2014a. 构造叠加晕法预测盲矿的关键技术[J]. 物探与化探,38(2):189-193.

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,李德亮. 2011. 构造叠加晕找盲矿法及找矿效果[M]. 北京:地质出版社:64-68.

李惠,禹斌,魏江,李永才,王俊,魏子鑫,孙凤舟,王旭,任良良,张贺然,彭伟,李上,司淑云,杨亚娟,骆雪飞. 2021. 勘查(新)区构造叠加晕研究方法及预测参照实用理想模型[J]. 地质与勘探,57(2):351-359.

李惠,禹斌,魏江,李永才,王俊,魏子鑫,张贺然,任良良,王旭,孙凤舟,彭伟,李上,司淑云,杨亚娟,骆雪飞. 2020. 热液型矿床深部盲矿预测的构造叠加晕实用理想模型及其意义[J]. 地质与勘探,56(5):889-897.

李惠,禹斌,张国义,马久菊,李德亮,孙凤舟,李永才,魏江. 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,张国义,禹斌,李德亮. 2010. 构造叠加晕找盲矿法及其在矿山深部找矿效果[J]. 地学前缘,17(1):287-293.

刘清泉,张青山,曾毅,李建岭,李冰,赵红涛,陈向阳,陈肇华,熊伊曲,邵拥军. 2024. 熊耳山地区栗子沟金矿勘查区构造叠加晕研究及找矿预测[J].矿产勘查,15(9):1711-1719.

马久菊,张永强,望开磊,巩英建,王钊,李志强,赵佳祥,魏江,杨亚娟. 2012. 甘肃天水宽沟金矿床构造叠加晕研究及盲矿预测[J]. 黄金科学技术,20(1):27-31.

任良良,王润涛,张承玉,魏江,田华. 2019. 构造叠加晕找矿法在云南省杨梅田铜矿床深部盲矿预测中的应用[J]. 地质找矿论丛,34(2):315-320.

任良良,魏江,李惠,马晓辉,要悦稳,王希君,林曼曼. 2023a. 广西大瑶山西部一带勘查(新)区构造叠加晕法研究及应用[J]. 地质与勘探,59(6):1217-1227.

任良良,魏江,秦连元,王希君,潘宝亮,闫世峰. 2023b. 地球化学勘查相关性研究与探讨——以胶莱盆地东北缘典型矿床为例[J]. 地质找矿论丛,38 (4):503-511.

任苗宇,代清龙,李旭,李志彤,宫文涛. 2021. 内蒙古柴胡栏子金矿地质特征及深部找矿前景[J].化工矿产地质,43(3):234-240.

魏江,王信,任良良,要悦稳,魏子鑫,廉永,王旭. 2023. 内蒙古花脑特银多金属矿Ⅰ号蚀变带构造叠加晕三维模型研究及应用[J]. 地质与勘探,59(5):1017-1026.

禹斌,李惠,李德亮,张连发,刘青,李威,王善飞,李思玲,杨清泉,郭彬,曲伟勋,赵冬冬. 2010. 山东莱州三山岛金矿床的构造叠加晕模式研究与深部预测[J]. 地质找矿论丛,25(3):260-264.

禹斌,李惠,李永才,魏江,王俊,王一大,李上,赵丹,阮怡箫. 2017. 典型矿床深部盲矿预测的构造叠加晕实用模式[J]. 黄金科学技术,25(2):1-6.

张宝林,吕古贤,余建国,张启鹏,史晓鸣,魏竣滨,王翠芝,毕珉烽,张腾飞,焦建刚,雷武超,苏艳平. 2021 .内蒙古赤峰柴胡栏子金矿及周边地区构造形迹的“米字型”分布及其控矿特征[J]. 现代地质,35(5):1267-1273.

赵阳,黄勇,尹福光,次仁拉姆,杨忠虎,熊韬,孟繁华. 2024. 甘肃文县阳山金矿床高楼山矿段构造叠加晕地球化学特征及岩浆-构造-成矿耦合关系简析[J].地质科学,59(2):484-497.

The Correlation of Indicator Elements in Structural Superimposed Halos for Concealed Gold Prospecting and Its Significance

LI Hui[1], YU Bin[1], REN Liangliang[1,2], WEI Jiang[1,2], WANG Xu[1], ZHANG Guoyi[1], LI Shang[1], PENG Wei[1], YAO Yuewen[1], WANG Xijun[1], XIE Zichen[1]

（1.*Geophysical Exploration Academy of China Metallurgical Geology Bureau*, *Baoding*, *Hebei* 071051; 2. *Institute of Mineral Resources Research*, *China Metallurgical Geology Bureau*, *Beijing* 101300）

Abstract: The study and correct understanding of the correlation between gold indicator elements are of significant theoretical importance and practical value for the prediction of concealed gold deposits using structural superimposed halos. Some scholars believe that the indicator elements for predicting blind gold deposits should be positively correlated with gold, with higher correlation coefficients being preferable. However, this is not entirely the case in practice. In hydrothermal gold deposits, ore-forming and associated elements were precipitated from mineralization fluids to form ore bodies and halos. Theoretically and macroscopically, these associated elements were closely related to gold, with halos being more extensive than ore bodies and thus easier to detect. As a result, associated elements serve as excellent direct indicators for gold prospecting. Gold ore bodies and their halos exhibit distinct axial zoning, with each ore body possessing its own frontal halo, near-ore halo, and rear halo. Theoretically, gold is only positively correlated with near-ore halo elements and shows no correlation with frontal or rear halo elements. However, in practice, the calculation of the correlation coefficient matrix for the orebody-halo indicator elements often results in complex and seemingly chaotic relationships. For example, gold may appear correlated with frontal halo elements (e.g., Hg) or rear halo elements (e.g., V, Ti), which reflects the complexity of gold-associated element relationships resulting from multi-stage mineralization and superposition. Further research indicates that this complexity largely reflects the intensity of hydrothermal activity. Combined with the anomaly strength of indicator elements, it serves as a favorable indicator for determining the presence of concealed deposits at depth.

Key words: structural superimposed halo, indicator elements, correlation complexity, prospecting criteria, hydrothermal gold deposit

地质与勘探