



秦岭西部铍厂沟金矿床主矿带原生晕分带特征及深部预测

曹强^{1,2}, 刘家军¹, 吴杰¹, 陶银龙¹, 王立新³, 刘相红³

1. 中国地质矿业有限公司, 北京 100029; 2. 中国地质大学(北京)地质过程与矿产资源国家重点实验室/地球科学与资源学院, 北京 100083; 3. 陕西略阳铍厂沟金矿, 陕西 略阳 724312

摘要: 为了解铍厂沟金矿原生晕分布规律、提高找矿勘查效率, 对铍厂沟金矿的原生晕进行了元素相关性分析、R 型聚类分析以及因子分析等, 并结合了野外工作及前人研究成果, 得到铍厂沟金矿床理想的分带组合: 前缘晕为 As-Te-Sb-Hg, 近矿晕为 Ag-Au-Bi-Pb-Zn-Se, 尾晕为 Sc-Co-Ni-Mo-Cu-Cd-Mn. 铍厂沟金矿的主矿带分带顺序为: Sc-Se-Mn-Cu-Cd-Ni-Zn-Ag-Au-Pb-Sb-Mo-Te-Co-Bi-Hg. 结合原生晕理想的叠加模型, 得到矿体从 1150 中段至 990 中段呈现不连续现象, 表现为在 1070 中段以及下部矿体延伸至 1030 中段附近出现尖灭. 新矿体从 1030 中段再次出现往下部延伸至 990 中段附近, 并且存在往深部延伸的趋势.

关键词: 原生晕; 数学地质分析; 轴向分带; 金矿床; 陕西省

PRIMARY HALO ZONING AND DEEP PREDICTION OF THE MAIN ORE BELT IN HUACHANGGOU GOLD DEPOSIT, WESTERN QINLING MOUNTAINS

CAO Qiang^{1,2}, LIU Jia-jun¹, WU Jie¹, TAO Yin-long¹, WANG Li-xin³, LIU Xiang-hong³

1. China National Geological and Mining Corporation, Beijing 100029, China; 2. State Key Laboratory of Geological Processes and Mineral Resources/School of Earth Sciences and Resources, China University of Geosciences, Beijing 100083, China; 3. Lueyang Huachanggou Gold Mine, Lueyang 724312, Shaanxi Province, China

Abstract: To know about the distribution rule of primary halo in Huachanggou gold deposit and improve the efficiency of prospecting and exploration, the paper makes the element correlation analysis, R-mode cluster analysis and factor analysis of the primary halo, combined with the field survey and previous research results, and obtains the ideal zoning combination of Huachanggou gold deposit as follows: As-Te-Sb-Hg for the front halo, Ag-Au-Bi-Pb-Zn-Se for the near-ore halo and Sc-Co-Ni-Mo-Cu-Cd-Mn for the rear halo, with Sc-Se-Mn-Cu-Cd-Ni-Zn-Ag-Au-Pb-Sb-Mo-Te-Co-Bi-Hg as the zoning sequence of main ore belt. Combined with the ideal model of primary superimposed halo, it is concluded that the orebody is discontinuous from Level 1150 m to Level 990 m, that is, the orebody extending from Level 1070 m downward and pinching out near Level 1030 m, then appearing again from Level 1030 m to Level 990 m, showing a tendency of deep extension.

Key words: primary halo; geo-mathematical analysis; axial zonation; gold deposit; Shaanxi Province

收稿日期: 2020-05-09; 修回日期: 2020-07-21. 编辑: 张哲.

基金项目: 国家自然科学基金重点项目“秦岭成矿域复合造山过程中印支-燕山期金-多金属成矿作用”(编号 41730426), “西秦岭卡林-类卡林型金矿床的成矿地质背景与叠加成矿作用研究”(编号 41030423); 中国地质调查局“中国矿产地质志”项目(编号 DD20190379-87); 中国地质调查局地质调查工作项目(编号 1212011220924).

作者简介: 曹强 (1989—), 男, 硕士, 主要从事矿床与矿床地球化学研究工作, 通信地址 北京市朝阳区北三环中路浙江大厦 7 层, E-mail// caoqiang@chinagm.com.cn

通信作者: 刘家军 (1963—), 男, 博士, 教授, 博士生导师, 主要从事矿床学与教学工作, 通信地址 北京市海淀区学院路 29 号, E-mail// liujiajun@cugb.edu.cn

0 引言

Goldberg 等对大量的矿床原生晕进行了元素分带性研究后,发现矿床原生晕的分带性是普遍存在的,并认为这是因为不同物理、化学条件会影响成矿溶液的运动过程,使原生晕具有分带性^[1]. 此后,学者们对原生晕进行了深入的研究,基于岩浆热液成矿学说,Beus 等认为地热可以对矿床原生分带进行控制,温度对矿物在溶液中沉淀析出有着重要的影响,元素的分带序列受到侵入体周围温度变化的影响^[2-4].

近年来,关于金矿床的地质研究发展十分迅速,越来越多的学者意识到金矿的成矿过程与原生晕的形成具有密切的关系. 在金矿的地球化学研究中,原生晕已成为一个重要的组成部分^[4],地质工作者也已经建立了初步的标准模型. 如邵跃、李惠等地球化学家提出了一套金矿的原生晕分带序列,建立了金矿原生晕分带模型^[5-7],并认为在金矿床的原生晕中,轴向分带通常指示含矿气液的运移方向. 当轴向分带与垂向分带一致时,表明含矿带是倾斜方向;当轴向分带与水平方向一致时,表明含矿带为水平方向^[8-10].

铍厂沟金矿位于西秦岭勉略缝合带内的泥盆系三河口群中,为 20 世纪 90 年代发现的大型金矿^[11]. 一经发现,就引起了国内外学者们的注意,及在矿床地质特征、成矿流体特征、矿床成因等方面的大量研

究^[12-13]. 然而,在矿床原生晕分布特征方面的研究依然薄弱,阻碍了进一步的找矿勘查. 为了进一步了解矿区原生晕特点,有必要在前人的研究基础上,详细分析铍厂沟金矿的原生晕分带特征,对矿体、矿化进行科学预测.

本文在详细研究铍厂沟矿床地质的基础上,通过对不同中段、不同勘探线矿石微量元素特征、元素分带性、原生晕叠加模型的研究,探讨矿山主矿带原生晕的分带特征,并对深部矿体成矿进行预测分析.

1 铍厂沟金矿地质概况

1.1 区域地质概况

秦岭造山带有着复杂的地壳组成和物质结构,其西部经历了 Rodinian 大陆裂解过程^[14]. 在新生代后期,西秦岭地区因青藏高原的大幅抬升而发生隆生,并成为现今国内最大的卡林型-类卡林型金矿成矿地区,该区矿床表现出从卡林型金矿过渡到造山型金矿的特点^[15-16]. 勉略缝合带是该区最重要的构造带,为一个由北到南的逆冲推覆构造带,其派生出的一系列北西-东西向的韧性剪切带,控制了铍厂沟金矿矿体的形成及分布. 该地区主要发育新元古界碧口群、泥盆系三河口群及石炭系略阳组地层,各地层之间均为断裂接触^[17](图 1).

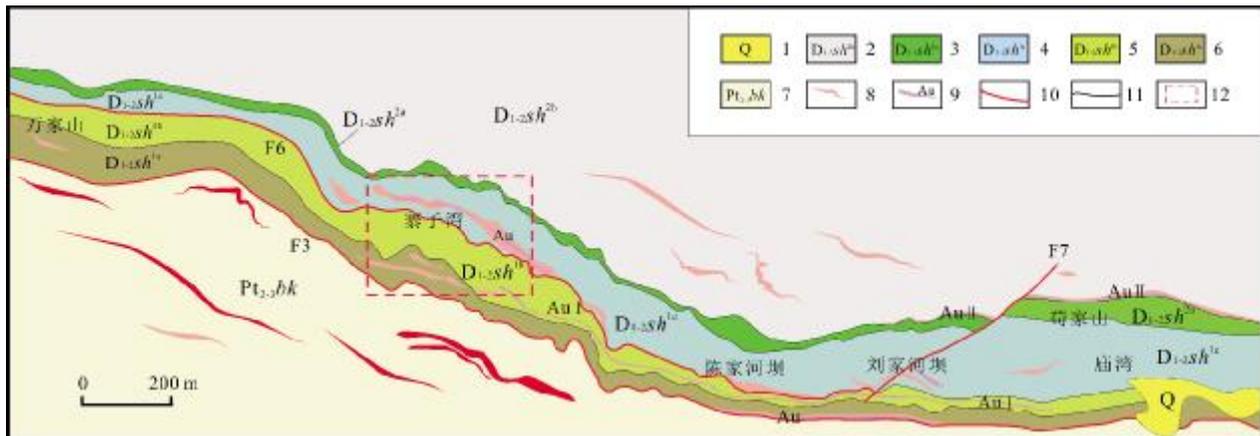


图 1 铍厂沟金矿地质简图

(据文献[23])

Fig. 1 Geological sketch map of Huachanggou gold deposit

(From Reference [23])

1—第四系(Quaternary); 2—泥盆系三河口群第二岩段第二岩性层(2nd layer of 2nd mem., Sanhekou gr., Devonian); 3—三河口群第二岩段第一岩性层(1st layer of 2nd mem., Sanhekou gr.); 4—三河口群第一岩性段第三岩性层(3rd layer of 1st mem., Sanhekou gr.); 5—三河口群第一岩性段第二岩性层(2nd layer of 1st mem., Sanhekou gr.); 6—三河口群第一岩性段第一岩性层(1st layer of 1st mem., Sanhekou gr.); 7—中-新元古界碧口群(Meso-Neoproterozoic Bikou gr.); 8—细碧岩(spillite); 9—金矿体(gold orebody); 10—断层(fault); 11—地质界线(geological boundary); 12—研究区域(study area)

1.2 矿区地质特征

铀厂沟金矿位于陕西省略阳县,处于秦岭微板块(南秦岭)与扬子板块交界处的南缘,基性火山岩系列和韧性剪切带对金矿的形成产生了重要的作用^[18].区域构造往东西向扩展,岩浆活动频繁,基性-超基性及中酸性岩体是该区域主要发育的岩体,局部地区可见岩脉,其总体的构造线为东西向波状伸展^[19].

中一新元古界碧口群($Pt_2-bk_2^{2-3}$)地层主要为酸性凝灰岩夹基性火山岩,出露在矿区南部;中一下泥盆统三河口群(D_{1-sh})^[20]地层局部中夹杂基性凝灰岩透镜体,主要出露在矿区北部.后者为主要的含矿地层,根据岩性可以划分为 3 个岩性段:其中第一岩性段和第二岩性段有 3 个岩性层,粉砂质绢云千枚岩、钙质千枚岩、粉砂岩等构成第一岩性段一岩性层,中一薄层状微晶灰岩、泥质灰岩、中一厚层状结晶灰岩构成第一岩性段二岩性层,凝灰质绢云千枚岩、凝灰质板岩等构成第一岩性段三层岩性;钙质千枚岩、粉砂质绢云千枚岩、变质石英砂岩构成第二岩性段一岩性层,薄一中厚层状结晶灰岩、微晶灰岩、泥质灰岩构成第二岩性段二岩性层,灰紫色凝灰质板岩、凝灰质千枚岩、中基性熔岩构成第二岩性段三层岩性;第三岩性段的主要构成为灰色薄一中厚层结晶灰岩、黄绿色板岩、粉砂质板岩.三河口群的总厚度超过 900 m^[21-22].矿区整体为向北倾斜的单斜构造,其北部地区属于康县-略阳华力西褶皱带,南部地区属于摩天岭加里东褶皱带,向东西方向展布(图 1).

1.3 矿床地质特征

铀厂沟金矿目前共发现 4 个含矿带,呈近东西向展布,北西西向倾斜.矿化带西起窑上湾,东至庙湾,整个矿带长约 3600 m,宽 20~60 m,受到细碧岩及绢云千糜岩的控制^[24].

矿体由南至北分别为南南矿带、南矿带、主矿带和北矿带^[25].南南矿带位于万家山-刘家河一带,倾向北,倾角在 55~65°之间, Au 品位为 $0.8 \times 10^{-6} \sim 4.2 \times 10^{-6}$,可见一些具有工业价值的矿体^[26-27].南矿带(AuI)位于寨子湾-刘家河坝一带,倾角 40~75°,品位为 $3.03 \times 10^{-6} \sim 12.57 \times 10^{-6}$,最高品位达 39.84×10^{-6} .主矿带位于寨子湾-刘家河坝东侧一带,共 5 条主矿体,分别为 Au8、Au9、Au10、Au11、Au14(图 2),矿体大致上呈脉状或透镜状产出.北矿带(AuII)分布在刘家河坝铁夹

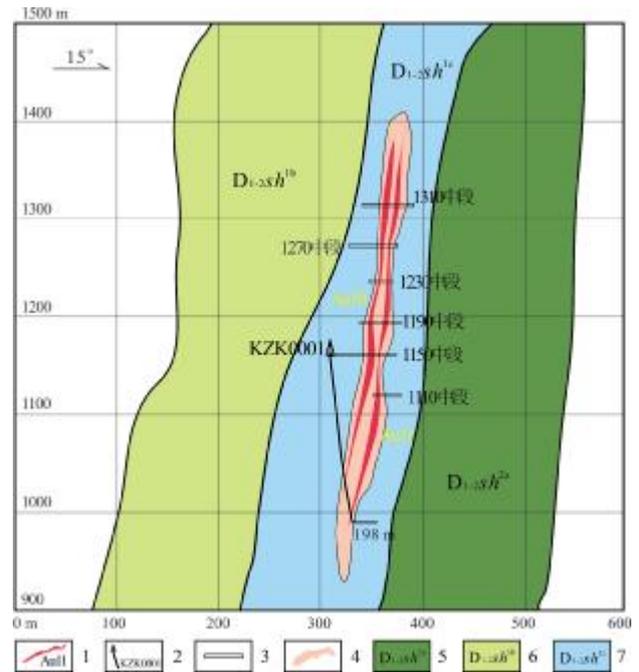


图 2 铀厂沟主矿体 0 号勘探线钻孔设计剖面图

Fig. 2 Borehole profile of Huachanggou main orebody along No. 0 exploratory line

1—矿体及编号 (orebody and number); 2—钻孔位置及编号 (drill hole and number); 3—中段位置 (mining level); 4—弱蚀变细碧岩带 (weakly altered spilite belt); 5—钙质千枚岩、粉砂质绢云千枚岩 (calcareous phyllite and silty sericite phyllite); 6—凝灰质板岩、凝灰质绢云千枚岩 (tuffaceous slate and tuffaceous sericite phyllite); 7—中厚层状结晶灰岩、泥质灰岩 (medium thick bedded crystalline limestone and argillaceous limestone)

树湾至庙湾一带,倾角 60~80°.品位较高,一般为 $4.0 \times 10^{-6} \sim 24.50 \times 10^{-6}$,最高品位达 54.67×10^{-6} .北矿带、南矿带围岩有明显的硅化现象,表现为硅化千枚岩、硅化灰岩等.矿物的排列具有定向性,其中以绢云母和绿泥石的排列最具代表性^[28].另外,波状消光特征在某些矿物中也有所体现.这些特征都说明了在蚀变发生的同时,也发生了韧性剪切运动.

成矿过程可根据脉体穿插关系、矿床地质特征、矿石组构和矿物组合等划分为 4 个期次^[29-30],分别是海底火山喷发沉淀期、区域浅变质期、热液矿化蚀变期和表生作用氧化期.热液矿化蚀变期是主要的成矿阶段,该阶段又可以划分为石英-黄铁矿阶段(I)、石英-多金属硫化物阶段(II)、石英-碳酸盐阶段(III)等 3 个阶段.矿床中金主要富集在第 III 阶段,以裂隙金和晶隙金的形式出现^[28].

2 铍厂沟金矿微量元素特征

2.1 样品采集及测试

本次采集了主矿带 990 中段、1030 中段的 47 件样品进行微量元素含量的测试. 共测定 17 种元素, 其中 Au 采用无火焰原子吸收光谱法(AAN)测定, Ag 采用发射光谱法(ES)测定, As 采用氢化物-原子荧光光谱法(HG-AFS)测定, Hg 采用冷蒸气-原子荧光光谱法(CV-AFS)测定, 其他采用等离子体质谱法(ICP-MS)测定.

2.2 测试结果分析

根据主矿带样品特征, 采用数学地质方法对所得数据进行了系统分析, 经相关性分析、聚类分析以及因子分析后得出成矿元素之间的规律性特征.

2.2.1 相关性分析

利用相关分析可以衡量各元素间的相关性和亲和力, 从而找出与成矿元素密切相关的伴生元素, 这些元素对找矿具有重要的指示意义. 主矿带的 990 和 1030 中段采自 36~70 勘探线, 其中 40 勘探线和 44 勘探线

包含有 1070 中段样品. 对主矿带的矿石样品进行相关性分析后得出 17 种元素的相关性系数 r , 结果如下表所示 (表 1). 取置信度为 95% 可得到主矿带的相关系数 $\alpha=0.281$, 由表 1 可以看出, Au 与 Ag、As、Hg、Te 呈正向关系; Ag 与 Au、As、Hg、Te 呈正向关系; As 与 Au、Ag、Bi、Hg、Pb、Te 呈正向关系; Bi 与 As、Hg、Pb、Te 呈正向关系; Cd 与 Mn、Mo、Zn 呈正向关系; Zn 与 Cd、Co、Mn 呈正向关系. 与 Co 呈正向相关的有 Sc、Zn; 与 Cu 呈正向关系的是 Sc; 与 Hg 呈正向关系的有 Au、Hg、As、Bi、Pb、Sb、Te; 与 Mn 呈正向关系的有 Cd、Co、Ni、Sc; 与 Mo 呈正向关系的有 Cd、Zn; 与 Ni 呈正向关系的有 Co、Mn、Sc; 与 Pb 呈正向关系的有 As、Bi、Hg、Te; 与 Sb 呈正向关系的有 Hg、Se; 与 Sc 呈正向关系的有 Co、Cu、Mn、Ni; 与 Se 呈正向关系的有 Sb; 与 Te 呈正向关系的有 Au、Ag、As、Bi、Hg、Pb. 其中 Ag 与 Au 之间的相关性很高, 为 0.805, 同时 Ag 与 As、Hg、Te 的相关性都很高, 这种特性与 Au 保持一致, 由此可见, Ag 是最主要的伴生元素.

表 1 主矿带元素相关系数

Table 1 Correlation coefficients of elements in the main ore belt

元素	Au	Ag	As	Bi	Cd	Co	Cu	Hg	Mn	Mo	Ni	Pb	Sb	Sc	Se	Te	Zn
Au	1	0.805	0.403	0.275	-0.027	0.069	-0.005	0.417	-0.140	0.021	-0.098	0.247	0.062	-0.268	-0.307	0.406	0.151
Ag	0.805	1	0.386	0.243	-0.077	0.085	0.025	0.484	-0.156	0.005	-0.058	0.211	0.080	-0.198	-0.232	0.425	0.080
As	0.403	0.386	1	0.581	0.166	0.128	-0.009	0.432	-0.251	0.000	-0.220	0.695	0.186	-0.431	0.046	0.901	0.176
Bi	0.275	0.243	0.581	1	-0.104	0.174	-0.061	0.406	-0.191	0.039	-0.045	0.849	0.115	-0.511	0.017	0.760	0.097
Cd	-0.027	-0.077	0.166	-0.104	1	0.255	-0.003	0.112	0.449	0.345	0.219	0.064	0.192	0.143	0.178	-0.021	0.575
Co	0.069	0.085	0.128	0.174	0.255	1	0.207	0.096	0.401	-0.088	0.702	-0.029	0.279	0.590	0.161	0.097	0.451
Cu	-0.005	0.025	-0.009	-0.061	-0.003	0.207	1	0.004	0.234	-0.171	0.118	-0.036	0.127	0.317	-0.023	0.048	0.061
Hg	0.417	0.484	0.432	0.406	0.112	0.096	0.004	1	-0.153	-0.049	-0.150	0.371	0.631	-0.333	0.056	0.426	0.195
Mn	-0.140	-0.156	-0.251	-0.191	0.449	0.401	0.234	-0.153	1	0.205	0.425	-0.261	0.029	0.512	0.070	-0.268	0.265
Mo	0.021	0.005	0.000	0.039	0.345	-0.088	-0.171	-0.049	0.205	1	-0.214	0.029	-0.066	-0.169	0.136	0.043	0.376
Ni	-0.098	-0.058	-0.220	-0.045	0.219	0.702	0.118	-0.150	0.425	-0.214	1	-0.275	0.032	0.557	0.047	-0.200	0.173
Pb	0.247	0.211	0.695	0.849	0.064	-0.029	-0.036	0.371	-0.261	0.029	-0.275	1	0.031	-0.632	-0.046	0.781	0.157
Sb	0.062	0.080	0.186	0.115	0.192	0.279	0.127	0.631	0.029	-0.066	0.032	0.031	1	0.108	0.479	0.119	0.212
Sc	-0.268	-0.198	-0.431	-0.511	0.143	0.590	0.317	-0.333	0.512	-0.169	0.557	-0.632	0.108	1	0.219	-0.526	0.119
Se	-0.307	-0.232	0.046	0.017	0.178	0.161	-0.023	0.056	0.070	0.136	0.047	-0.046	0.479	0.219	1	-0.001	0.001
Te	0.406	0.425	0.901	0.760	-0.021	0.097	0.048	0.426	-0.268	0.043	-0.200	0.781	0.119	-0.526	-0.001	1	0.120
Zn	0.151	0.080	0.176	0.097	0.575	0.451	0.061	0.195	0.265	0.376	0.173	0.157	0.212	0.119	0.001	0.120	1

2.2.2 R 型聚类分析

聚类分析主要遵从“物以类聚”的原则将性质相近的元素归为一类,从而找到近矿指示元素,辅助找矿.采用 R 型聚类分析将变量进行归类分析,研究出岩体之间以及不同的成矿期次之间的内在关系.由于物理化学条件的改变,不同的元素沉淀在成矿元素的运移和富集过程中有所差别,R 型聚类分析正好揭示这些差别所在^[30].利用 SPSS 数据统计分析软件得到主矿带 47 件样品的树形谱系图(图 3).

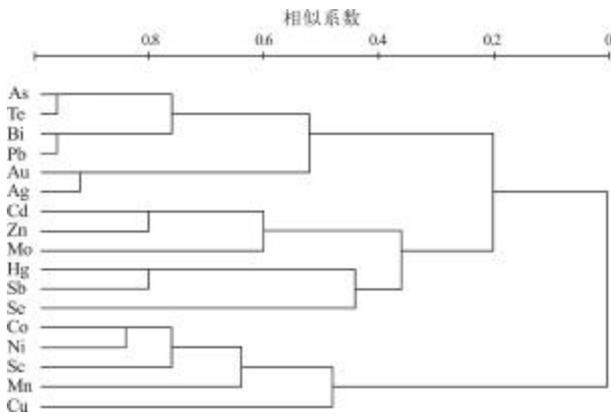


图 3 主矿带 R 型聚类分析谱系图

Fig. 3 R-mode cluster analysis for the main ore belt

由图 3 看出,以相似系数 0.4 为界,可以将 17 种元素分为 3 组: Au、Ag、Pb、Bi、Te、As 为第一组; Cd、Zn、Mo、Hg、Sb、Se 为第二组; Co、Ni、Sc、Mn、Cu 为第三组.在 0.8~1 之间,Au 与 Ag,Pb 与 Bi,As 与 Te 相关性密切.在前人研究基础上,可认为与 Au 成矿联系较为密切的有 Pb、Bi、As、Te,Au 的主要伴生元素为 Ag,次要伴生元素为 Bi、Pb、As 和 Te,都可以形成较好的地球化学原生晕.

2.2.3 因子分析

R 型因子分析是一种数据的降维分析,将存在复杂关系的较多变量根据元素之间的内在联系生成几种新的变量,这几种新的变量就是形成的新的因子量,反映的是元素的组合以及地球化学信息与成矿之间的关系^[31-32].本文采用 SPSS 软件进行 R 型因子分析,得到因子载荷矩阵和极大方差旋转矩阵及因子散点图(图 4).

如图 4 所示,前 5 个因子特征值都大于 1,且变化范围较大,对整体的影响也很大;第 6~17 个因子的特征值均分布于 0~1 之间,变化幅度很小,对整体因子

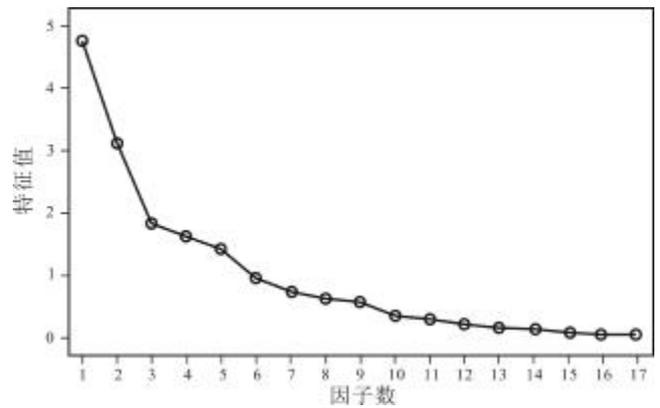


图 4 元素因子散点图

Fig. 4 Scatter diagram of element factors

影响较小.因此,在整个数据处理过程中,将前 5 个因子作为整体进行因子分析.数据分析结果如表 2、3.

表 2 主矿带因子载荷矩阵

Table 2 Factor loading matrix of the main ore belt

元素	F1	F2	F3	F4	F5
Te	0.89	0.16	0.00	-0.05	-0.27
Pb	0.83	0.05	0.20	-0.02	-0.39
As	0.82	0.23	0.05	-0.05	-0.16
Bi	0.78	0.15	0.06	-0.11	-0.42
Sc	-0.73	0.48	-0.27	-0.11	-0.01
Hg	0.62	0.32	-0.08	-0.26	0.47
Au	0.57	0.14	-0.48	0.37	0.36
Ag	0.56	0.15	-0.52	0.28	0.39
Co	-0.10	0.83	-0.27	-0.06	-0.26
Zn	0.11	0.67	0.27	0.40	0.08
Cd	-0.09	0.64	0.45	0.28	0.09
Ni	-0.39	0.58	-0.34	0.01	-0.33
Mn	-0.45	0.56	0.06	0.25	-0.10
Mo	0.04	0.14	0.63	0.50	0.20
Cu	-0.11	0.28	-0.34	-0.17	-0.13
Sb	0.17	0.50	0.10	-0.61	0.47
Se	-0.09	0.30	0.49	-0.59	0.13

由表 2、3 可以看出,前 5 个主因子占据了因子载荷矩阵和方差极大正交矩阵. F1: Te、Pb、As、Bi、-Sc、Hg、Au、Ag, F2: Co、Zn、Cd、Ni、Mn, F3: Mo、-Cu, F4: Sb、

表 3 主矿带方差极大正交旋转矩阵

Table 3 Varimax orthogonal rotation matrix of the main ore belt

元素	F1	F2	F3	F4	F5
Pb	0.93	-0.15	0.04	0.05	-0.01
Te	0.90	-0.04	0.25	-0.01	0.08
Bi	0.90	0.02	0.06	-0.03	0.04
As	0.81	-0.04	0.25	0.08	0.17
Co	0.14	0.86	0.06	0.26	0.15
Ni	-0.11	0.82	-0.07	0.11	-0.10
Sc	-0.56	0.71	-0.15	0.09	0.09
Cu	-0.01	0.48	0.05	-0.14	0.07
Ag	0.19	0.01	0.89	-0.02	0.03
Au	0.22	-0.02	0.89	0.04	-0.04
Cd	0.01	0.17	-0.07	0.80	0.18
Zn	0.14	0.21	0.17	0.77	0.08
Mo	-0.01	-0.38	-0.04	0.75	-0.06
Mn	-0.25	0.50	-0.13	0.50	-0.07
Sb	0.05	0.15	0.11	0.06	0.92
Se	0.02	0.01	-0.44	0.13	0.70
Hg	0.34	-0.07	0.52	0.03	0.62

Se, F5 为空, 可以总结为因子载荷矩阵的 5 个因子: F1: Pb、Te、Bi、As, F2: Co、Ni、Sc、Cu, F3: Ag、Au, F4: Cd、Zn、Mo、Mn, F5: Sb、Se、Hg, 总结为方差极大正交旋转矩阵的 5 个因子. 5 个因子特征值如表 4.

表 4 主矿带因子贡献百分比

Table 4 Factor contribution percentage of the main ore belt

因子	载荷矩阵		方差极大正交旋转矩阵	
	特征值	累积特征值	特征值	累积特征值
F1	27.91	27.91	22.16	22.16
F2	18.28	46.19	15.60	37.76
F3	10.85	57.04	13.45	51.21
F4	9.50	66.54	12.88	64.09
F5	8.45	74.99	10.90	74.99

由表 4 可以看出, 前 5 个因子的累积特征值都达到了 74.99%, 反映了 17 种元素的 74.99% 的地球化学信息. 经过方差正交旋转之后, 各因子特征值发生了

改变, 可以看出 F1: Pb、Te、Bi、As 代表的是多金属硫化物阶段. 从 F2 和 F4 的元素可以推测出, 这是代表着深部岩浆有关的中高温成矿作用. F3 代表金的主因子, 而 F1、F3、F5 的元素代表着多期的多金属硫化物矿化及成晕, 一般为中低温的成矿元素. 结合因子分析结果, 可得到 Au 元素因子模型: $Au=0.89F3+0.22F1+0.04F4-0.02F2-0.04F5$.

3 原生晕分带特征

3.1 主矿带原生晕轴向分带序列

成矿地球化学研究、找矿勘探、剥蚀深度、盲矿预测等离不开金矿床原生晕分带序列的研究^[7, 33-34]. 根据采样位置的不同, 将样品分为 5 组, 得到一个原生晕轴向分带序列. 将大量元素金属量相加可以起到减小原始数据误差的作用. 按照取平均值—标准化—求分带指数—求变异指数—分带序列的顺序对其进行了系统分析(表 5), 得到原生晕轴向分带序列如下.

表 5 主矿带地球化学元素分带指数

Table 5 Geochemical element zoning index of the main ore belt

采样位置	990 中段	1030 中段	1070 中段	1110 中段	1150 中段
Au	0.0184	0.0117	0.0093	0.0084	0.0112
Ag	0.1025	0.0502	0.0224	0.0257	0.0600
As	0.0709	0.0673	0.0185	0.0216	0.0223
Bi	0.1270	0.1024	0.0263	0.0414	0.0422
Cd	0.0133	0.0213	0.0210	0.0235	0.0176
Co	0.0591	0.0592	0.0915	0.0638	0.0831
Cu	0.0980	0.0908	0.1189	0.1266	0.1152
Hg	0.0440	0.1356	0.0204	0.0271	0.0323
Mn	0.0224	0.0226	0.0328	0.0336	0.0340
Mo	0.1028	0.0314	0.1166	0.1613	0.0914
Ni	0.0586	0.0310	0.1750	0.0913	0.1533
Pb	0.0342	0.0452	0.0131	0.0196	0.0121
Sb	0.0222	0.0554	0.0320	0.0217	0.0519
Sc	0.0280	0.0097	0.0722	0.0659	0.0717
Se	0.0378	0.0490	0.0307	0.0915	0.0585
Te	0.0220	0.0203	0.0050	0.0095	0.0068
Zn	0.1386	0.1969	0.1943	0.1675	0.1365

990 中段: Au、Ag、As、Bi、Te

1030 中段: Hg、Pb、Sb、Zn

1070 中段: Co、Ni、Sc

1110 中段: Cd、Cu、Mo、Se

1150 中段: Mn

通过元素的变异分带指数, 得到轴向分带序列: Ag-Bi-As-Te-Au-Hg-Pb-Sb-Zn-Sc-Ni-Co-Mo-Se-Cd-Cu-Mn. 通过对全国 63 个典型金矿床原生晕轴向分带序列进行概率统计后, 得到国内金矿床原生晕综合轴向分带序列: 矿体前缘及上部为 B-As-Hg-F-Sb-Ba, 矿体中部为 Pb-Ag-Au-Zn-Cu, 矿体下部及尾晕为 W-B-Mo-Mn-Ni-Cd-Co-V-Ti^[7]. 总结了前人有关铀厂沟主矿带原生晕的研究后, 提出其理想的前缘晕序列为: Sb-As-Cu-Hg, 理想的近矿晕为 Au-Ag-Bi-Pb-W, 理想的尾晕 Ni-Co-Mn-Mo-Zn-Cd^[25]. 结合中国金矿原生晕综合轴向分带序列的总体特征, 对比本次研究所得出的轴向分带序列, 发现 990 中段和 1030 中段都出现了前缘晕和近矿晕的元素, 1070 中段则出现了尾晕元素, Cu、Se 等前缘晕或者近矿晕元素在 1110 中段重新出现, 1150 中段出现的是尾晕元素. 由各中段的元素分布情况明显看出 Ag、Au 元素提前出现在前缘晕, 或者是 As、Sb 出现在了近矿晕, Cu 则出现在尾晕系列中. 由此可以看出在 990 中段的前缘晕中叠加了 1030 中段的近矿晕的成分, 1110 中段则叠加了矿体的前缘晕与近矿晕, 1150 中段则为尾晕元素. 在前人研究结论中, 前缘晕、近矿晕和尾晕同时在 1150 中段叠加, 1110 中段和 1070 中段则为近矿晕和尾晕叠加. 综合可见, 从 990~1150 中段之间, 存在 2~3 个或更多矿体在不同中段相互叠加的现象, 并且在 990 中段还存在一定规模的往下继续延伸至 950 中段的矿体.

根据以上分析并结合前人的研究成果, 可以得到铀厂沟主矿带的理想原生晕的前缘晕分带序列为 As-Te-Sb-Hg, 近矿晕分带序列为 Ag-Au-Bi-Pb-Zn-Se, 尾晕分带序列为 Sc-Co-Ni-Mo-Cu-Cd-Mn.

3.2 勘探线原生晕轴向分带序列

各种不同的原生晕轴向分带序列分布于各勘探线上, 根据采样的特点选用 56~70 线进行原生晕的轴向分带序列分析, 从而更加详细地了解主矿带矿体原生晕的分带特征, 有利于对矿区的盲区部位进行预测.

得出各勘探线的原生晕轴向分带序列如表 6 所示.

表 6 主矿带勘探线原生晕轴线分带序列

Table 6 Primary halo axis zoning sequence of exploratory lines in the main ore belt

勘探线	轴向分带序列
36 线	Hg-Bi-Pb-Ag-Te-Mo-Zn,Cu-Sc-Co-Cd-Mn-Sb-Ni-Se-Au-As
40 线	Au-Sc-Te-Se-Ag,Sb-Mo-Mn-Bi-Hg-Pb-Cd,Co-As-Ni-Cu-Zn
44 线	Cd-Ag-As,Hg-Pb-Mo-Se,Au-Cu-Sc-Co-Ni-Mn-Zn-Bi-Te-Sb
48 线	Sb-Hg-As-Bi-Mo-Se-Cd-Ag,Au-Co-Mn-Cu-Sc-Ni-Pb-Zn-Te
56 线	Hg-Sb-Zn-Au-Ag-Sc,Se-Pb-Bi-Mo-Te-As-Cd-Mn-Ni-Co-Cu
60 线	Se-Cu-Pb-Zn-Te-Cd-Au-Co-As-Bi-Ni-Sc,Mo-Mn-Ag-Hg-Sb
62 线	Cu-Te-As-Bi-Se-Ag-Ni,Mn-Mo-Hg-Sb-Zn-Au-Co-Cd-Sc-Pb
64 线	Sc-Mo-Ni-Mn-Se-Zn-Cd-Co-Cu,Ag-As-Te-Bi-Au-Hg-Pb-Sb
66 线	Cd-Mn-Sc-Zn-Hg-Ni-Cu-Sb,Bi-Te-Mo-Co-Ag-As-Au-Se-Pb
68 线	Sc-Se-Cd-Mo-Mn,Ag-Cu-Au-Sb-Te-Bi-As-Hg-Pb-Co-Ni-Zn
70 线	Sc-Ni-Mn-Cu-Co-Cd-Se-Zn,Bi-Au-Te-As-Ag-Pb-Hg-Sb-Mo

各个勘探线均包含 1030 中段和 990 中段, 其中 40 和 44 勘探线包含 1070 中段原生晕数据. (近矿晕+尾晕)→(尾晕+近矿晕+前缘晕)为 36 勘探线的分带趋势;(前缘晕+近矿晕)→(近矿晕+尾晕)→尾晕为 40 勘探线的分带趋势,(尾晕+前缘晕)→(近矿晕+尾晕)→(尾晕+近矿晕+前缘晕)为 44 勘探线的分带趋势,(前缘晕+近矿晕)→(尾晕+近矿晕)为 48 勘探线的分带趋势,(前缘晕+近矿晕)→(近矿晕+前缘晕+尾晕)为 56 勘探线的分带趋势,(近矿晕+前缘晕+尾晕)→(尾晕+前缘晕)为 60 勘探线的分带趋势,(前缘晕+近矿晕+尾晕)→(尾晕+近矿晕+前缘晕)为 62 勘探线的分带趋势,(尾晕+近矿晕)→(前缘晕+近矿晕)为 64 勘探线的分带趋势,(尾晕+近矿晕+前缘晕)→(前缘晕+尾晕+近矿晕)为 66 勘探线的分带趋势, 尾晕→(近矿晕+前缘晕+尾晕)为 68 勘探线和 70 勘探线的分带趋势(图 5).

综合以上分析, 从 48~70 勘探线, 自西向东方向矿体的叠加位置从 990 中段逐渐往上偏移至 1030 中段, 62 勘探线附近 990 中段往下存在矿体向深部延伸, 往 70 勘探线方向, 深部延伸矿体逐渐减少. 在这之间不同层位的矿体存在不同程度的叠加, 40 和 44 勘探线从 1070~1030 中段有矿体分布, 结合 1030~990

中段的分布规律,可推断从 1070~1030 中段的其余勘探线也存在矿体分布.

4 矿体原生晕叠加模型

利用数学地质方法分析铍厂沟采样数据以及上述

分析研究发现不同勘探线上的矿体具有多样化特点, 即有完整的矿体存在, 也有上下两个或多个矿体出现叠加的现象. 如 40 和 44 勘探线包含 1070 中段矿体特征, 40 勘探线在 990 中段下部未见新的矿体出现, 44 勘探线则出现一个新的前缘晕, 推测可能存在下部

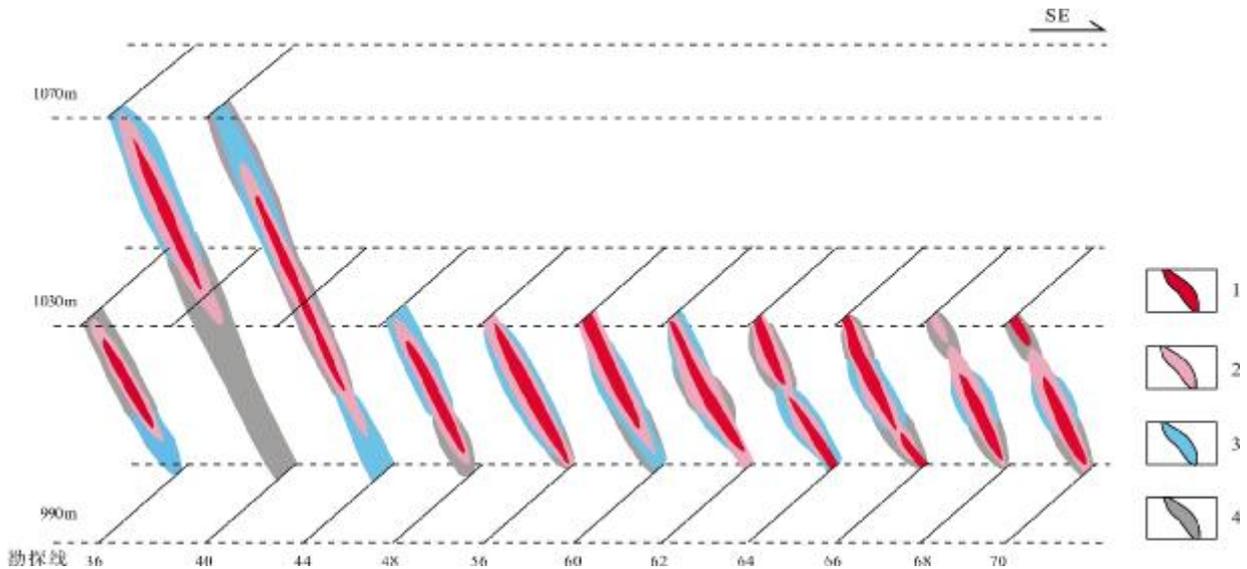


图 5 主矿带原生晕特征示意图

Fig. 5 Characteristics of primary halo in the main ore belt

1—矿体(orebody); 2—近矿晕(near-ore halo); 3—前缘晕(front halo); 4—尾晕(rear halo)

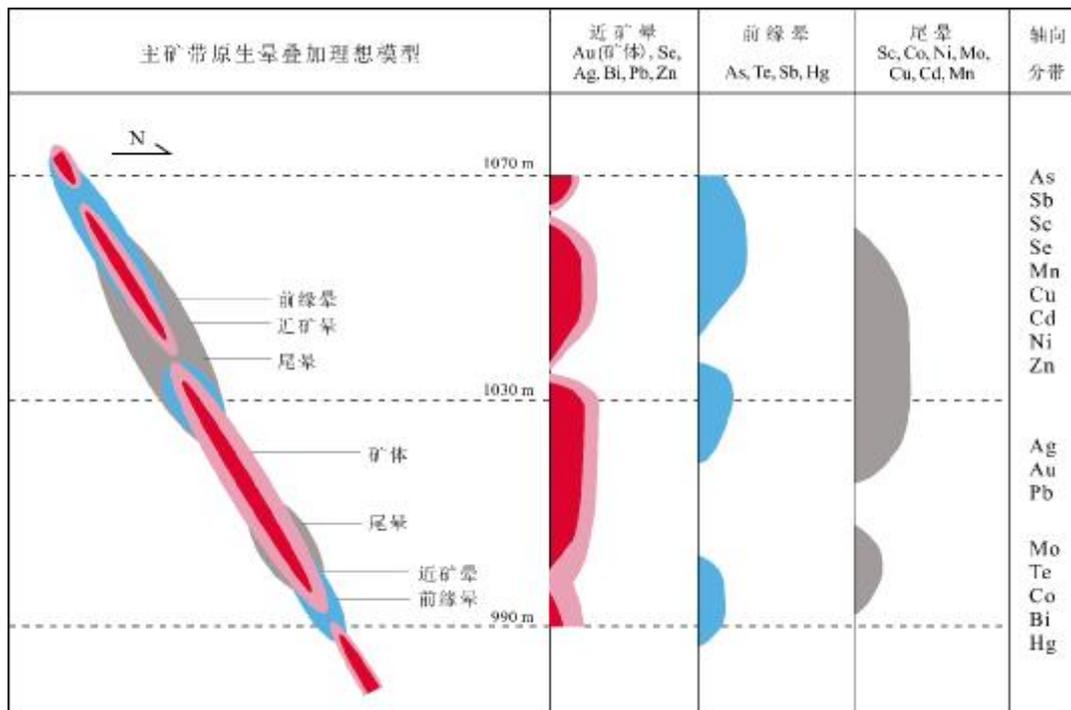


图 6 主矿带原生晕叠加理想模型

Fig. 6 Ideal model of superimposed primary halo in the main ore belt

隐藏矿体. 56 勘探线所示, 从 1030~990 中段为一个完整的矿体. 上部矿体的中下部出现在 60 勘探线 1030 中段, 而下部矿体的上部出现在 990 中段, 因此可以推断 990 中段往下还会存在矿体的延伸. 62、64、66 勘探线都存在反分带现象, 由特征图可得知, 990 中段下部存在矿体延伸. 1030 中段处近矿晕和尾晕发育较强, 990 中段处则发育较多前缘晕和尾晕. 由此可以体现出 1030 中段以上矿体的中下部特征以及 990 中段矿体的特征, 在 60~66 勘探线, 990 中段有部分矿体向深部延伸.

综合以上分析, 结合前人研究的部分成果, 本次建立主矿带 1070~990 中段矿体原生晕叠加理想模型, 预测 990 深部矿体延伸趋势 (图 6). 从 1070 中段向 1030 中段延伸方向存在矿体, 规模较小, 在 1030 中段附近尖灭. 1030~990 中段出现新的矿体延伸, 有明显的前缘晕和少许近矿晕出现, 推测从 990~950 中段存在矿体延伸.

5 结论

通过建立原生晕特征图和原生晕叠加的理想模型, 得到如下结论.

(1) 铀厂沟主矿带原生晕前缘晕分带序列为 As-Te-Sb-Hg, 近矿晕分带序列为 Ag-Au-Bi-Pb-Zn-Se, 尾晕分带序列为 Sc-Co-Ni-Mo-Cu-Cd-Mn.

(2) 矿区从 48 勘探线至 70 勘探线, 从 990 中段向上部 1030 中段, 矿体自西向东发生叠加的位置偏移. 推测 44 勘探线附近可能存在深部隐伏矿体, 从 60~66 勘探线处, 矿体出现多重叠加.

(3) 在 1030 中段处出现新矿体, 并向下延伸至 990 中段而未尖灭, 由此可推测 990 中段以下还存在新的矿体.

参考文献(References):

- [1] 邵跃. 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, 1984, 2(2): 47-55.
Shao Y. The study of the primary zoning of mineral deposits and its application in geochemical prospecting[J]. Geology and Prospecting, 1984, 2(2): 47-55. (in Chinese)
- [2] 黄薰德, 吴郁彦. 地球化学找矿[M]. 北京: 地质出版社, 1986: 1-180.
Huang X D, Wu Y Y. Geochemical prospecting [M]. Beijing: Geological Publishing House, 1986: 1-180. (in Chinese)
- [3] Beus A A, Grigorian S V. Geochemical exploration methods for mineral deposits[M]. Wilmette, USA: Applied Publishing Ltd, 1977: 1-287.
- [4] Goldberg I S, Abramson G Y, Los V L. Depletion and enrichment of primary haloes: Their importance in the genesis of and exploration for mineral deposits [J]. Geochemistry: Exploration, Environment, Analysis, 2003, 3(3): 281-293.
- [5] 邵跃. 金矿化异常评价的几个问题[J]. 中国地质, 1988, 2(5): 22-23.
Shao Y. Several issues on the evaluation of geochemical abnormality of gold deposit[J]. Geology in China, 1988, 2(5): 22-23. (in Chinese)
- [6] 邵跃. 热液矿床岩石测量(原生晕法)找矿[M]. 北京: 地质出版社, 1997: 1-62.
Shao Y. Measurements (primary halo method) in the hydrothermal deposit prospecting[M]. Beijing: Geological Publishing House, 1997: 1-62. (in Chinese)
- [7] 李惠, 张文华, 刘宝林, 等. 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, 1999, 35(1): 32-35.
Li H, Zhang W H, Liu B L, et al. 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, 1999, 35(1): 32-35.
- [8] 李惠, 张文华, 常凤池. 大型、特大型金矿盲矿预测的原生叠加晕理想模型[J]. 地质找矿论丛, 1999, 9(3): 25-33.
Li H, Zhang W H, Chang F C. Ideal models of overprint of primary halo for large, mega-size blind au ore deposits[J]. Contributions to Geology and Mineral Resources Research, 1999, 9(3): 25-33.
- [9] 张国伟, 张本仁, 袁学诚, 等. 秦岭造山带与大陆动力学[M]. 北京: 科学出版社, 2001: 1-855.
Zhang G W, Zhang B R, Yuan X C, et al. Qinling orogenic belt and continental dynamics[M]. Beijing: Science Press, 2001: 1-855.
- [10] 张国伟, 孟庆任, 于在平, 等. 秦岭造山带的造山过程及其动力学特征[J]. 中国科学(D辑), 1996, 26(3): 193-200.
Zhang G W, Meng Q R, Yu Z P, et al. Orogenesis and dynamics of the Qinling Orogen[J]. Science in China Series D-Earth Sciences, 1996, 39(3): 225-234.
- [11] 朱赖民, 张国伟, 李彝, 等. 秦岭造山带重大地质事件、矿床类型和成矿大陆动力学背景[J]. 矿物岩石地球化学通报, 2008, 27(4): 384-390.
Zhu L M, Zhang G W, Li B, et al. Main geological events, genetic types of metallic deposits and their geodynamical setting in the Qinling Orogenic belt [J]. Bulletin of Mineralogy, Petrology and Geochemistry, 2008, 27(4): 384-390.
- [12] 陈衍景. 秦岭印支期构造背景、岩浆活动及成矿作用[J]. 中国地质, 2010, 37(4): 854-865.
Chen Y J. Indosinian tectonic setting, magmatism and metallogenesis

- in Qinling Orogen, central China[J]. *Geology in China*, 2010, 37(4): 854-865.
- [13] 刘家军, 郑明华, 刘建明, 等. 西秦岭大地构造演化与金成矿带的分布[J]. *大地构造与成矿学*, 1997, 21(4): 307-314.
Liu J J, Zheng M H, Liu J M, et al. Geotectonic evolution and mineralization zone of gold deposits in western Qinling[J]. *Geotectonica et Metallogenia*, 1997, 21(4): 307-314.
- [14] 成志雁, 刘开君, 余平辉, 等. 西秦岭金矿床成矿年代和成矿期次划分[J]. *黄金*, 2015, 36(10): 13-19.
Cheng Z Y, Liu K J, Yu P H, et al. Classification of metallogenic epochs and metallogenic periods of the gold deposits in Western Qinling Mountains[J]. *Gold*, 2015, 36(10): 13-19.
- [15] 陈衍景, 张静, 张复新, 等. 西秦岭地区卡林-类卡林型金矿床及其成矿时间、构造背景和模式[J]. *地质论评*, 2004, 50(2): 134-152.
Chen Y J, Zhang J, Zhang F X, et al. Carlin and Carlin-like gold deposits in western Qinling mountains and their metallogenic time, tectonic setting and model[J]. *Geological Review*, 2004, 50(2): 134-152.
- [16] 陈衍景, 翟明国, 蒋少涌. 华北大陆边缘造山过程与成矿研究的重要进展和问题[J]. *岩石学报*, 2009, 25(11): 2695-2726.
Chen Y J, Zhai M G, Jiang S Y. Significant achievements and open issues in study of orogenesis and metallogenesis surrounding the North China continent[J]. *Acta Petrologica Sinica*, 2009, 25(11): 2695-2726.
- [17] 闫全人, 王宗起, 闫臻, 等. 碧口群火山岩的时代—SHRIMP 锆石 U-Pb 测年结果[J]. *地质通报*, 2003, 22(6): 456-458.
Yan Q R, Wang Z Q, Yan Z, et al. Geochronology of the Bikou Group volcanic rocks: Newest results from SHRIMP zircon U-Pb dating[J]. *Geological Bulletin of China*, 2003, 22(6): 456-458.
- [18] 周振菊, 秦艳, 刘振林, 等. 西秦岭铍厂沟金矿床流体包裹体特征研究及矿床成因[J]. *岩石学报*, 2011, 27(5): 1311-1326.
Zhou Z J, Qin Y, Liu Z L, et al. Study of fluid inclusion characteristic and genetic type of the Huachanggou gold deposit, West Qinling Orogen[J]. *Acta Petrologica Sinica*, 2011, 27(5): 1311-1326.
- [19] 许寻会, 王海岗. 西秦岭铍厂沟地区金矿床成矿规律研究[J]. *西安科技大学学报*, 2014, 34(3): 331-336.
Xu X H, Wang H G. Research on metallogenic regularity in Huachanggou gold deposits of West Qinling Mountains[J]. *Journal of Xi'an University of Science and Technology*, 2014, 34(3): 331-336.
- [20] 白忠. 陕西铍厂沟金矿床成矿地质特征[J]. *西南工学院学报*, 1995, 10(2): 30-39.
Bai Z. Ore-forming geological character of Huachanggou gold deposit in Shanxi[J]. *Journal of Southwest Institute of Technology*, 1995, 10(2): 30-39.
- [21] 杨隆勃, 刘家军, 王建平, 等. 陕西铍厂沟金矿床成矿特征及物质来源研究[J]. *中国地质*, 2013, 40(4): 1218-1230.
Yang L B, Liu J J, Wang J P, et al. Metallogenic characteristics and ore-forming material sources of the Huachanggou gold deposit in Shaanxi Province[J]. *Geology in China*, 2013, 40(4): 1218-1230.
- [22] 李宏安, 郇瑜辉. 铍厂沟金矿地质特征及成因分析[J]. *有色金属(矿山部分)*, 2007, 59(3): 23-26.
Li H A, Tai Y H. Geological characteristics and genesis of gold deposits in Huachanggou mine [J]. *Nonferrous Metals (Mining Section)*, 2007, 59(3): 23-26.
- [23] 吴杰, 刘家军, 王建平, 等. 陕西铍厂沟金矿床中细碧岩的岩石学和元素地球化学特征研究[J]. *矿物岩石地球化学通报*, 2014, 33(4): 411-420.
Wu J, Liu J J, Wang J P, et al. Petrological and geochemical characteristics of the spilite in the Huachanggou gold deposit in the Shaanxi Province [J]. *Bulletin of Mineralogy, Petrology and Geochemistry*, 2014, 33(4): 411-420.
- [24] 魏钢锋, 姜修道, 刘永华, 等. 铍厂沟金矿床地质特征及控矿因素分析[J]. *矿床地质*, 2000, 19(2): 138-146.
Wei G F, Jiang X D, Liu Y H, et al. Geological characteristics and ore-controlling factors of the Huachanggou gold deposit[J]. *Mineral Deposits*, 2000, 19(2): 138-146.
- [25] 刘冲昊, 刘家军, 王建平, 等. 陕西省略阳县铍厂沟金矿北矿带地球化学原生晕特征及其地质意义[J]. *中国地质*, 2012, 39(5): 1397-1405.
Liu C H, Liu J J, Wang J P, et al. Primary halo characteristics of the north ore zone in the Huachanggou gold deposit, Lueyang County, Shaanxi Province [J]. *Geology in China*, 2012, 39(5): 1397-1405.
- [26] 杨隆勃, 刘家军, 王建平, 等. 陕西略阳铍厂沟金矿床金的赋存状态研究[J]. *现代地质*, 2013, 27(2): 303-313.
Yang L B, Liu J J, Wang J P, et al. Study of occurrence of native gold in the Huachanggou gold deposit, Shaanxi Province, China[J]. *Geoscience*, 2013, 27(2): 303-313.
- [27] 王立新, 贾磊, 吴杰, 等. 陕西铍厂沟金矿床地质特征及成矿规律[J]. *黄金科学技术*, 2013, 21(6): 11-21.
Wang L X, Jia L, Wu J, et al. Geological characteristics and metallogenic regularity of Huachanggou gold deposit, Shaanxi Province [J]. *Gold Science and Technology*, 2013, 21(6): 11-21.
- [28] 宗静婷. 陕西略阳铍厂沟金矿床地质与矿床类型[J]. *西北地质*, 2004, 37(1): 97-101.
Zong J T. Features of Huachanggou gold deposit and its type in Lueyang County, Shaanxi[J]. *Northwestern Geology*, 2004, 37(1): 97-101.

(下转第 98 页/Continued on Page 98)

- 大学, 2007.
- Yan D W. Research on knowledge service oriented intelligent recommendation system[D]. Nanjing: Nanjing University of Science and Technology, 2007.
- [25]张红岩. 我国图书情报领域本体研究可视化分析[J]. 图书馆学研究, 2012(6): 7-12.
- Zhang H Y. Visualization analysis about ontology research in the field of library and information science in China[J]. Researches in Library Science, 2012(6): 7-12.
- [26]Zhu Y Q, Zhou W W, Xu Y, et al. Intelligent learning for knowledge graph towards geological data [J]. Scientific Programming, 2017, 2017: 5072427.
- [27]朱月琴, 谭永杰, 张建通, 等. 基于 Hadoop 的地质大数据融合与挖掘技术框架[J]. 测绘学报, 2015, 44(S1): 152-159.
- Zhu Y Q, Tan Y J, Zhang J T, et al. A framework of Hadoop based geology big data fusion and mining technologies[J]. Acta Geodaetica et Cartographica Sinica, 2015, 44(S1): 152-159.
- [28]Wei D Q, Zhu Y Q. Management of unstructured geological data based on Hadoop [C]//2015 IEEE 12th Intl Conf on Ubiquitous Intelligence and Computing and 2015 IEEE 12th Intl Conf on Autonomic and Trusted Computing and 2015 IEEE 15th Intl Conf on Scalable Computing and Communications and Its Associated Workshops (UIC-ATC-ScalCom). Beijing, China: IEEE, 2015: 432-435.
- [29]李婧, 陈建平, 王翔. 地质大数据存储技术[J]. 地质通报, 2015, 34(8): 1589-1594.
- Li J, Chen J P, Wang X. A study of the storage technology of geological big data[J]. Geological Bulletin of China, 2015, 34(8): 1589-1594.
- [30]Zhu Y Q, Tan Y J, Li R X, et al. Cyber-physical-social-thinking modeling and computing for geological information service system[J]. International Journal of Distributed Sensor Networks, 2016, 12(11): 1-9.
- [31]姚健鹏, 郭艳军, 潘懋, 等. 铜矿床领域本体的构建方法研究[J]. 中国矿业, 2017, 26(8): 140-145, 153.
- Yao J P, Guo Y J, Pan M, et al. Study on the method of constructing copper deposits domain ontology[J]. China Mining Magazine, 2017, 26(8): 140-145, 153.
- [32]Luo X, Deng J, Wang W P, et al. A quantized kernel learning algorithm using a minimum kernel risk-sensitive loss criterion and bilateral gradient technique[J]. Entropy, 2017, 19(7): 365.
- [33]Luo X, Liu J, Zhang D D, et al. An entropy-based kernel learning scheme toward efficient data prediction in cloud-assisted network environments[J]. Entropy, 2016, 18(7): 274.
- [34]孙凯, 诸云强, 潘鹏, 等. 形态本体及其在地理空间数据发现中的应用研究[J]. 地球信息科学学报, 2016, 18(8): 1011-1021.
- Sun K, Zhu Y Q, Pan P, et al. Research on morphology-ontology and its application in geospatial data discovery [J]. Journal of Geoinformation Science, 2016, 18(8): 1011-1021.

(上接第 36 页/Continued from Page 36)

- [29]陈新跃. 铍厂沟金矿床构造特征及其对金矿的控制作用[D]. 西安: 长安大学, 2003: 1-66.
- Chen X Y. Tectonic characteristics of Huachanggou gold deposit and its control of gold deposit[D]. Xi'an: Chang'an University, 2003: 1-66.
- [30]张彦艳, 王建新, 赵志, 等. R 型聚类分析在成矿阶段划分中的应用: 以桦甸大庙子-菜枪子金矿区为例[J]. 世界地质, 2006, 25(1): 29-33, 38.
- Zhang Y Y, Wang J X, Zhao Z, et al. Application of R-type clustering analyses in subdivision of mineral stages: An example from gold ore area in Damiaozhi-Caiqiangzi of Huadian[J]. Global Geology, 2006, 25(1): 29-33, 38.
- [31]董庆吉, 陈建平, 唐宇. R 型因子分析在矿床成矿预测中的应用——以山东黄埠岭金矿为例[J]. 地质与勘探, 2008, 44(4): 64-68.
- Dong Q J, Chen J P, Tang Y. Application of R type factor analyses in mineralization prognosis: By an example of Huangbuling gold deposit, Shandong Province[J]. Geology and Prospecting, 2008, 44(4): 64-68.
- [32]刘晓玲, 陈建平. R 型因子分析在青海省治多杂多地区成矿预测中的应用[J]. 物探化探计算技术, 2010, 32(3): 332-336.
- Liu X L, Chen J P. A case study of R-factor analysis for metallogenic prognosis applied to Zhiduo-Zaduo area of Qinghai Province [J]. Computing Techniques for Geophysical and Geochemical Exploration, 2010, 32(3): 332-336.
- [33]邢利琦, 刘炳璋. 矿床原生地球化学晕分带性研究[J]. 四川地质学报, 2011, 31(4): 489-492, 495.
- Xing L Q, Liu B Z. Study of zonation of primary halo of hydrothermal deposits[J]. Acta Geologica Sichuan, 2011, 31(4): 489-492, 495.
- [34]陈永清, 韩学林, 赵红娟, 等. 内蒙敖包特 Pb-Zn-Ag 多金属矿床原生晕分带特征与深部矿体预测模型[J]. 地球科学——中国地质大学学报, 2010, 36(2): 236-246.
- Chen Y Q, Han X L, Zhao H J, et al. Characteristics of primary halo zonation and prediction pattern of deep orebody of the Huaobaote Pb-Zn-Ag polymetallic deposit, inner Mongolia [J]. Earth Science—Journal of China University of Geosciences, 2010, 36(2): 236-246.