

doi: 10.12029/gc20160519

周向科, 王建国, 刘荫椿, 等. 云南冬瓜林金矿床原生叠加晕特征与深部找矿[J]. 中国地质, 2016, 43(5): 1710-1720.

Zhou Xiangke, Wang Jianguo, Liu Yinchun, et al. Primary superimposed halo features and deep ore-prospecting in the Donggualin gold deposit, Yunnan Province[J]. Geology in China, 2016, 43(5): 1710-1720(in Chinese with English abstract).

云南冬瓜林金矿床原生叠加晕特征与深部找矿

周向科^{1,2} 王建国¹ 刘荫椿³ 雷恒永⁴ 李光景³

(1. 中国地质大学(北京) 地球科学与资源学院, 北京 100083; 2. 中国地质博物馆, 北京 100034;
3. 中国黄金集团公司科技公司, 北京 100176; 4. 云南黄金有限责任公司镇沅分公司, 云南 镇沅 666511)

摘要: 冬瓜林金矿床位于哀牢山金矿带的镇沅金矿田。文章在野外地质工作的基础上, 运用多元统计的方法, 求得微量元素找矿标志; 并根据地球化学各参数信息, 计算出元素轴向分带序列, 建立原生叠加晕理想模型, 构建深部矿体预测指标, 明确下一步的找矿方向。研究表明: (1) 该矿床的成矿元素 Au 与元素 Ni、Co、Cu、Mn、Sb、Sn 关系密切, 原生晕轴向分带序列从上到下为 As-Bi-Mn-Pb-Sb-B-Sn-Cu-Co-Hg-Ni-Zn-Au-Ag-Mo; (2) 矿体中前缘晕、尾晕共存现象明显, 预示着矿体向下还有很大的延伸, 深部找矿应在矿体的北东方向进行; (3) 评价指标 $(B \times As \times Hg \times Sb)_D / (Mn \times Ni \times Co \times Sn)_D$, 是有效的预测深部矿体资源潜力指标。

关键词: 原生晕分带; 深部找矿; 冬瓜林金矿床; 云南

中图分类号: P632⁺.2; P618.51 文献标志码: A 文章编号: 1000-3657(2016)05-1710-11

Primary superimposed halo features and deep ore-prospecting in the Donggualin gold deposit, Yunnan Province

ZHOU Xiang-ke^{1,2}, WANG Jian-Guo¹, LIU Yin-chun³, LEI Heng-yong⁴, LI Guang-jing³

(1. School of Earth Sciences and Resources, China University of Geosciences, Beijing 100083, China; 2. Geological Museum of China, Beijing 100034, China; 3. China Gold Science and Technology Co., Ltd., Beijing 100176, China; 4. Zhenyuan Company of Yunnan Gold Co., Ltd., Zhenyuan 666511, Yunnan, China)

Abstract: The Donggualin gold deposit is located in the Zhenyuan gold orefield of the Ailaoshan gold ore belt. Based on field investigation, the authors figured out the prospecting criteria of trace elements by multivariate statistical methods and, in combination with geochemical parameters information, counted out the axial zonation of the ore deposit, built the ideal zoning model of the primary superimposed halos, constructed criteria for evaluating the ore potential in depth and clearly indicated the orientation in search for deep orebodies. Some conclusions have been reached: (1) The ore-forming element Au is close to elements Ni, Co, Cu, Mn, Sb, Sn, and the axial zonation of the ore deposit from top to bottom is As-Bi-Mn-Pb-Sb-B-Sn-Cu-Co-Hg-Ni-Zn-Au-Ag-Mo. (2) The front halo elements and the rear halo elements are existent together, suggesting that the orebodies extend in the deeper place; furthermore, deep ore prospecting should be carried out in the NE direction of the ore bodies. (3) Indexes

收稿日期: 2016-06-12; 改回日期: 2016-07-13

基金项目: 国土资源部科技专项“地质遗迹标本采集、购置与综合研究”项目(12111300000160034)资助。

作者简介: 周向科, 男, 1982年生, 博士生, 主要从事矿床学研究; E-mail: zhouxk5@163.com。

such as $(B \times As \times Hg \times Sb)_D / (Mn \times Ni \times Co \times Sn)_D$ can be used to predict the ore potentials in the deep portions of the orebodies.

Key words: zonation of primary halos; deep ore prospecting; Donggualin gold deposit; Yunnan

About the first author: ZHOU Xiang-ke, male, born in 1982, doctoral candidate, engages in the study of ore deposit geology; E-mail: zhouxk5@163.com.

Fund support: Supported by Ministry of Land and Resources of PRC Program: Collection, Purchase and Comprehensive Research of the Geological Remains Specimens (No. 12111300000160034).

早在20世纪50年代末,谢学锦等^[1]就发现了热液矿床的原生晕具有明显轴(垂)向分带,建立了利用原生晕进行深部盲矿预测、寻找的理论基础^[2-3]。60年代起,原生晕分带规律作为预测深部盲矿的有效手段,在国内受到全面的推广和发展^[4-7]。70—80年代,分带指数法提出,广泛应用于计算原生晕分带序列。90年代至今,利用原生晕方法寻找盲矿得到不断的丰富并取得巨大的成功^[3],特别是找矿地球化学标志、分带序列和分带模型的建立,对深部盲矿的预测与寻找起到了积极的作用^[8-11]。

冬瓜林金矿床地处云南哀牢山金矿带,平均金品位超过5 g/t^[12],为大型金矿床^[13],与老王寨、搭桥箐、浪泥塘和库独木矿床共同构成镇沅金矿田,矿田储量已达100 t^[14]。该矿床自20世纪80年代发现以来,得到广泛的关注,也有一些化探分析数据^[13],也进行过部分数据分析^[12],但对于该矿床的原生晕特征和深部找矿探索的系统研究尚未进行。本文在野外地质调查基础上,对该矿床进行了系统采样和岩石地球化学分析,研究找矿地球化学标志、原生晕分带特征和深部矿体预测指标,为指导找矿与深部预测提供科学依据。

1 区域地质

冬瓜林金矿床位于哀牢山金矿带北段^[15-16],区域上主要有阿墨江断裂、九甲—安定断裂、哀牢山断裂和红河断裂等北西向的断裂,其中红河断裂是哀牢山金成矿带东界,西界是九甲—安定断裂^[15,17]。

出露地层主要为夹持于红河、哀牢山断裂间的元古宇深变质岩系(哀牢山岩群)和哀牢山、阿墨江断裂间的古生界浅变质岩系(马邓岩群),共同组成“双变质带”^[18-19]。哀牢山岩群变质程度达高绿片岩和低角闪岩相,主要由片麻岩、变粒岩、角闪岩、大理岩和片岩组成。马邓岩群为一套低绿片岩相变质岩系,主要岩性为砂岩、板岩、泥页岩、变质砂板岩、绢云板岩^[20-21]。

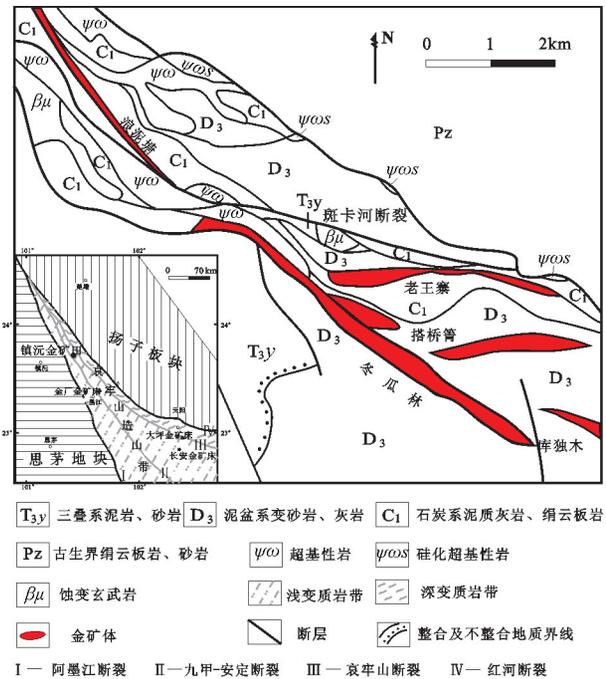


图1 镇沅金矿田地质图(据文献[21-22]修改)

Fig.1 Sketch geological map of the Zhenyuan gold orefield (modified after references [21-22])

区内岩浆岩沿构造线分布,活动频繁,种类多样,发育有加里东期或前加里东期的超基性岩,海西期的基性侵入岩和喷出岩,印支期的中酸性侵入岩,燕山晚期的中酸性岩脉和喜马拉雅期的煌斑岩类岩脉^[23]。

2 矿床地质

冬瓜林金矿床的产出严格受到北西向哀牢山断裂、九甲—安定断裂和阿墨江断裂及其上盘的次级断裂夹持控制,总体上呈北西—南东向展布^[17]。矿区构造以北西向为主导,派生近东西向的共轭构造,形成菱形网格状构造带^[13]。

矿床产出在哀牢山低级变质带中,主要出露地层主要有:泥盆系上统下段(D₃¹)的变石英杂砂岩夹

砂质绢云板岩等;泥盆系上统上段(D₃²)的硅质绢云板岩、含炭泥质灰岩夹炭质钙质板岩和变石英杂砂岩^[13];石炭系下统下段(C₁¹)的薄层炭质泥质灰岩、粉砂—细砂灰岩和生物碎屑灰岩,常夹变石英杂砂岩,有大量煌斑岩及花岗斑岩岩脉贯入;石炭系下统上段(C₁²)的含砂质绢云硅质板岩、硅质绢云板岩,三叠系上统下段(T₃y)的红色碎屑岩系^[13,15,24]。

岩浆岩以煌斑岩及花岗斑岩类为主,也有基性—超基性岩,多沿断裂带分布^[13,25]。矿床的煌斑岩大都经过热液蚀变或矿化,可单独形成矿体,也可与花岗斑岩等围岩构成矿体。这两类岩带是对比联接矿体的主要依据,且产状与矿体一致。矿石类型也以煌斑岩型为主,约占矿床金属总储量的50%,另有花岗斑岩型、变石英杂砂岩型和绢云硅质板岩型等^[23,26]。矿石呈自形晶—半自形粒状晶结构、增生环带结构、碎斑状压碎结构,浸染状、细脉状、网脉状、条带状构造^[13]。

该矿床的热液成矿活动可分为以下4个阶段:①早期硅化阶段,②绢云母碳酸盐硫化物阶段,③多金属硫化物碳酸盐化阶段,④辉锑矿化硅化阶段;金成矿主要在第②、③阶段^[27]。

矿床主要矿化带长8.4 km,宽100~500 m,主要赋存在D₃²层位中,受控于断裂F16、F17和F18,金矿体大体分出SI、SII和SIII三个矿体群,以SII矿体群规模最大,SIII矿体群次之。SII矿体群中SII2矿体最大,SIII矿体群中SIII2矿体最大。

3 原生晕特征分析

工作位置为该金矿床西露天采场40线(图2),地表仅出露SIII2矿体。地球化学样品采自40线剖面的SII2、SIII2矿体及附近,垂向分布在1723 m~1713 m~1703 m三个中段,每个中段约8 m采一个样品,共计33件。每件样品选取Au、Ag、As等15种元素进行定量分析,测试工作由河北省地矿局廊坊实验室完成,其中,Au采用无火焰原子吸收光谱法(AAN),As、Hg采用原子荧光光谱法(AFS),Sn、B采用发射光谱法(ES),Ag、Bi、Co、Cu、Mn、Mo、Ni、Pb、Sb和Zn采用等离子体质谱法(ICP-MS)。

3.1 成矿及伴生元素组合特征

元素组合体现其在地质体内的亲性和^[28],研究与成矿元素有关的元素组合特征,对指导找矿有重要意义,而研究成矿元素与伴生金属元素之间的亲

疏关系,可用于建立找矿预测的地球化学标志^[29]。

3.1.1 相关分析

相关分析是研究两个(组)变量之间相关关系的一种统计方法。在矿床学中,可用该方法研究主成矿元素(比如Au)的成因特点等,考察Au(与Au有关的元素)和其他化学元素之间的相关性^[30-31]。

本文用SPSS软件进行相关分析,从结果(表1)可以看出,Au与Ni呈显著性正相关关系,与Co、Cu、Mn、Sb和Sn有较高的相关性,与Hg、Zn存在负相关关系。另外,Ni与Co的相关系数达到了0.818,他们与Cu的相关系数也大于0.6,属于密切相关。其中,Au和Ni关系最为密切,相关性达到0.631,表明Ni很可能是Au矿化良好的指示剂。

3.1.2 聚类分析

聚类分析又称群分析,它是研究对样品或指标(变量)分类问题的一种多元统计方法。根据他们的共同属性或亲疏关系,利用一定的划分依据,关系密切的样品或指标(变量)聚合为一个小小的分类单位,区分出不同的类型,再进行地质解释^[30-32]。

R型聚类分析可以了解Au和哪些元素共生组合在一起,和哪些元素伴生或相关,和哪些元素的形成有关,关系密切的元素有什么找矿标志等问题^[30-32]。本文用STATISTICA数据分析软件对数据进行了R型分析(图3)。

由图3可知,相似度在0.4附近,元素划分为4

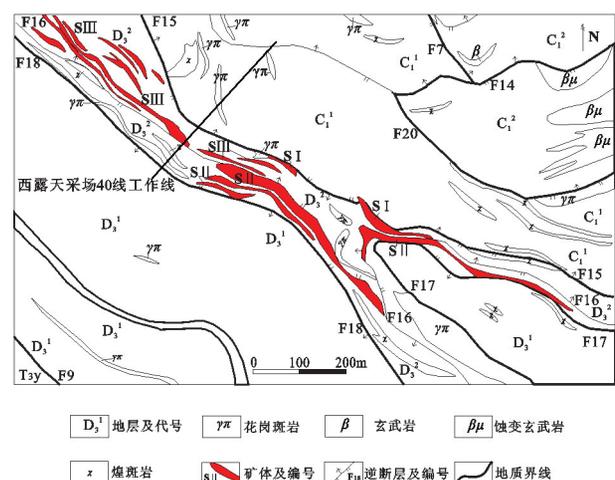


图2 冬瓜林金矿床地质简图(据文献[13]修改)
Fig.2 Sketch geological map of the Donggualin gold deposit
(modified after reference [13])

表1 冬瓜林金矿床微量元素相关系数矩阵
Table 1 Correlation coefficient matrix of trace elements of the Donggualin gold deposit

| | Au | Ag | As | B | Bi | Co | Cu | Hg | Mn | Mo | Ni | Pb | Sb | Sn | Zn |
|----|--------|--------|--------|--------|--------|--------|-------|-------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|-------|
| Au | 1.000 | | | | | | | | | | | | | | |
| Ag | -0.098 | 1.000 | | | | | | | | | | | | | |
| As | 0.113 | -0.195 | 1.000 | | | | | | | | | | | | |
| B | 0.042 | 0.080 | -0.009 | 1.000 | | | | | | | | | | | |
| Bi | 0.112 | 0.255 | -0.032 | 0.498 | 1.000 | | | | | | | | | | |
| Co | 0.367 | -0.231 | -0.117 | 0.023 | -0.036 | 1.000 | | | | | | | | | |
| Cu | 0.219 | 0.176 | -0.147 | -0.079 | 0.275 | 0.716 | 1.000 | | | | | | | | |
| Hg | -0.138 | 0.367 | -0.162 | -0.235 | -0.168 | 0.251 | 0.418 | 1.000 | | | | | | | |
| Mn | 0.238 | -0.287 | -0.001 | -0.195 | -0.038 | 0.492 | 0.495 | 0.048 | 1.000 | | | | | | |
| Mo | -0.087 | 0.508 | -0.183 | -0.064 | -0.035 | -0.243 | 0.063 | 0.378 | -0.270 | 1.000 | | | | | |
| Ni | 0.631 | -0.043 | -0.152 | -0.046 | -0.165 | 0.818 | 0.664 | 0.278 | 0.315 | 0.022 | 1.000 | | | | |
| Pb | 0.002 | 0.003 | 0.241 | 0.131 | 0.205 | 0.205 | 0.349 | 0.128 | 0.368 | -0.129 | 0.086 | 1.000 | | | |
| Sb | 0.238 | -0.254 | 0.075 | 0.021 | 0.109 | 0.465 | 0.374 | 0.230 | 0.386 | -0.188 | 0.344 | 0.397 | 1.000 | | |
| Sn | 0.162 | -0.076 | -0.023 | 0.192 | 0.192 | 0.630 | 0.430 | 0.116 | 0.184 | -0.360 | 0.410 | 0.036 | 0.453 | 1.000 | |
| Zn | -0.107 | 0.518 | -0.118 | -0.071 | -0.056 | -0.203 | 0.050 | 0.695 | -0.152 | 0.614 | -0.049 | -0.001 | -0.159 | -0.145 | 1.000 |

个组合:①Au、Co、Ni、Cu、Sn、Mn、Sb、Ag、Hg、Zn和Mo;②Pb;③B、Bi;④As。相似度在0.6时,Au、Co、Ni、Cu和Sn为1个组合,Hg、Zn和Mo为1个组合,其他元素的组合不明显。Au与Co、Ni和Cu的相似水平大于0.6,有密切关系;Co、Ni和Cu之间的关系也很亲密,其中Co和Ni的关系最为密切。

3.1.3 因子分析

R型因子分析又称为主成分分析^[30]。在地质学中,运用该方法可以从错综复杂的地质数据中排除冗余的地质信息,找出少数几个主要因子,把能够反映出主要成矿特征的地球化学元素组合类型信息准确的提炼出来^[33]。对该矿床的样品用SPSS软件作了R型因子分析,采用主成分分析法,提取了5个主因子,并进行了极大方差正交旋转(表2)。

因子分析表明,由因子载荷矩阵给出5个主因子,F1:Co、Cu、Mn、Ni、Sb和Sn、(Au);F2:Ag、Hg、Mo和Zn;F3:B、Bi;F4:Pb;F5:Au、As。

方差极大正交旋转后给出5个主因子F1:Co、Cu、Mn、Ni、Sb和Sn;F2:Ag、Hg、Mo和Zn;F3:B、Bi;F4:Au、(Ni);F5:Pb、As。正交旋转后5个因子的特征值累积百分数分别为F1:24.259%;F2:42.606%;F3:54.633%;F4:64.466%;F5:74.125%。前5个主因子的累计方差贡献率达到了74.125%,

可以认为包含了原始变量的绝大部分信息。起主导作用的F1因子元素组合与因子载荷矩阵一致,并和聚类分析、相关性分析结果基本吻合。

3.2 原生晕的轴向分带序列

原生晕的分带性是其重要特点之一^[34],以轴向分带规律和横向分带规律最具有找矿指导意义,而核心是轴向分带规律^[35]。研究原生晕的轴向分带序列对于判定矿体的剥蚀程度及深部盲矿体的追踪有着极其重要的意义^[7]。

目前国内国内应用最广泛的计算方法是Grigorian分带指数法^[34],采取标准化(表3)—求分带指数(表3)—求变异性指数或梯度差(表4)—排分带序列(表4)的顺序进行分析计算^[7,36],得出冬瓜林金矿床40线最终的轴向分带序列自上而下为:As—Bi—Mn—Pb—Sb—B—Sn—Cu—Co—Hg—Ni—Zn—Au—Ag—Mo。

3.3 微量元素浓度分带

原生晕最基本的表现是具有浓度分带,目前应用较多的是把在矿床空间分布的某一元素原生晕划分为三个浓度带(外带、中带、内带)。元素浓度分带首先要确定其异常下限。本次研究按照“求各元素平均值和标准离差—平均值加减2倍标准离差剔除特高、低异常值—求剩余元素平均值和标准离差—剩余元素平均值加上其2倍标准离差”得出异常

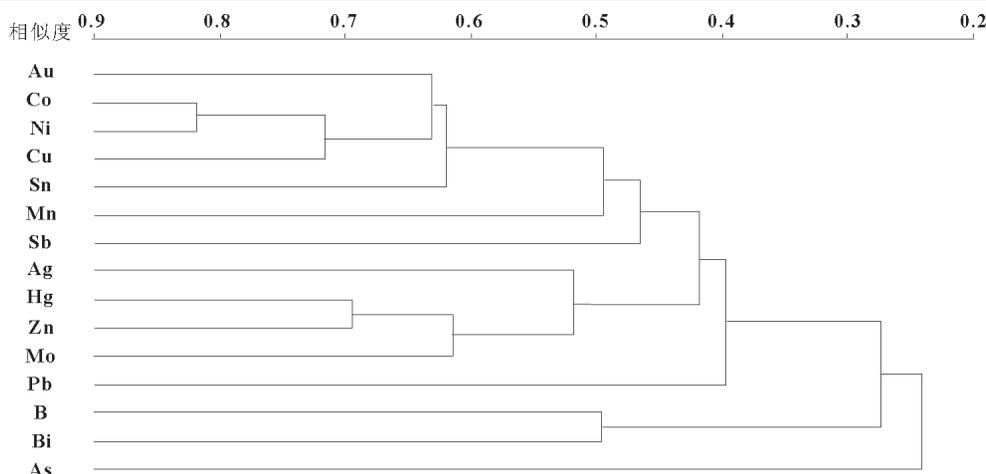


图3 冬瓜林金矿床微量元素R型聚类分析谱系图

Fig.3 R type cluster hierarchical diagram of the indication elements in the Donggualin gold deposit

表2 冬瓜林矿床R型因子分析旋转因子载荷矩阵
Table 2 Factor loading of R type factor analysis with orthogonal rotation in the Donggualin gold deposit

| 元素 | F1 | F2 | F3 | F4 | F5 |
|---------|--------|--------|--------|--------|--------|
| Au | 0.192 | -0.087 | 0.070 | 0.910 | 0.100 |
| Ag | -0.100 | 0.758 | 0.323 | -0.024 | -0.128 |
| As | -0.221 | -0.196 | -0.031 | 0.168 | 0.688 |
| B | -0.025 | -0.091 | 0.811 | 0.036 | -0.040 |
| Bi | 0.090 | 0.057 | 0.867 | -0.018 | 0.131 |
| Co | 0.878 | -0.139 | -0.060 | 0.291 | -0.099 |
| Cu | 0.818 | 0.274 | 0.095 | 0.165 | 0.079 |
| Hg | 0.434 | 0.726 | -0.273 | -0.195 | -0.009 |
| Mn | 0.581 | -0.188 | -0.242 | 0.068 | 0.369 |
| Mo | -0.229 | 0.799 | -0.055 | 0.130 | -0.095 |
| Ni | 0.678 | 0.090 | -0.144 | 0.644 | -0.153 |
| Pb | 0.359 | 0.078 | 0.177 | -0.151 | 0.764 |
| Sb | 0.656 | -0.135 | 0.032 | -0.012 | 0.334 |
| Sn | 0.703 | -0.219 | 0.273 | -0.016 | -0.225 |
| Zn | -0.065 | 0.862 | -0.095 | -0.092 | 0.007 |
| 特征值 | 3.639 | 2.752 | 1.804 | 1.475 | 1.449 |
| 方差贡献% | 24.259 | 18.347 | 12.027 | 9.833 | 9.659 |
| 累计方差贡献% | 24.259 | 42.606 | 54.633 | 64.466 | 74.125 |

下限(Ca),以2倍、4倍的异常下限圈出原生晕的中带(2Ca)、内带(4Ca)^[7,29,37](表5)。

根据以上参数,绘制该矿床40勘探线成矿成晕元素浓度分带图(图4),纵坐标为高程(单位:m),横

坐标为水平距离(单位:m),由浅变深的3种颜色表示元素的3个浓度分带(单位:10⁻⁶),低于异常下限(Ca)的元素异常未标出。由该图可知,元素原生晕具有以下特征:(1)元素Au结构完整,有清晰的内带、中带和外带,其浓度分带与剖面图矿体分布非常吻合;(2)元素的浓度分带大体与矿体的分布一致,其中Zn、Ag和Mo向下有较强的浓度分带,可能预示下面有新的矿体存在;(3)部分元素的内带不明显或异常结构松散,可能是采样时受矿区工作程度限制,采样点未触及矿体的中心位置。

4 讨 论

4.1 微量元素找矿标志

地球化学多元统计结果显示:元素Ni、Co、Cu、Mn、Sb、Sn和Au的关系密切,基本符合李惠等(2010)^[6]提出的最佳指示元素组合,可以认为他们是主要的成矿元素和伴生元素组合。其中,元素Au和Ni、Co、Cu的关系最为密切,与Mn、Sb、Sn的关系较为密切。

元素Ni、Co和Cu原子序数邻近,和Fe相近,均有较强的亲硫性,也有很好的亲铁性^[38]。他们不仅容易形成硫化物,且易在黄铁矿中出现,而黄铁矿是金矿床重要的载金矿物,这也能很好的解释其与元素Au亲近的原因。冬瓜林金矿床的两个主成矿阶段都出现了很多的硫化物,在事实上也能印证其

表3 冬瓜林矿床标准化线金属量与分带指数
Table 3 Standardized linear metal quantity and zoning indexes of the Donggualin gold deposit

| 中段/m | 标准化线金属量 | | | 分带指数 <i>D</i> | | |
|--------------------------------|---------|---------|---------|---------------|----------|----------|
| | 1723 | 1713 | 1703 | 1723 | 1713 | 1703 |
| Au | 94.7 | 27.6 | 162.6 | 0.022895 | 0.005793 | 0.02961 |
| Ag | 123.59 | 190.75 | 656.88 | 0.02988 | 0.040036 | 0.119618 |
| As | 536.1 | 298.43 | 110.56 | 0.129611 | 0.062637 | 0.020133 |
| B | 170.26 | 117.45 | 207.05 | 0.041163 | 0.024651 | 0.037704 |
| Bi | 290 | 140 | 250 | 0.070112 | 0.029384 | 0.045525 |
| Co | 128.6 | 154.9 | 143.4 | 0.031091 | 0.032512 | 0.026113 |
| Cu | 288 | 286.3 | 331.4 | 0.069629 | 0.060091 | 0.060348 |
| Hg | 445.87 | 930.42 | 836.94 | 0.107797 | 0.195285 | 0.152407 |
| Mn | 660.54 | 581.46 | 425.11 | 0.159697 | 0.122042 | 0.077413 |
| Mo | 103 | 477 | 767 | 0.024902 | 0.100117 | 0.139671 |
| Ni | 363 | 560 | 712 | 0.087762 | 0.117538 | 0.129656 |
| Pb | 241.3 | 173.3 | 181.3 | 0.058338 | 0.036374 | 0.033015 |
| Sb | 448 | 507.8 | 283 | 0.108312 | 0.106581 | 0.051534 |
| Sn | 177 | 192 | 178 | 0.042793 | 0.040299 | 0.032414 |
| Zn | 66.25 | 127.02 | 246.23 | 0.016017 | 0.02666 | 0.044839 |
| Σ | 4136.21 | 4764.43 | 5491.47 | | | |
| (B×As×Hg×Sb)/ (Mn×Ni×Co×Sn) | 3.34 | 1.71 | 0.70 | | | |

关系。同理, Mn 和 Sn 也具有一定的亲硫性; Mn 的原子序数和 Fe 邻近, 二者同属铁族元素^[38], 而 Fe 是形成黄铁矿不可缺少的元素; Sb 和 Sn 原子序数邻

近, 而该矿床成矿后期出现了较多的辉锑矿; 这些也能从侧面说明其与成矿元素 Au 的亲近关系。

因此, 根据以上统计结果, 结合矿床实际情况, 元素 Ni、Co、Cu 的异常可作为良好的找矿指示标志; 元素 Mn、Sb、Sn 的异常可作为找矿的参考标志。

4.2 矿体原生晕叠加模型

李惠等^[6,39]研究了大量的金矿床, 总结出中国金矿床原生晕综合轴向分带序列, 从上→下是 B-I-As-Hg-F-Sb-Ba(前缘晕)→Pb-Ag-Au-Zn-Cu(近矿晕)→W-Bi-Mo-Mn-Ni-Cd-Co-Sn-V-Ti(尾晕)。

冬瓜林金矿床与之相比并不正常, 且有较大的差异, 可能是由于多期成矿叠加造成的。将该矿床的轴向分带序列, 参照上述总结的中国金矿床分带序列进行分类归位, 得到原生晕元素在各个中段的分布(表6)。

1723 m 和 1703 m 中段各有 1 个近矿晕(表6), 代表着该矿床的 2 个矿体。在 1723 m 中段, 分布近矿晕和尾晕, 指示其上部分别有前缘晕和前缘晕+近矿晕, 但已被开采。

根据该矿床原生晕元素在各中段的分布、地球化学多元统计结果、原生晕轴向分带序列、深部矿体预测指标, 并结合其成矿阶段划分及野外实地考察, 建立了冬瓜林金矿床(体)的原生叠加晕理想模型(图5)。

该模型与李惠等^[6,39]认为的串珠状金矿体原生叠加晕理想模型相似, 上部矿体的尾晕与下部矿体

表4 原生晕轴向分带序列分解
Table 4 Primary halo axial/vertical zoning sequences in the Donggualin gold deposit

| 中段 | 元素 | As | B | Bi | Cu | Mn | Pb | Sb | Sn | |
|--------------|---|------------------------|----------|----------|----------|----------|----------|----------|----------|--|
| 1723 m 中段 | 变异性指数 <i>G</i> | 8.50699 | 2.761564 | 3.926126 | 2.312511 | 3.371469 | 3.370899 | 3.117967 | 2.382091 | |
| | 排序 | As—Bi—Mn—Pb—Sb—B—Sn—Cu | | | | | | | | |
| | 元素 | Co | | | | Hg | | | | |
| 1713 m 中段 | 变异性梯度差 ΔG | -0.19934 | | | | | | 0.53026 | | |
| | 排序 | Co—Hg | | | | | | | | |
| | 元素 | Au | Ag | | Mo | | Ni | | Zn | |
| 1703 m 中段 | 变异性指数 <i>G</i> | 6.404585 | 6.991034 | | 7.003908 | | 2.580462 | | 4.481292 | |
| | 排序 | Ni—Zn—Au—Ag—Mo | | | | | | | | |
| | 1723 m—1713 m—1703 m 剖面的轴向分带序列: As—Bi—Mn—Pb—Sb—B—Sn—Cu—Co—Hg—Ni—Zn—Au—Ag—Mo | | | | | | | | | |

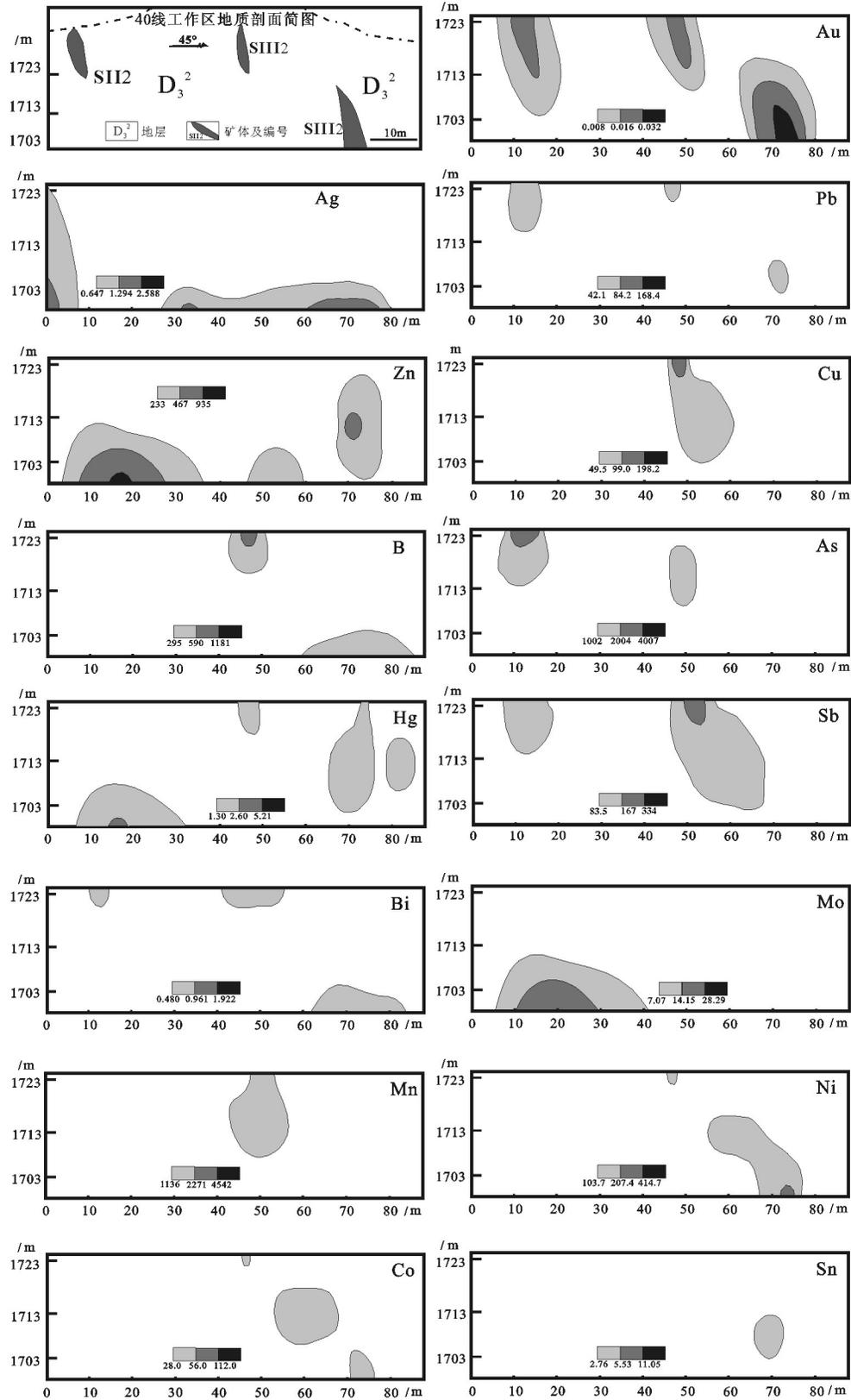


图4 40勘探线成矿晕元素浓度(10⁻⁶)分带图

Fig.4 Zonation map of primary geochemical haloes along No. 40 geological section(10⁻⁶)

表5 元素浓度分带参数(10⁻⁶)
Table 5 Zoning parameters of elements (10⁻⁶)

| 元素 | Au | Ag | As | B | Bi | Co | Cu | Hg | Mn | Mo | Ni | Pb | Sb | Sn | Zn |
|------|----------|--------|----------|----------|--------|----------|---------|---------|---------|--------|----------|----------|----------|----------|----------|
| 平均值 | 0.002943 | 0.1993 | 199.2574 | 145.8987 | 0.233 | 12.19949 | 27.221 | 0.45787 | 537.18 | 1.9865 | 43.10582 | 19.16383 | 35.6505 | 1.763521 | 78.52964 |
| 标准离差 | 0.002645 | 0.2239 | 401.3016 | 74.68413 | 0.1237 | 7.902256 | 11.164 | 0.42338 | 299.22 | 2.5435 | 30.28452 | 11.47517 | 23.9219 | 0.499513 | 77.70409 |
| Ca | 0.008233 | 0.6471 | 1001.861 | 295.267 | 0.4804 | 28.004 | 49.549 | 1.30463 | 1135.62 | 7.0735 | 103.6749 | 42.11416 | 83.4943 | 2.762547 | 233.9378 |
| 2Ca | 0.016465 | 1.2942 | 2003.721 | 590.534 | 0.9608 | 56.008 | 99.098 | 2.60926 | 2271.24 | 14.147 | 207.3497 | 84.22833 | 166.9886 | 5.525095 | 467.8756 |
| 4Ca | 0.032931 | 2.5884 | 4007.442 | 1181.068 | 1.9216 | 112.016 | 198.196 | 5.21852 | 4542.48 | 28.294 | 414.6994 | 168.4567 | 333.9772 | 11.05019 | 935.7513 |

表6 原生晕元素在冬瓜林金矿床各中段的分布
Table 6 Primary halo elements at different levels in the Donggualin gold deposit

| 中段 | 前缘晕 | 近矿晕 | 尾晕 |
|--------|---------|----------|----------|
| 1723 m | As、Sb、B | Pb、Cu | Bi、Mn、Sn |
| 1713 m | Hg | | Co |
| 1703 m | | Zn、Au、Ag | Ni、Mo |

的前缘晕叠加在一起,而上部矿体的前缘晕与下部矿体的尾晕基本没有叠加。由于样品采集时矿区开采程度有限,取样深度受到限制;1703 m中段虽没出现前缘晕,但其下部仍有可能出现前缘晕元素及矿体。

1723 m、1713 m中段均有前缘晕和尾晕(表6,

图5),既有较强的As、Sb、B、Hg等前缘晕元素的强异常,又有Bi、Mn、Sn、Co等尾晕元素的强异常;二者的共存增加了矿体前缘晕和尾晕的长度和强度,导致了前缘晕和尾晕重叠或共存部分的加大^[39]。同时,采样位置为40线的SII2和SIII2矿体,根据李惠等(1998)^[39]的“前、尾晕共存准则”,指示矿体向下还有很大的延伸。

受区域构造影响,该矿床的SII2、SIII2矿体整体均为北东走向,倾向虽有不同变化,但总体倾向北东。矿体沿走向、倾向连续性较好。40线的矿体出露情况与整个矿体基本一致。因此,应根据矿体的地表出露情况,沿着矿体走向,在其北东方向进行深部找矿。可根据矿体的控制数据,计算矿体的倾角,以此推测深部的矿体深度进行验证。由于矿

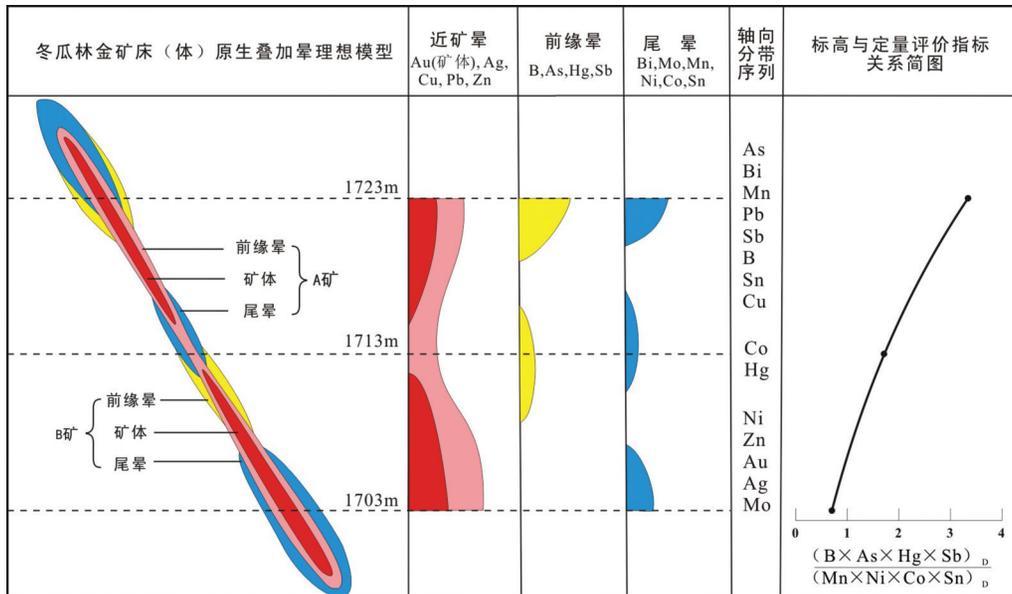


图5 冬瓜林金矿床(体)原生叠加晕理想模型(据文献[39]修改)
Fig.5 Ideal zoning model of the primary superimposed halos of the Donggualin gold deposit (modified after reference [39])

体为串珠状,中间可能会有间断。

4.3 深部矿体预测指标

深部矿体资源潜力的定量评价,可用前缘晕元素组合的各元素分带指数累乘值与尾晕元素组合各元素分带指数累乘值的比值^[7,34]。本文选取前缘晕元素 $(B \times As \times Hg \times Sb)_D / (Mn \times Ni \times Co \times Sn)_D$ 作为定量评价指标,指标数值的计算结果分别为(表3):矿体上部(1723 m)3.34—中部(1713 m)1.71—下部(1703 m)0.70。评价指标随矿体深度的增加迅速降低(图5),说明这是预测深部矿体资源潜力的有效指标^[7]。若该指标往深部出现有规律的降低之后突然升高的情况,应是深部矿体的前缘晕和其上部矿体的尾晕叠加导致的,表明深部将有新矿体发现^[17,10,39]。

标高(y)与定量评价指标的关系,用最小二乘法得出的一次拟合函数为: $y=12.71+1707x, x=\ln[(B \times As \times Hg \times Sb)_D / (Mn \times Ni \times Co \times Sn)_D]$ 。相关系数 $R^2=0.9932$,说明 y 和 x 线性关系明显。该函数既能随着矿床控制深度的增加进行调整和验证,也能对深部的矿体资源潜力进行预测。

5 结 论

(1)冬瓜林金矿床的地球化学结果显示:成矿元素Au和元素Ni、Co、Cu、Mn、Sb、Sn的关系密切。其中,元素Ni、Co和Cu的异常可作为良好的找矿指示标志;元素Mn、Sb和Sn的异常可作为找矿的参考标志。该矿床西露天采场40线最终的轴向分带序列自上而下为:As-Bi-Mn-Pb-Sb-B-Sn-Cu-Co-Hg-Ni-Zn-Au-Ag-Mo。

(2)建立了矿体的原生叠加晕理想模型,由于矿体中前缘晕、尾晕共存现象明显,说明矿体向下还有很大的延伸,深部找矿方向为矿体的北东向。

(3)构建了深部矿体预测评价指标 $(B \times As \times Hg \times Sb)_D / (Mn \times Ni \times Co \times Sn)_D$,从矿体上部(1723 m)3.34—中部(1713 m)1.71—下部(1703 m)0.70,该指标随矿体深度的增加迅速降低,表明是预测深部矿体资源潜力的有效指标。

致谢:论文野外工作得到袁琴和王晓的大力支持,样品采集和资料收集过程中得到中国黄金集团公司科技公司有关领导、云南黄金有限责任公司镇沅分公司相关负责人和工作人员的帮助,审稿人提出了宝贵的建设性意见,在此一并表示感谢。

参考文献(References):

- [1] 谢学锦,陈洪才.原生晕方法在地质普查勘探中的应用[J].地质学报,1961,41(3/4):273-284.
Xie Xuejin, Chen Hongcai. Application in geological prospecting and exploration of primary halo method[J]. Acta Geologica Sinica, 1961, 41(3/4): 273-284(in Chinese).
- [2] 李惠,张国义,禹斌.金矿区深部盲矿预测的构造叠加晕模型及找矿效果[M].北京:地质出版社,2006:1-46.
Li Hui, Zhang Guoyi, Yu Bin, et al. The Model of Structural Superimposed Halo in Prognostic and Efficiency for Blind Ore Bodies in Gold Ore-district[M]. Beijing: Geological Publishing House, 2006: 1-46(in Chinese).
- [3] 卿成实,彭秀红,徐波,等.原生晕找矿法的研究进展[J].矿物学报,2011(增刊):828-829.
Qing Chengshi, Peng Xiuhong, Xu Bo, et al. Progress in studies on primary halos of ore deposit prospecting method[J]. Acta Mineralogica Sinica, 2011(supp.): 828-829(in Chinese).
- [4] 刘崇民,马生明.我国原生晕研究50年的主要成果[J].物探化探计算技术,2007,29(增刊):215-211.
Liu Chongmin, Ma Shengming. The main achievements of the study on primary halo in the past 50 years in China[J]. Computing Techniques for Geophysical and Geochemical Exploration, 2007, 29(supp.): 215-211(in Chinese with English abstract).
- [5] 李惠,禹斌,李德亮,等.化探深部预测新方法综述[J].矿产勘查,2010,1(2):156-160.
Li Hui, Yu Bin, Li Deliang, et al. Summary of new methods on deep prediction of geochemical exploration[J]. Mineral Exploration, 2010, 1(2):156-160(in Chinese with English abstract).
- [6] 李惠,张国义,禹斌,等.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,2010,17(1):287-293.
Li Hui, Zhang Guoyi, Yu Bin, et al. Structural superimposed halos method for prospecting blind ore-body in the deep of ore districts[J]. Earth Science Frontiers, 2010, 17(1): 287-293(in Chinese with English abstract).
- [7] 陈永清,韩学林,赵红娟,等.内蒙花敖包特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,2011,36(2):236-246.
Chen Yongqing, Han Xuelin, Zhao Hongjuan, et al. Characteristics of primary halo zonation and prediction pattern of deep orebody of the Hua' aobaote Pb-Zn-Ag polymetallic deposit, Inner Mongolia[J]. Earth Science—Journal of China University of Geosciences, 2011, 36(2): 236-246 (in Chinese with English abstract).
- [8] 邵跃.金矿化探异常评价的几个问题[J].中国地质,1988,(5):22-23.
Shao Yue. Several issues on the evaluation of geochemical abnormality of gold deposit[J]. Geology in China, 1988, (5):22-23

- (in Chinese).
- [9] 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 Yue. Rock Measurements (Primary Halo Method) in the Hydrothermal Deposits Prospecting [M]. Beijing: Geological Publishing House, 1997: 1-62(in Chinese).
- [10] 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 Hui, Zhang Wenhua, Liu Baolin, 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(in Chinese).
- [11] 章永梅, 顾雪祥, 程文斌, 等. 内蒙古柳坝沟金矿床原生晕地球化学特征及深部成矿远景评价[J]. 地学前缘, 2010, 17(2): 209-221.
Zhang Yongmei, Gu Xuexiang, Cheng Wenbin, et al. The geochemical features of primary halo and the evaluation of deep mineralization prospect of Liubagou gold deposit, Inner Mongolia[J]. Earth Sciences Frontiers, 2010, 17(2): 209-221 (in Chinese with English abstract).
- [12] 丁矢勇. 论老王寨金矿田(段)地球化学特征[J]. 云南地质, 1995, 14(3): 206-215.
Ding Shiyong. Discussing on the geochemical characteristics of Laowangzhai gold ore field[J]. Yunnan Geology, 1995, 14(3): 206-215(in Chinese).
- [13] 云南省地质矿产局第三地质大队. 镇沅金矿田冬瓜林矿段详细普查地质报告[R]. 大理:云南省地质矿产局第三地质大队, 1993.
The Third Geological Survey Team of Yunnan Provincial Bureau of Geology. Detailed Report of Geological Survey in Donggualin Ore Section of Zhenyuan Ore Field [R]. Dali: The Third Geological Survey Team of Yunnan Provincial Bureau of Geology, 1993 (in Chinese).
- [14] 张闯, 杨立强, 赵凯, 等. 滇西哀牢山老王寨金矿床控矿构造样式[J]. 岩石学报, 2012, 28(12): 4109-4124.
Zhang Chuang, Yang Liqiang, Zhao Kai, et al. Structure controlling pattern of the Laowangzhai gold deposit, Ailaoshan orogenic belt, western Yunnan, China[J]. Acta Petrologica Sinica, 2012, 28(12): 4109-4124 (in Chinese with English abstract).
- [15] 胡云中, 唐尚鹑, 王海平, 等. 哀牢山金矿地质[M]. 北京:地质出版社, 1995: 1-278.
Hu Yunzhong, Tang Shangchun, Wang Haiping, et al. Geology of Gold Deposits in Ailaoshan[M]. Beijing: Geological Publishing House, 1995: 1-278 (in Chinese).
- [16] 李定谋, 曹志敏, 覃功炯, 等. 哀牢山蛇绿混杂岩带金矿床[M]. 北京:地质出版社, 1998: 1-137.
Li Dingmou, Cao Zhimin, Qin Gongjiong, et al. Gold Deposits in Ailaoshan Ophiolitic Melange Zone [M]. Beijing: Geological Publishing House, 1998: 1-137 (in Chinese).
- [17] 杨立强, 邓军, 赵凯, 等. 哀牢山造山带金矿成矿时序及其动力学背景探讨[J]. 岩石学报, 2011, 27(9): 2519-2532.
Yang Liqiang, Deng Jun, Zhao Kai, et al. Tectono-thermochronology and gold mineralization events of orogenic gold deposits in Ailaoshan orogenic belt, Southwest China: Geochronological constraints[J]. Acta Petrologica Sinica, 2011, 27(9): 2519-2532 (in Chinese with English abstract).
- [18] 段新华, 赵鸿. 论哀牢山—藤条河断裂古板块俯冲带[J]. 地质学报, 1981, 57(4): 258-266.
Duan Xinhua, Zhao Hong. The Ailaoshan—Tengtiaohe fracture—the subduction zone of an ancient plate[J]. Acta Geologica Sinica, 1981, 57(4): 258-266 (in Chinese with English abstract).
- [19] 吴海威, 张连生, 嵇少丞. 红河—哀牢山断裂带喜山期陆内大型左行走滑剪切带[J]. 地质科学, 1989, 10(1): 1-8.
Wu Haiwei, Zhang Liansheng, Ji Shaocheng. The Red River—Ailaoshan Fault Zone—a Himalayan large sinistral strike slip intracontinental shear zone[J]. Chinese Journal of Geology, 1989, 10(1): 1-8 (in Chinese).
- [20] 唐尚鹑, 李经典, 何叔欣. 哀牢山北段金矿成矿带成矿规律初探[J]. 云南地质, 1991, 10(1): 44-70.
Tang Shangchun, Li Jingdian, He Shuxin. On metallogenic regularity of gold metallogenic belts in northern section of Ailaoshan Mountain[J]. Yunnan Geology, 1991, 10(1): 44-70 (in Chinese with English abstract).
- [21] 赵岩, 黄钰涵, 梁坤, 等. 西南三江地区镇沅金矿载金黄铁矿稀土与微量元素特征[J]. 岩石学报, 2015, 31(11): 3297-3308.
Zhao Yan, Huang Yuhuan, Liang Kun, et al. Rare earth element and trace element features of auriferous pyrite in the Zhenyuan gold deposit, Sanjiang region, Yunnan Province, China[J]. Acta Petrologica Sinica, 2015, 31(11): 3297-3308 (in Chinese with English abstract).
- [22] 胡瑞忠, 毕献武, 何明友, 等. 哀牢山金矿带矿化剂对金成矿的制约[J]. 中国科学(D辑), 1998, 28(增刊): 24-30.
Hu Ruizhong, Bi Xianwu, He Mingyou, et al. Constrains from mineralizing agent to gold mineralization in the Ailao Shan gold metallogenic belt [J]. Science in China (Series D: Earth Sciences), 1998, 28(supp.): 24-30 (in Chinese with English abstract).
- [23] 何文举. 镇沅金矿田煌斑岩特征及其与金矿成矿的关系[J]. 云南地质, 1993, 12(2): 148-158.
He Wenju. Characteristic of the lamprophyre and the relation with gold mineralization in Zhenyuan gold mine field [J]. Yunnan Geology, 1993, 12(2): 148-158(in Chinese with English abstract).
- [24] 黄智龙, 刘从强, 朱成明, 等. 云南老王寨金矿区煌斑岩成因及其与金矿化的关系[M]. 北京:地质出版社, 1999: 1-252.
Huang Zhilong, Liu Congqiang, Zhu Chengming, et al. The Origin of Lamprophyres in the Laowangzhai Gold Field, Yunnan Province and their Relations with Gold Mineralization[M].

- Beijing: Geological Publishing House, 1999: 1-252(in Chinese).
- [25] 梁业恒, 孙晓明, 石贵勇, 等. 云南哀牢山老王寨大型造山型金矿成矿流体地球化学[J]. 岩石学报, 2011, 27(9): 2533-2540.
Liang Yeheng, Sun Xiaoming, Shi Guiyong, et al. Ore-forming fluid geochemistry and genesis of Laowangzhai large scale orogenic gold deposit in Ailaoshan gold belt, Yunnan Province, China[J]. Acta Petrologica Sinica, 2011, 27(9): 2533-2540 (in Chinese with English abstract).
- [26] 黄智龙. 幔源岩浆活动过程中的去气作用—以云南老王寨金矿煌斑岩为例[J]. 矿物岩石地球化学通报, 2001, 20(1): 1-5.
Huang Zhilong. Deaeration in the activity progress of mantle source magma—the lamprophyres in the Laowangzhai gold field, Yunan Province as an example[J]. Mineralogica-Petrologica-Geochemica Bulletin, 2001, 20(1): 1-5 (in Chinese).
- [27] 周向科, 王建国, 易锦俊, 等. 云南冬瓜林金矿床的围岩蚀变特征和成矿阶段划分[J]. 中国矿业, 2016, 25(s1):285-288.
Zhou Xiangke, Wang Jianguo, Yi Jinjun, et al. Wall rock alteration and ore-forming hydrothermal process division of Donggualin gold deposit, Yunnan[J]. China Mining Magazine, 2016, 25(s1):285-288 (in Chinese with English abstract).
- [28] 戚长谋. 元素地球化学分类探讨[J]. 长春科技大学学报, 1997, 21(4):361-365.
Qi Changmou. A discussion on the classification of element geochemistry[J]. journal of Changchun University of Science and Technology, 1997, 21(4):361-365(in Chinese).
- [29] 孙莉, 肖克炎, 高阳. 彩霞山铅锌矿原生晕地球化学特征及深部矿产评价[J]. 吉林大学学报(地球科学版), 2013, 43(4): 1179-1189.
Sun Li, Xiao Keyan, Gao Yang. Primary halos characteristics of Caixiashan Pb-Zn deposit and prediction for deep mineralization[J]. Journal of Jinlin University(Earth Science Edition), 2013, 43(4): 1179-1189(in Chinese with English abstract).
- [30] 王学仁. 地质数据的多变量统计分析[M]. 北京: 科学出版社, 1982: 1-407.
Wang Xueren. Multivariable Statistical Analysis of Geological Data [M]. Beijing: Science Press, 1982: 1-407 (in Chinese).
- [31] 高惠璇. 应用多元统计分析[M]. 北京: 北京大学出版社, 2013: 1-408.
Gao Huixuan. Multivariate Statistical Analysis[M]. Beijing: Peking University Press, 2013: 1-408(in Chinese).
- [32] 李庆, 张振强. 聚类分析在 534 铀钼矿床研究中的应用[J]. 地质与资源, 2013, 22(4): 326-329.
Li Qing, Zhang Zhenqiang. Application of cluster analysis in the study of No. 534 uranium-molybdenum deposit[J]. Geology and Resources, 2013, 22(4):326-329(in Chinese with English abstract).
- [33] 董毅. 因子分析在水系沉积物测量地球化学分区中的应用探讨——以青海都兰地区为例[J]. 矿产与地质, 2008, 22(1): 78-82.
Dong Yi. Discussion of applying factor analysis to the geochemical subareas measurement in stream sediment——A case study of Dulan area in Qinghai Province[J]. Mineral Resources and Geology, 2008, 22(1): 78-82 (in Chinese with English abstract).
- [34] Beus A A, Grigorian S V. Geochemical Exploration Methods for Mineral Deposit[M]. Applied Publishing Ltd., Wilmette Illinois, U.S.A., 1977: 1-287.
- [35] 朱有光, 蒋敬业. 金矿地球化学找矿[M]. 武汉: 中国地质大学出版社, 1993: 100-131.
Zhu Youguang, Jiang Jingye. Geochemical Exploration of Gold Deposits [M]. Wuhan: China University of Geosciences Press, 1993: 100-131(in Chinese).
- [36] 刘冲昊, 刘家军, 王建平, 等. 陕西省略阳县铀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 Chonghao, Liu Jiajun, Wang Jianping, 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(in Chinese with English abstract).
- [37] 刘崇民, 马生明, 胡树起. 金属矿床原生晕勘查指标[J]. 物探与化探, 2010, 34(6):765-771.
Liu Chongmin, Ma Shengming, Hu Shuqi. A study of primary halo exploration indexes for metallic ore deposits [J]. Geophysical and Geochemical Exploration, 2010, 34(6):765-771(in Chinese with English abstract).
- [38] 赵伦山, 张本仁. 地球化学[M]. 北京: 地质出版社, 1988: 1-399.
Zhao Lunshan, Zhang Benren. Geochemistry[M]. Beijing: Geological Publishing House, 1988: 1-399(in Chinese).
- [39] 李惠, 张文华, 常凤池, 等. 大型、特大型金矿盲矿预测的原生叠加晕模型[M]. 北京: 冶金工业出版社, 1998: 1-125.
Li Hui, Zhang Wenhua, Chang Fengchi, et al. Models of Overprint of Primary Halo for Large, Mega Size Blind Gold Ore Deposits[M]. Beijing: China Metallurgical Industry Press, 1998: 1-125(in Chinese).