

贵州泥堡大型金矿床金的三维富集规律 及成矿模式探讨



www.
geojournals.cn/georev

曹胜桃¹⁾, 郑禄林²⁾, 魏怀瑞¹⁾, 陈军¹⁾, 李俊海¹⁾

1) 贵州大学资源与环境工程学院, 贵阳, 550025; 2) 贵州大学矿业学院, 贵阳, 550025

内容提要: 泥堡金矿床是黔西南近些年发现的大型金矿床之一, 前人对金的富集规律及成矿过程开展了大量的研究, 但从金的三维富集规律方面探讨金的成矿模式尚未研究。本文利用 3Dmine 软件对泥堡金矿床的地层、断层和矿体进行三维可视化地质建模。结果显示, 矿体呈顺层状和沿断层产状产出, Au 主要富集层位为上二叠 统龙潭组二段和一段 (P_3l^2 、 P_3l^1), 赋存位置为构造蚀变体 (Sbt)、F1 断层内、F1 断层两侧、背斜轴面附近、背斜轴面与断层 F1 之间, 背斜轴面倾向一侧的背斜翼部, 且 Au 含量具有斑块状分布和带状连续分布特点, 表现出 Au 在局部斑块处含量高, 并向四周持续递减。据此, 本文结合 Au 的物质来源、流体来源、以及矿床中的地层岩性、断层和背斜组合等特征, 获取了矿床形成的流体流向路径, 提出了“S 型”和“断层+背斜轴面”的成矿模式, 这对于泥堡金矿床及类似的矿床开展下一步找矿和成矿预测具有一定的参考意义。

关键词: 泥堡金矿床; 三维地质建模; 富集规律; 成矿模式

泥堡大型金矿床随水银洞金矿床深入的科研工作及找矿勘探经验, 被成功勘查发现, 使其金资源储量从 18 t 增加至 70 t, 成为贵州第三大金矿床, 是滇黔桂“金三角”卡林型金矿床典型代表 (郑禄林, 2017)。研究认为泥堡金矿床形成于中晚燕山期 (139 ~ 145 Ma; 高伟, 2018; Chen Maohong et al., 2019; Zheng Lulin et al., 2019), 具有典型的卡林型金矿床热液蚀变特征, 主要有脱碳酸盐化、硫化 (黄铁矿化、毒砂化)、硅化、黏土化、以及少量雄 (雌) 黄化、辉锑矿化、萤石化等作用 (郑禄林, 2017)。其中脱碳酸盐化和硫化作用与金成矿关系密切, 表现为金的成矿流体交代蚀变含 Fe 碳酸盐 (Fe 白云石), 释放 Fe^{2+} 进入流体, 导致含砷黄铁矿沉淀并卸载 Au, 从而在有利空间的赋矿岩石中形成金矿体 (韦东田等, 2016; 谢贤洋, 2018; 郑禄林等, 2019)。而大量研究得出, Au 主要以 Au^{1+} 离子形式赋存于龙潭组、Sbt、F1 中的含砷黄铁矿 (主) 和毒砂 (次) 中 (郑禄林等, 2017; Wei Dongtian et al., 2020)。对于金的富集规律研究, 前人 (韦东田等, 2016; 谢贤洋等, 2016; 郑禄林, 2017; 吴松洋等, 2018) 也开展过相关的统计研究, 但主要采用二维统计方法, 且由于前期

样品量少, 数据不足, 存在对矿床不能有效控制和空间可视性差等问题, 难以直观揭示矿床空间富集规律。随着勘探工作不断深入、积累了大量矿山数据, 包括钻孔柱状图和样品测试信息。同时, 计算机技术不断提高, 在收集矿山数据的基础上, 利用现代信息理论和可视化技术, 建立矿床空间特征和自身属性的三维模型, 使主要地质构造和物质组成三维可视化, 可清晰观察金在地层、断层、褶皱中的富集变化规律 (张权平等, 2020)。

因此, 本文利用 3Dmine 软件, 对泥堡金矿床进行三维可视化地质建模, 建立地层模型、断层模型和矿体模型, 分析 Au 的三维富集规律。同时, 在分析 Au 三维富集规律基础上, 结合矿床中 Au 的物质来源、流体来源、流体迁移方向、以及矿床的地质特征探讨 Au 的成矿模式, 旨在为该矿床及相似矿床的找矿勘查和成矿预测提供一定的参考。

1 地质背景

贵州泥堡金矿床位于扬子准地台南缘与华南褶皱系两个 I 级构造单元交汇处, 且处在北西向紫云—垭都深断裂、北东向弥勒—师宗断裂和近东西

注: 本文为国家自然科学基金资助项目 (编号: 41962008) 的成果。

收稿日期: 2021-01-04; 改回日期: 2021-05-07; 网络首发: 2021-05-20; 责任编辑: 黄道裘、刘志强。Doi: 10.16509/j.georeview.2021.05.072

作者简介: 曹胜桃, 男, 1996 年生, 硕士研究生, 研究方向为矿产普查与勘探; Email: caoshengtao520@foxmail.com。通讯作者: 郑禄林, 男, 1983 年生, 博士, 副教授, 硕士生导师, 主要从事金矿床地质研究; Email: zhenglulin1983@126.com。

表 1 贵州西南普安泥堡金矿床主要金矿体特征表

Table 1 Characteristics of main gold orebodies in the Nibao gold deposit, Pu'an, southwestern Guizhou

矿体类型	矿体编号	空间位置	平面位置(勘探线)	长度(m)	延深(m)	厚度(m)	空间形态	品位($\times 10^{-6}$)
断裂型	Ⅲ-1	F1 破碎带	9100-11380	2700	310	4.28	矿体呈似层状, 沿 F1 产出,倾向 160°,倾角 35°	2.77
	Ⅲ-2	F1 破碎带	11900-12340	450	60	4.62		2.03
	Ⅲ-3	F1 破碎带	8700-8980	300	50	5.43		1.47
层控型	Ⅳ-1	Sbt 中	9020-9420	420	80	8.1	矿体呈似层状、 透镜状产出、 与 Sbt、 P_3l^1 、 P_3l^2 形态一致	3.14
	Ⅳ-2	Sbt 中	9380-9660	300	75	3.53		1.86
	Ⅳ-15	Sbt 中	10140-11340	1285	480	9.66		3.87
	Ⅳ-16	Sbt 中	11740-12500	820	190	2.38		2.05
	Ⅳ-17	Sbt 中	12740-13540	940	140	10.98		2.48
	Ⅳ-18	Sbt 中	12900-13540	775	85	8.1		2.44
	I	P_3l^1 中	9420-9660	110	80	2		1.18
	II	P_3l^2 中	9420-9660	120	80	4		2.07
氧化矿	Ⅶ-2	Q 中	8700-9020	340	155	4.76	矿体呈 透镜状产出	0.99
	Ⅶ-4	Q 中	9100-9220	207	140	6.91		1.26
	Ⅶ-5	Q 中	9100-9380	305	225	5.31		1.16
	Ⅶ-6	Q 中	9340-9580	260	180	6.35		1.23
	Ⅶ-9	Q 中	9540-9570	360	230	4.16		0.9
	Ⅶ-10	Q 中	9660-9860	230	162	7.09		1.45

注:数据来源于“泥堡金矿资源储量核实及勘探报告(2013)”。

富集而成,均为氧化矿,集中分布在 8700-9980 勘探线间。因此,根据矿床中矿体的空间位置、平面位置、空间形态、长度、延深、厚度、空间形态、品位等信息,选择同时具有三类矿体、且能有效代表整个矿床的区域进行建模。综合分析发现,平面位置上,矿体主要集中在分布于 9100-10460 勘探线间,空间位置上,集中分布于 F1、Sbt、 P_3l^1 、 P_3l^2 和 Q 内。基于以上,此次建模范围的平面位置选择 9100-10460 勘探线、其中有二龙抢宝背斜两翼和核部较完整出露,空间位置选择 F1、Sbt、 P_3l^1 、 P_3l^2 和 Q,以及直接接触的 P_2m 、 P_3l^3 地层。

2 地质模型建立

2.1 建立实体模型

随着三维地质建模技术逐渐成熟,不断涌现出 Surpac、Micromine、Gocad、Minesight、Creatar、Datamine、3Dmine 等三维建模软件。上述软件中,3Dmine 软件侧重于服务矿山三维地质建模,具有空间立体感强、可视化性高、操作简便、效率高、准确性强等优点(陶晓丽,2015;蒋新艳,2018)。因此,本文采用 3Dmine 软件进行三维地质建模,建模平面位置选择 9100-10460 勘探线,空间位置选择 F1、Sbt、 P_2m 、 P_3l^1 、 P_3l^2 、 P_3l^3 和 Q。建模方式为钻孔柱状图建模,共利用 90 个钻孔数据,平均深度为 182 m,按 80 m \times 80 m 工程间距布置钻孔,钻孔控制的建模高程为 800~1600 m。建模流程依次为:①从钻孔

柱状图中提取钻孔名称、孔口坐标、孔深、钻孔倾角、钻孔方位角、地层层位、岩性、采样位置及样品中 Au 含量等信息,建立定位表、测斜表、化验表、岩性表,后导入 3Dmine 内,建立钻孔数据库。②利用全地层建模依次对 F1、 P_2m 、Sbt、 P_3l^1 、 P_3l^2 、 P_3l^3 和 Q 建模(图 2)。在建模中,层位尖灭处理方式选择趋势延伸、浅孔记录连续和顶底板边界封闭处理,部分位置钻孔间距较远或存在钻孔缺失,利用网格估值进行插值,以便减小误差,其中网格间距设为 20 m,并利用曲面拟合进行插值。此时得到 F1 与各地层的三维地质模型,存在地层、断层实体模型重叠、交叉等问题,主要是由于 F1 逆冲运动导致,利用 F1 断层面将实体模型切割上下两盘,分别建模后组合,在单盘内不存在地层重复,从而解决严重交叉问题。此外,在地层实体模型中存在重叠部分,将钻孔数据库设置显示钻孔,透明化处理实体模型或沿多条勘探线切割剖面观察,确定重叠部分所属地层,再利用布尔运算中的交集、并集和差集对地层处理,从而得到 F1 和各地层准确的空间实体模型,组合得到总模型(图 3)。

2.2 建立块体模型

研究 Au 的三维富集规律,需在建立断层和各地层实体模型的基础上创建块体模型分析,其中单个块体尺寸(X、Y、Z)分别为 10 m、10 m、10 m,次级块体的尺寸为 5 m、5 m、5 m。将块体模型进行实体模型约束,从而得到 F1 和各地层的块体模型,对块

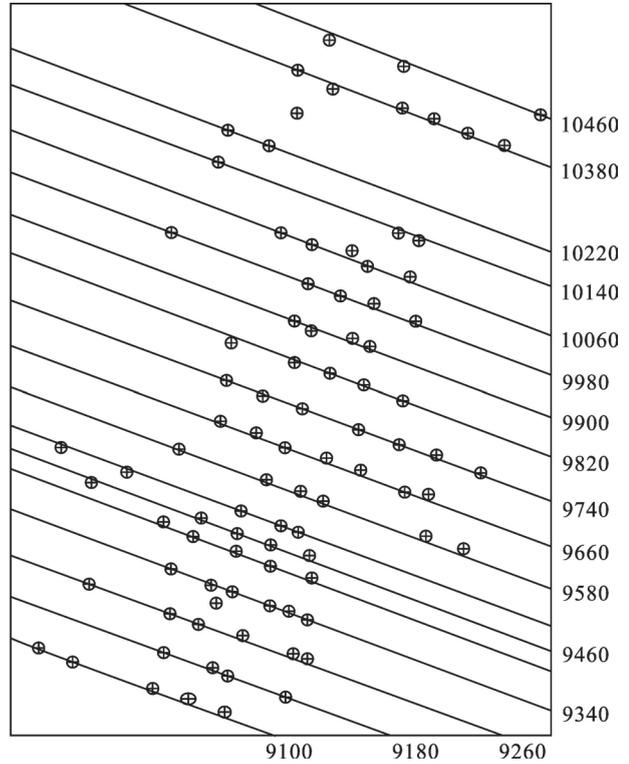
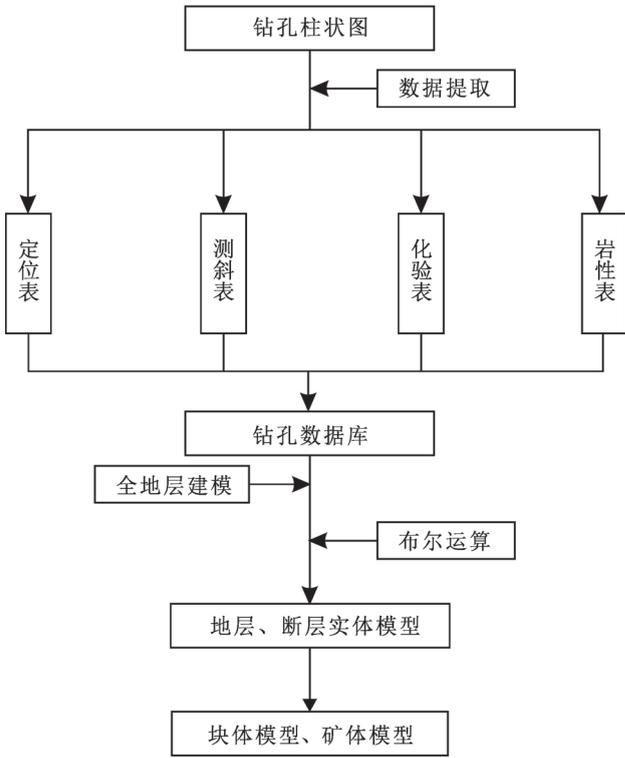


图2 建模流程图与钻孔布置图

Fig. 2 Modeling flowchart and drilling layout diagram

体进行新建 Au 含量属性,并赋值。在块体中,各样品点距待估值块的距离不同,其品位对待估值块的影响程度不同,距离待估值块近,其品位对待估值块品位影响越大,因此,选择距离幂次反比法对块体进行赋值。在利用距离幂次反比法进行赋值中,主要是估值参数中 Au 样品点文件生成和确定搜索参数,样品点文件包括原始样品长度点文件, Au 组合样品点文件。原始样品长度点文件共收集

样品 6835 件,样品长为 0.52~1.72 m,而样品长度中数和平均长度均为 1.14 m(图 4),因此以 1.14 m

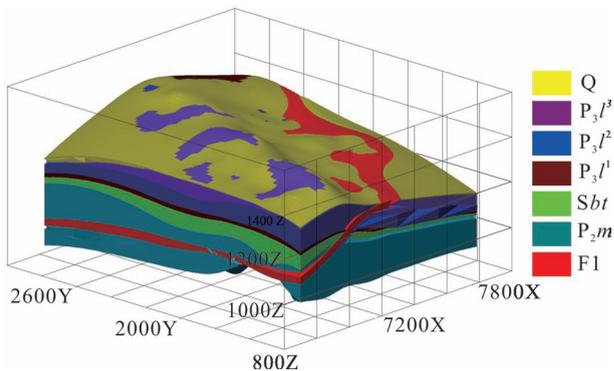


图3 贵州西南普安泥堡金矿床实体模型图

Fig. 3 Entity model diagram of the Nibao gold deposit, Pu'an, southwestern Guizhou

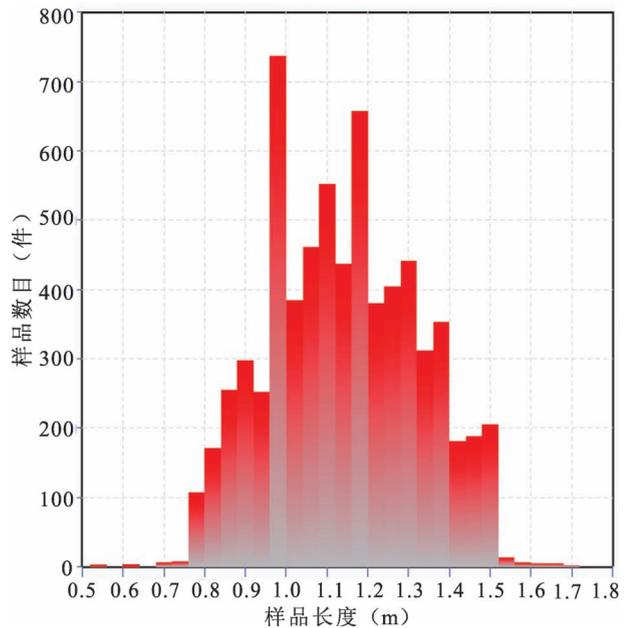


图4 贵州西南普安泥堡金矿床中样品长度直方图

Fig. 4 Histogram of sample length in Nibao gold deposit, Pu'an, southwestern Guizhou

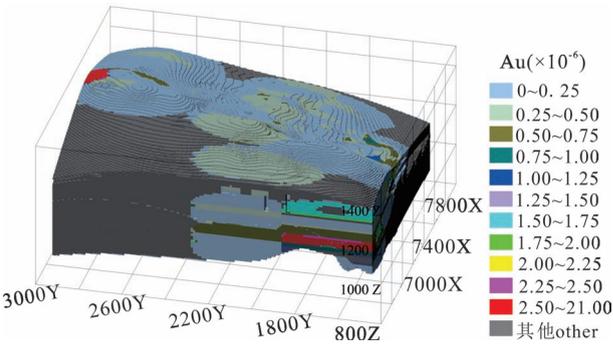


图 5 贵州西南普安泥堡金矿床块体模型图
Fig. 5 Block model diagram of Nibao gold deposit, Pu'an, southwestern Guizhou

为 Au 点的提取组合长度,可减少组合样品对原样品的破坏。

实体建模区域位于二龙抢宝背斜内,包括核部及两翼部分地层,表现出两翼产状明显差异,且被 F1 穿切。在 F1 上盘,主要为二龙抢宝背斜核部,为此次建模的重点区域,各地层表现出走向约 0°,倾向约 270°,倾角为 10°,不存在显著侧伏现象。因此,在利用距离幂次反比法进行赋值时,搜索参数中的主轴、次轴和短轴搜索半径分别为 300 m、150 m、

75 m,主轴方位角、主轴倾伏角和次轴倾角分别为 0°、0°、10°,待估值块利用其它样品估值时,最多使用 12 块样,最少 3 块,单孔最多 4 块,以此得到 F1 和各地层 Au 品位块体模型(图 5)。

3 含金性分析

泥堡金矿床中,Au 的含量在整体上、纵向上、横向上,以及各地层、断层、二龙抢宝背斜之间均存在较大差异。因此,在三维地质建模的基础上,开展含金性统计分析和三维含金性分析,以此细化对 Au 富集规律研究。而金矿床中原生矿和氧化矿的工业指标不同,原生矿中 Au 的边界品位为 1.00×10^{-6} ,工业品位为 2.5×10^{-6} ,氧化矿的边界品位为 0.5×10^{-6} ,所以在建矿体模型时,原生矿和氧化矿分别按 1.00×10^{-6} 和 0.5×10^{-6} 提取矿体。同时,为直观观察 Au 在矿床中的三维分布情况,将块体模型图(图 5)中 Au 含量按 $0 \sim 0.25 \times 10^{-6}$ 、 $0.25 \times 10^{-6} \sim 0.5 \times 10^{-6}$ 、 $0.5 \times 10^{-6} \sim 0.75 \times 10^{-6}$ 、 $0.75 \times 10^{-6} \sim 1 \times 10^{-6}$ 、 $1 \times 10^{-6} \sim 1.25 \times 10^{-6}$ 、 $1.25 \times 10^{-6} \sim 1.5 \times 10^{-6}$ 、 $1.5 \times 10^{-6} \sim 1.75 \times 10^{-6}$ 、 $1.75 \times 10^{-6} \sim 2 \times 10^{-6}$ 、 $2 \times 10^{-6} \sim 2.5 \times 10^{-6}$ 、 $> 2.5 \times 10^{-6}$ 等品位区间着色,以便增加空间立体感强,而品位区间还有“其它”,指未被赋值的块体,由部分区域的钻孔间距较大或钻孔缺失造成。

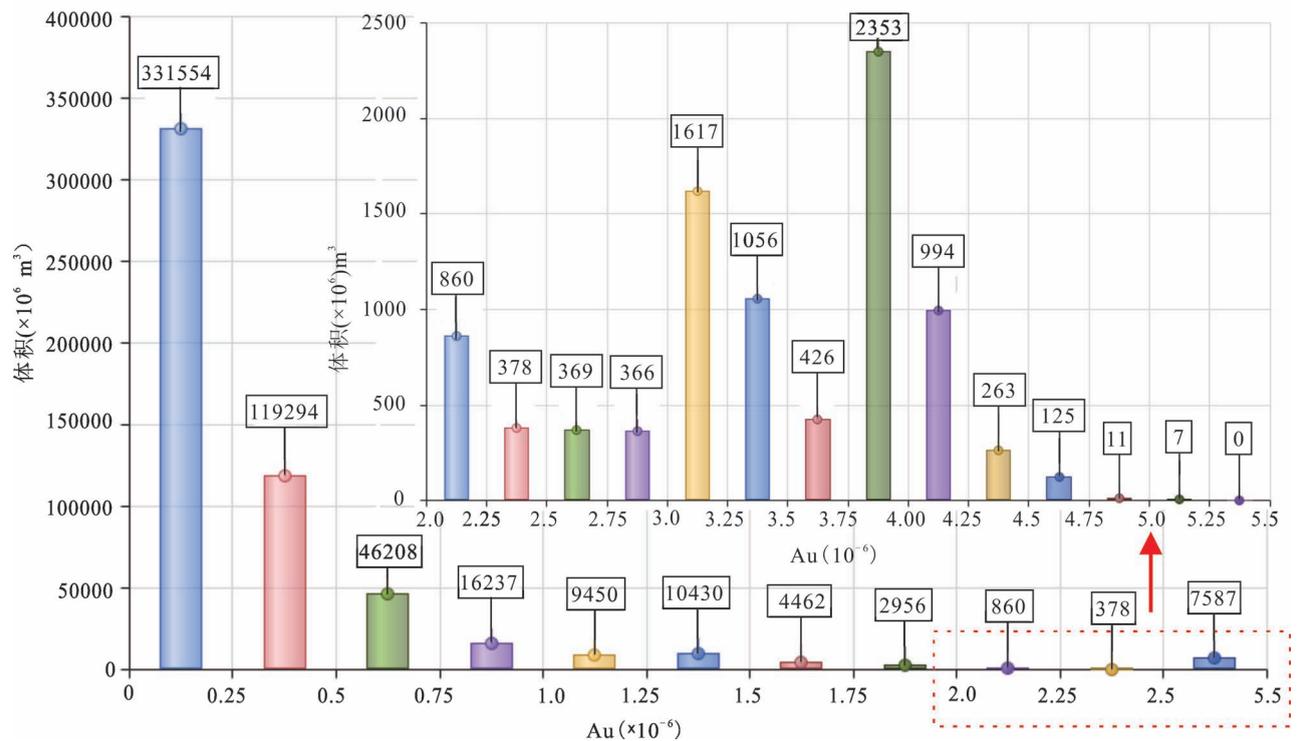


图 6 贵州西南普安泥堡金矿床中 Au 含量分布图

Fig. 6 Distribution diagram of Au content in the Nibao gold deposit, Pu'an, southwestern Guizhou

3.1 含金性统计分析

从提取钻孔柱状图信息,到建立钻孔数据库,后依次建立矿床的三维实体模型和块体模型,在块体模型中的每个块都具有 Au 含量属性和体积量属性,通过 3Dmine 软件的统计功能,可清晰分析矿床在整体上、各地层和 F1 中 Au 的含量与对应岩石体积之间的关系,并含金性统计分析其富集规律。通过统计分析得出,矿床整体上 Au 含量为 $0.01 \times 10^{-6} \sim 20.41 \times 10^{-6}$,平均为 0.39×10^{-6} ,集中分布于 $0.01 \times 10^{-6} \sim 0.67 \times 10^{-6}$,将 Au 含量按 0.25×10^{-6} 为一个区间梯度,划分出 22 个品位区间,并统计区间的岩石体积,得出泥堡金矿床中 Au 含量分布图(图 6)。图 6 表明,含 Au 岩石的量随 Au 含量增加而减少,但在 Au 含量为 2.5×10^{-6} 之后出现异常,不减反增,表明存在一定作用使 Au 异常富集(图 6)。

研究认为金主要以离子金赋存于含砷黄铁矿(主)和毒砂(次)中(郑禄林等,2017; Wei Dongtian et al., 2020),硫化作用是形成含砷硫化物的主要机制(王疆丽,2014; 韦东田等,2016; 郑禄林,2017; 谢贤洋,2018),也是 Au 富集的主要成矿机制。同时,统计出 P_2m 、Sbt、 P_3l^1 、 P_3l^2 、 P_3l^3 、Q、F1 中的 Au 含量和对应的岩石体积量,在此基础上得出矿床中地层内 Au 含量分布图(图 7)。在图 7 中,含矿岩石的量随 Au 含量增加而减少,但在 Au 含量为 2.5×10^{-6} 之后出现异常,不减反增,且 Au 主要富集 F1、Sbt、 P_3l^1 和 P_3l^2 中。

3.2 三维含金性分析

对泥堡金矿床进行三维地质建模及可视化处理后,发现 Au 含量在纵向上、横向上,以及各地层、断

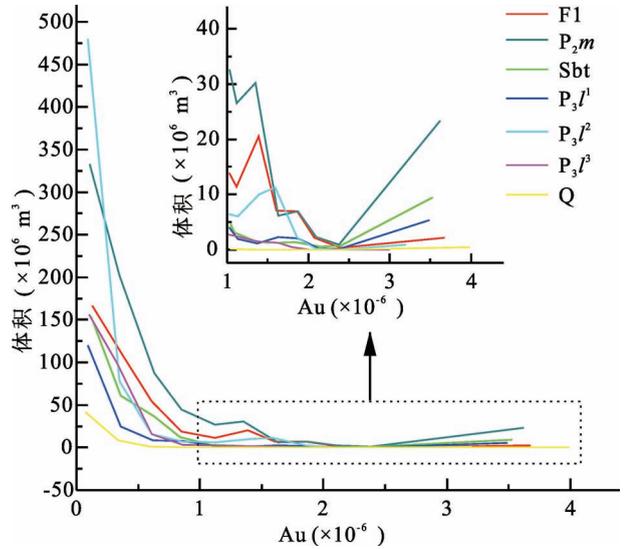


图 7 贵州西南普安泥堡金矿床中地层 Au 含量分布图
Fig. 7 Distribution diagram of Au content in the strata of Nibao gold deposit, Pu'an, southwestern Guizhou

层、二龙抢宝背斜轴面之间均存在较大差异(图 9)。在纵向上,对二龙抢宝背斜核部轴线方向切割剖面(图 8),剖面中出露的 Au 矿体较多,表现出斑块状分布及色带连续分布,Au 在斑块处含量高,并向四周逐渐减少。

在横向上,F1 具有较好的连续性,F1 中 Au 含量分布不均匀,在建模区域的西南部 Au 含量高,以及在 F1、Sbt 和背斜轴面交汇带品位高,从西南部向北(X)东(Y)向减少(图 9j、m、n)。同时,F1 中也存在斑块状分布及色带连续分布现象,Au 在斑块处含量高,向四周逐渐减少,不存在太大跳跃(图 9n)。

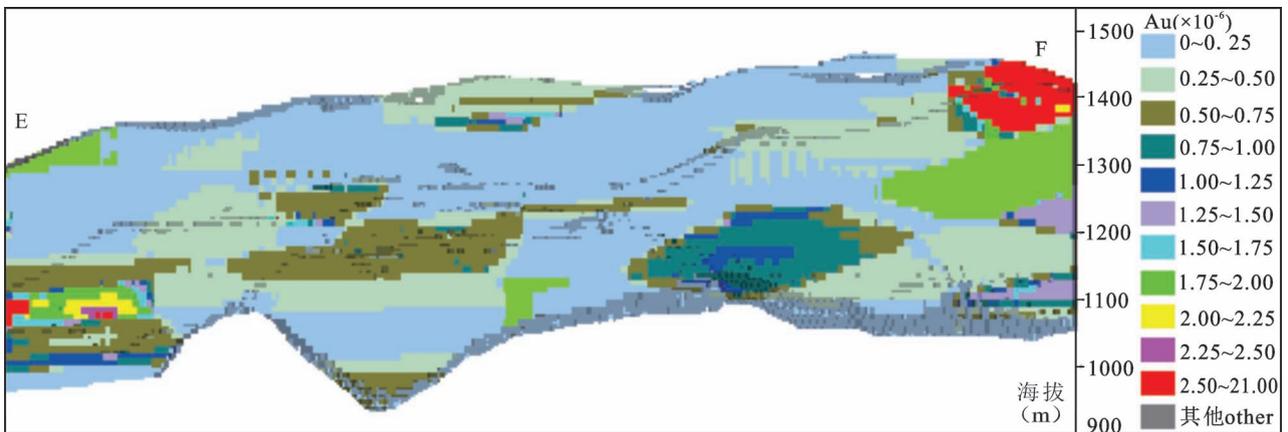
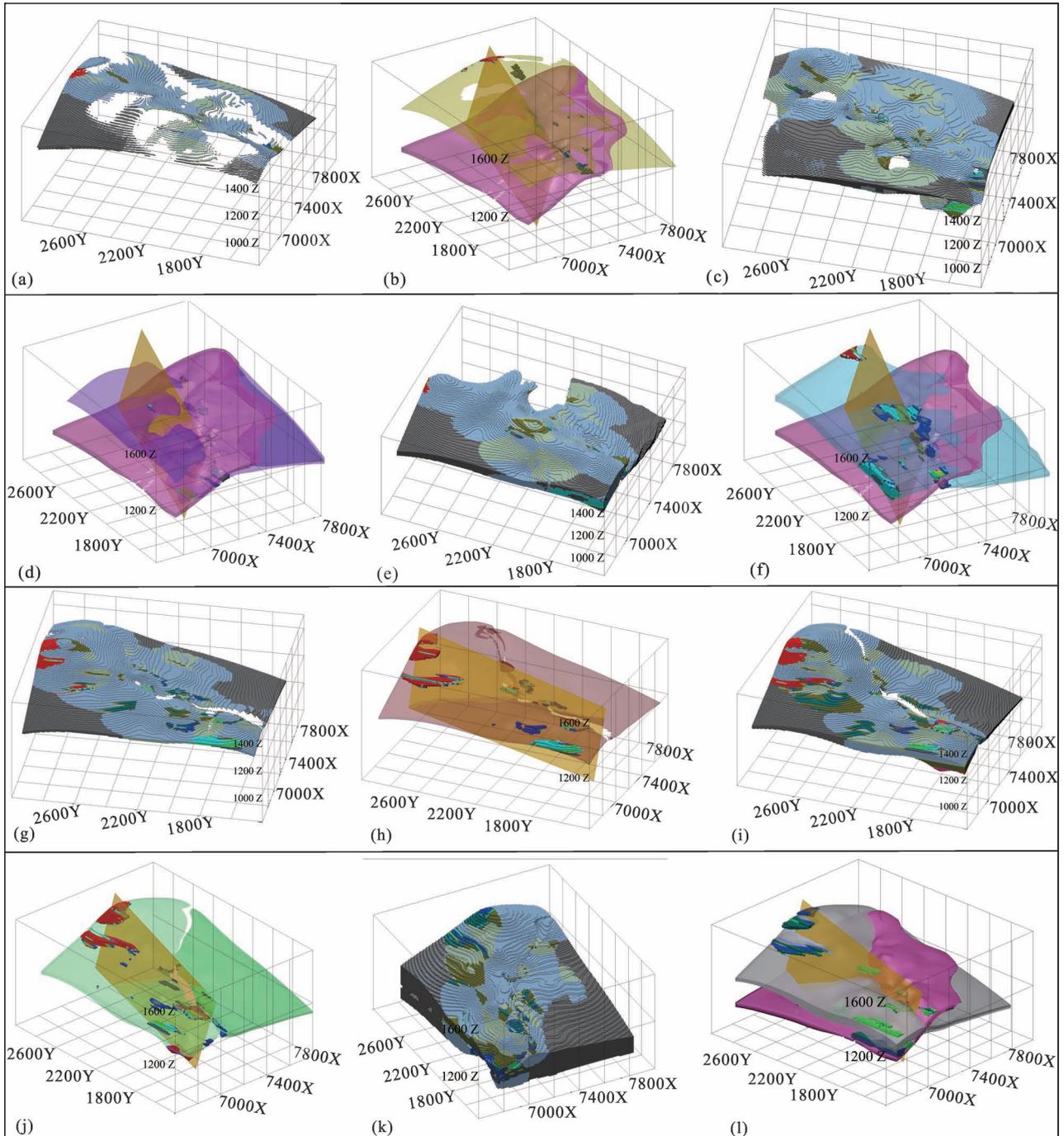


图 8 贵州西南二龙抢宝背斜轴向横切剖面图(EF 位置见图 1)
Fig. 8 Axial cross-sectional view of the Erlongqiangbao anticline, Pu'an, southwestern Guizhou (The location of EF is shown in Fig. 1)

而 Au 在地层中富集程度存在明显差异,在 P_2m 中,地层较厚,被 F1 错断,矿体主要分布在 F1 上盘中与 Sbt 和 F1 接触部位附近,随 F1 和 Sbt 产状产出,尤其在轴面、Sbt、 P_2m 、F1 接触带周围品位最高(图 9k,l),主要是由于 F1 运动以及 P_2m 内灰岩蚀变导致,也是 P_2m 在图 7 中高含量的 Au 对应岩石体积量多的原因。因此,把 F1 上盘内 P_2m 内蚀变矿体划入 F1 和 Sbt 内,而原生 P_2m 内的灰岩含金量较低,不成矿。在 Sbt、 P_3l^1 和 P_3l^2 中,矿体顺层产出,主要分布在 F1 两侧、背斜轴面附近、背斜轴面

与 F1 之间、背斜轴面倾向一侧的背斜翼部,且在地层与上下地层底顶部位、断层和背斜轴面交汇处, Au 含量较高(图 9e、f、g、h、i、j)。在 P_3l^3 中,矿体主要分布在 F1 下盘,断层与 P_3l^3 接触部位附近,品位较低(图 9c、d)。而 Q 中矿体为氧化矿,主要分布在背斜轴线附近(图 9a、b)。此外,在图 9 中,F1 的下盘几乎不含矿,而在实际生产研究中(Zheng Lulin et al., 2019),有部分矿体产出,主要是由于矿体埋藏深、前期施工钻孔未对下盘矿体进行有效控制所致。因此,利用整个模型图、矿床中 Au 含量分布



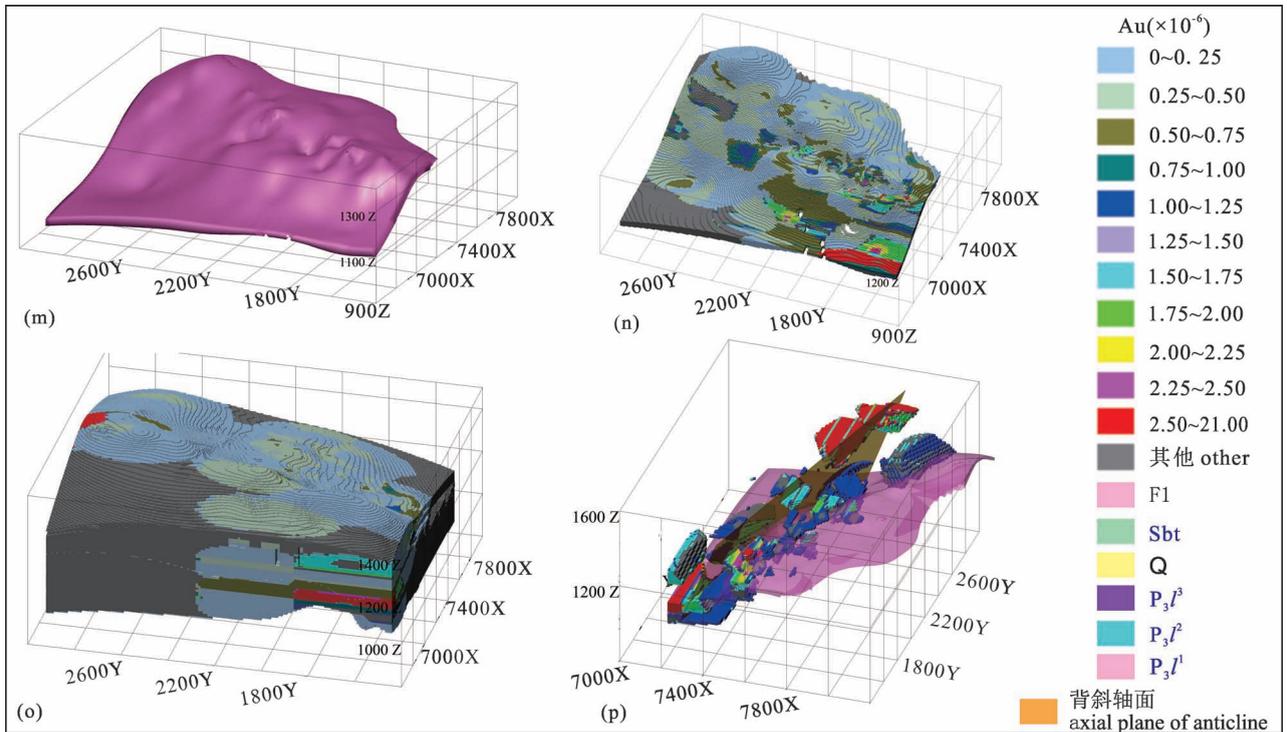


图9 贵州西南普安泥堡金矿床中 Au 含量分布图与对应矿体分布图

Fig. 9 Au content distribution map and corresponding ore body distribution map in the Nibao gold deposit, Pu'an, southwestern Guizhou

图中 a、c、e、g、i、k 和 b、d、f、h、j、l 分别对应 Q、 P_3l^3 、 P_3l^2 、 P_3l^1 、Sbt、 P_2m 中的 Au 含量分布图和矿体分布图；m 为 F1 的实体模型图；n 为 F1 的 Au 含量分布图；o 为矿床的 Au 含量分布图；p 为矿床的矿体分布图

The a, c, e, g, i, k and b, d, f, h, j, l in the map correspond to the Au content distribution map and the orebody distribution map in the Q, P_3l^3 , P_3l^2 , P_3l^1 , Sbt, P_2m , F1, respectively. The m is the entity model diagram of F1; n is the Au content distribution map of F1, o is the Au content distribution map of the deposit, and p is the orebody distribution map of the deposit

图、地层中 Au 含量分布图、二龙宝背斜轴向横切剖面图、以及断层 F1 与各地层矿体分布图对泥堡金矿床进行含金性统计分析和三维含金性分析。分析得出,矿床中 Au 含量为 $0.01 \times 10^{-6} \sim 20.41 \times 10^{-6}$, 平均为 0.39×10^{-6} , 集中分布于 $0.01 \times 10^{-6} \sim 0.67 \times 10^{-6}$ 。而 Au 矿体主要富集层位为 P_3l^2 、 P_3l^1 , 赋存位置为 Sbt、F1 内、F1 两侧、背斜轴面附近、背斜轴面与 F1 之间, 背斜轴面倾向一侧的背斜翼部。同时, Au 随地层和断层层状产出, 在纵向和横向上分布不均匀, 具有斑块状分布及带状连续分布特点, 表现出 Au 在斑块处含量高, 并向四周持续递减, 不存在较大跳跃。

4 成矿模式探讨

以往对泥堡金矿床开展了大量研究, 得出泥堡金矿床的物质来源于峨眉山幔热柱及深部岩浆 (聂爱国, 2009; 盛响元等, 2016; 郑禄林, 2017; Wu

Songyang et al., 2019; 陈军等, 2020), 流体主要来源于深源岩浆水、在向上迁移过程中混入了部分地层建造水、变质流体和大气降水 (谢贤洋等, 2016; 郑禄林等, 2019; Jin Xiaoye et al., 2020, 2021)。同时, 成矿流体在向上迁移过程中, 流体渗透压逐渐减小, 而矿床中的 Au 在高围压状态下被捕获 (Zhang Xingchun et al., 2003)。郑禄林 (2017) 通过对泥堡金矿床成矿期中的石英、方解石流体包裹体研究, 得出成矿流体压力约 32 MPa; 邵主助等 (2019) 同样对泥堡金矿床中 F1 内的方解石脉和石英脉进行流体包裹体研究, 得出成矿流体压力为 26.4 ~ 64.2 MPa, 平均为 42.0 MPa, 显示成矿流体具有超压流体特征, 同时反映深部流体处于超高压状态。此外, 学者们 (郑禄林, 2017; 吴松洋, 2019; 郑禄林等, 2019; Jin Xiaoye et al., 2020) 在对泥堡金矿床研究中, 总结出泥堡金矿床为深部岩浆来源成矿模式。因此, 结合前人研究成果及金的三维富集规律, 推测含金热

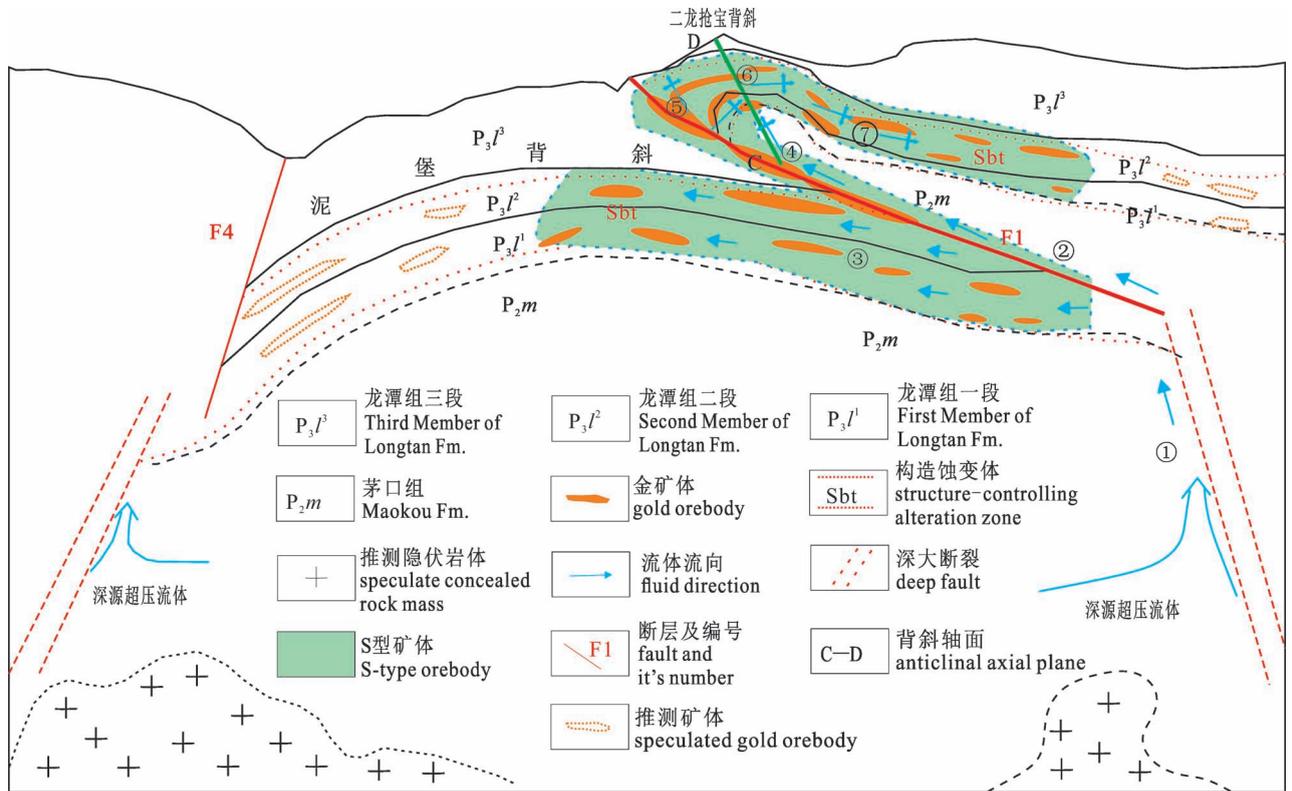


图 10 贵州西南普安泥堡金矿床成矿模式示意图(据郑禄林,2017 修改)

Fig. 10 Schematic map of the mineralization model of the Nibao gold deposit, Pu'an, southwestern Guizhou (modified after Zheng Lulin, 2017&)

液运移及金的富集成矿过程如下:深部含 Au 热液沿着深大断裂向上运移,进入次一级断层 F1 中(靳晓野,2017;谢贤洋,2018),后热液沿着 F1 穿过被错开的 P₂m 灰岩到达②(图 10),此处 F1 的上盘接触地层为 P₂m 灰岩、渗透性差,而下盘与 Sbt、P₃l¹、P₃l² 接触,岩性为角砾状凝灰岩、含凝灰质次生石英岩、硅质岩、沉凝灰岩、粉砂岩等,渗透性较好。因

此,深源超压流体在此渗透压得到释放,部分流体流入 F1 下盘 Sbt、P₃l¹、P₃l² 中,并发生成矿作用,使 Au 富集成矿;同时部分流体继续沿 F1 破碎带上移,在 F1 的④~⑤段,由于 F1 和二龙抢宝背斜的形成,导致 F1 上下盘渗透性不同。F1 为逆断层,在下盘中,地层遭受挤压,孔隙率降低,使岩石坚实,不易侵蚀,而上盘在 F1 形成时,地层间滑脱弯曲,形成牵引褶

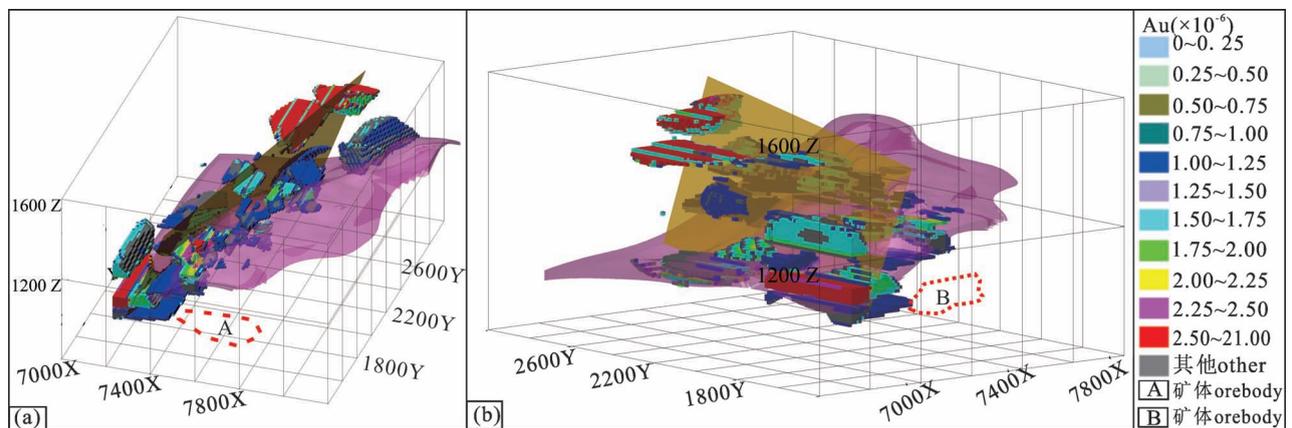


图 11 贵州西南普安泥堡金矿床矿体分布图(A 与 B 为断层 F1 下盘中 P₃l¹、P₃l² 内的矿体)

Fig. 11 Orebody distribution map of the Nibao gold deposit, Pu'an, southwestern Guizhou (A and B are the ore bodies in P₃l¹ and P₃l² in the lower disk of the fault F1)

皱(二龙宝背斜),在此过程中岩石拉张,层间滑脱构造发育,尤其在背斜轴面上,拉张力大,甚至塑脆性差异较大部位形成虚脱空间,导致上盘孔隙率大,渗透性好,易被流经的流体侵蚀,使地层渗透性更好,以至于F1中流体到断层下盘渗透势差减小,到上盘的渗透势差增大。因此,沿F1流动的流体到④后,流体渗透压再次释放,部分流体会继续沿着F1运动、穿过⑤、流向地表,同时有部分流体沿着二龙抢宝背斜轴面破碎带、Sbt、 P_3l^1 、 P_3l^2 等渗透性好的层面流入二龙抢宝背斜。在Au的三维含金性分析中得出,在F1下盘的 P_3l^1 、 P_3l^2 地层、F1破碎带和二龙抢宝背斜中有矿体产出,且矿体空间形态呈“S”型(图10、图11)。而“S”矿体的形成明显受流体运移、地层岩性、断层和背斜制约,具有下部为透性差和厚度大的地层(P_2m)、上部为透性好的地层(P_3l^1 、 P_3l^2)、Sbt、逆断层(F1)和由逆断层形成的背斜(二龙抢宝背斜)等地质特征。因此,当深源超压含Au流体沿着深大断裂迁移,进入逆断层,会在逆断层下盘透性好的地层、Sbt、逆断层破碎带和逆断层形成的背斜中形成产状呈“S型”的矿体趋势,上述三个空间位置均为Au有利的成矿部位。

此外,在二龙抢宝背斜中,F1、背斜轴面和地层均为渗透性较好的流体通道,且两两相交。当深部超压流体沿F1上移,流入二龙抢宝背斜内的流体,会在三者之间互相补给,并渗透进入岩石孔隙、节理、裂隙中,发生成矿作用成矿。因此,流体在二龙抢宝背斜的流体整体迁移方向为①→②→④→⑤→⑥→⑦、①→②→④→⑥→⑦、①→②→④→⑦,局部流体迁移存在互相补给现象,使Au在F1破碎带内、背斜轴面两侧,背斜轴面与F1之间,背斜轴面倾向一侧的背斜翼部等有利成矿部位成矿,而在Au的三维含金性分析中,在这些部位均有对应矿体产出(图10、图11)。同时,根据二龙抢宝背斜处岩性、构造、渗透性、流体方向等特点对有利成矿部位分析,存在可能成矿优先级,依次由高到低为F1破碎带内、背斜轴面附近,背斜轴面与F1之间、背斜轴面倾向一侧的背斜翼部。

因此,上述两个成矿过程可归纳为“S”型和“断层+背斜轴面”两种成矿模。

5 结论

(1)泥堡金矿床中Au的三维富集规律体现为:矿体主要富集层位为上二叠统龙潭组二段和一段(P_3l^2 和 P_3l^1),赋存位置为构造蚀变体(Sbt)、F1断

层内、F1断层两侧、背斜轴面附近、背斜轴面与F1断层之间,背斜轴面倾向一侧的背斜翼部。同时,Au随地层和断层层状产出,在纵向和横向上分布不均匀,具有斑块状分布及带状连续分布特点,表现出Au在斑块处含量高,并向四周持续递减过程。

(2)泥堡金矿床的流体流向为深源超压流体沿着深大断裂迁移,进入F1断层,穿过渗透性差的中二叠统茅口组(P_2m)灰岩,后经过F1断层下盘渗透性强的上二叠统龙潭组二段和一段(P_3l^1 、 P_3l^2)地层,强渗透压释放,部分流体流入其中,同时部分流体继续沿F1断层破碎带上移,到二龙抢宝背斜时,渗透压再次释放,使得部分流体流入二龙抢宝背斜。

(3)泥堡金矿床存在“S”型和“断层+背斜轴面”两种成矿模式。

致谢:感谢审稿专家和编辑对本论文提出宝贵的修改意见。

注释 / Note

① 贵州省地矿局 105 地质大队. 2013. 贵州省普安县泥堡金矿资源/储量核实及勘探报告.

参考文献 / References

(The literature whose publishing year followed by a “&” is in Chinese with English abstract; The literature whose publishing year followed by a “#” is in Chinese without English abstract)

- 陈军, 黄智龙, 杨瑞东, 杜丽娟, 苏文超, 郑禄林, 叶霖. 2020. 右江盆地 SEDEX 金矿化类型的发现及意义. 科学通报, 65(15): 1486~1495.
- 高伟. 2018. 桂西北卡林型金矿成矿年代学和动力学. 导师: 胡瑞忠. 贵阳: 中国科学院地球化学研究所博士学位论文.
- 蒋新艳. 2018. 基于 3Dmine 的矿山三维模型建模及应用. 导师: 朱大明. 昆明: 昆明理工大学硕士学位论文.
- 靳晓野. 2017. 黔西南泥堡、水银洞和丫他金矿床的成矿作用特征与矿床成因研究. 导师: 李建威. 武汉: 中国地质大学博士学位论文.
- 聂爱国. 2007. 黔西南卡林型金矿的成矿机制及成矿预测. 导师: 秦德先. 昆明: 昆明理工大学博士学位论文.
- 邵玉助, 彭振安, 蔡明海, 张含, 胡志成, 刘嘉兴. 2019. 贵州泥堡金矿成矿流体特征及其地质意义. 科学技术与工程, 19(14): 46~56.
- 盛响元, 朱笑青, 李晓霞, 黄艳. 2016. 贵州泥堡卡林型金矿床的钢铁矿标型特征与成矿物质来源. 矿物学报, 36(4): 563~570.
- 陶晓丽. 2015. 基于 3DMine 的矿山三维地质建模研究. 导师: 张丽萍. 兰州: 兰州交通大学硕士学位论文.
- 王疆丽. 2014. 贵州省普安县泥堡金矿床地球化学特征与成因探讨. 导师: 林方成. 北京: 中国地质科学院硕士学位论文.
- 韦东田, 夏勇, 谭亲平, 谢卓君, 闫俊, 郭海燕, 刘建中. 2016. 黔西南泥堡金矿围岩与矿石的对比及其成矿机制研究. 岩石学报, 32(11): 3343~3359.
- 吴松洋, 侯林, 丁俊, 张锦让, 朱斯豹, 王疆丽. 2018. 贵州泥堡金矿床原生晕特征及深部找矿预测——以 III-1 号矿体为例. 矿

- 物岩石地球化学通报, 37(4): 674~686.
- 吴松洋. 2019. 黔西南卡林型金矿构造—岩浆—热液成矿模式研究. 导师: 邓军. 北京: 中国地质大学博士学位论文.
- 谢贤洋, 冯定素, 陈懋弘, 郭申祥, 况顺达, 陈恨水. 2016. 贵州泥堡金矿床的流体包裹体和稳定同位素地球化学研究及其成矿成因意义. 岩石学报, 32(11): 3360~3376.
- 谢贤洋. 2018. 贵州泥堡金矿床成矿流体和成矿机制研究. 导师: 陈懋弘. 北京: 中国地质科学院硕士学位论文.
- 张权平, 陈建平, 陈雪薇, 李国超, 刘畅, 朱静. 2020. 贵州烂泥沟金矿三维定量预测. 地球学报, 41(2): 193~206.
- 郑禄林. 2017. 贵州西南部泥堡金矿床成矿作用与成矿过程. 导师: 杨瑞东. 贵阳: 贵州大学博士学位论文.
- 郑禄林, 杨瑞东, 陈军, 高军波, 张旭, 魏怀瑞. 2017. 黔西南普安泥堡大型金矿床黄铁矿与毒砂标型特征及金的赋存状态. 地质论评, 63(5): 1361~1377.
- 郑禄林, 杨瑞东, 刘建中, 高军波, 陈军, 程伟. 2019. 黔西南普安县泥堡大型金矿床地质地球化学特征与矿床成因探讨. 地质论评, 65(6): 1363~1382.
- Chen Jun, Huang Zhilong, Yang Ruidong, Du Lijuan, Su Wenchao, Zheng Lulin, Ye Lin. 2020&. Discovery of SEDEX gold in the Youjiang basin, SW China; Implications for a new type Au mineralization. Chinese Science Bulletin, 65(15): 1486~1495.
- Chen Maohong, Leon Bagas, Liao Xin, Zhang Zhiqiang, Li Qiuli. 2019. Hydrothermal apatite SIMS Th Pb dating; Constraints on the timing of low-temperature hydrothermal Au deposits in Nibao, SW China. Lithos, 324~325: 418~428.
- Gao Wei. 2018#. Geochronology and dynamics of Carlin-type gold deposits in the Youjiang basin (NW Guangxi). Mentor: Hu Ruizhong. Guiyang: Institute of Geochemistry, Chinese Academy of Sciences, China, Ph. D. thesis.
- Jin Xiaoye. 2017&. Geology, mineralization and genesis of the Nibao, Shuiyindong and Yata gold deposits in SW Guizhou province, China. Mentor: Li Jianwei. Wuhan: China University of Geosciences. Ph. D. thesis.
- Jiang Xinyan. 2018#. Modeling and application of mine 3D model based on 3dmine. Mentor: Hu Daming. Kunming: A dissertation for master degree submitted to Kunming University of Science and Technology.
- Jin Xiaoye, Hofstra A H, Hunt A G, Liu Jianzhong, Yang Wu, Li Jianwei. 2020. Noble gases fingerprint the source and evolution of ore-forming fluids of Carlin-type gold deposits in the Golden Triangle, South China. Economic Geology, 115(2): 455~469.
- Jin Xiaoye, Yang Chengfu, Liu Jianzhong, Yang Wu. 2021. Source and Evolution of the Ore-Forming Fluids of Carlin-Type Gold Deposit in the Youjiang Basin, South China; Evidences from Solute Data of Fluid Inclusion Extracts. Journal of Earth Science, 32(1): 185~194.
- Nie Aiguo. 2007&. A mineralization mechanism as well as minerogenetic prospe carlin-type gold deposit in southwestern of Guizhou. Mentor: Li Deqin. Kunming: Kunming University of Science and Technology, Ph. D. thesis.
- Shao Zhuzhu, Peng Zhenan, Cai Minghai, Zhang Han, Hu Zhishu, Liu Jiaying. 2019&. Characteristics of ore-forming fluids its geological significance in the Nibao gold deposit, Guizhou. Science Technology and Engineering, 19(14): 46~56.
- Sheng Xiangyuan, Zhu Xiaoping, Li Xiaoxia, Huang Yan. 2016&. Typomorphic characteristics of pyrite and source of ore-forming materials in Nibao carlin type gold. Acta Mineralogica Sinica, 36(4): 563~570.
- Tao Xiaoli. 2015&. 3D geologic modeling of mines based on 3DMine. Mentor: Zhang Liping. Lanzhou: A dissertation for master degree submitted to Lanzhou Jiaotong University.
- Wang Jiangli. 2014&. Geological and geochemistry characters of Nibao gold deposit of Pu - an county in Gui - zhou province and the discussion on its genesis. Mentor: Lin Fangcheng. Beijing: A Dissertation for Master Degree Submitted to Chinese Academy of Geological Sciences.
- Wei Dongtian, Xia Yong, Tan Qiping, Xie Zhuojun, Yan Jun, Guo Haiyan, Liu Jianzhong. 2016&. Comparative study of the wallrock and ore and ore forming mechanisms at the Nibao gold deposit, Guizhou, China. Acta Petrologica Sinica, 32(11): 3343~3359.
- Wei Dongtian, Xia Yong, Daniel G D, Jeffrey S A, Tan Qiping, Xie Zhuojun, Liu Xijun. . 2020. Multistage pyrites in the Nibao disseminated gold deposit, southwestern Guizhou Province, China: Insights into the origin of Au from textures, in situ trace elements, and sulfur isotope analyses. Ore Geology Reviews, doi: 10.1016/j.oregeorev.2020.103446
- Wu Songyang, Hou Lin, Ding Jun, Zhang Jinrang, Zhu Sibao, Wang Jiangli. 2018&. Primary halo characteristics and deep ore body prospecting of the Nibao gold deposit, Guizhou Province; Illustrated with the example of III - 1 orebody. Bulletin of Mineralogy, Petrology and Geochemistry, 37(4): 674~686.
- Wu Songyang, Hou Lin, Jowitt S M, Ding Jun, Zhang Jinrang, Zhu Sibao, Zhao Zhenyu. 2019. Geochronology, geochemistry and petrogenesis of Late Triassic dolerites associated with the Nibao gold deposit, Youjiang Basin, southwestern China; implications for post-collisional magmatism and its relationships with Carlin-like gold mineralization. Ore Geology Reviews, doi: 10.1016/j.oregeorev.2019.102971
- Wu Songyang. 2019&. The study of tectonic - magmatic - hydrothermal metallogenic Model of carlin - type gold deposit in southwestern Guizhou Province, China. Mentor: Deng Jun. Beijing: China University of Geosciences, Ph. D. thesis.
- Xie Xianyang, Feng dingsu, Chen Maohong, Guo Shenxiang, Kuang Shunda, Chen Henshui. 2016&. Fluid inclusion and stable isotope geochemistry study of the Nibao gold deposit, Guizhou and insights into ore genesis. Acta Petrologica Sinica, 32(11): 3360~3376.
- Xie Xiangyang. 2018&. Ore-forming fluid and metallogenic mechanism study of the Nibao gold deposit, Guizhou province. Mentor: Chen Maohong. Beijing: A dissertation for master degree submitted to Chinese Academy of Geological Sciences.
- Zhang Quanping, Chen Jianping, Chen Xuewei, Li Guochao, Liu Chang, Zhu Jing. 2020&. 3D quantitative prediction in the Lannigou gold deposit, Guizhou Province. Acta Geoscientia Sinica, 41(2): 93~206.
- Zhang Kingchun, Spiro Baruch, Halls C, Stanley C J, Yang Keyou. 2003. Sediment - hosted disseminated gold deposits in southwest Guizhou, PRC: Their geological setting and origin in relation to mineralogical, fluid Inclusion, and stable - Isotope characteristics. International Geology Review, 45(5): 407~470.
- Zheng Lulin, Yang Ruidong, Gao Junbo, Chen Jun, Liu Jianzhong, He Yannan. 2016. Geochemical characteristics of the giant Nibao Carlin-type gold deposit (Guizhou, China) and their geological implications. Arabian Journal of Geosciences, 9(2): 108~123.
- Zheng Lulin. 2017&. Mineralization mechanism and ore-forming process of the Nibao gold deposit in southwestern Guizhou, China. Mentor:

Yang Ruidong. Guiyang: Guizhou University, Ph. D. thesis.
 Zheng Lulin, Yang Ruidong, Chen Jun, Gao Junbo, Zhang Xu, Wei
 Huairui. 2017. Typomorphic characteristics of pyrite,
 arsenopyrite and occurrence of gold in the giant Nibao gold deposit,
 Pu'an, southwestern Guizhou. *Geological Review*, 63(5): 1361~
 1377.
 Zheng Lulin, Yang Ruidong, Gao Junbo, Chen Jun, Liu Jianzhong, Li

Depeng. 2019. Quartz Rb-Sr isochron ages of two type orebodies
 from the Nibao Carlin-type gold deposit, Guizhou, China.
Minerals, 9(7): 3~15.
 Zheng Lulin, Yang Ruidong, Liu Jianzhong, Gao Junbo, Chen Jun,
 Chen Wei. 2019. Geological-geochemical characteristics and
 genesis of the large Nibao gold deposit in southwestern
 Guizhou. *Geological Review*, 65(6): 1363~1382.

Study on three-dimensional gold enrichment regularity and metallogenic model of Nibao large-scale gold deposit, southwestern Guizhou

CAO Shengtao¹⁾, ZHENG Lulin²⁾, WEI Huairui¹⁾, CHEN Jun¹⁾, LI Junhai¹⁾

1) *College of Resources and Environmental Engineering, Guizhou University, Guiyang, 550025;*

2) *Mining College of Guizhou University, Guiyang, 550025*

Objectives: The Nibao gold deposit is one of the large gold deposits discovered in recent years in southwestern Guizhou. Previous studies mainly focus on the gold enrichment regularity and metallogenic process. However, the gold metallogenic model from the perspective of the three-dimensional gold enrichment regularity has not been studied.

Methods: In this paper, a 3Dmine software was utilized to model the strata, faults and ore bodies of the Nibao gold deposit in three-dimensional visualization.

Results: Results show that the ore body is stratified or occurs along the fault occurrence. Au mineralization mainly occurs in the strata of the 2nd and 1st Member of the Upper Permian Longtan Formation (P_3l^1 and P_3l^2), and is controlled by the tectonic alteration body (Sbt), fault F1, and the Erlongqiubao anticline. In addition, Au mineralization exhibits characteristics of patchy distribution and continuous band-shaped distribution, showing that Au content is high in local patches and decreases to the surrounding areas.

Conclusions: Based on the ore-forming material source, ore fluid source, and characteristics of stratum lithology, faults and anticline, the fluid flow path formed by the deposit is obtained. The "S-type" and "fault + anticline axis" metallogenic models are proposed, which has reference significance for further metallogenic prediction of the Nibao gold deposit and similar deposits.

Keywords: Nibao gold deposit; three-dimensional geological modeling; enrichment regularity; metallogenic model

Acknowledgements: We sincerely appreciate the editors' and anonymous reviewer's comments. This research was supported by the National Natural Science Foundation of China (No. 41962008)

First author: CAO Shengtao, male, born in 1996, master degree candidate, mainly engaged in the research on geology of gold deposit; Email: caoshengtao520@foxmail.com

Corresponding author: ZHENG Lulin, male, born in 1983, Ph. D., associate professor, mainly engaged in the research on geology of gold deposit; Email: zhenglulin1983@126.com

Manuscript received on: 2021-01-04; Accepted on: 2021-05-07; Network published on: 2021-05-20

Doi: 10. 16509/j. georeview. 2021. 05. 072

Edited by: LIU Zhiqiang