

湘东北万古矿区金矿迁移沉淀机制与找矿突破

王延波^{1*}, 林跃^{1#}, 王齐金²

¹湖南省地质灾害调查监测所, 湖南 长沙

²湖南省核地质调查所, 湖南 长沙

收稿日期: 2026年5月21日; 录用日期: 2026年7月16日; 发布日期: 2026年7月27日

摘要

湘东北万古矿区作为“江南造山带”上的关键成矿节点, 其金矿成因并非单一的纯沉积变质型, 而是“陆内造山热液叠加型”, 成矿混合流体具有“深源流体”与“壳源流体”双重属性。金的高效迁移依赖于流体中悬浮的纳米金颗粒(Au-NP)与硫氢络合物($\text{Au}(\text{HS})_2^-$)的协同作用, 而沉淀机制则主要受控于断层阀控引起的流体沸腾(Flash Vaporization)、围岩褪色化蚀变(菱铁矿诱发硫化)及有机质吸附-解吸附过程。在万古矿区东部实施的2000米级深部钻探验证了“深部找矿”模型的有效性, 证实了深部隐伏岩体与盲矿体的存在。

关键词

万古矿区, 造山型金矿, 迁移沉淀, 流体, 湘东北

Migration and Precipitation Mechanisms of Gold and Breakthrough in Prospecting in the Wangu Gold Deposit, Northeastern Hunan

Yanbo Wang^{1*}, Yue Lin^{1#}, Qijin Wang²

¹Hunan Provincial Geological Disaster Investigation and Monitoring Institute, Changsha Hunan

²Hunan Provincial Nuclear Geology Survey Institute, Changsha Hunan

Received: May 21, 2026; accepted: July 16, 2026; published: July 27, 2026

Abstract

The northeastern Hunan Wangu mining district, a critical metallogenic node within the Jiangnan

*第一作者。

#通讯作者。

文章引用: 王延波, 林跃, 王齐金. 湘东北万古矿区金矿迁移沉淀机制与找矿突破[J]. 地球科学前沿, 2026, 16(7): 1109-1116. DOI: 10.12677/ag.2026.167099

Orogenic Belt, hosts gold deposits whose genesis is not solely of pure sedimentary-metamorphic type but rather belongs to an “intracontinental orogenic hydrothermal overprinting type”. The ore-forming fluids exhibit dual characteristics, comprising both deep-sourced and crustal-derived components. Efficient gold migration relies on the synergistic interaction between suspended nanoparticulate gold (Au-NP) and hydrosulfide complexes ($\text{Au}(\text{HS})_2^-$) within the fluid. Precipitation is primarily controlled by fluid boiling (flash vaporization) induced by fault-valve mechanisms, wall-rock bleaching alteration (triggered sulfide formation associated with siderite), and organic matter adsorption-desorption processes. Deep drilling to depths exceeding 2000 meters in the eastern part of the Wangu district has validated the “deep prospecting” model, confirming the presence of concealed intrusions and blind ore bodies at depth.

Keywords

Wangu Mining District, Orogenic Gold Deposit, Migration Sedimentation, Fluid, Northeastern Hunan

Copyright © 2026 by author(s) and Hans Publishers Inc.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY 4.0).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



Open Access

1. 引言

平江县万古矿区是湘东北重要金矿聚集区，经长期开采与勘查积累了详实地质资料。在当前矿业整合与绿色开发背景下，系统梳理其成矿规律、明确找矿标识，对稳定资源储量、指引深部及外围勘查意义重大。湘东北地区金矿床集中，有万古、黄金洞、团山背、雁林寺等大型金矿床，构成了著名的“湖南金腰带”。其中，万古金矿田已探明金资源量超 300 吨，远景资源量预计达 1000 吨，是湖南省乃至全国重要的金矿产勘查基地。长期以来，关于湘东北金矿的成因存在“纯沉积变质型”与“岩浆热液型”的争论。随着深部勘查的推进与原位微区分析技术的应用，最新的研究证据表明，该区金矿形成于陆内造山环境，特别是 2020 年以来在 2000 米以深钻孔中发现的厚大矿体，挑战了传统的浅部成矿观念。本文旨在通过系统梳理万古矿区的地质背景，深入剖析金的迁移与沉淀机制，并结合矿区储量核实报告及最新的深部勘查成果进行综合研究，寻找新的金矿找矿突破。

2. 湘东北万古矿区地质背景

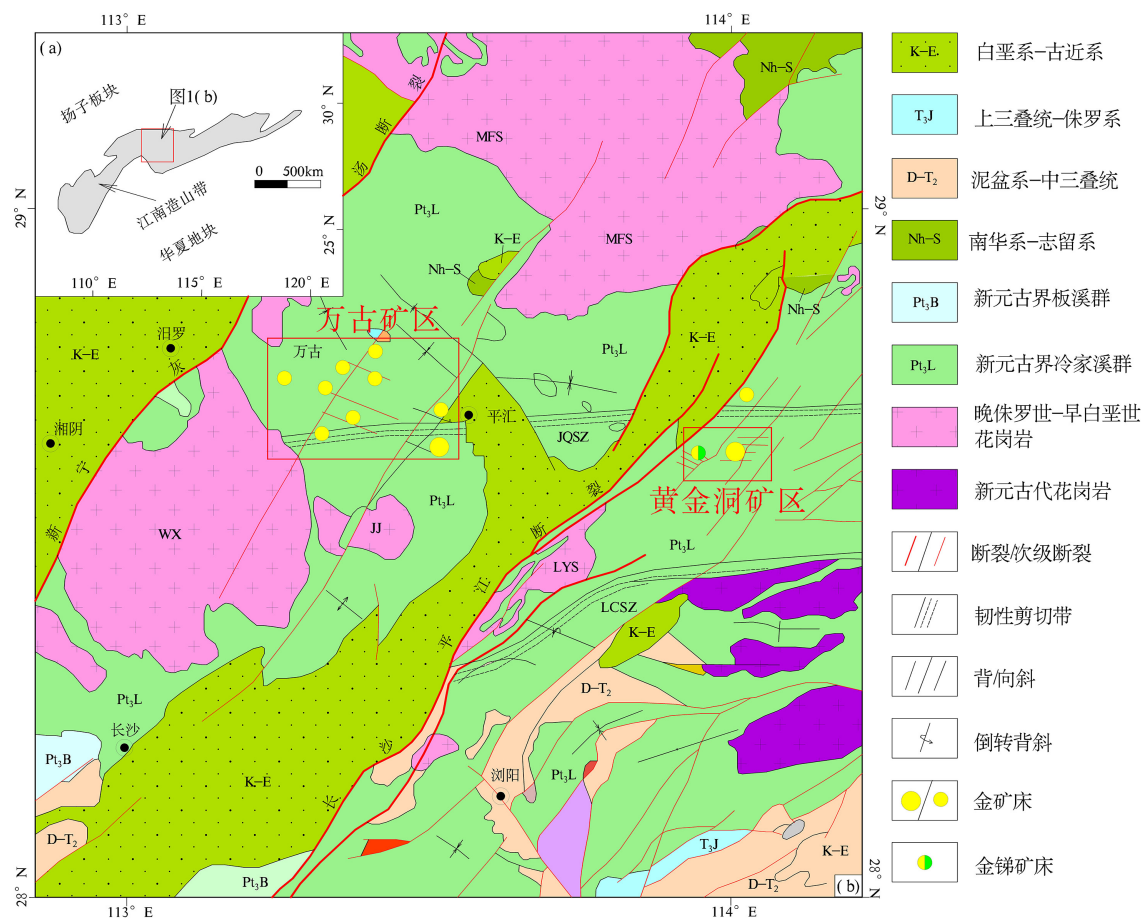
2.1. 大地构造位置与区域演化

湘东北地区地处江南造山带中部(图 1)，该带长 1500 km，宽 500 km。万古矿区从区域演化角度来看，该区经历了新元古代(860~820 Ma)：受古华南海板块向北西俯冲影响，形成弧后盆地环境，沉积了富含金元素的冷家溪群地层，随后的雪峰运动导致地层发生绿片岩相变质，使金元素活化并初步分散[1][2]；加里东期(430~410 Ma)：区域发生强烈的挤压造山作用，形成了大规模的韧性剪切带与褶皱，为成矿物质的初步富集提供了构造通道[3][4]；印支期至燕山期(227~130 Ma)：这是万古金矿田最主要的成矿期。伴随着陆内造山运动，深大断裂(如长平大断裂)活动剧烈，伴随广泛的中酸性岩浆侵入(如连云山花岗岩体)，为金矿的最终沉淀提供了热源、流体与部分成矿物质[5]。

2.2. 赋矿地层与围岩特征

地层岩性是控制金矿分布的物质基础。万古矿区出露地层主要为新元古界冷家溪群和板溪群，以及

覆盖其上的白垩系红层。冷家溪群(Pt₃ln)是矿区最主要的赋矿层位,尤其是坪原组(Pt₃ln pn),是成矿物质的主要“源库” [6]。



岩体代号: CSB——长三背岩体; DWS——大围山岩体; GTL——葛藤岭岩体; JJ——金井岩体; JXL——蕉溪岭岩体; LYS——连云山岩体; MFS——幕阜山岩体; WX——望湘岩体; ZF——张坊岩体。韧性剪切带代号: JQSZ——九岭-清水韧性剪切带; LCSZ——连云山-长沙韧性剪切带。

Figure 1. Tectonic and geological mineral map of northeastern Hunan Province
图 1. 湘东北地区大地构造及地质矿产图

围岩蚀变特征: 具绢云母化、碳酸盐化、硅化、褪色等蚀变。特别是“褪色化蚀变带”与金矿化密切, 岩石颜色由原来的青灰色变为灰白色或灰黄色, 常伴有菱铁矿斑点[5]。

2.3. 构造格架与控矿体系

万古矿区发育三组主要断裂构造, 构成了“网脉状”的控矿格局。NE 向断裂(导矿构造)在压力传递与流体运移中起主导作用[1], 以长平大断裂为代表, 这类深大断裂通常形成于新元古代, 经多期活化。它们是区域性的导矿通道, 引导深部成矿流体向上运移; NW 向断裂(容矿构造)为金矿流体提供了巨大的容矿空间与沉淀场所[2], 主要为韧性推覆剪切带或脆性破碎带(如泥湾断裂), 这类构造通常切穿地层或呈层间滑脱, 具有规模大、延伸深、破碎强烈的; EW 向断裂多为压扭性或张性断裂, 常作为 NW 向与 NE 向构造的次级派生裂隙, 控制矿体的侧伏与局部富集[4]。

3. 造山型金矿成矿流体与源解析

3.1. 成矿流体的地球化学特征

造山型金矿的形成依赖于特殊的流体体系。综合流体包裹体、同位素及微量元素分析, 万古矿区的成矿流体具有以下特征: 根据流体包裹体、同位素、微量元素综合分析表明流体主要为变质水或经水岩反应改性的混合水, 而非高盐度的纯岩浆流体[5]。流体成分以 $\text{H}_2\text{O}-\text{NaCl}-\text{CO}_2$ 体系为主, 早期阶段含少量 N_2 和 CH_4 , 后期逐渐演化为以 $\text{H}_2\text{O}-\text{NaCl}$ 体系为主。金在流体中主要以 $\text{Au}(\text{HS})_2^-$ 形式迁移, 表明流体具有还原性。主导迁移和沉淀机制:

石英 - 白钨矿阶段(高温氧化物阶段): 钨以($\text{ce}\{\text{WO}_4^{2-}\}$)络合物形式迁移, 白钨矿($\text{ce}\{\text{CaWO}_4\}$)沉淀受控于钙质围岩交代及流体降温($300^\circ\text{C}\sim 400^\circ\text{C}$)。地球化学约束: 微量元素: 白钨矿高 Mo、高 Eu/Eu^* (>1.5) 指示高氧逸度($\Delta\text{FMQ}+1.5$ 至 $+3.0$)。同位素: $\delta^{18}\text{O}$ 值 $+6\text{‰}$ 至 $+10\text{‰}$ (石英 - 白钨矿) 反映岩浆流体主导, 水岩反应弱。物理化学条件: 高温($400^\circ\text{C}\sim 500^\circ\text{C}$)、酸性、高氧逸度环境, 与深部花岗岩侵入相关。

石英 - 黄铁矿阶段(中温硫化物阶段): 硫化物沉淀由流体混合(大气降水注入)及温度下降($200^\circ\text{C}\sim 300^\circ\text{C}$)触发, 黄铁矿($\text{ce}\{\text{FeS}_2\}$)形成需还原条件。地球化学约束: 微量元素: 黄铁矿低 Co/Ni (<1)、高 As 含量, 指示中温还原环境; 白钨矿 Mo 含量骤降(如白石嶂 Wol (II) 阶段 $\text{Mo} < 60 \text{ ppm}$)、 Eu/Eu^* 降至 $0.5\sim 1.0$, 证实氧逸度降低。硫同位素: $\delta^{34}\text{S}$ 值 -5‰ 至 $+5\text{‰}$, 反映岩浆硫与地层硫混合。物理化学条件: 中温($250^\circ\text{C}\sim 350^\circ\text{C}$)、近中性 pH、还原条件($\Delta\text{FMQ}-1$ 至 $+1$), 伴随 CO_2 逸失导致碳酸盐化。

多金属硫化物阶段(中低温阶段): Pb、Zn、Cu 硫化物沉淀受控于流体沸腾、温度骤降($150^\circ\text{C}\sim 250^\circ\text{C}$)及 pH 升高, 如方铅矿 - 闪锌矿组合。地球化学约束: 元素分带: 闪锌矿 Fe/Mn 比值 >10 指示高温残留, 低 Ga/Ge 比值(<5)佐证低温热液环境。稀土元素: 碳酸盐矿物 Ce 负异常($\text{Ce}/\text{Ce}^* < 0.8$)及白钨矿 Y/Ho 比值异常(>44), 反映大气降水混入。物理化学条件: 低温($<250^\circ\text{C}$)、碱性、强还原环境, 常见于断裂带开放系统。

演化关系与驱动因素温度 - 氧逸度协同演化。高温阶段(白钨矿)→中温阶段(黄铁矿)→低温阶段(Pb-Zn 硫化物), 氧逸度持续降低(Eu/Eu^* 从 >1.5 降至 <0.5), 温度下降主导矿物相变, 流体来源转变为早期岩浆流体(高 $\delta^{18}\text{O}$)向晚期大气降水混合(低 $\delta^{18}\text{O}$)过渡。关键触发机制为水岩反应, 钙质围岩提供 Ca^{2+} 促使白钨矿沉淀。断裂活动引发流体混合与沸腾, 导致硫化物快速析出。流体密度随温度降低和盐度变化而逐渐增大, 范围在 $0.684\sim 0.982 \text{ g/cm}^3$ 之间。

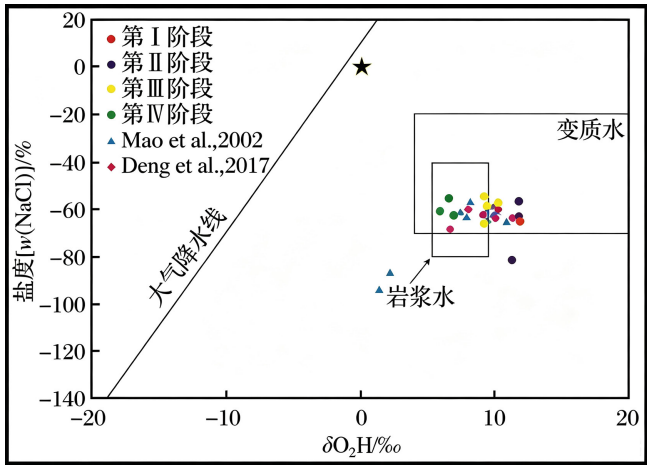


Figure 2. H-O isotope composition diagram of the Jiangdong and Wangu gold deposits [1]
图 2. 江东金矿床和万古金矿床 H-O 同位素组成图解[1]

据江东金矿和万古金矿同位素特征 H-O 同位素分析表明,成矿流体主要来源于岩浆流体,可能与燕山期岩浆活动有关, δD 和 $\delta^{18}O$ 值显示流体经历了岩浆-热液演化过程(图 2)。最新的硫同位素($\delta^{34}S \approx 0\%$)及有机地球化学研究指出,万古金矿床的流体具有“深源流体”属性,流体可能携带了来自深部地幔或岩石圈的物质,这种深源流体的加入,为金矿化提供了额外的能量与物质来源[7]。

所以,成矿阶段演化本质是热液系统物理化学参数的连续变化,地球化学指标(如白钨矿 Mo-Eu、黄铁矿 Co/Ni)可定量反演氧逸度-温度-流体组成的耦合关系,为深部找矿提供理论依据。

3.2. 成矿物质来源

关于金的来源,目前的共识逐渐倾向于“壳源为主,深部叠加”。

主要来源:冷家溪群地层中含有大量富碳沉积岩与硫化物,这些岩石在新元古代变质过程中释放了巨量的金、硫与碳,构成了矿床物质的基础[6]。

次要来源:燕山期岩浆热液活动,通过深部流体通道,对围岩进行了“淋滤”与“萃取”,并将部分金元素搬运至浅部成矿带。

4. 金的迁移与高效沉淀机制

4.1. 金的迁移形式

硫氢络合迁移:在中低温、弱还原、pH 近中性的流体环境中,Au 主要与 H_2S 结合形成 $Au(HS)_2^-$ 络合物。 CO_2 的存在缓冲了流体的 pH 值,防止了络合物的解离,从而保证了金在长距离运移过程中的稳定性[5][8]。

纳米金(Nano-Au)悬浮迁移:这是解释“高品位盲矿体”的关键机制。研究发现,金可以形成尺寸在 1~100 nm 范围内的金属颗粒,悬浮在富碳热液流体中。这种“纳米金”具有极高的迁移容量,其搬运效率比溶解态金高出约 5000 倍。在流体快速运移过程中,大量的金以固态纳米颗粒的形式聚集,一旦遇到沉淀触发机制,便形成富集中心[9]。

4.2. 金的沉淀触发机制

金的沉淀是一个多机制耦合的物理化学过程,主要包括以下三个关键环节:

流体沸腾与不混溶(Flash Vaporization):这是最主要的沉淀机制。当富含 CO_2 的热液沿断裂上升,穿过压力较低的断层破碎带时,会发生“闪蒸”现象。流体中挥发分(CO_2, H_2O)迅速气化,导致流体体积急剧膨胀(流体不混溶)。这一过程瞬间降低了流体中 H_2S 的溶解度,导致大量 H_2S 以气泡形式逸出,破坏了 $Au(HS)_2^-$ 络合物的稳定性,迫使金迅速从流体中析出沉淀[8][9]。

围岩化学蚀变(Sulfidation):流体与围岩中的菱铁矿($FeCO_3$)发生反应,消耗了围岩中的铁与碳酸盐,诱发了强烈的硫化作用。反应生成的黄铁矿晶格成为金沉淀的理想载体(载金矿物),同时流体中氧逸度的降低也有利于金的还原沉淀[5]。

有机质解吸附与相分离:在成矿晚期,随着温度降低或氧逸度升高,深部携带的“金-有机质”络合物发生解吸附,金被释放出来。同时,流体可能发生液-液相分离,高密度的富含金的液滴沉降并聚集,形成富集中心[7]。

5. 深部勘查与找矿突破

5.1. 深部找矿模型的建立

通过系统分析区域地质构造、地层、岩浆活动等因素,总结金矿成矿规律,利用地质、地球物理、地

球化学等多源数据,构建矿区三维地质结构模型,提出“成矿规律研究+三维地质建模+可控源音频大地电磁测深”的综合找矿技术方法,构建“三位一体”找矿预测地质模型,即成矿地质体、成矿构造与成矿结构面、成矿作用特征标志的综合模型。

基于上述成矿机制,万古矿区成功建立并验证了“深部隐伏岩体驱动、断裂控矿、侧伏与深伏延伸”的找矿模型。通过深部物探资料分析,矿区深部存在低电阻率体,推测为隐伏的燕山期侵入体或岩基,该岩体为成矿流体提供了持续的热动力来源[2]。金矿体在空间分布上受地层、构造和成矿流体等多因素控制,呈现出垂向分带、水平条带、构造交汇富集等规律(如图3)。

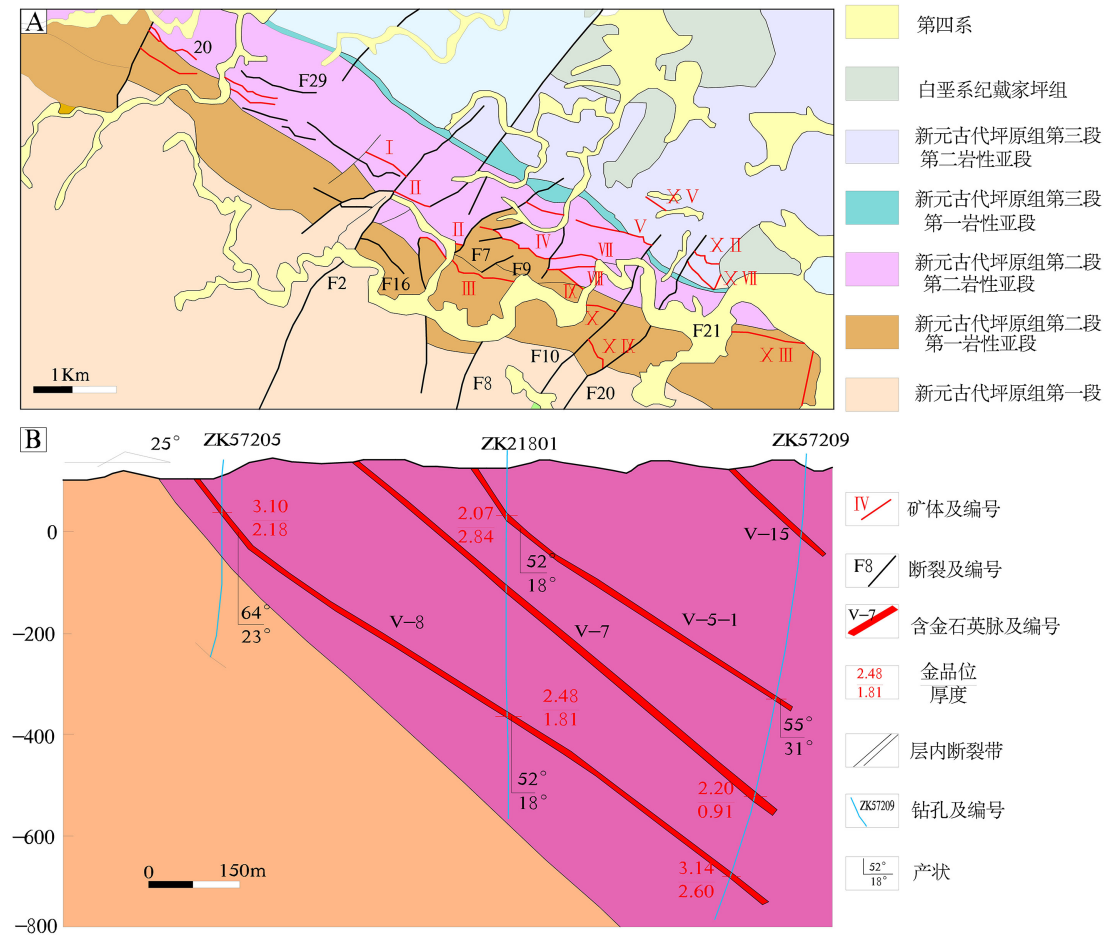


Figure 3. Geological sketch map and structural profile of the Wangu gold deposit
图3. 万古金矿地质简图及构造剖面略图[4]

5.2. 找矿突破

万古矿区自1991年通过水系沉积物异常首次发现金矿化,随着地质找矿技术进步和国家找矿突破战略行动的推进,运用三维地质建模、可控源音频大地电磁测深等先进技术,通过实施“攻深找盲”,在万古矿区深部(2000 m级)、边部开展勘探,2020年至今取得重大突破,发现超40条金矿脉,金品位最高达138 g/t,万古金矿田核心区累计探获金资源量已突破300吨,远景资源量预测超过1000吨,确立了其作为世界级超大型金矿田的地位。

深部钻探验证：实施了多个 2000 米级深部勘查示范钻孔(如图 4)。在-1500 m 至-2000 m 深部，成功揭露了厚度大、品位高的金矿体。ZK808 钻孔在 1900 m 深处见矿，平均品位达 4.35×10^{-6} ，证实了深部找矿模型的可靠性。

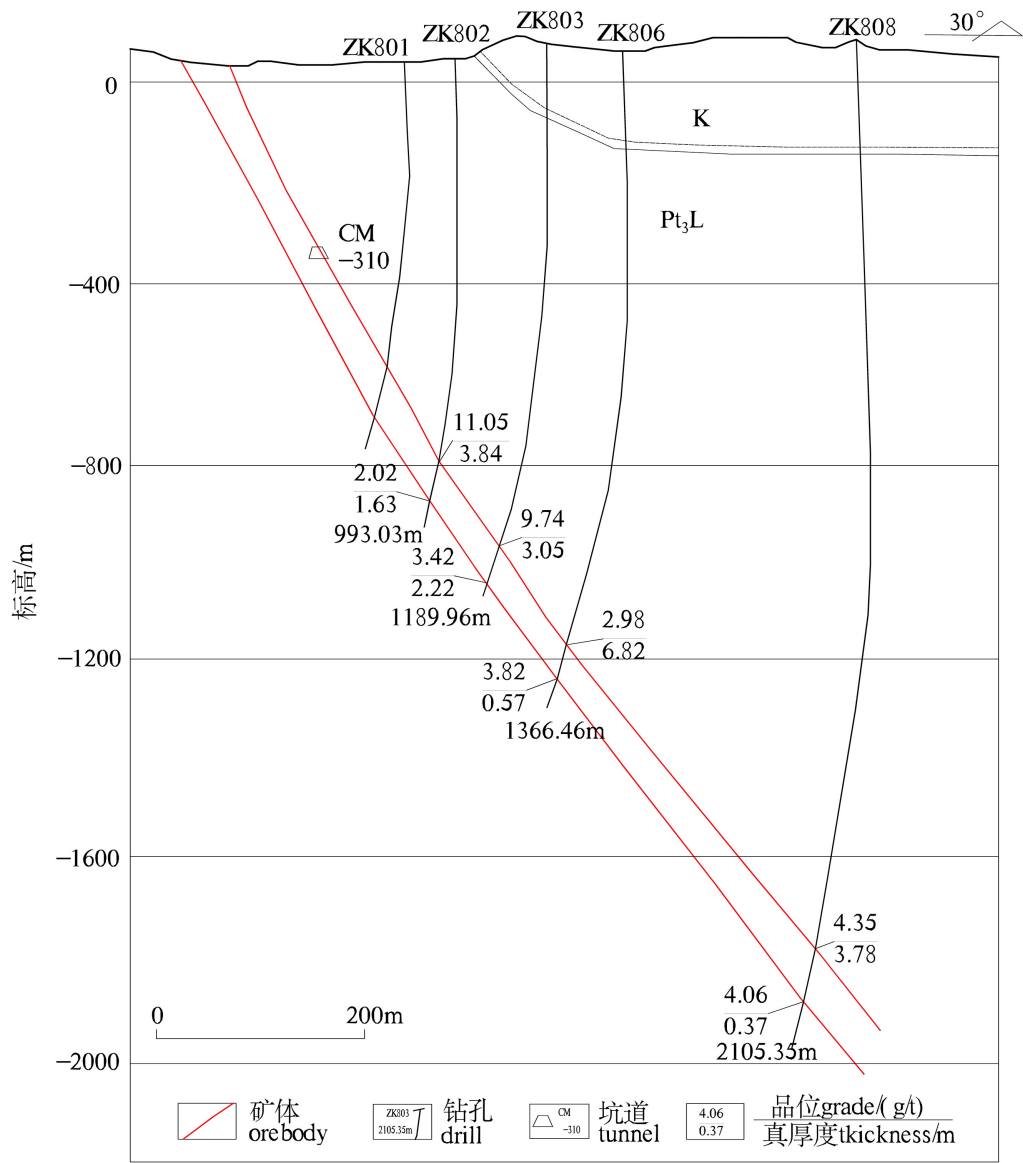


Figure 4. Section map of the 8th exploration line for deep gold deposit verification in the Wangu mining area, northeastern Hunan

图 4. 湘东北万古矿区金矿深部验证 8 线剖面图

5.3. 找矿标志

构造标志：北东向深大断裂、北西向韧性剪切带的交汇部位；断层破碎带宽度大、硅化强的地段。

围岩蚀变标志：地表出现大规模的“褪色化蚀变”板岩带，伴有菱铁矿化、硅化及强烈的碳酸盐化。

地球化学标志：土壤或水系沉积物中 Au、Ag、As、Sb、W 的组合异常，As、Sb 的高背景值往往指示深部存在活化的矿源层。

6. 结论与展望

6.1. 结论

本文针对湘东北万古矿区造山带型金矿的“源-运-储”机制进行了系统剖析,得出以下结论:

(1) 成矿性质: 万古金矿床属于受陆内造山运动控制的、具有深源流体特征的构造-岩浆热液叠加型金矿床。

(2) 流体与物质: 成矿流体为中低温、低盐度、富 CO_2 的混合流体, 兼具壳源变质水与幔源/深部岩浆水的属性。成矿物质主要来源于冷家溪群地层, 深部热液起到了“萃取”与“活化”的作用。中温、中盐度富 CO_2 的岩浆热液体系, 随成矿阶段演化逐渐向低温、低盐度的 $\text{H}_2\text{O}-\text{NaCl}$ 体系转变, 金以有机络合物形式迁移, 流体不混溶作用和水-岩反应是金沉淀的主要机制。

(3) 沉淀机制: 金的富集是流体沸腾(相分离)、围岩硫化蚀变(化学沉淀)以及纳米金胶体运移等多重机制共同作用的结果。

(4) 深部潜力: 深部隐伏岩体与断裂控矿规律的确认, 为矿区向 2000 米以深延伸提供了坚实的理论依据。

6.2. 展望

未来的工作应继续深化“深部找矿”, 重点针对矿区东部红层覆盖区及深部隐伏构造进行探索。建议进一步应用深穿透地球物理勘探技术(如广域电磁法)与深部钻探工程, 验证“侧伏”与“深伏”矿体的延伸规律; 通过分析土壤地球化学场中汞组分的演化规律和异常结构, 判断深部矿体延伸情况, 多峰模式烃类异常表明深部存在多条平行盲脉, 对偶双峰异常模式提示矿体向深部延伸良好, 为深部找矿提供地球化学证据。力争在万古矿区 3000 米以浅范围内取得新的金矿资源突破。

参考文献

- [1] 袁梓焜, 邵拥军, 刘清泉, 张毓策, 王智琳, 等. 湘东北万古金矿田江东金矿床成因——流体包裹体和 H-O 同位素制约[J]. 黄金科学技术, 2024, 32(4): 559-578.
- [2] 柏道远, 蒋启生, 李彬, 姜文, 李银敏, 等. 湘东北冷家溪群沉积岩地球化学特征及其构造意义[J]. 地质科技通报, 2021, 40(1): 1-13+26.
- [3] 柏道远, 李彬, 江华军, 等. 湘东北黄金洞金矿区构造变形序列、控矿构造属性及其控矿模式[J]. 地质通报, 2026, 45(1): 20-45.
- [4] 曾广乾, 穆家乐, 柏道远, 等. 湘东北黄金洞金矿田控矿构造解析与找矿方向[J/OL]. 矿物岩石地球化学通报, 2025: 1-18. <https://link.cnki.net/urlid/52.1102.P.20251201.1458.002>, 2025-12-02.
- [5] 尹樱, 董国军. 湘东北地区赋矿围岩与金成矿的关系[J]. 黄金科学技术, 2025, 33(2): 248-263.
- [6] 黄小强, 柳清琦, 曾乐, 等. 湘东北黄金洞金矿田矿床地质特征成矿规律及找矿新进展[J]. 矿产与地质, 2022, 36(6): 1125-1135.
- [7] 陈海龙, 权永彬, 陈平波, 等. 雪峰隆起带金矿床有机地球化学特征及其成矿指示意义: 以沃溪和万古金矿为例[J]. 地质科技通报, 2025, 44(4): 233-255.
- [8] 马盈, 蒋少涌. 造山型金矿是如何形成的? [J]. 地球科学, 2022, 47(10): 3894-3896.
- [9] 曹根深, 张宇, 陈华勇, 等. 造山型金矿床黄铁矿微量元素对成矿机制的指示[J]. 岩石学报, 2023, 39(8): 2330-2346.