

淘金冲金矿成矿流体地球化学和 矿床成因研究*

阎明 马东升 刘英俊

(南京大学地球科学系, 南京)

提 要: 包裹体地球化学和氢氧同位素研究结果表明, 淘金冲金矿床成矿溶液为中低温、中压、弱碱性和还原性的 Ca-Mg-C-S 体系, 成矿溶液早期以变质水为主, 中晚期则以建造水为主 (大气降水来源), 明显具混合成因特点, 其矿床成因类型属受地下水改造成因的层控金矿或特征的“江南型”金矿。

主题词: 淘金冲金矿 包裹体地球化学 氢氧同位素 矿床成因

1 矿床地质概况

淘金冲金矿位于雪峰山华夏系隆起褶皱带肖家田背斜南西倾伏端的南东一侧, 基本构造格局为一个被一系列断裂构造所复杂化的单斜 (图 1)。矿区出露地层属元古界板溪群五强溪组第一段 (Ptbnw¹), 岩性以青灰、暗灰色条纹条带状含粉砂质、细砂质板岩或含粉砂质绢云母板岩为主, 地层产状平缓。区内岩浆岩不发育, 仅在矿区外围浪子田、于家界等地见有少量辉绿岩脉 (墙) 侵入。

矿区断裂构造十分发育, 按其产状可分为北东向、北西西—北北西向、层间断裂等三组。北东向断裂是区内主要构造形迹, 它直接控制着矿床的发育, 而北西西至北北西向断裂, 则是背斜发生前所形成的一组“X”型节理及背斜轴部的一组张性裂隙, 它提供了石英脉赖以存在的容矿空间, 为区内主要的含矿断裂。在层间断裂与切层断裂的交叉处, 矿化作用往往得到明显加强。

淘金冲金矿为细脉带型石英脉金矿床, 所划分的三大脉带, 均由疏密交错、彼此大致平行的石英脉群所组成, 主要工业矿体均赋存在Ⅱ脉带中。作为贫硫化物型自然金矿床, 其主要金属矿物为自然金、毒砂、黄铁矿、闪锌矿和方铅矿, 次之为钛铁矿、磁黄铁矿和黄铜矿等。非金属矿物主要有石英、方解石、白云石、绿泥石, 少量绢云母和重晶石等。自然金粒度较细, 除少量粒度为 0.2~2 mm 的可见金外, 一般为 0.0005~0.01mm 粒度的微粒金, 多以片状、树枝状、不规则粒状等形态产出, 嵌布于石英脉微裂隙中或与毒砂、黄铁矿共生。自然金成色较高, 达 952, 含银仅 4.77%, Au/Ag 比值约为 20^①。

* 国家自然科学基金和国家教委博士点基金资助项目

阎明, 男, 27岁, 博士生, 地球化学专业。邮政编码: 210009

1993-4-19 收稿, 1993-7-14 修改回

● 湖南地矿局 407 队, 1986, 淘金冲金矿区详查地质报告

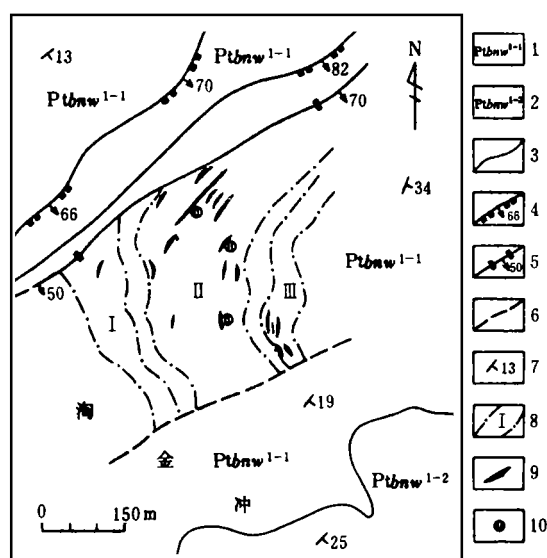


图1 淘金冲金矿区地质略图

1~2—板溪群五强溪组第一段1~2层; 3—地质界线; 4—压性断层; 5—挤压破碎带; 6—推测断层; 7—地层产状; 8—脉带界线及编号; 9—石英脉矿体; 10—采样位置

Fig. 1. Geological sketch map of the Tanjinchong gold district.

1~2—Wuqiangxi Formation of Banxi Group; 1st~2nd layer of 1st Member; 3—Geological boundary; 4—Compression fault; 5—Compressional shatter zone; 6—Inferred fault; 7—Attitude of strata; 8—Boundary of vein zone and serial number; 9—Orebody of quartz veins; 10—Sampling location.

矿化可分为早、中、晚三期: 早期生成石英-黄铁矿-毒砂组合; 中期形成石英-自然金-黄铁矿-毒砂-闪锌矿-方铅矿-黄铜矿组合; 晚期则为石英-碳酸盐矿物-黄铁矿组合。自然金主要在中期形成, 品位一般以1~2 g/t 最为普遍。根据矿物组合特点, 矿石类型分三种, 即石英-自然金, 石英-毒砂-自然金, 石英-多种硫化物-自然金。矿石结构主要有充填结构、交代结构、粒状镶嵌结构等。矿石构造主要为脉状、块状、角砾状构造。

淘金冲金矿床围岩蚀变轻微而不强烈, 主要有黄铁矿化、毒砂化、硅化、碳酸盐化和绿泥石化等。围岩蚀变强弱与矿化强弱有一定的关系, 矿化好处蚀变强, 矿化差处蚀变弱。表明部分成矿物质可能直接来源于控矿围岩。

2 包裹体研究

矿区石英脉石英中包裹体密集、细小, 其长轴直径多数小于 30 μm, 少量包裹体大小(μm) 介于 2×4~15×20 之间。包裹体形态各异, 椭圆状、浑圆状、长条状以及各种不规则形状等都较发育。从相态分类看, 包裹体以气液包体为主, 气液比 5 % 左右, 最大可达 15 %, 少量纯液相包裹体, 部分样品有时可见含 CO₂ 包裹体和含子晶三相包裹体。从成因分类看, 原生和次生包裹体极少, 呈随机分布的假次生包裹体最为发育, 这为研究成矿流体的物理化学性质创造了条件。

图2为矿区10个石英样品、25个包裹体测温结果构成的直方图。从图中可以看出: 矿区石英脉形成的均一温度界于 130~230 °C 之间, 以 160~180 °C 最为集中, 说明其为中偏低温

热液矿床。图3则是矿区10个石英样品、22个包裹体盐度作出的频数直方图。由图可见成矿溶液盐度变化范围为3~9 wt% NaCl, 以6~8 wt% NaCl居多, 它高于典型变质热液的盐度(一般小于3~4 wt% NaCl), 而与地下水盐度相似, 属中等盐度的热液。在温度-盐度-密度关系图上确定成矿溶液密度为0.88~0.97 g/cm³, 平均0.93 g/cm³。在温度-密度-压力关系图上求得成矿压力约为60~80 MPa。

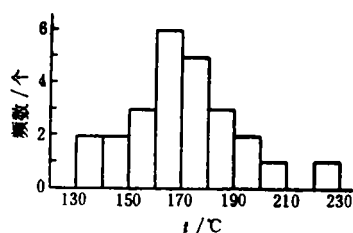


图2 包裹体均一温度频数直方图
Fig. 2. Histogram of homogenization temperatures of inclusions.

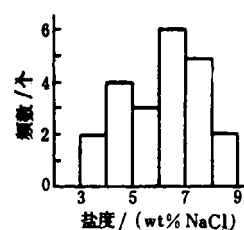


图3 包裹体盐度频数直方图
Fig. 3. Histogram of salinities of inclusions.

矿区石英脉气、液包裹体成分列于表1。气相成分以CO₂为主, 部分样品含少量CO和CH₄, 利用V_{CO₂}/V_{CH₄}和均一温度在log f_{O₂}-T图解上求得f_{O₂}为10⁻⁴⁴, 表明成矿溶液具还原性。在包裹体液相成分中, 阳离子浓度序列为Ca²⁺、Mg²⁺>Na⁺>K⁺, 阴离子浓度序列为HCO₃⁻>SO₄²⁻>Cl⁻>F⁻, 因此估计成矿溶液以Ca²⁺、Mg²⁺、HCO₃⁻、SO₄²⁻为主, 属于Ca-Mg-C-S体系, 与浅部地下水(大气降水)特征相类似。

表1 石英脉包裹体成分

Table 1. Inclusion composition of quartz veins

样品号	矿化期	气相成分 (10 ⁻⁶)				液相成分 (mol/kg)													ΔpH
		CO	CH ₄	CO ₂	H ₂ O	Ca ²⁺	Mg ²⁺	Na ⁺	K ⁺	HCO ₃ ⁻	SO ₄ ²⁻	Cl ⁻	F ⁻	Ca ²⁺ Mg ²⁺	K ⁺ Na ⁺	HCO ₃ ⁻ Cl ⁻	SO ₄ ²⁻ Cl ⁻	Cl ⁻ F ⁻	
TJC-1-4	早期	56.5	13.7	27.2	743.0	1.81	1.96	0.35	0.05	9.61	0.64	0.58	0.08	0.92	0.14	16.6	1.10	7.25	1.75
TJC-5	早期	48.0	14.5	30.8	578.4	1.74	2.01	0.29	0.06	8.83	0.53	0.50	0.07	0.87	0.21	17.7	1.06	7.14	1.56
TJC-3-1	早期	51.8	8.78	35.9	684.1	1.69	1.85	0.27	0.07	7.59	0.59	0.53	0.07	0.91	0.26	14.3	1.11	7.57	1.48
TJC-7-1	中期			23.7	479.8	3.19	4.30	0.30	0.06	9.87	2.18	0.25	0.08	0.74	0.20	39.5	8.72	3.13	1.52
TJC-2-1	中期			40.6	682.2	1.57	1.90	0.34	0.06	5.24	1.07	0.13	0.06	0.83	0.18	40.3	8.23	2.17	1.16
TJC-14	中期			34.4	680.9	2.06	1.77	0.25	0.08	5.73	1.14	0.20	0.07	1.16	0.32	28.7	5.70	2.86	1.23
TJC-15	中期	3.44	1.14	32.0	677.1	2.16	1.52	0.17	0.09	5.68	0.97	0.18	0.06	1.42	0.53	31.6	5.39	3.00	1.25
TJC-1-1	中期			20.6	497.3	2.31	1.91	0.27	0.09	5.90	1.01	0.48	0.07	1.21	0.33	12.3	2.10	6.86	1.34
TJC-1-3	晚期	33.2	14.3	58.7	856.5	1.55	0.51	0.12	0.09	2.62	1.07	0.26	0.05	3.04	0.75	10.1	4.12	5.20	0.77
TJC-7-2	晚期			47.5	747.2	1.93	0.58	0.14	0.09	2.17	1.16	0.18	0.06	3.33	0.64	12.1	6.44	3.00	0.68

SO₄²⁻仅是成矿溶液中总硫的分析形式, 在区内金矿床形成的物理化学条件下, 它实际上反映了成矿溶液中HS⁻的含量。较高的HS⁻与Au以[Au(HS⁻)₂]⁻配离子形式迁移有关, Au⁺具有典型的软酸性质, 与软碱配位体(HS⁻等)能形成相当稳定的配合物。有关金硫、金氯配合物的实验研究和热力学计算也表明^[4], 在中-低温、富硫、还原、中性到偏碱性的热液环境中, 金主要呈含硫配合物形式迁移。HCO₃⁻在成矿溶液中则起着pH缓冲剂的作用,

维持成矿元素与配离子之间的稳定。对成矿溶液 pH 值估算表明,不同矿化阶段成矿溶液 pH 值均高于相应温度下中性溶液的 pH 值,两者差值 (ΔpH) 介于 0.68~1.75 之间,表明金矿床是在弱碱性环境中形成的,且从矿化早期到矿化晚期 ΔpH 值有不断下降的趋势。

从表 1 还可以看到,不同矿化阶段的成矿溶液物质组成具有一定的差异性。早期矿化阶段的成矿溶液呈现出富氯贫硫的变质水性质,而中、晚期矿化阶段的成矿溶液却富硫贫氯,与浅部地下水(大气降水)化学组成特征相似。成矿流体富含 HCO_3^- 常常是深源地下水或变质水特征之一,淘金冲金矿由矿化早期至晚期成矿流体中 HCO_3^- 含量逐渐降低,也反映了随矿化作用的不断进行大气降水的作用得到逐步增强。

3 氢氧同位素研究

对石英脉包裹体水的氢氧同位素研究,有助于阐明成矿溶液的性质和来源。淘金冲金矿区氢氧同位素组成测定计算结果列于表 2。成矿溶液的 $\delta^{18}\text{O}$ 值根据石英-水平衡方程计算出

表 2 石英氧同位素组成和成矿溶液氢氧同位素组成

Table 2. Oxygen isotopic composition of quartz and hydrogen and oxygen isotopic composition of ore-forming fluids

样品号	矿化期	测试矿物	均一温度 ($^{\circ}\text{C}$)	$\delta^{18}\text{O}/(\text{‰})$		$\delta \text{D}_{\text{H}_2\text{O}}/(\text{‰})$
				矿物	成矿溶液	
TJC-1-4	早期	石英	224	20.65	8.92	-44
TJC-3-1	早期	石英	218	20.03	7.94	-50
TJC-7-1	中期	石英	174	18.98	3.83	-81
TJC-2-1	中期	石英	173	19.42	4.19	-63
TJC-1-1	中期	石英	160	19.52	3.20	-62
TJC-15	中期	石英	151	18.16	1.03	-70
TJC-1-3	晚期	石英	145	16.87	-0.84	-82
TJC-7-2	晚期	石英	137	16.47	-2.04	-86

来,采用公式是 $1000 \ln \alpha_{\text{Q-W}} = 3.57 \times 10^6 T^{-2} - 2.71$ (Wenner, 1971)。

由表 2 可知,矿床氢、氧同位素组成变化均较大, $\delta \text{D}_{\text{H}_2\text{O}}$ 变化范围是 $-44\text{‰} \sim -86\text{‰}$, $\delta^{18}\text{O}$ 变化范围是 $-2.04\text{‰} \sim +8.92\text{‰}$ 。在 M F Sheppard (1979) 的不同成因流体水氢氧同位素组成图(图 4)上,矿化早期投影点落于变质水区域,中期和晚期投影点则落于雨水热液的范围,演化线有向大气降水变化的趋势。因此有理由认为早期成矿流体源于变质水,中期和晚期不断有大气降水的加入并占主导。

淘金冲金矿床成矿溶液氢氧同位素组成特点与某些沉积盆地中的建造水或同生水相似,这种建造水源于当地的雨水,并与围岩发生过不同程度的同位素交换^[1]。

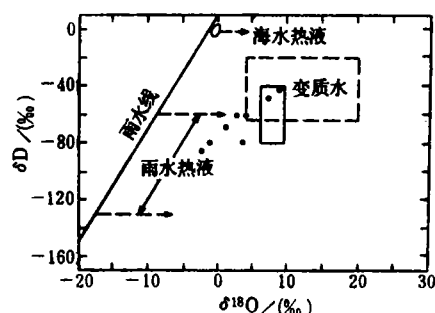


图 4 成矿溶液氢氧同位素组成图
(据 M F Sheppard, 1979)

Fig. 4. Hydrogen and oxygen isotopic composition of ore-forming fluids.

淘金冲金矿成矿溶液 δD_{H_2O} 值变化达42‰, 显示溶液明显具混合成因的特点, $\delta^{18}O$ 值从矿化早期到晚期随温度降低而有规律减小, 也显示出晚期大气降水作用的加强。成矿溶液氧同位素组成变化达 10.96‰, 显然不是由简单的冷却历史所致, 而与大气降水在较大温度范围内与各种围岩发生不同程度的氧同位素交换或两种与围岩交换程度不同的大气降水的混合有关^[7]。

4 矿床成因探讨

4.1 物质来源

淘金冲金矿床控矿地层为元古界板溪群五强溪组第一段, 其岩石化学成分和稀土元素特征具典型的晚太古代沉积岩(页岩)模式。局部层位有凝灰岩类等海相火山碎屑岩发育, 显示控矿地层为一套火山-沉积建造。对于五强溪组以及整个元古代地层地质地球化学特征研究表明^{①②}, 作为 Au-Sb-W 元素组合的综合性含矿建造, 无论在冷家溪群还是板溪群地层中金等成矿元素背景含量均明显高于上部大陆地壳平均值, 产生了较为强烈的同生富集, 且其中有相当数量的金是以具化学活性的吸附形式赋存在岩石中。区域地球化学研究资料还揭示^[2], 在层控金矿床附近存在着区域性金含量亏损带, 它与矿化围岩和矿脉一起构成了成矿元素金的贫化-富集的地球化学共轭体系。结合前述成矿溶液组成和氢氧同位素组成特点, 可以认为淘金冲金矿成矿物质主要来源于控矿地层。区域金矿床中硫、铅同位素研究结果也证实了这一点^[3]。

4.2 成矿元素迁移和沉淀

成矿溶液的物理化学条件及其主要组成, 决定了金在成矿溶液中的主要迁移形式。包裹体地球化学和氢氧同位素地球化学研究表明, 淘金冲金矿床形成温度为130~230℃, 压力为60~80MPa, 成矿溶液盐度为3~9 wt% NaCl, 密度为0.88~0.97 g/cm³, 具弱碱性和还原性。阴离子以 HCO₃⁻ 和 HS⁻ 占主导, 成矿流体以建造水(大气降水来源)为主并具混合成因特点。在这种地球化学环境中金应当主要以[Au(HS)₂]⁻ 配离子形式迁移。有关的热力学计算结果也表明, 在中低温和中低压条件下, 金在弱碱性硫化物溶液中的溶解度较大, 而在氯化物溶液中的溶解度较小。

金硫配合物溶解度计算和成矿实验研究表明^[6], 促使金沉淀富集的主要因素是温度、压力、pH 值降低以及还原硫浓度的降低。淘金冲金矿从矿化早期到矿化晚期成矿温度逐渐降低(表2), 矿体严格受各种断裂裂隙系统的控制, 即含金石英脉分布于压力减低、形成压力差的部位。包裹体地球化学研究表明, 淘金冲金矿成矿溶液pH值由弱碱性向中性演化, 晚期碳酸盐矿物的发育甚至说明成矿溶液已达到了弱酸性。从矿石矿物组合还可知道, 自然金时常以裂隙金或包体金(交代结构)形式存在于黄铁矿和毒砂中, 表明自然金的形成稍晚于硫化物, 硫化物的沉淀必然导致成矿溶液中硫浓度的降低。因此综上所述, 可以认为温度、压力、pH 值以及ΣS 的下降是导致淘金冲金矿床金沉淀的主要原因。

4.3 成矿时代

① 张 干, 1990, 南京大学地球科学系硕士论文

② 牛贺才, 1991, 南京大学地球科学系博士论文

大量的研究已表明,金矿床形成的时代分布主要与地史中各种重大的能量释放事件有关。在具备一定成矿物质,即含金建造或矿源层存在的前提下,各种后期地质作用所释放的能量,及其所驱动的流体和矿化剂对含金建造的改造和叠加是金矿化集中区内形成不同类型金矿床的重要机制。

区域地质资料显示,淘金冲金矿区及其周围均未发现大规模岩浆岩或隐伏岩体的存在,因此金矿床在成因上与后期岩浆作用无关。鉴于矿床明显受雪峰期构造体系的控制以及控矿地层五强溪组的变质作用主要发生在雪峰期,所以淘金冲金矿成矿时代当为雪峰期。成矿时代与本区主要构造运动时代的一致性表明,区域变质、深部变质热液上升、断裂动力作用等均可成为有效的热液驱动能源。

从区域范围看,湘西金矿密集区金矿点星罗棋布,据统计各种类型金矿床(点)共107处,其中脉金矿床(点)46处。它们有规律地受不同等级构造的控制。雪峰隆起褶皱带控制了成矿带,一些背斜构造控制了成矿区,而发育在背斜轴部及两翼的裂隙系统则控制着脉体、脉组、脉带的空间分布。

淘金冲金矿床与漠滨、西安、黄金洞等其它湖南前寒武系层控金矿床在成矿时代上是一致的^[5],也同整个江南金矿带层控金矿的主成矿时代相一致^[2]。

4.4 矿床成因类型

通过上述讨论,可以把淘金冲金矿床形成过程大致归纳为:晚元古代陆源碎屑沉积作用和火山沉积作用形成了Au-Sb-W元素组合的综合性含矿建造。在雪峰期构造运动和变质作用影响下,早期以变质水为主,中晚期以建造水(大气降水来源)为主的具混合成因特点的热液体系产生。它通过水/岩反应促使金从岩石中活化转移出来而成为成矿溶液。在不均一围压的作用下,成矿溶液沿构造破碎带迁移,并在适当的构造环境中因物理化学条件的改变金沉淀富集成金矿床。

淘金冲金矿床成矿物质来源于控矿地层,其层控性是非常明显的,属于涂光炽先生所划分的受地下水强烈改造成因的微细浸染型层控金矿。马东升和刘英俊(1991)通过对整个江南金成矿带层控金矿的地球化学和成因研究,提出了“江南型”金矿的概念,以示与典型变质热液型和微细浸染型金矿的区别,淘金冲金矿无疑属于其中的一个。

5 主要结论

(1) 包裹体地球化学研究表明,淘金冲金矿床成矿温度为130~230℃(以160~180℃最为集中),成矿压力约60~80 MPa,成矿溶液盐度为3~9 wt% NaCl(以6~8 wt% NaCl居多),密度为0.88~0.97 g/cm³(平均0.93 g/cm³)。成矿溶液具弱碱性和还原性。

(2) 成矿溶液阳离子以Ca²⁺、Mg²⁺为主,阴离子以HCO₃⁻、HS⁻为主,属Ca-Mg-C-S体系。成矿溶液的物理化学条件及其组成决定了成矿元素,金主要以[Au(HS)₂]⁻配离子形式迁移,温度、压力、pH值和ΣS浓度的降低是导致金沉淀的主要原因。

(3) 淘金冲金矿床氢氧同位素组成变化较大,δD_{H₂O}为-44‰~-86‰,δ¹⁸O为-2.04‰~+8.92‰。研究表明成矿溶液早期属变质水,中晚期则以建造水为主(大气降水来源),成矿溶液明显具混合成因特点。

(4) 淘金冲金矿床成矿物质主要来源于控矿地层, 成矿能量则源于雪峰期构造运动和变质作用, 其成矿时代与湖南前寒武系层控金矿乃至整个江南金矿带层控金矿的主成矿时间相一致。在矿床成因类型上属受地下水改造成因的层控金矿或特征的“江南型”金矿。

本文在野外工作期间曾得到湖南省会同县黄金办公室和淘金冲金矿地质工作者的大力帮助, 在此深表谢意。

参 考 文 献

- 1 沈渭洲等编. 稳定同位素地质. 北京: 原子能出版社, 1987.
- 2 马东升, 刘英俊. 江南金成矿带层控金矿的地球化学特征和成因研究. 中国科学, B 辑, 1991, (4): 424~433
- 3 罗献林. 论湖南前寒武系金矿床的成矿物质来源. 桂林冶金地质学院学报, 1990, 10(1): 13~26
- 4 刘英俊, 马东升. 金的地球化学. 北京: 科学出版社, 1991.
- 5 罗献林. 论湖南前寒武系金矿床的形成时代. 桂林冶金地质学院学报, 1989, 9(1): 25~34
- 6 Seward T M. Thio complexes of gold and the transport of gold in hydrothermal ore solutions. *Geochim. et Cosmochim. Acta*, 1973, 37: 379~399
- 7 Radtke A S et al. Geology and stable isotope studies of the Carlin gold deposit, Nevada. *Econ. Geol.*, 1980, 75: 641~672

ORE-FORMING FLUID GEOCHEMISTRY AND GENESIS OF THE TAOJINCHONG GOLD DEPOSIT

Yan Ming, Ma Dongsheng and Liu Yingjun

(Department of Earth Sciences, Nanjing University, Nanjing 210008)

Key words: the Taojinchong gold deposit, inclusion geochemistry, hydrogen and oxygen isotopes, genesis of the ore deposit

Abstract

According to geochemical studies of inclusions in the Taojinchong gold deposit, the ore-forming temperature of the deposit is 130~230°C, its ore-forming pressure is some 60~80MPa, its cations in the ore-forming solution are mainly Ca^{2+} and Mg^{2+} , its anions are chiefly HCO_3^- and HS^- , its salinity is 3%~8% NaCl, its density is 0.88~0.97 g/cm³, and its ore-forming solution shows weakly alkaline and reducing behaviors. In the ore-forming solution, gold is transported mainly in the form of $[\text{Au}(\text{HS})_2]^-$, and the precipitation of gold is mainly attributed to the decrease in temperature, pressure, pH value and ΣS concentration. Hydrogen and oxygen isotope studies of the ore deposit show that the ore-forming solution is dominated by metamorphic water at the early stage and by formation water derived from meteoric water at the middle-late stage, showing obvious character of mixed genesis.

The Taojinchong gold deposit derived its ore-forming materials from ore-control strata and its ore-forming energy from Xuefengian tectonism and metamorphism. Genetically, it is a stratabound gold deposit that has undergone reformation by groundwater or a characteristic “Jiangnan” type gold deposit.