

马鞍桥金矿床地质—地球化学特征及成因探讨

栾长青¹, 唐益群¹, 云正文²

(1. 同济大学 岩土及地下工程教育部重点实验室, 上海 200092;

2. 长庆油田 勘探开发研究院, 西安 710021)

摘 要: 马鞍桥金矿床具有明显的层控特点, 矿化范围大、形态较规则、工业矿体分布较局限, 矿石品位较低, 金矿床受区域性大断裂一侧的脆—韧性剪切带控制, 金矿化产于剪切带中较低序次脆性破裂面中, 深部含矿热流体主要是同生水、大气降水和少量岩浆水, 多数金属硫化物的形成具有多期性, 而金的成矿主要为一期, 二者不具明显的相关关系。马鞍桥金矿为受脆—韧性剪切带控制的微细浸染型金矿, 成因上属于多来源地下热水渗滤型金矿。

关键词: 马鞍桥金矿; 地质—地球化学特征; 矿床成因; 陕西省

中图分类号: P611; P618.51 **文献标识码:** A **文章编号:** 1001-1412(2007)03-0190-05

0 引言

马鞍桥金矿位于陕西省周至县南部, 是在上世纪 80 年代中期第二轮找金热潮中发现的。矿床所在区域处于秦岭造山带构造背景下, 导致矿床地质特征及其成因总体上与秦岭成矿带诸多金矿床具有趋同性, 同时又显示了自身的独特性与过渡性。不断深入地研究矿床的特征与成因^[1-11], 对于总结秦岭成矿带金矿地质理论, 开展新一轮找矿无疑是十分有益的。

1 矿区地质

1.1 地层

区内出露地层为上泥盆统和中石炭统(图 1)。上泥盆统桐峪寺组分为下、中、上 3 个岩段, 由各种变砂岩和千枚岩类构成; 中石炭统由砂砾岩、变砂岩和千枚岩组成。赋金层位为桐峪寺组上岩段, 岩性为变质粉砂岩、绢云千枚岩。含矿层位岩石具明显的片理化、糜棱岩化, 常见构造透镜体或扁豆体产出, 早期形成的石英脉体发生揉皱和褶曲, 表现出

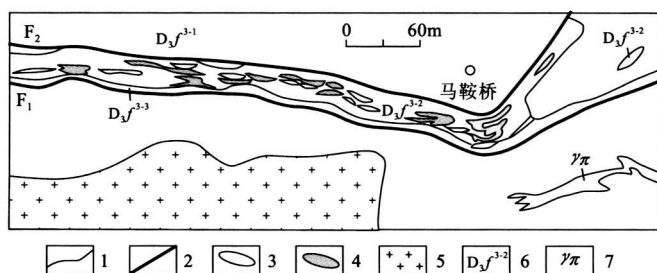


图 1 马鞍桥金矿床地质简图

Fig. 1 Geological map of the Ma'anqiao gold deposit

1. 地质界线 2. 断裂 3. 大理岩透镜体 4. 金矿体
5. 青沟花岗岩 6. 桐峪寺组上岩段 7. 花岗岩脉

含碳粉砂岩类经区域变质后又叠加了韧—脆性构造变形的显著特点。矿化地段岩石具较强的硅化蚀变, 并产生黄铁矿化和毒砂化。

1.2 岩浆岩

香沟似斑状黑云母花岗岩位于马鞍桥金矿床的西南部, 侵入于中石炭统中。岩体呈 EW 向延长, 与本区构造方向一致, 岩体内可见石英脉, 局部有黄铁矿化、方铅矿化和黄铜矿化。花岗岩体北部受韧性剪切带和断裂构造影响, 局部出现片理化和糜棱岩化。花岗岩的⁴⁰Ar—³⁹Ar 同位素年龄为 200 Ma (张国伟, 1988), 是印支—燕山期的产物。

1.3 构造

收稿日期: 2007-04-10, 改回日期: 2007-07-05

基金项目: 中国地质调查局项目(20031600026)资助。

作者简介: 栾长青(1977), 男, 江苏扬州人, 博士研究生, 从事岩土工程和地下工程研究。

(1) 褶皱构造。矿区位于旭奋子-黄石板复背斜的南翼, 在区内表现为单斜构造, 但其中的低级次褶皱及层间褶皱也可反映区域褶皱的构造特征。褶皱构造已被后期的韧、脆性构造所破坏。

(2) 韧性剪切带。沿正南沟-汪家山沟一线产出, 呈近 EW 向横贯全区。剪切作用主要发生在桐峪寺组上岩段岩石中, 剪切带在区内出露宽度约为 120~240 m, 倾向 170°~190°, 倾角约 56°。剪切叶理产状与区域片理基本一致。变形带中广泛发育面理构造、拉伸线理、不对称旋转碎斑和残块、石香肠构造, 岩石的普遍糜棱岩化也是韧性变形带的显著特征。剪切带具有早期右行逆冲、晚期左行滑落的的活动特点。根据香沟岩体部分岩石和同期的花岗斑岩脉被剪切带卷入并产生糜棱岩化推断, 本区韧性剪切变形应发生于印支-燕山期, 即香沟花岗岩侵位之后。

(3) 断裂。矿区发育有 2 条近 EW 向断裂, 大致平行展布, 限定了剪切带和金矿带的南、北边界。这两条断裂是韧性剪切构造的继承性活动产物, 至燕山期仍有活动。断裂倾向 170°~220°, 倾角 45°~70°, 显示出先压扭、后张扭的活动特点。此外, 区内还发育 NE 向、NW 向次级断裂, 规模较小。

2 矿床地质特征

2.1 矿体特征

马鞍桥金矿床矿化带产于经过韧性变形的上泥盆统桐峪寺组上岩段上部岩性层中, 赋矿岩石为二云母石英千糜岩、绢云母石英千糜岩、碳质片岩和千枚岩等。矿化带总体呈 EW 向, S 倾, 倾角 35°~50°, 矿带断续延伸达 10 km 以上, 南北宽约 90~150 m。

矿区已圈定金矿体 20 余个, 其中工业矿体 10 个, 主要分布在矿带东部。矿体形态为透镜状、似层状或扁豆状, 矿体群的空间展布关系则为斜列状、叠瓦状、串珠状。矿体产状比围岩产状稍陡, 主要矿体长 120~421 m, 延深 110~438 m, 厚度 1.1~1.9 m, 矿石平均品位 $w(\text{Au}) = 4.75 \times 10^{-6}$ 。

2.2 矿石特征

金矿矿石类型可以分为千枚岩型和石英脉-千枚岩型两种。可见自形-半自形粒状、他形粒状、胶状、交代残余、填隙、碎斑、碎裂、糜棱等结构, 千糜状、细脉-浸染状、浸染状、斑点状等构造。

矿石矿物主要为黄铁矿、磁黄铁矿, 次为毒砂、闪锌矿、黄铜矿和自然金等; 脉石矿物为石英、绢云母、铁白云石、方解石、绿泥石等。

金矿物为自然金, 呈他形粒状、浑圆粒状、细脉状产于矿物粒间或矿物的微裂隙中, 自然金粒度多为 0.005~0.03 mm, 成色为 809~896。大部分自然金赋存于脉石矿物中, 少量分布于金属矿物中。许多千枚岩型金矿石未见金矿物, 有可能呈超显微金状态赋存或呈被吸附在其他物质中。

2.3 围岩蚀变

矿体的围岩蚀变主要有硅化、绢云母化、碳酸盐化和绿泥石化等, 其中硅化和绢云母化与金矿化关系密切。

3 矿床地球化学特征

3.1 微量元素地球化学

对马鞍桥金矿区及外围 238 件地球化学样品的 12 种元素分析结果进行数学地质分析表明, Au 在主矿体中服从对数正态分布, 与其他元素总体相关性很小(大部分 < 0.6), 但有时或局部与 As, Sb, Zn, W, Bi, Mo 等元素体现出某种较紧密的联系(相关系数约为 0.6), 说明 Au 与其他金属元素的多期成矿特点不同, 主要为 1 期成矿; 而 Cu, Pb, Zn, As, Sb, Hg 和 W 等元素在样本中的含量和变异系数变化较大, 反映出多期叠加改造成矿的特点^[8]。这与矿石中黄铁矿、磁黄铁矿、黄铜矿等多期形成的事实是吻合的。

矿石中黄铁矿、磁黄铁矿的 Co/Ni 的平均值为 0.84^[4], S/Se 值为 27979~164406^[11], 表明了金属硫化物同时具有沉积和热液成因特征, 金属硫化物是多期、多形成的。

3.2 稀土元素地球化学

据李福东等(2001)和卢纪英等(2000)的研究^[8,6], 矿区赋矿岩石、矿石和黄铁矿的稀土配分曲线具有相似性, 均为右倾, 一般不具十分明显的 Eu 亏损, 少数样品显示低正峰。这一方面表明矿体、矿石对赋矿岩系地球化学特征的继承性演化, 成矿物质来源与赋矿岩系关系密切; 另一方面石英脉的稀土元素配分模式具有总量较低、部分不具 Eu 亏损(呈低正峰)、具 Sm 异常的特点, 也给出热液改造-成矿期有深源物质加入的信息。

3.3 稳定同位素地球化学

(1) 硫同位素。经对不同研究者^[1,4,8] 硫同位素数据的统计,矿床岩石中硫化物的 $\delta(^{34}\text{S}) = -10.72 \times 10^{-3} \sim -12.60 \times 10^{-3}$, 数据集中分布在 3 个区段中 ($-10 \times 10^{-3} \sim -6 \times 10^{-3}$, $-2 \times 10^{-3} \sim 4 \times 10^{-3}$, $6 \times 10^{-3} \sim 12 \times 10^{-3}$)。研究表明,在硅质多、变形强度大(石英脉发育)的部位硫同位素的 $\delta(^{34}\text{S})$ 趋近 0 值,而变形较弱、硅质不甚发育的部位则 $\delta(^{34}\text{S})$ 远离 0 值。这一方面说明本矿床硫源的复杂性(岩浆成因硫、海水中的硫酸盐和还原硫),另一方面也说明矿床中的硫化物是多期形成的。

张复新等(1997)对同一成矿阶段的黄铁矿-磁黄铁矿矿物对进行研究,发现成矿溶液中的硫同位素分馏达到平衡,并求得成矿溶液的总硫为 $1.6 \times 10^{-3} \sim 2.3 \times 10^{-3}$, 认为成矿热液中有相当部分来自地壳深部^[1]。

(2) 氢氧同位素。对矿区热液石英的流体包裹体氢氧同位素分析结果进行计算、投图,在 $\delta(\text{D}) - \delta(^{18}\text{O})$ 图中,数据点均落在岩浆水与变质水重叠的范围内或其附近。可见本区成矿流体的性质复杂,具有多期叠加改造的特点,同时有大气降水的参与。其原因可能与本区所处的构造部位、区域热中心等有关。

(3) 铅同位素。不同研究者的矿石铅同位素测定结果近似, $^{206}\text{Pb}/^{204}\text{Pb} = 17.459 \sim 18.416$, $^{207}\text{Pb}/^{204}\text{Pb} = 15.499 \sim 15.709$, $^{208}\text{Pb}/^{204}\text{Pb} = 38.100 \sim 39.131$ 。主要为正常铅组成,属造山带构造环境。矿石铅的模式年龄数值与本区的几次构造热事件的时代大致相当,说明本区铅的演化经历了几个不同的构造期,而不宜将其作为成矿年龄解释。

3.4 流体包裹体地球化学

矿物包裹体的形态、物态及标型特征是成矿溶液热力学条件的综合反映。马鞍桥金矿石英脉的石英包裹体数量多、粒度小、不均匀。包体形态不规则,呈椭圆形、圆形、短柱状、不规则状及透镜状等,也有形态相似的包裹体群。以液相包体为主,气液比一般为 $8\% \sim 20\%$,具少量全液相和有机包裹体^[11]。

1018 中段 9 线 K₂ 矿体石英脉包体的均一温度 $> 300^\circ\text{C}$, 1285 中段 88 线 K₉ 矿体包体均一法数据频率峰值为 $210 \sim 250^\circ\text{C}$, 1314 中段 104 线 K₉ 矿体的包体均一温度峰值为 $240 \sim 260^\circ\text{C}$ 。石英包裹体盐度中等, $w(\text{NaCl}) = 4.5\% \sim 7.8\%$ 。石英包体中的气相成分为 CO_2 , CO , CH_4 , H_2 , N_2 等,液相成分为 H_2O , K^+ , Na^+ , F^- 等,矿化度为 19.89 g/l ,包

裹体水溶液性质相当于盐水。溶液中含 K^+ , Na^+ , Ca^{2+} , Mg^{2+} , Cl^- , SO_4^{2-} , F^- 等离子,阴离子 $\text{SO}_4^{2-} > \text{Cl}^- > \text{F}^-$, 阳离子 $\text{Ca}^{2+} > \text{Mg}^{2+} > \text{Na}^+ > \text{K}^+$, 以 Ca 离子占优势,为 $\text{SO}_4^{2-} - \text{Cl}^- - \text{Ca}^{2+} - \text{Mg}^{2+}$ 型热水。

经计算,矿床流体压力范围为 $26.6 \sim 31.7 \text{ MPa}$, 深度 $1 \sim 2 \text{ km}$, pH 值 $5.3 \sim 5.9$ (弱酸性), Eh 值 $-0.731 \sim -0.676$ (还原环境)。

4 成因探讨

4.1 控矿因素

(1) 成矿物质来源。马鞍桥金矿带及金矿床均赋存于上泥盆统桐峪寺组,岩石组合中富含钙质、碳质和金属硫化物,同时该组的浅变质岩石组合中 Au 的丰度较高,岩石的 $w(\text{Au}) = 10 \times 10^{-9} \sim 50 \times 10^{-9}$, 平均值为 44×10^{-9} , 且金丰度变异系数不大,说明这套地层在成矿前金元素已经有一定的预富集,虽然富集程度还达不到“矿化”,但可以在后来的构造-热液成矿作用中为金成矿提供丰富的成矿物质,所以说上泥盆统桐峪寺组是本区金的衍生矿源层。

应当强调的是,虽然人们经常根据一个岩石单位中 Au 的丰度去判断这套地层(岩石)是否为“矿源层(岩)”;然而,由于无法证实这个丰度中有没有从“源岩”继承而来的 Au,同样,也不好排除这套地层(岩石)在形成后经历的构造-岩浆-热液改造(再造)活动中积累的 Au。人们测到的丰度值只是多期构造-岩浆-流体活动中元素若干次变化的最终结果,而无法准确获知每一次变化增长(或减少)的量。也就是说,对“矿源层”岩石中元素丰度的认识 and 解释还有待研究,不宜简单地根据元素质量分数的高低下结论。

(2) 控矿构造。印支-燕山期的脆-韧性剪切带和近 EW 向断裂(F_1 和 F_2)是控制马鞍桥金矿床的构造因素。剪切带早期的逆冲产生的韧性剪切应力和构造-岩浆热效应使围岩中以金为主的成矿元素产生活化并进入流体,同时为含金流体的迁移积蓄了充足的动力和部分热能;剪切带晚期发生以脆性破裂为主的左行走滑活动,由于应力的释放,在原来的应力集中带形成大量破裂面,为深部含金流体向上迁移提供了通道,沿破裂面产生的扩容空间成为含金流体循环和金质沉淀的优选部位。脆-韧性

剪切作用使金矿化集中赋存于强变形带扩容空间与泥、钙、碳质物偏高的复合部位, 并控制了矿体主要形态特征和展布规律。F₁ 和 F₂ 断裂不仅控制了剪切带的南北边界, 而且也控制了金矿化的宽度范围, 因此这两条断裂是剪切带的替代性构造形迹, 对金矿具有更为直接的控制意义。

研究表明, 韧性剪切带和稍晚发生的脆性破裂同时存在并具有适度的规模和强度是金矿床形成的必要条件。找矿实践表明, 韧性剪切作用往往控制着矿床的规模, 而同期同空间出现的脆性破裂面往往控制着金矿石的质量。

(3) 成矿深度的确定。成矿深度的确定往往与韧性剪切带的形成深度联系在一起。马鞍桥地区韧性剪切带发生的深度有两种认识, 分别为 5~ 8 km 和 1~ 2 km, 我们认为后者比较符合实际情况。其实理由很简单: 矿区的韧性剪切带是在香沟似斑状黑云母花岗岩侵入之后发生的, 与香沟岩体同时侵入的还有一些脉状的花岗斑岩, 上述侵入体的结构特点证明岩石是在浅成环境下冷凝固结的, 其形成深度是有限的。当时这一带处于整体上隆的状态, 从发生韧性剪切到矿体定位, 是深度越来越小的过程, 所以成矿深度为 1~ 2 km 可信程度较高。

(4) 金矿的成矿时代。研究者对马鞍桥金矿金的成矿时代认识不一。我们注意到以下事实: 其一, 与金矿有关的脆- 韧性剪切带形成晚于香沟似斑状黑云母花岗岩。花岗岩的⁴⁰Ar-³⁹Ar 同位素年龄为 200 Ma (张国伟, 1988), 这一数值相当于燕山期 (早侏罗世初期), 但考虑到秦岭地质构造演化的具体情况, 也不排除印支晚期形成的可能性, 因此, 将其暂定为印支- 燕山期产物是比较客观的。部分花岗岩及同期花岗斑岩卷入韧性剪切活动, 说明构造作用发生于岩体定位并冷凝固结之后, 这其间是有一定时间间隔的, 经此间隔, 地质时代会不会已经进入燕山期呢? 其二, 研究表明, 韧性变形阶段, Au 质主要处于被流体携裹、迁移的状态, 而在脆性破裂出现后, 流体中的 Au 质才因物理化学条件的改变而发生沉淀。这说明金矿体是在脆- 韧性剪切作用晚期才定位, 这就将成矿的时间又向后延伸了。其三, 据研究, 区内还存在一期热事件, 黑云母 Ar-Ar 阶段升温法的坪年龄、等时线年龄和 K-Ar 稀释法年龄均反映出热事件发生于燕山晚期 (101~ 123 Ma)^[8], 地质时代相当于早白垩世中晚期, 这个年代区间可以视为马鞍桥金矿成矿期的上限。其四, 矿石矿物研究证实, 金矿物形成晚于黄铁矿、磁黄铁

矿、黄铜矿、毒砂等, 这些硫化物具有多期形成的特点, 而金矿物却没有这方面的证据, 元素相关性分析也证实 Au 与其他金属元素的相关性不高。

从以上分析可以确认, 马鞍桥金矿金的成矿时代为燕山期, 有可能与区域上局部出现的中生代中基性火山岩时代相当。

4.2 成矿机制

4.2.1 成矿物质的活化与迁移

大气降水、地下水或层间水聚集并沿断裂带、破碎带循环运移, 在岩浆热、构造应力及地热的驱动下, 萃取容矿地层及早期富集体中的金及其他组分, 使之发生活化。Au 具有很强的结合能力, 可在适宜的条件下转化为 Au⁺ 和 Au³⁺, 与多种配位体形成易溶络合物进入溶液。马鞍桥成矿流体为中温、酸性或碱性、富硫、中等氧逸度, 这对金形成硫化络合物非常有利, 从而使金大量活化迁移。在韧性剪切带的活动中, 形成了以 SO₄²⁻ - Cl⁻ - Ca²⁺ - Mg²⁺ 型热液, 不断萃取地层的 Au, (和部分 Ag, Hg, Sb, As, Fe, Bi, S 等元素)。在相对开放条件下, 雨水的加入使矿液量增多, 迁移循环范围扩大, Au 的活化量也相应增加。Au 的活化迁移与构造活动有关, 构造提供了 Au 活化迁移的通道及容矿空间, 也提供了除地热梯度之外的压力梯度等动力, 因而断裂构造控制了金矿化的分布和金矿体。

4.2.2 成矿物质的沉淀聚集

(1) 成矿物质沉淀的有利部位。马鞍桥金矿金多沉淀于低压扩容带, 即低序次断裂、裂隙中, 这是矿床的主要储矿构造, 尤其在裂隙密集带、层间薄弱带、层间破碎带最易成矿。较大的断裂带控制成矿热液运移的基本方向, 但由于整个系统较为开放, 金不易集中富集; 而在次级裂隙带、破碎带中有较大的物理化学梯度, 并处于半封闭状态, 有利于金的聚集和沉淀。另外富有机质岩系的存在, 也是金沉淀的一个有利条件。

(2) Au 成矿的物理化学条件。从前面的讨论可知, 马鞍桥金矿成矿温度为 210~ 260 ℃, 随着热液从深部运移到近地表处, 温度和压力逐渐下降, 在深度 1~ 2 km, 压力 26.6~ 31.7 MPa 的条件下, Au 发生沉淀。热液蚀变过程中, 热液的 pH 值会发生显著变化, 硅质、绢云母及其分解的粘土矿物对热液的 pH 值具有缓冲作用, 有利于金的富集。成矿的早- 中期主要形成硫化物, 而无含氧矿石矿物生成, 表明这时的热液富硫少氧; 待硫化物晶出后, 热液从还原向弱还原转变, 利于含 Au 络合物的分解, 并使

Au 还原为自然金而沉淀。成矿晚期的弱氧化、弱酸性环境使 Au 活化, 进入下部的还原带发生富集作用。马鞍桥金矿床成矿热液的盐度 $w(\text{NaCl})$ 约为 6.15%, 反映 Au 是在盐度较低的流体中, 这种流体能携带一定数量的 S, 这些 S 使 Au 形成络合物, 而 S 和 Cl 不足以搬运贱金属, 从而造成富 Au 矿石中贱金属含量低, 即 Au 与贱金属分离的结果。

4.3 矿床成因类型

综上所述, 马鞍桥金矿床具有明显的层控特点, 矿化范围大、形态较规则、工业矿体分布较局限, 矿石品位较低, 金矿床受区域性大断裂一侧的脆-韧性剪切带控制, 金矿化产于剪切带中较低序次脆性破裂面中, 深部含矿热流体主要是同生水、大气降水和少量岩浆水, 多数金属硫化物的形成具有多期性, 而金的成矿主要为一期, 二者不具明显的相关关系。因此, 马鞍桥金矿为受脆-韧性剪切带控制的微细浸染型金矿, 成因上属于多来源地下热水渗滤型金矿。

参考文献:

[1] 张复新, 马建秦. 马鞍桥金矿成矿地质条件及矿床成因[J]. 地

质找矿论丛, 1997, 12(1): 18-24.

- [2] 李瑞生. 陕西周至马鞍桥金矿床地质特征及成因分析[J]. 陕西地质, 1997, 15(2): 31-35.
- [3] 隗合明. 周至马鞍桥金矿床成矿控制条件及找矿标志[J]. 西安地质学院学报, 1997, 19(4): 20-26.
- [4] 隗合明, 丁华. 陕西马鞍桥金矿床成因探讨[J]. 黄金地质, 1999, 5(2): 1-7.
- [5] 张拴宏, 王书兵. 陕西周至马鞍桥金矿控矿构造及成矿模式[J]. 地质找矿论丛, 1999, 14(3): 71-77.
- [6] 卢纪英, 李作华, 张复新. 秦岭板块金矿床[M]. 西安: 陕西科学技术出版社, 2000.
- [7] 魏宽义, 孟宪忠, 刘淑文. 马鞍桥金矿控矿构造规律及成矿预测[J]. 西安工程学院学报, 2001, 23(1): 20-24.
- [8] 李福东, 邹湘华, 高纪璞. 马鞍桥微细浸染型(沉积岩容矿)金矿床(体)快速定位预测研究[J]. 西北地质, 2001, 34(1): 27-63.
- [9] 侯满堂, 张银龙. 陕西周至地区金矿成因初探[J]. 陕西地质, 2004, 22(1): 29-35.
- [10] 黄喜峰. 周至马鞍桥金矿控矿规律及成矿预测研究(硕士论文)[D]. 西安: 长安大学, 2004.
- [11] 云正文. 陕西马鞍桥全矿床成矿控制因素及成矿预测(硕士论文)[D]. 西安: 长安大学, 2005.
- [12] 张增奇, 刘书才, 张成基, 等. 《中国区域年代地层(地质年代)表》和《国际地层表》简介[J]. 山东国土资源, 2003, 19(3): 34-42.

GEOLOGICAL-GEOCHEMICAL CHARACTERISTICS AND GENESIS OF MA' ANQIAO GOLD DEPOSIT

LUAN Chang-qing¹, TANG Yi-qun¹, YUN Zheng-wen²

(1 Key Laboratory of Geotechnical and Underground Engineering of Ministry of Education, Tongji University, Shanghai 200092, China; 2 Exploration & Development Research Institute of PetroChina Oilfield Company, Xi'an 710021, China)

Abstract: Ma'anqiao gold deposit is characteristic of stratabound, large area mineralization, regular ore bodies and low grade. The deposit is controlled by brittle-ductile shear zone in one side of a deep regional fault. Gold mineralization occurs at the low order brittle fractural plane in the shear zone. The deep heat ore fluid is composed of cognate water, meteoroid water, and a small amount of magmatic water. Sulfides are formed in multiple stages but gold is mainly deposited in one stage showing no obvious correlation. It is a brittle-ductile shear zone-controlled infiltrated micro-disseminated gold ore deposit with multiple sources of fluid.

Key Words: Ma'anqiao gold deposit; geological-geochemical characteristics; genesis; Shaanxi province