

区域地质构造演化特征及对矿产资源分布的控制作用研究

吉鹏朝

陕西中威勘测规划设计有限公司 陕西省 西安市 710071

【摘要】：本研究在系统梳理片麻岩—变粒岩基底、盖层碎屑—碳酸盐层序及多期岩脉切割关系的基础上，以陕西省南秦岭构造带为典型案例，综合区域地质资料，重建了研究区由基底塑形、早古生代构造活化、中晚古生代伸展台地、早中生代反转叠覆至晚中生代—新生代走滑叠加的五阶段构造演化，并揭示其对成矿作用的多期耦合机制。结果显示，构造通道可重复激活与流体通量增强呈正相关：缝合界面两侧 5 - 10 km 条带内金矿床数量占比 64%，NE 向剪切带交汇区金矿占比达 72%；碳酸盐台地断陷的 MVT 型 Pb - Zn 资源量占比 68%；走滑转换段—拉分小盆 Cu - Fe - Ti 矿点密度占比 61%；基底—盖层不整合透隙化窗口叠置矿化点占比 45%。成矿期空间上由缝合带向台地再向走滑转换段迁移，时间上形成金 I、Pb - Zn II、金 III 与 Cu - Fe - Ti IV 四期主成矿序列。据此提出以断裂交汇、正断层尖灭端、不整合透隙化窗口与释放弯为核心的靶区优选策略，可为区域找矿提供定量化指引。

【关键词】：构造演化；成矿作用；通道再活化；层控矿化；靶区预测；陕西

0 引言

多期叠加的造山与盆地演化是控制成矿物质来源、运移与沉淀的首要因素，尤其在具有基底—盖层二元结构和多期岩浆—构造事件叠加的区域，更易形成空间分带与时间分期并存的矿集区。陕西省横跨华北地台与秦岭造山带两大构造单元，发育了典型的太古宇太华群片麻岩基底和豫陕裂陷槽盖层沉积序列，是研究基底—盖层二元结构控矿的理想地区。传统研究往往聚焦单期构造或单一矿种，难以解释矿化带分段连续、品位跃迁与复活成矿的共同出现。为此，有必要在区域尺度上整合同位素年代学、构造岩石学、地球化学与地球物理证据，建立从深部基底到浅部盖层的通道体系与圈闭类型的全过程约束。本研究以陕西南秦岭佛坪隆起、凤太矿集区等典型单元为背景，以出露的变质基底、不整合覆盖层及多期花岗质与基性岩脉为对象，厘定关键不整合面、变质峰期与脉体切交关系，划分构造演化阶段；在此基础上，解析断裂、韧性剪切带、层间滑脱与微裂隙网络的渗透结构及其重复激活机制，提炼矿产分布的构造控制规律，建立成矿期与构造阶段的耦合模型，并提出可操作的勘探靶区预测思路，为深部找矿与跨尺度部署提供理论与方法支撑。

1 研究区地质构造演化阶段划分

围绕研究区出露的片麻岩—变粒岩基底、其上不整合覆盖的碎屑—碳酸盐层序以及多期花岗质与基性岩脉的切割关系，研究把地质构造演化划分为若干关键阶段。所谓变质基底，指由高变质级岩石组成并作为沉积—火山建造的区域性底板。陕西省以宝鸡—洛南一线为界，以北属华北地台，以南属秦岭造山带；华北地台的太古宇基底出露在华阴和蓝田地区，称太华群，是一套经历角闪岩相变质的片麻岩、混合岩、石墨片岩、大理岩夹磁铁石英岩系，Rb-Sr 年龄 25.49 亿年，古元古界铁

铜沟组石英岩不整合覆于其上。关键时间节点以不整合界面、变质峰期与岩浆脉切交关系为界定标志，并把野外观察与室内时空约束进行耦合。鉴于野外测线、同位素定年以及构造岩石学综合约束，演化序列呈现由古老基底塑形到晚期差异隆升的递进格局。基底形成期对应前寒武纪的深部变质与糜棱化改造，S-L 型片麻理与线理相互交切，并见同构造花岗质侵入体沿弱面伸入。陕西南秦岭佛坪隆起区的前寒武纪变质基底以穹状出露为特征，麻粒岩—高角闪岩相—低角闪岩相—高绿片岩相—低绿片岩相变质带呈同心环状向外展布，混合岩化作用发育，显示了基底塑形阶段的典型构造样式。构造活化期在早古生代表现为俯冲增生背景下的定向压扭，应力场主轴稳定偏东北，形成密集褶皱轴列与韧性剪切带，伴随中酸性岩体批次侵入。陕西石泉—汉阴金矿带在该期形成了与成矿密切相关的多期次韧性剪切构造，成矿前的韧性剪切构造（S1）与成矿早期的韧性剪切构造（S2）先后发育，对区内成矿物质起到了预富集作用。稳定盖层发育期进入中至晚古生代，广域海侵促成碳酸盐台地沉积，区域伸展把正断层与层内滑脱发育到峰值，裂陷洼地开始定向沉降。早中生代的盆山耦合与构造反转期体现为逆冲推覆叠置于早期正断层系之上，角度不整合清晰指示沉积间断与快速抬升，粗砾物源指向邻近隆起。陕西凤太矿集区所在的南秦岭地区经历了从伸展到收缩的重大构造体制转换，早中生代褶皱造山和脆—韧性剪切变形奠定了该区的基本构造格架。晚中生代至新生代的晚期改造期再度进入走滑叠加伸展的混合体制，基性岩脉群切穿前期构造网，热液蚀变及断块式隆升把不同构造单元的出露高度拉开，为后续成矿事件提供了通道与热驱动。

2 区域构造演化对矿产成矿的控制机制

2.1 构造活动对成矿物质迁移的影响

从研究区由基底塑形到晚期差异隆升的构造序列出发,可以把构造流体通道理解为由断裂、韧性剪切带、层间滑脱与微裂隙网络共同构成的高渗透带,该通道在不同阶段被重复激活,从而把金属硫化物与氧化物相关溶质持续输送至有利富集部位。早古生代 NE 向剪切带在定向压扭场中形成石英脉—糜棱岩条带组合,脉体开合与剪切角度耦合产生的牵引型拉张区显著提高连通性,地表与坑探样品显示 As - Sb - Au 异常与剪切带核部重叠,且 Cu/Zn 与 S/Fe 比值相对围岩升高,揭示富含还原硫的深源流体沿该带定向运移并发生硫化作用。陕西凤县马蹄沟—庙沟金矿区位于唐藏—商丹构造混杂带内,该构造单元经历了板块构造、板内伸展和陆内造山 3 个重要阶段,印支期褶皱造山和脆—韧性剪切变形奠定了基本构造格架,晚加里东期的剪切变形在区内亦有深刻影响。中至晚古生代伸展体系把碳酸盐台地内部的层间界面与正断层尖灭端转化为渗流优势面,断层倾向侧的孔隙增大与角砾化使流体得以脉动式进入, Pb - Zn - Ag 的异常峰位与层内滑脱面相互对应,说明溶解再沉淀与脆性破裂共同控制物质富集。及至早中生代构造反转,逆冲叠置于早期正断层之上形成的闭合—再开启循环产生压缩抽汲效应, Au 的异常条带沿断层转折段连续分布,表明流体在弯折段发生低压膨胀与金属络合物解离。晚中生代至新生代走滑叠加伸展阶段,释放弯与牵引洼陷把走滑断裂两侧的渗流分区拉开,伴随基性岩脉供热与花岗质脉体补给, Cu - Fe - Ti 与磁化率异常集中在开阔的拉分小盆与脉岩接触带。陕西紫阳地区发育的早古生代基性岩墙(脉)集中侵入于志留纪(410 - 440 Ma),为拉分小盆内铜铁矿的富集提供了重要的热源和物质来源。综合这些证据,构造活动强度与成矿物质迁移效率呈正向关联:位移量大、重复活动频繁与多期脉体叠置的部位,显示更高的脉密度、更连续的元素异常与更稳定的硫同位素深源指向,反映出通道持续开放与流体通量加大对成矿物质长程输送的叠加放大效应。

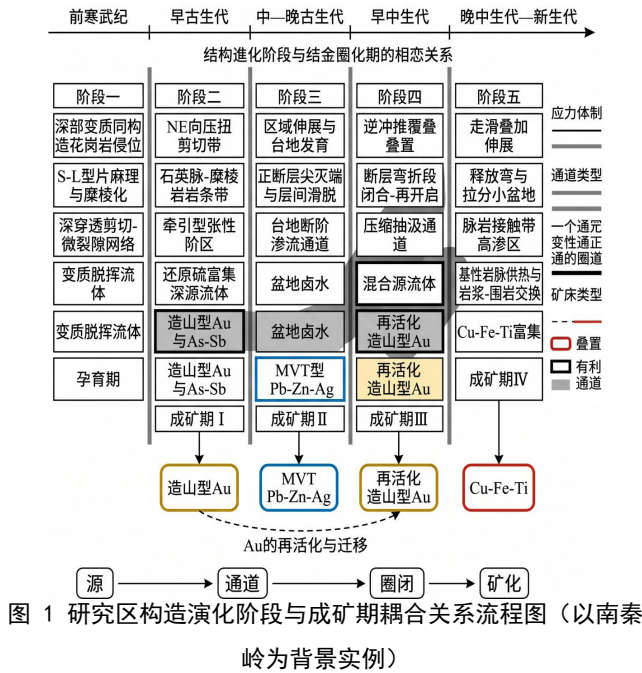
2.2 构造单元对矿产分布格局的约束

从构造分区来看,研究区可划分为北西向缝合带及其两侧增生楔、东段 NE 向基底穹隆—剪切带系统、中部碳酸盐台地断陷洼地以及西南部走滑转换段—拉分小盆。不同单元的力学特性与渗透结构差异,把矿产类型、规模与密度组织成分异格局。缝合带近旁的高剪应变与深部物质输入叠加,形成条带化 Au - As - Sb 成矿带,大型矿床多位于缝合界面两侧 5 - 10 km 内,矿体走向与构造走向一致。陕西南秦岭石泉—汉阴金矿带是秦岭金成矿带的重要组成部分,多期构造叠加和面理置换强烈,成矿主期与拆离滑脱构造同期,由岩浆分异而来的含矿热液叠加在早期矿化带之上形成了区内金矿床。基底穹隆—剪切带系

统因长期重复活化,出现脉群叠置与流体通量放大,金石英脉系密度升高,富集规模受剪切带核部控制,向穹隆外缘迅速衰减。南秦岭佛坪隆起的穹状基底出露和印支期花岗岩广泛侵入,早期以基底为主的塑性变形及晚期的脆—韧性变形叠加改造,为石英脉型金的富集提供了优越的构造条件和岩浆热源。碳酸盐台地断陷洼地以层控 MVT 型 Pb - Zn - Ag 为主,矿化受制于盖层内的层间滑脱面和台地断阶边界,矿带在断阶处被截断并转折。陕西南郑马元铅锌矿床位于扬子板块北缘,赋存于震旦系灯影组白云岩中,受断裂和地层控制明显,围岩蚀变较弱以碳酸盐化为主,是典型的 MVT 型铅锌矿床。走滑转换段与拉分小盆受基性岩脉供热与断块隆升影响, Cu - Fe - Ti 与磁化率异常围绕脉岩接触带环状分布,规模取决于释放弯的长度与开度。需关注的是,构造单元边界不仅限定矿化侧向展布,还通过渗透性突变与应力场旋转把富集区固定在交汇节点;同时,基底—盖层不整合面作为软弱界面,把跨单元的流体交换收敛至透隙化窗口,导致成矿带呈分段连续的几何特征。

2.3 构造演化阶段与成矿期的耦合关系

从时空序列重建来看,研究区构造演化把成矿事件组织成多期叠加的耦合链条,见图 1。前寒武纪基底塑形期以深部变质与同构造花岗质侵入为特征,把深源流体与长尺度通道预先构建,但以孕育为主。早古生代构造活化期在 NE 向压扭剪切带内触发造山型金的富集, As - Sb - Au 随石英脉组合进入成矿期 I,矿体受牵引型张性阶区控制。中至晚古生代伸展与碳酸盐台地形成,把层间滑脱与正断层尖灭端转化为渗流优势面,盆地卤水主导的 MVT 型 Pb - Zn - Ag 进入成矿期 II,矿化呈明显层控。早中生代构造反转把早期正断层逆冲再活化,在断层弯折段形成闭合到再开启的循环,促使 Au 的再活化与新增沉淀,定义成矿期 III。陕西凤县八卦庙金矿的矿床空间定位和矿体展布受脆—韧性剪切带控制,矿区内岩石剪切变形特征明显,金为粗粒可见金, Au 的再活化沉淀与早中生代构造反转期的弯折段低压膨胀直接相关。晚中生代至新生代走滑叠加伸展并伴随基性岩脉群供热,把拉分小盆与脉岩接触带塑造成 Cu - Fe - Ti 富集场,形成成矿期 IV,同时热液蚀变与断块式隆升提高暴露与保存机率。陕西略阳县徐家沟铜矿床赋存于中新元古界碧口岩群片理化细碧岩中,呈现明显的构造—热液改造特征, Cu、Ni、Co 等成矿元素主要来自细碧岩, S 主要来自岩浆,形成于中生代,属于火山沉积—构造—岩浆改造型矿床。由此推导,成矿期在时间上呈由缝合带到台地再到走滑转换段的迁移,在空间上被不整合面与构造单元边界收敛,重复再活化区出现矿体规模放大和品位跃迁的叠置效应,流程模型把流体来源、通道体系与圈闭类型按阶段耦合起来。



3 区域矿产资源分布规律及勘探方向建议

3.1 基于构造演化的矿产资源分布规律提炼

鉴于研究区由基底塑形—伸展台地—反转叠覆—走滑叠加的构造序列，矿产资源的空间格局表现为通道可重复激活、单元力学差异与成矿期迁移的耦合控制。从通道视角来看，位移量大的 NE 向剪切带、断裂交汇节点以及正断层尖灭端，把深

源还原流体与盆地卤水组织成高通量路径，脉群叠置与硫化作用在这些部位趋于增强；从单元视角来看，缝合带近旁的高剪应变域、基底穹隆的剪切核部、台地断陷的层间滑脱面以及走滑释放弯的拉分洼地，各自对应 Au、Au 石英脉、MVT 型 Pb - Zn - Ag 与 Cu - Fe - Ti 的主导类型，矿体展布与构造走向高度平行。需关注的是，缝合界面两侧 5 - 10 km 的条带与 NE 向剪切带交汇区呈现金的高密集度，而台地断阶转折和正断层尖灭端控制 Pb - Zn 富集，拉分小盆与基性脉接触带则集中 Cu - Fe - Ti 异常。典型实例中，陕西石泉—汉阴金矿带主成矿期与拆离滑脱构造同期，陕西马元铅锌矿为 MVT 型矿床，陕西徐家沟铜矿表现出火山沉积—构造—岩浆改造特征，充分验证了上述构造单元对主导矿种的分异控制规律。由此推导，构造活动强度与成矿密集度在时间上对应早古生代与早中生代的两次峰值，在空间上沿不整合面及单元边界被收敛并形成分段连续的矿集带。表 1 把主要矿种与关键构造单元进行对应，并给出代表性占比指标，用以归纳研究区的主控规律。叠置再活化的窗口位置往往出现品位跃迁与规模扩容，体现出通道长期开放与供热叠加对金属携带与沉淀的放大效应。同时，边界处的渗透性突变与应力场旋转把矿化连续体切分为若干段落，矿段之间在交汇节点实现能量与物质的再分配。这种规律具备稳定的时空可追踪性，在后续勘查部署中可作为尺度转换的约束。

表1 研究区主要矿产类型与构造单元对应关系表（以南秦岭为背景实例）

构造单元	主导矿产类型	优势控矿部位	资源占比或密度指标	空间指向与说明
北西向缝合带及两侧增生楔	Au - As - Sb	缝合界面两侧 5 - 10 km 条带、转折段	金矿床数量占比 64%	矿体走向与缝合带一致，剪切应变高、深源物质输入强
NE 向基底穹隆—剪切带系统	石英脉型 Au	剪切带核部及交汇节点	交汇区金矿占比 72%	脉群叠置、通道连通性高，流体通量放大；陕西佛坪隆起、石泉—汉阴带为典型
中部碳酸盐台地断陷洼地	MVT 型 Pb - Zn - Ag	层间滑脱面、正断层尖灭端	Pb - Zn 资源量占比 68%	矿带在断阶处转折并被截断，呈显著层控；陕西南郑马元铅锌矿为代表
西南部走滑转换段—拉分小盆	Cu - Fe - Ti	释放弯、拉分洼地与基性脉接触带	Cu - Fe - Ti 矿点密度占全区 61%	受岩脉供热与拉分开度共同控制，异常环状分布；陕西紫阳基性岩墙、徐家沟铜矿为实例
基底—盖层不整合带透隙化窗口	Au 与 Pb - Zn 叠置	不整合面透隙化窗口与边界交汇	叠置矿化点占比 45%	成矿带分段连续，在窗口位置发生规模放大与品位跃迁

3.2 构造控制下的矿产勘探靶区预测

鉴于通道可重复激活与单元边界收敛的控矿规律，靶区预测把构造交汇、反转叠覆节点与走滑释放弯作为优先对象。沿北西向缝合带两侧 5 - 10 km 与 NE 向剪切带切入的转折段，存在牵引型张性阶，为造山型金一级靶区；在陕西凤太矿集区、石泉—汉阴金矿带等关键地段，晚加里东期和印支期的多期剪切变形叠加区应是重点勘查目标；建议开展 1:10000 构造填图与无人机高精度磁测，测线距 50 - 100 m 并平行 NE 构造，叠

加 1 - 2 km 梯度地球化学剖面，样距 50 m，以 As - Sb - Au 指示带追踪剪切核。基底穹隆外缘与基底—盖层不整合透隙化窗口易形成 Au 与 Pb - Zn 叠置，宜布设浅层地震反射识别不整合起伏，并用时间域激电与电阻率偶极距 200 m 刻画硫化物富集带。碳酸盐台地断阶处的正断层尖灭端与层间滑脱面对应 MVT 型集中区，陕西南郑马元铅锌矿即典型实例，南秦岭灯影组白云岩分布区应优先部署，适宜开展 CSAMT，测线间距 500 m、站距 50 m，配合 Zn - Pb - Sr - Ba 地球化学剖面限定卤水运移

路径与沉淀窗。走滑转换段释放弯与拉分小盆及基性脉接触带有利于 Cu - Fe - Ti 集聚, 陕西紫阳地区早古生代基性岩墙发育区、略阳徐家沟铜矿周边是重要的 Cu - Fe - Ti 找矿潜力区, 建议地面磁测加密至 25 m, 联合广域电磁圈定热蚀变晕与导电脉岩。由此推导, 区域航磁与重力梯度先行筛查构造骨架, 叠加证据开展三维建模, 再以 100 - 200 m 浅钻验证异常中心, 实现靶区向工程的转换。

4 结语

研究区构造演化体现出由深部基底塑形到浅部差异隆升的递进框架, 构造通道在 multi 期应力场转换下被反复激活, 决定了矿系在时间与空间上的迁移与叠加。通道层面, 位移量大、活动频繁与多期脉体叠置部位具有更高的脉密度和稳定的深源硫指向, 直接放大金属长程输送与沉淀效率。单元层面, 缝合带近旁形成 Au - As - Sb 条带, 基底穹隆—剪切系统组织石英脉型金高密度集区, 碳酸盐台地断陷主导层控 Pb - Zn - Ag, 走滑

转换段—拉分小盆富集 Cu - Fe - Ti, 不整合透隙化窗口强化跨单元耦合与叠置。陕西省作为横跨华北地台与秦岭造山带的典型区域, 其太华群片麻岩基底、佛坪隆起穹状构造、石泉 - 汉阴金矿带、马元 MVT 型铅锌矿及紫阳基性岩墙等实际案例, 充分验证了上述构造控矿规律的系统性与可复制性。时空上, 成矿序列由造山型金的成矿期 I, 过渡至伸展背景下的 MVT 型成矿期 II, 再经反转叠覆触发金成矿期 III, 最终在走滑叠加与岩脉供热下进入 Cu - Fe - Ti 成矿期 IV。面向找矿实践, 应优先锁定缝合带两侧 5 - 10 km 条带、NE 向剪切交汇节点、台地断阶与正断层尖灭端、不整合透隙化窗口及释放弯等关键部位, 采用多证据体制构建三维构造—成矿模型, 并以高精度磁、电与地球化学联合约束异常中心, 实现从构造骨架识别到工程验证的高效转化。上述认识为复杂叠加区的资源规模化发现提供了可迁移的流程范式。

参考文献

- [1] 杨贺杰, 胡伟, 喻艳丽, 陈霏霏. 河南省细鳞片石墨矿分布特征及片度成因分析[J]. 世界地质, 2025, 44(04): 597-607.
- [2] 杨剑, 张卫雄, 陈爱兵, 翟向华, 张元, 姜鑫, 胡杨, 李永恒. 甘肃早子沟金矿区构造应力场数值模拟研究[J]. 高校地质学报, 2025, 31(03): 346-362.
- [3] 梁宏达, 方慧, 高锐, 谢昌丽, 裴发根, 肖都, 仇根根, 张小博, 郭杰. 大兴安岭中南段扎木钦铅锌银多金属矿床深部电性结构及成矿背景研究[J]. 地学前缘,
- [4] 段云江, 周思宇, 黄少英, 魏红兴, 罗彩明, 夏金凯, 梅永旭, 刘培焯. 塔里木盆地库车坳陷东部煤相关构造解析[J]. 天然气地球科学,
- [5] 赵昭, 胡志伟, 叶涛, 李果营, 岳军培, 谢祥. 渤南低凸起变质岩潜山风化壳储层发育特征及控制因素[J]. 中国石油大学学报(自然科学版), 2025, 49(06): 30-41.
- [6] 陕西省区域地质志. 陕西地质[M]. 北京:地质出版社, 2013.
- [7] 王根宝, 岳康茂, 张升全. 陕西南秦岭地质组成及其演化[J]. 陕西地质, 1996(01).
- [8] 胡国朝, 杨兴科, 任仓智, 等. 陕西凤县马蹄沟—庙沟金矿区控矿构造特征[J]. 黄金科学技术, 2019, 27(4): 469-479.
- [9] 曾阳, 付海平, 郑晓龙, 等. 陕西南郑马元铅锌矿床地质特征与成因分析[J]. 铜业工程, 2022(6): 53-56, 62.
- [10] 代军治, 陈荔湘, 王瑞廷, 等. 陕西省略阳县徐家沟铜矿床地质、地球化学特征及成矿模式[J]. 西北地质, 2016, 49(4): 99-109.
- [11] 陕西紫阳地区早古生代基性岩墙成因、地球动力学背景及其对成矿启示[D]. 万方数据, 2024.

作者简介: 吉鹏朝 (1991—), 男, 汉族, 本科, 研究方向为地质工程。