

钨锡矿化花岗岩地球化学分异规律

徐鹏，鲁新丽，张克亮

云南德成规划设计有限公司，云南 昆明 650000

DOI:10.61369/ADA.2026010066

摘 要： 钨锡矿化花岗岩演化中呈现显著的地球化学分异，分异方向与程度直接影响矿质的聚集与释放，岩浆上升冷凝过程中持续分离亲石元素与亲流体元素，使富挥发分熔体具备运移金属的能力，多阶段分异让示踪元素分布趋向高演化端元，形成利于钨锡富集的弱还原环境。随温压条件改变，金属与挥发分由深部向浅部运移，在构造薄弱带形成局部富集，花岗质岩浆体系内微量元素分布、挥发分富集及残余组分演变，共同控制钨锡矿化的时序与规模，这一分异规律揭示矿化花岗岩内部物质传输路径，可为判断岩浆成矿潜力提供依据。

关 键 词： 钨锡矿化；花岗岩；地球化学分异；挥发分富集；岩浆演化

Geochemical Differentiation Pattern of Tungsten-Tin Mineralized Granite

Xu Peng, Lu Xinli, Zhang Kelian

Yunnan Decheng Planning and Designing Co., Ltd., Kunming, Yunnan 650000

Abstract： During the evolution of tungsten-tin mineralized granite, there is a significant geochemical differentiation, and the direction and degree of differentiation directly affect the aggregation and release of minerals. During the ascent and condensation of magma, the elements that are close to the rock and the elements that are close to the fluid continuously separate, enabling the volatile-rich melt to have the ability to transport metals. The multi-stage differentiation leads to the distribution of tracer elements tending towards the high-evolved end members, forming a weakly reducing environment conducive to the enrichment of tungsten and tin. With changes in temperature and pressure conditions, metals and volatile components migrate from the deep to the shallow, forming local accumulations in the weakly deformed zones. The distribution of trace elements, volatile component enrichment, and residual component evolution within the granite magma system jointly control the timing and scale of tungsten-tin mineralization. This differentiation pattern reveals the internal material transport path of the mineralized granite and can provide a basis for judging the magma's mineralization potential.

Keywords： tungsten-tin mineralization; granite; geochemical differentiation; volatile component enrichment; magma evolution

引言

钨锡矿化常与高度演化花岗岩体相伴，内部元素组合与挥发分含量存在独特指向性，花岗岩于深部形成并经历多阶段抬升，过程中分异作用持续调整岩浆体系构成，提升金属与挥发分的迁移效率，围岩应力场变动、构造裂隙导通状态及残余熔体属性，共同决定金属富集的空间分布。钨锡矿化花岗岩的地球化学特征记录岩浆演化轨迹，反映金属富集的动力机制，为解析成矿物质来源与运移路径提供重要依据。

一、矿化花岗岩的分异困境

（一）分异方向的识别难点

钨锡矿化花岗岩演化过程中存在多阶段、多方向的分异特征，岩体内部相关变化较为微弱，无法依靠单一指标完成识别，岩浆上升与冷凝过程中持续调整内部结构，部分元素迁移路径复杂，温压小幅波动即可改变元素分配状态，岩体结构差异、结晶速率变化及矿物组合细微调整，均会导致分异方向难以通过常规

标志确定，仅依靠少量示踪元素或局部矿物组合开展分析，易忽视岩浆体系整体变化，进而形成认知偏差。不同阶段矿物会对早期地质信息形成覆盖，真实分异轨迹易被掩盖，分异方向识别与元素分布、岩浆黏度、挥发分含量及压力条件相关，单一因素变动即可引发分异方向调整，提升判断难度，多重因素共同作用下，分异方向表现出隐蔽性与阶段性特征，是矿化花岗岩研究中的关键难点^[1]。

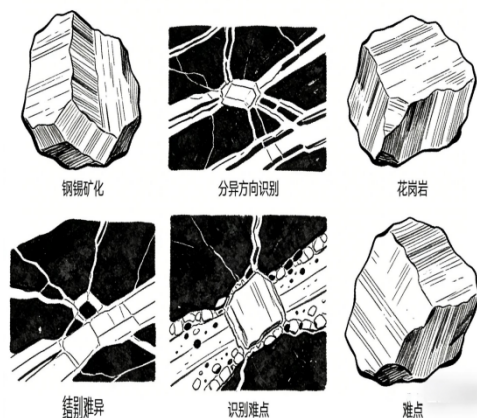


图1: 钨锡花岗岩分异识别难点示意图

(二) 金属富集现象的成因疑问

花岗岩体系内钨锡等金属的富集过程复杂,成因受多重因素影响,研究结果存在较强不确定性,深部岩浆对金属的聚集并非呈线性发展,不同阶段金属迁移趋势存在差异,这一过程受温度、压力、熔体组分及挥发分含量共同控制,促使金属进入高演化熔体的动力机制易受岩体结构变动干扰,金属富集表现出非连续特征,金属在岩体中的滞留时长、与矿物的反应速率及流体作用强度,均会影响最终富集规模。部分区域出现金属异常富集,相邻地段则表现为贫化状态,无法通过单一成因模型完成解释,围岩属性、构造空间位置及岩体冷凝速率同样会改变金属运移与聚集状态,造成富集特征的区域差异^[2]。

(三) 挥发分行为的不确定性

岩浆体系内挥发分的赋存状态、释放规律与参与程度均存在较强波动性,这一特征直接作用于钨锡金属的运移与富集过程,深部岩浆中的挥发分多以溶解形式存在,温压条件改变会引发其状态频繁转换,释放时机难以精确定,热力条件的微小差异即可改变挥发分与熔体的分配关系,进而改变金属的赋存与搬运形式,部分阶段挥发分可在局部区域集中聚集,形成临时运移通道并快速释放;部分阶段则被封闭于岩浆内部,降低整体运移效率。这种不均衡的释放规律会导致金属呈离散状富集,挥发分内部组分变化会影响其携带金属的能力,氟、硼等组分比例变动可引发金属溶解度突变,增加金属迁移规律的预判难度^[3]。

二、岩浆演化控制下的分异路径

(一) 岩浆组分变化的关键环节

花岗质岩浆上升与冷却过程中会发生多阶段组分调整,直接决定地球化学分异的方向与强度,深部岩浆处于高温高压环境,矿物析出量较少,元素分布保持相对均衡,岩浆向浅部迁移时,结晶作用持续增强,不同矿物的结晶程度存在差异,部分元素被优先结合,残余熔体持续向高演化方向发展,结晶序列推进过程中,铁镁质矿物占比降低,含挥发分矿物比例升高,熔体体系由封闭状态逐步转向开放活跃状态^[4]。这一转变为金属元素重新分配提供条件,早期部分元素进入固相矿物,后期部分元素在熔体中不断聚集,形成各阶段特有的地球化学标识,温度梯度、压力

变化及岩浆内部对流形式均可调整组分演变顺序,让分异过程呈现多样路径。

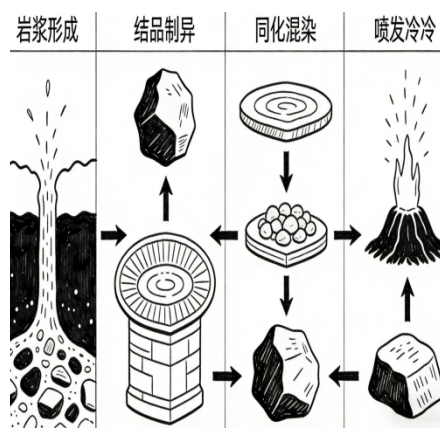


图2: 花岗质岩浆组分演化关键环节示意图

(二) 微量元素指示的演化线索

微量元素在岩浆体系中含量较低,可灵敏反映岩浆演化方向与进程,为分异过程研究提供有效依据,微量元素与不同矿物的结合能力存在明显区别,结晶过程中表现出较强选择性,适合作为分异过程的追踪指标,岩浆向高演化阶段发展时,稀土元素、过渡族元素与高场强元素的配比随之改变,体现熔体结构的重构过程,部分元素因矿物选择性捕获而快速减少,部分元素在残余熔体中持续聚集,分布特征呈现明显偏向性。此类变化具有阶段性特征,不同部位岩浆可形成可识别的微量元素分布模式,对比相关特征能够还原岩浆从初始到成熟的演化过程,明确分异程度与矿化潜力之间的联系,构造背景、熔体源区及挥发分含量差异均会体现在微量元素分布中,让指示线索更具复杂性与判别意义^[5]。

(三) 挥发分释放的时序特点

挥发分释放节奏直接影响金属元素迁移过程,时序变化是分异路径形成的重要节点,岩浆演化早期,挥发分多溶解于熔体内部,未形成独立流体相,作用方式相对隐蔽,温度与压力逐步降低后,挥发分从熔体中分离形成微小流体包裹体,初期活动范围有限,却已对熔体结构产生影响,演化至晚期阶段,挥发分聚集达到临界值,释放过程明显加快,可引发局部强烈扰动,导致金属迁移方向发生突变。不同挥发分组分溶解度存在差异,各阶段释放特征各不相同,氟、硼等组分在晚期可强化金属迁移效率,加强金属与流体之间的耦合作用,岩体冷凝速度、应力场变化及围岩性质差异会改变挥发分释放时段,时序特征存在明显区域差异^[6]。

三、钨锡富集的内部驱动机制

(一) 金属迁移通道的形成条件

钨锡等金属在岩浆系统内的迁移依托连续稳定的通道,这类通道由岩浆物理性质、构造裂隙与挥发分活动共同构建,岩浆上升过程受区域应力场约束,局部张裂带与原生微裂隙逐步扩张,为金属运移提供基础空间,熔体黏度、温度梯度与结晶节奏的变动,可调节通道开合状态,持续改变金属运移特征,挥发分在通道发育中发挥重要作用,压力释放可激活既有裂隙,保障金属持

续向上运移。部分区段因矿物组合差异表现出较高渗透性，通道得以延伸并长期保持稳定，金属的汇入、滞留与扩散行为在上述条件下得到强化，运移路径呈现稳定与定向特征，通道形成后，金属可沿既定路径持续汇聚，为后续富集区形成提供物质保障^[7]。

（二）流体介质的携带能力特征

流体在岩浆体系中的活动模式决定金属运移效率，携带能力受组分构成、温压条件与熔体结构共同影响，高温高压环境中，流体以复合形态存在并与熔体衔接过渡，金属以络合物形式维持较高活跃度，氟、硼等组分的参与可提升金属溶解度，增强流体运载金属的能力，岩体冷凝节奏改变时，流体可在局部快速膨胀，带动金属脱离原位进入新的空间。流体密度与黏度的变化使其在不同深度表现出差异化运载效果，金属随流体运动呈现选择性分布，压力周期性变动与应力场动态调整，使流体活动呈阶段性跃变，影响金属运移路径与效率。

（三）局部富集区的形成逻辑

局部富集区的形成是岩浆演化、流体活动与结构变动协同作用的产物，岩浆向高演化阶段发展时，金属在残余熔体中不断聚集，为富集提供前期基础，后期流体在裂隙与孔隙中活动，对均一体系内的金属进行再次分配，这类过程多在结构疏松带或压力梯度显著区域得到加强。局部区段矿物持续结晶析出，将金属固定于稳定环境，形成显著富集特征，岩体冷凝不均使部分区域拥有更优沉淀条件，金属在短时间内大量汇聚，应力场变动引发通道形态调整，金属运移方向出现局部偏转，富集区空间分布表现出明显指向性^[8]。

四、分异规律的整体凝练

（一）分异特征的共性提炼

钨锡矿化花岗岩分异过程中存在若干指向性共性，贯穿岩浆演化全程，元素在不同结晶序列中分布持续偏移，向高演化端聚集，岩体内部微量元素组合形成可识别模式，挥发分含量随岩浆成熟度提升而增加，为金属迁移提供动力，加剧分异活跃度，不同阶段矿物参与度存在差异，持续调整岩浆结构，形成具节奏性

的分异轨迹。金属元素表现出恒定偏移方向，与岩浆演化形成稳定耦合关系，这些特征在不同花岗岩体中虽有差异，但均能在整体分异规律中找到共通之处，为解析矿化花岗岩内部运行模式提供凝练框架。

（二）金属聚集过程的整体框架

金属元素在岩浆体系中的聚集遵循特定顺序，可通过完整结构框架解析，岩浆早期流动性强，金属以分散状态存在于熔体中，分异作用不断加强，金属在残余熔体中的占比提升，为后续集中创造条件，挥发分活动加剧阶段，金属与流体形成耦合，迁移方向趋于集中，沿构造通道或裂隙逐步汇聚^[9]。流体压力变化与局部岩性差异，使金属在特定区域停留沉淀，聚集范围逐步收缩，岩体冷凝前后，金属在稳定环境中形成空间连续的矿化特征，整个过程从分散、集中到固结层次清晰，该框架揭示了金属聚集的连续逻辑。

（三）矿化花岗岩识别思路的升华

结合分异特征、元素组合与结构背景，可提升矿化花岗岩识别水平，岩浆分异的程度与方向，能通过微量元素分布、挥发分含量及矿物组合体现，这些指标成为判断岩体性质的重要线索，金属进入高演化熔体后的行为模式，在岩体内部留下指向性地球化学印记，增强识别可操作性。岩体结构特征及与周边环境的匹配度，可进一步强化矿化潜力判断，整合这些信息可形成系统化识别路径，将矿化花岗岩从普通花岗质岩体中区分出来，识别思路在多因素交织中不断完善，具备更高辨识能力与适用性^[10]。

五、结语

钨锡矿化花岗岩的分异特征随多阶段岩浆演化与流体活动逐步显现，金属迁移路径与局部富集格局由多重因素共同塑造，分异过程中出现的元素偏移、挥发分增强及通道活化，让金属在特定条件下逐步聚集，形成稳定矿化体，岩体内部结构节奏、应力变化与熔体性质的协调，为矿化形成提供持久动力。凝练这些规律可梳理矿化过程系统逻辑，呈现钨锡富集内在机制，为深入认识矿化花岗岩特征提供完整思维框架。

参考文献

- [1]LI W ,TANG J ,GUO N , et al. Robust Timing Constraints for Granitic Magmatism and Hydrothermal Mineralization in the Tieshanlong W - Sn Ore Field, Eastern Nanling Range, South China [J]. Acta Geologica Sinica - English Edition, 2024, 98 (5): 1255-1269. DOI:10.1111/1755-6724.15212.
- [2]倪培,潘君屹,韩亮,等. 华南与花岗岩有关大规模钨锡成矿作用的时空分布、成矿模式及找矿方向 [J]. 地质学报, 2023, 97 (11): 3497-3544. DOI:10.19762/j.cnki.dizhixuebao.2023368.
- [3]周云,黄惠兰,于玉帅,等. 湖南锡田钨锡多金属矿床流体包裹体显微测温 and LA-ICP-MS 原位分析对成矿流体演化的制约 [J]. 地球科学, 2021, 46 (04): 1248-1268.
- [4]Chen J ,Wang R ,Zhou J , et al. Multiple-aged granitoids and related tungsten-tin mineralization in the Nanling Range, South China [J]. Science China Earth Sciences, 2013, 56 (12): 2045-2055.
- [5]黄长帅,卢见昆,陶明荣,等. 广西越城岭地区钨锡矿成矿条件分析 [J]. 矿产与地质, 2018, 32 (04): 616-621.
- [6]汪祖豪. 广东阳春盆地锡山岩体岩石地球化学、年代学和氧逸度特征及其对锡成矿作用的制约 [D]. 成都理工大学, 2017.
- [7]Zhang R ,Lu J ,Lehmann B , et al. Combined zircon and cassiterite U - Pb dating of the Piaotang granite-related tungsten - tin deposit, southern Jiangxi tungsten district, China [J]. Ore Geology Reviews, 2017, 82 268-284. DOI:10.1016/j.oregeorev.2016.10.039.
- [8]Wilkins C ,Jeffery B ,Speer J , et al. Mineral assemblages and textures of granite-hosted veins in the Hemerdon W - Sn deposit: constraints from scanning electron microscope chemical X-ray mapping [J]. Applied Earth Science, 2017, 126 (2): 104-105. DOI:10.1080/03717453.2017.1306306.
- [9]Zhou Y ,Liang X ,Wu S , et al. Isotopic geochemistry, zircon U - Pb ages and Hf isotopes of A-type granites from the Xitian W - Sn deposit, SE China: Constraints on petrogenesis and tectonic significance [J]. Journal of Asian Earth Sciences, 2015, 105 122-139. DOI:10.1016/j.jseas.2015.03.006.
- [10]陈喜峰,陈秀法,叶锦华. 东南亚主要花岗岩省(带)及其钨锡矿化特征 [C]// 中国地质学会. 第四届全国青年地质大会摘要集. 中国地质调查局发展研究中心; , 2019: 287-289.