

岩浆硬石膏的成因及其成矿意义

王瑞^{1,2*}, 周秋石^{1†}

1. 中国地质大学(北京)地质过程与成矿预测全国重点实验室, 中国地质大学(北京)科学研究院, 北京 100083

2. 中国地质大学(北京)深时数字地球前沿科学中心, 北京 100083

* 通讯作者, E-mail: rw@cugb.edu.cn

† 同等贡献

2025-12-02收稿, 2026-04-02修回, 2026-04-17接受, 2026-05-22网络版发表

国家自然科学基金杰出青年科学基金项目(42225204)资助

1 引言

斑岩Cu-(Mo-Au)矿床(以下简称斑岩Cu矿床)是最重要的岩浆热液型矿床之一, 是全球范围内Cu、Mo金属的最重要来源和Au的重要来源。斑岩Cu矿床的形成与高氧逸度(fO_2)和高硫(S)含量的岩浆有关(例如, Richards, 2003; Simon和Ripley, 2011)。高氧逸度使得岩浆可以溶解更多的S, 后者进一步提高岩浆对Cu、Au等金属元素的搬运能力(Jugo等, 2005; Jugo, 2009)。然而, 无论是岩浆的高S还是高 fO_2 环境, 其具体形成过程都存在较大争议。早期的一些研究指出, 无论是火山喷发还是斑岩成矿, 其喷发过程消耗的S或成矿所需要的S均远超岩浆系统的S承载力, 即“excessive S problem”(Wallace, 2001; Blundy等, 2015)。还有研究指出, 初始岩浆可能发生硫化物饱和, 从而导致成矿潜力降低(Fortin等, 2015; Matjuschkin等, 2016; Zhou等, 2026)。因此, 一个需要回答的问题是: 供给岩浆成矿的巨量S从何而来? 另外, 尽管对斑岩矿床成矿岩浆的氧化机理提出了多种不同的认识, 如俯冲型斑岩矿床成矿岩浆中的水分解氧化(Tollan和Hermann, 2019)、碰撞型斑岩矿床成矿岩浆在下地壳的角闪石/石榴子石分离结晶自氧化等(Tang等, 2018; Luo等, 2024; Zhang等, 2025), 但被公认为具备高 fO_2 的成矿岩浆, 却很少有岩浆硬石膏的报道(Xiao等, 2012)。这是否意味着这些岩浆的氧化程度难以达到硬石膏的饱和条件?

近年一些研究报道了斑岩Cu矿床中岩浆硬石膏($CaSO_4$)的产出(Xia等, 2023; Audétat等, 2025, 2026; Zhou等, 2026; Jin等, 2026), 意味着其母岩浆达到了硫

酸盐的饱和, 指示岩浆的高 fO_2 以及高S含量。伴随近年的实验岩石学工作(Boulliung和Wood, 2023; Liu等, 2025; Muth和Cottrell, 2025)以及模拟计算(Zhou等, 2026), 岩浆硬石膏的饱和条件已能得到精确限定, 可以用来辅助限定岩浆演化过程。后文“硬石膏”未特别说明, 均指岩浆硬石膏。本文基于近年来相关成果, 针对岩浆硬石膏的产出状态、稳定域等问题进行梳理与总结, 以期丰富对斑岩成矿体系金属富集过程的理解。

2 岩浆硬石膏的产出状态与共生关系

在斑岩Cu矿床中, 硬石膏既可以热液成因的矿物出现(Heinrich, 2005), 也可以岩浆成因的矿物包裹体或独立的基质矿物出现(Xiao等, 2012; Hutchinson和Dilles, 2019), 有时还以较大的斑晶或捕掳晶产出(Xiao等, 2012; 秦克章等, 2014; Audétat等, 2025, 2026)。但全球范围内迄今为止报道的发育岩浆硬石膏的斑岩Cu矿床仅有33例(Audétat等, 2025, 2026)。很多斑岩Cu矿床的成矿岩体中, 未见或未报道过岩浆硬石膏, 可能与这些岩石在地表或近地表条件下易受风化有关, 如Audétat等(2025)指出一些火山岩或次火山岩手标本上的“板状空洞”可能是岩浆硬石膏遭受风化和溶蚀后留下的。

一些研究发现岩浆硬石膏与岩浆硫化物可在平衡状态下共存(Li等, 2009; Audétat等, 2025)。这种共存关系得到了近年的热力学计算(He等, 2024)及实验岩石学研究结果(Parat等, 2011; Liu等, 2025)的支持(图1)。岩浆硬石膏也常见包裹于磷灰石, 在中国多龙矿床和巨龙矿床、墨西哥El Teniente矿床、美国Santa Rita矿床等矿床, 岩浆硬石膏均被发现与高S磷灰石共生(Li等, 2021;

中文引用格式: 王瑞, 周秋石. 2026. 岩浆硬石膏的成因及其成矿意义. 中国科学: 地球科学, 56(6): 2363–2368, doi: [10.1360/SSTe-2025-0418](https://doi.org/10.1360/SSTe-2025-0418)英文引用格式: Wang R, Zhou Q. 2026. Origin of magmatic anhydrite and its implications for porphyry Cu mineralization. Science China Earth Sciences, 69(6): 2318–2322, <https://doi.org/10.1007/s11430-025-1930-0>

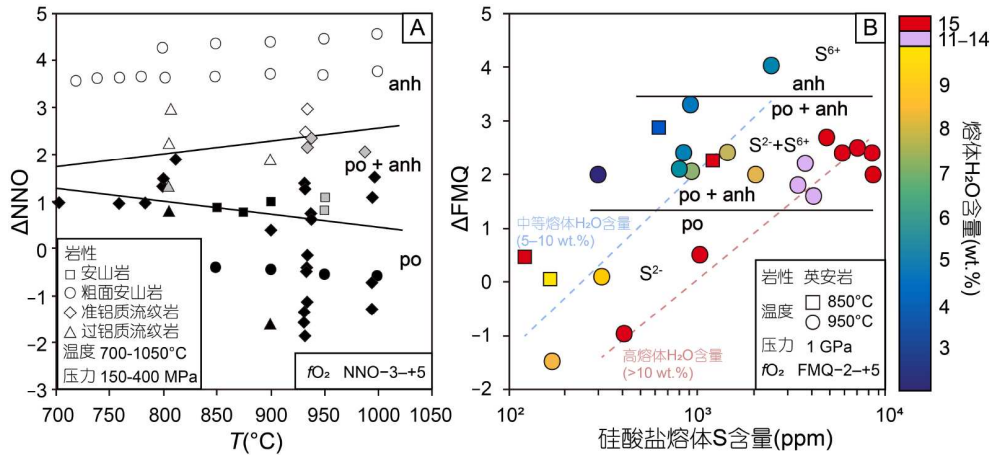


图1 部分研究中关于磁黄铁矿(po)与硬石膏(anh)稳定域的实验结果。(A) 不同岩性和不同温压条件下磁黄铁矿和硬石膏稳定存在的氧逸度范围(Parat等, 2011)。在700–1050 $^{\circ}\text{C}$ 、150–400 MPa的温压范围内, 硬石膏约在NNO+1的氧逸度条件下出现。(B) 下地壳温压条件下(850–950 $^{\circ}\text{C}$, 1.0 GPa) fO_2 及 H_2O 含量对英安质熔体中S的溶解度影响, 在约FMQ+1.6的氧逸度条件下岩浆中开始出现石膏(Liu等, 2025)

Xia等, 2023; Audétat等, 2025; Zhou等, 2026)。

岩浆硬石膏在斑岩系统中的产出可能比我们想象的普遍。在Bingham Canyon矿床, 致矿岩体安粗岩中单斜辉石、角闪石及斜长石, 均发现了岩浆硬石膏包裹体(Zhang和Audétat, 2017; Grondahl和Zajacz, 2017); Hutchinson和Dilles(2019)在美国Christmas、Yerington, 智利El Salvador、Encuentro等斑岩Cu矿床中发现包裹在单斜辉石、角闪石、石英等矿物中的岩浆硬石膏包裹体; 最近Audétat等(2025)在Santa Rita斑岩铜矿区的安山质到流纹英安质岩石中均发现岩浆硬石膏呈矿物包裹体的形式产出于角闪石、石英等斑晶矿物中。以上报道表明, 岩浆硬石膏的沉淀条件较为广泛。基于与斑岩Cu矿床相关的超镁铁质堆晶岩中通常只出现黄铁矿等硫化物这一观察事实(Zhang等, 2022; Nathwani等, 2025), 我们认为硬石膏的饱和和结晶发生在中上地壳深度, 是初始岩浆经过特定的深部岩浆过程后形成的。

3 岩浆硬石膏稳定域的数值模拟与实验岩石学研究

在硫饱和的前提下, 岩浆是以硫化物还是硬石膏饱和和为主主要取决于 fO_2 , 如岩浆硬石膏普遍在FMQ>~+1.5 (FMQ指 fO_2 相对于铁橄榄石-磁铁矿-石英氧缓冲对的对数级别, 后同)条件下结晶(图1)。Kleinsasser等(2022)测定硫化物-硫酸盐相变的FMQ发生在+1.81±0.56(英安质熔体, 1000 $^{\circ}\text{C}$, 300 MPa), Liu等(2025)测定该相变FMQ发生在~+1.6(英安质熔体, 850–950 $^{\circ}\text{C}$, 1 GPa)。硬石膏在岩浆中的饱和和受控于硬石膏饱和时的硫含量(sulfur content at anhydrite saturation, SCAS; Jugo, 2009), 而

SCAS与岩浆成分有关。Zajacz和Tsay(2019)通过统计分析发现, SCAS与熔体中 Ca^{2+} 、 Mg^{2+} 、 Fe^{2+} 等二价金属阳离子组分的含量成正比, 偏铝质/碱性熔体中的 Na^{+} 、 K^{+} 或过铝质熔体中的 Al^{3+} 也可以增加SCAS。 H_2O 对SCAS的影响受控于熔体聚合度, 在长英质熔体中高 H_2O 对SCAS的促进作用显著, 在偏基性熔体中作用较弱。近年的实验岩石学研究发现, 较高 fO_2 条件下(FMQ+2)水能够极大地促进SCAS(Li等, 2025; Liu等, 2025; Audétat等, 2025), 极富水的条件下($H_2O>13$ wt.%)FMQ+2的英安质岩浆中S的溶解度可高达8434 ppm(图1b; Liu等, 2025; 实验的温压和氧逸度条件分别为950 $^{\circ}\text{C}$ 、1 GPa), 这比基于单个熔融包裹体分析结果计算的成矿岩浆中S含量(~2500 ppm)高得多(Grondahl和Zajacz, 2022)。相比之下, 较低氧逸度下 H_2O 对SCSS的影响较小, 水含量每增加1 wt.%仅能提高~100 ppm的SCSS(Fortin等, 2015)。

岩浆硬石膏的稳定性同时受温度和压力的控制, 温度和压力通过影响岩浆 $S^{6+}/\Sigma S$ 转变的FMQ阈值(图2), 从而间接影响岩浆硬石膏稳定性(Jugo等, 2005)。同等 fO_2 条件下, 更低的FMQ阈值意味着更高的岩浆 $S^{6+}/\Sigma S$, 利于岩浆硬石膏的稳定性。Matjuschkin等(2016)通过实验结果推断压力升高会提高NNO阈值, 即高压不利于岩浆硬石膏稳定。然而后续多数研究得出了相反结论, 即压力升高应降低FMQ阈值(Nash等, 2019; Boulling和Wood, 2023; Muth和Cottrell, 2025)。Boulling和Wood(2023)指出, 导致结论差别的原因, 主要与选取的氧缓冲对有关。如Matjuschkin等(2016)的实验采用的是NNO(Ni-NiO)氧缓冲对, 若采用FMQ氧缓冲对, 岩浆硬石膏的稳定性将随压力的升高而下降。此外, $S^{6+}/\Sigma S$ 的测试

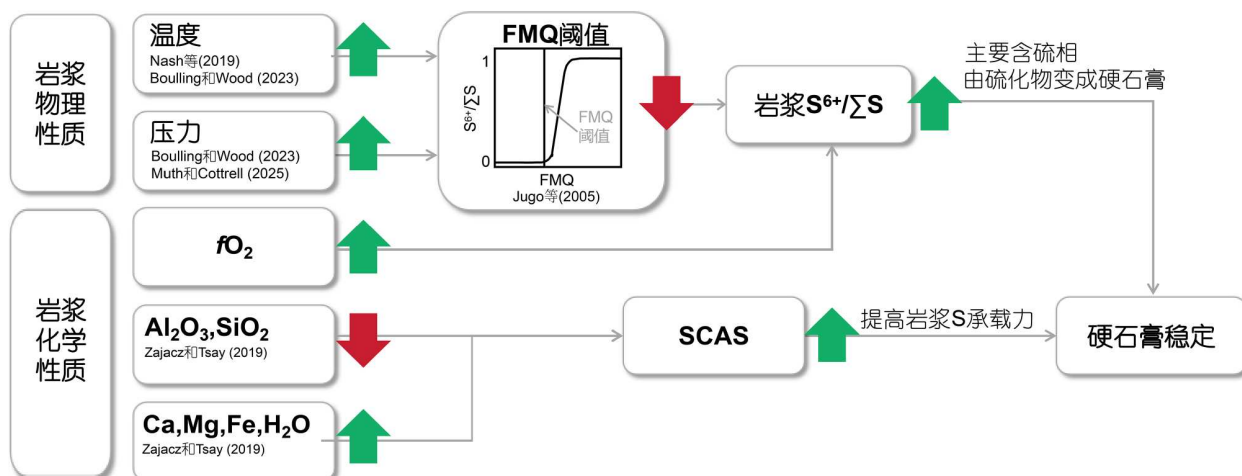


图2 有利于硬石膏稳定存在的岩浆物理化学条件示意图。相应论证见正文

方法也对实验结果产生影响。Matjuschkin等(2016)通过岩浆的S含量来估计 $S^{6+}/\Sigma S$ ，而非使用XANES直接测量(Muth和Cottrell, 2025)。Muth和Cottrell (2025)进一步通过热力学数值模拟指出，压力对 $S^{6+}/\Sigma S$ 的直接影响非常小，压力本质上通过影响 $Fe^{3+}/\Sigma Fe$ 控制FMQ阈值。即便如此，Audétat等(2026)的统计发现，含岩浆硬石膏的成矿侵入体均具备高Sr/Y特征，指示高压下角闪石+石榴子石的分离结晶，高压通过调节 $Fe^{3+}/\Sigma Fe$ 间接影响岩浆硬石膏的稳定性。相比于压力，温度对FMQ阈值的影响更为显著，且历来观点较为一致(Nash等, 2019; Boulling和Wood, 2023)。Boulling和Wood(2023)在大气压压力条件下对不同熔体成分(玄武岩、安山岩、碧玄岩、霞石岩等)中岩浆硬石膏的稳定性开展了研究，发现温度从1200 °C上升到1500 °C时，FMQ阈值可降低约0.6，从而有利于岩浆硬石膏的稳定存在。

综合而言，升高温度和压力通过降低FMQ阈值的方式有助于岩浆硬石膏的稳定；高 Ca^{2+} 、 Mg^{2+} 、 Fe^{2+} 、 H_2O 等岩浆化学成分因素通过提高岩浆对硫酸盐的承载力(SCAS)，间接利于岩浆硬石膏稳定(图2)。

4 对成矿过程的指示意义

初始 fO_2 较低的成矿岩浆可能发生硫化物饱和。Zhou等(2026)依据Fortin等(2015)和Zajacz和Tsay(2019)提供的SCSS与SCAS计算方法，以Schmidt和Jagoutz(2017)提供的玄武质岩浆为初始成分模拟S演化路径。在0.2 GPa以及较低初始 fO_2 条件(FMQ<+0.75)下，玄武质岩浆的SCSS仅为1000 ppm左右，对于S含量为530 ppm的初始岩浆来说可在演化到 $SiO_2=56\%$ 时便发生硫化物饱和(图3)。另外，模拟发现无论是何种岩浆成分条件，SCSS总是低于

SCAS。这说明在初始 fO_2 不高的条件下，岩浆总是先结晶硫化物。这对于碰撞型斑岩矿床来说尤为常见(Huang等, 2020; Park等, 2021; Sun等, 2023)，因此在这些矿床中观察到的岩浆硬石膏意味着岩浆通过角闪石+石榴子石分异自氧化/高 fO_2 岩浆混合等方式获得高 fO_2 (Tang等, 2018; Luo等, 2024)，通过同化硫化物/高S岩浆混合等方式获得高S(图3过程①; Xia等, 2023; Jin等, 2026; Zhou等, 2026)。对于俯冲型斑岩矿床，初始弧岩浆常具有相对高的 fO_2 (FMQ+1; Cottrell等, 2021)，可以满足优先饱和硬石膏而非硫化物的条件，避免了早期硫化物饱和。Grondahl和Zajacz(2017)对美国Bingham Canyon矿区安粗岩中单斜辉石熔体包裹体的研究发现，从早期到晚期岩浆中的S含量始终位于SCSS之上和SCAS之下。结合单斜辉石中硬石膏包裹体的发育，他们认为岩浆的 fO_2 条件始终满足饱和硬石膏的条件，或者说这些硬石膏记录了初始高 fO_2 岩浆的存在。

由于低温不利于硬石膏稳定，相比基性岩浆，中酸性岩浆需要更高FMQ来满足硬石膏饱和。从1100到900 °C， S^{2-} 转变为 S^{6+} 的FMQ阈值从+1升为+2(Nash等, 2019)，而氧逸度达FMQ+2的岩浆并不常见，Cottrell等(2021)统计的弧岩浆中FMQ≥+2者<10%。因此，与斑岩矿化相关的岩浆硬石膏的发育反映岩浆具有异常高的 fO_2 。伴随高 fO_2 的高S承载力，又进一步指向高 H_2O 条件。Audétat等(2025a)根据Santa Rita斑岩Cu矿床一个含1.8 vol.%岩浆硬石膏(风化空洞形式存在)的安粗质斑岩脉样本，估算出母岩浆的S含量可高达5600 ppm，进而推测成矿岩浆异常富水(>13%)。

近年Jin等(2026)的研究揭示了岩浆混合促成硬石膏沉淀的过程。他们对长江中下游成矿带阳新斑岩矿化侵

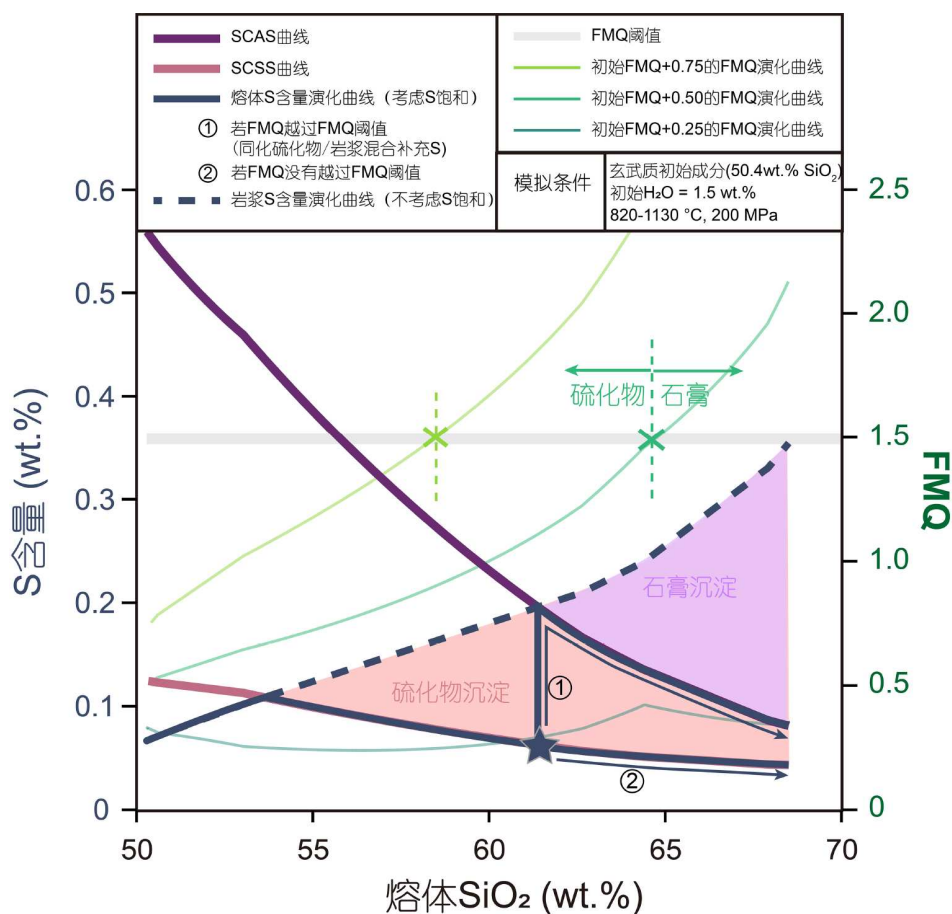


图3 熔体中S含量、SCSS、SCAS、 fO_2 (FMQ对数单位)与 SiO_2 含量变化关系的实验模拟结果(修改自Zhou等, 2026)。实验模拟以玄武质熔体(初始S含量~530 ppm)为初始条件(Schmidt和Jagoutz, 2017), 实验温度范围820–1130 °C, 实验压力位0.2 GPa。图中粗线(除灰色)示意S含量, 细线示意FMQ, 其中FMQ基于角闪石分异随 SiO_2 的变化

入体的镁铁质捕虏体进行研究, 发现在一期斜长石富Ca核部、角闪石富Al核部之外, 发育一期伴生岩浆硬石膏的贫Ca缘和贫Al缘, 指出高Ca、高Al且富S的中基性氧化岩浆注入浅部相对低Ca、低Al的岩浆房后, 经历分离结晶导致岩浆硬石膏饱和。岩浆硬石膏储存了相当一部分S, Li等(2021)统计一组西藏多龙矿床中与岩浆硬石膏共生的磷灰石, 其XF/XCl相对稳定而S含量变化范围较大(1.38–0.60 wt.%), 记录了以硬石膏形式储存的S。经计算得出, 这些硬石膏锁定了成矿岩浆80%的S。岩浆硬石膏可以在后续热液阶段被分解并提供S(Streck和Dilles, 1998; Dilles等, 2015; Li等, 2021; Jin等, 2026), 且其分解过程($SO_4^{2-} \rightarrow SO_2$)可以通过氧化还原反应进一步氧化岩浆, 在锆石 δEu 等矿物指纹中留下痕迹(Dilles等, 2015)。

岩浆硬石膏的发育与斑岩Cu矿化相关性。据Audé-tat等(2026)统计, 与斑岩Cu矿化有关的岩浆硬石膏的案例占有所有岩浆硬石膏报道的80%, 而约20%与斑岩Cu矿

化无关(Li等, 2009; Wallace和Edmonds, 2011)。

5 结语与展望

斑岩Cu矿床中岩浆硬石膏的发育表明斑岩成矿岩浆具备满足岩浆硬石膏饱和的 fO_2 和S含量条件。岩浆硬石膏作为缓冲剂为后期岩浆热液的出溶提供了大量额外S, 补足了“实际成矿的S远大于岩浆中S的承载力”的“excessive S problem”这一悖论。岩浆硬石膏是一个长期被忽视的矿物, 在很多火山岩/浅成岩中发育的板条状空洞可能是岩浆硬石膏被风化或溶蚀后留下的, 表明岩浆硬石膏的发育比我们想象的普遍。岩浆分异/混合情况下饱和的硬石膏生命周期短暂, 这些以硬石膏形式储存的S在研究过程中若被忽视, 会影响岩浆S承载力乃至 fO_2 条件的研判。富S岩浆磷灰石通常意味着富硫酸根的岩浆, 可以增加对与富S磷灰石共生的硬石膏的关注。此外, 岩浆硬石膏的稳定性对温压条件和 fO_2 的变化非常敏感, 对硬石膏的产状、寄主矿物, 饱和时机的研究将有助于对岩浆 fO_2

演化的深入理解。例如，早期结晶、包裹于高Mg#岩体基性矿物中的岩浆硬石膏指示初始岩浆便具有高 fO_2 性质；晚期结晶、包裹于边部环带中的岩浆硬石膏，为揭示岩浆混合事件导致的 fO_2 变化提供了重要窗口。对岩浆硬石膏产状、矿物组合、结晶时间等方面的研究，结合磷灰石S含量等资料的综合分析，可为深入理解斑岩Cu矿成矿岩浆演化过程中是否存在硫化物早饱和、是否存在高 fO_2 岩浆注入等关键科学问题提供新的视角。

致谢 感谢责编委和审稿人提出宝贵的修改意见。

参考文献

- 秦克章. 2014. 西藏驱龙斑岩-夕卡岩铜钼矿床. 北京: 科学出版社
- Audétat A, Chang J, Gaynor S P, et al. 2025. Widespread occurrence of former anhydrite phenocrysts in Laramide-age magmas related to porphyry-skarn Cu mineralization at Santa Rita and Hanover-Fierro, New Mexico, USA. *J Petrol*, 66: ega002
- Audétat A, Chang J, Gaynor S P. 2026. Widespread anhydrite saturation in Laramide-age arc magmas of the southwestern USA. *Geology*, 54: 19–23
- Blundy J, Mavrogenes J, Tattitch B, et al. 2015. Generation of porphyry copper deposits by gas-brine reaction in volcanic arcs. *Nat Geosci*, 8: 235–240
- Boulliung J, Wood B J. 2023. Sulfur oxidation state and solubility in silicate melts. *Contrib Miner Petrol*, 178: 56
- Cottrell E, Birner S, Brounce M, et al. 2021. Oxygen fugacity across tectonic settings. In: Moretti R, Neuville D R, eds. *Magma Redox Geochemistry: American Geophysical Union Geophysical Monograph*, volume 266. 33–61
- Dilles J H, Kent A J R, Wooden J L, et al. 2015. Zircon compositional evidence for sulfur-degassing from ore-forming arc magmas. *Econ Geol*, 110: 241–251
- Fortin M A, Riddle J, Desjardins-Langlais Y, et al. 2015. The effect of water on the sulfur concentration at sulfide saturation (SCSS) in natural melts. *Geochim Cosmochim Acta*, 160: 100–116
- Grondahl C, Zajacz Z. 2017. Magmatic controls on the genesis of porphyry Cu-Mo-Au deposits: The Bingham Canyon example. *Earth Planet Sci Lett*, 480: 53–65
- Grondahl C, Zajacz Z. 2022. Sulfur and chlorine budgets control the ore fertility of arc magmas. *Nat Commun*, 13: 4218
- He D Y, Qiu K F, Simon A C, et al. 2024. Mantle oxidation by sulfur drives the formation of giant gold deposits in subduction zones. *Proc Natl Acad Sci USA*, 121: e2404731121
- Heinrich C A. 2005. The physical and chemical evolution of low-salinity magmatic fluids at the porphyry to epithermal transition: A thermodynamic study. *Miner Depos*, 39: 864–889
- Huang M L, Gao J F, Bi X W, et al. 2020. The role of early sulfide saturation in the formation of the Yulong porphyry Cu-Mo deposit: Evidence from mineralogy of sulfide melt inclusions and platinum-group element geochemistry. *Ore Geol Rev*, 124: 103644
- Hutchinson M C, Dilles J H. 2019. Evidence for Magmatic Anhydrite in Porphyry Copper Intrusions. *Econ Geol*, 114: 143–152
- Jin Y, Xie G, Humphreys M C S, et al. 2026. Petrologic reconstruction of sulfur transfer processes during mafic magma recharge: Insight from anhydrite-bearing mafic microgranular enclaves. *Geochim Cosmochim Acta*, 412: 32–50
- Jugo P J, Luth R W, Richards J P. 2005. Experimental data on the speciation of sulfur as a function of oxygen fugacity in basaltic melts. *Geochim Cosmochim Acta*, 69: 497–503
- Jugo P J. 2009. Sulfur content at sulfide saturation in oxidized magmas. *Geology*, 37: 415–418
- Kleinsasser J M, Simon A C, Konecke B A, et al. 2022. Sulfide and sulfate saturation of dacitic melts as a function of oxygen fugacity. *Geochim Cosmochim Acta*, 326: 1–16
- Li C, Ripley E M, Naldrett A J, et al. 2009. Magmatic anhydrite-sulfide assemblages in the plumbing system of the Siberian Traps. *Geology*, 37: 259–262
- Li L, Liu X, Xu T, et al. 2025. Sulfur partitioning between aqueous fluids and felsic melts at high pressures: Implications for sulfur migration in subduction zones. *Sci Rep*, 15: 4273
- Li J X, Li G M, Evans N J, et al. 2021. Primary fluid exsolution in porphyry copper systems: Evidence from magmatic apatite and anhydrite inclusions in zircon. *Miner Depos*, 56: 407–415
- Liu X, Li L, Xu T, et al. 2025. Gold solubility enhanced by H_2O in sulfur-bearing magma: Implications for gold partitioning and mineralization. *Geochim Cosmochim Acta*, 393: 170–181
- Luo C H, Wang R, Nebel O, et al. 2024. Amphibole fractionation as a key driver for oxidation of magmas in convergent margins. *Earth Planet Sci Lett*, 641: 118851
- Matjuschkin V, Blundy J D, Brooker R A. 2016. The effect of pressure on sulphur speciation in mid- to deep-crustal arc magmas and implications for the formation of porphyry copper deposits. *Contrib Miner Petrol*, 171: 66
- Muth M J, Cottrell E. 2025. The effect of pressure on sulfur valence state in mafic silicate melts. *Earth Planet Sci Lett*, 668: 119562
- Nash W M, Smythe D J, Wood B J. 2019. Compositional and temperature effects on sulfur speciation and solubility in silicate melts. *Earth Planet Sci Lett*, 507: 187–198
- Nathwani C, Giovanini E, Bachmann O, et al. 2025. Sulfate-dominant apatite in the deep arc crust indicates that high oxidation state promotes copper fluxing in arcs. *Geology*, 54: 87–91
- Parat F, Holtz F, Streck M J. 2011. Sulfur-bearing magmatic accessory minerals. *Rev Mineral Geochem*, 73: 285–314
- Park J W, Campbell I H, Chiaradia M, et al. 2021. Crustal magmatic controls on the formation of porphyry copper deposits. *Nat Rev Earth Environ*, 2: 542–557
- Richards J P. 2003. Tectono-magmatic precursors for porphyry Cu-(Mo-Au) deposit formation. *Econ Geol*, 98: 1515–1533
- Schmidt M W, Jagoutz O. 2017. The global systematics of primitive arc melts. *Geochem Geophys Geosyst*, 18: 2817–2854
- Simon A C, Ripley E M. 2011. The role of magmatic sulfur in the formation of ore deposits. *Rev Mineral Geochem*, 73: 513–578
- Streck M J, Dilles J H. 1998. Sulfur evolution of oxidized arc magmas as recorded in apatite from a porphyry copper batholith. *Geology*, 26: 523
- Sun X, Deng J, Lu Y, et al. 2023. Two stages of porphyry Cu mineralization at Jiru in the Tibetan collisional orogen: Insights from zircon, apatite, and magmatic sulfides. *GSA Bull*, 135: 2917–2986
- Tang M, Erdman M, Eldridge G, et al. 2018. The redox “filter” beneath magmatic orogens and the formation of continental crust. *Sci Adv*, 4: eaar4444
- Tollan P, Hermann J. 2019. Arc magmas oxidized by water dissociation and hydrogen incorporation in orthopyroxene. *Nat Geosci*, 12: 667–671
- Wallace P J. 2001. Volcanic SO_2 emissions and the abundance and distribution of exsolved gas in magma bodies. *J Volcanol Geotherm Res*, 108: 85–106
- Wallace P J, Edmonds M. 2011. The sulfur budget in magmas: Evidence from melt inclusions, submarine glasses, and volcanic gas emissions.

- [Rev Mineral Geochem](#), 73: 215–246
- Xia W, Wang R, Jenner F. 2023. Sulfide resorption contributes to porphyry deposit formation in collisional settings. [Ore Geol Rev](#), 163: 105804
- Xiao B, Qin K, Li G, et al. 2012. Highly oxidized magma and fluid evolution of Miocene Qulong giant porphyry Cu-Mo deposit, Southern Xizang, China. [Resour Geol](#), 62: 4–18
- Zajacz Z, Tsay A. 2019. An accurate model to predict sulfur concentration at anhydrite saturation in silicate melts. [Geochim Cosmochim Acta](#), 261: 288–304
- Zhang D, Audétat A. 2017. What caused the formation of the Giant Bingham Canyon porphyry Cu-Mo-Au deposit? Insights from melt inclusions and magmatic sulfides [Econ Geol](#), 112: 221–244
- Zhang J, Chang J, Wang R, et al. 2022. Can post-subduction porphyry Cu magmas form by partial melting of typical lower crustal amphibole-rich cumulates? Petrographic and experimental constraints from samples of the Kohistan and Gangdese Arc Roots [J Petrol](#), 63: egac101
- Zhang J, Wang R, Teng F, et al. 2025. Fractionation of amphibole as an endogenic oxidizer in continental arc magmas. [J Geophys Res-Solid Earth](#), 130: e2025JB033325
- Zhou Q, Wang R, Jeon H. 2026. Apatite sulfur isotopes reveal anhydrite saturation in collisional porphyry systems, southern Tibet. [Geol Soc Am Bull](#), 138: 1825–1839

(责任编辑: 李建威)