

# 稀缺元素铟的地球化学行为及成矿作用研究进展

赵浩楠

桂林理工大学地球科学学院, 广西 桂林

收稿日期: 2026年3月10日; 录用日期: 2026年4月1日; 发布日期: 2026年4月13日

## 摘要

铟(In)是战略性稀缺元素,在半导体、光伏电池等高新技术领域有着不可替代的应用价值。受资源稀缺性与成矿复杂性影响,铟长期以来都是地球化学与矿产资源领域的研究热点。本文以“赋存机制-成矿过程-资源潜力”为核心,梳理了全球铟资源分布、地球化学特征、赋存状态、成矿规律及控制因素,分析了现有研究的局限与关键空白。研究显示,全球铟资源分布极不均衡,主要集中在中国、玻利维亚等国,中国2024年原生铟产量占全球71%,再生铟已成为重要供给来源。铟的主要赋存形式为闪锌矿中的类质同象,占全球铟产出的95%,但微纳米包裹体与吸附态赋存的贡献被长期低估。成矿温度、流体成分(Cl<sup>-</sup>浓度、pH值、氧逸度)及构造背景,共同影响铟的富集,贫锡矽卡岩型、锡石-硫化物型及铅锌多金属型矿床是主要富集载体,其成矿与岩浆-热液演化、流体-岩石相互作用密切相关。目前研究多依赖闪锌矿地球化学指标,对表生环境铟的迁移再富集、中小型矿床资源潜力评估存在不足。未来需重点攻克低品位铟精准识别、流体与铟富集耦合机制等问题,为铟矿高效勘探与综合利用提供理论支撑。

## 关键词

铟, 稀缺元素, 成矿地球化学, 资源分布, 赋存状态, 富集机制

# Research Progress on Geochemical Behavior and Mineralization of Scattered Element Indium

Haonan Zhao

College of Earth Sciences, Guilin University of Technology, Guilin Guangxi

Received: March 10, 2026; accepted: April 1, 2026; published: April 13, 2026

## Abstract

Indium (In) is a strategic rare element, which has irreplaceable application value in high-tech fields such as semiconductors and photovoltaic cells. Affected by the scarcity of resources and the complexity of mineralization, indium has long been a research hotspot in the field of geochemistry and mineral resources. Based on the core of "occurrence mechanism - metallogenic process - resource potential", this paper combs the distribution, geochemical characteristics, occurrence state, metallogenic regularity and control factors of global indium resources, and analyzes the limitations and key gaps of existing research. Studies have shown that the distribution of indium resources in the world is extremely uneven, mainly concentrated in China, Bolivia and other countries. In 2024, China's primary indium production accounted for 71% of the world's total, and recycled indium has become an important source of supply. The main occurrence form of indium is isomorphism in sphalerite, accounting for 95% of global indium output, but the contribution of micro-nano inclusions and adsorbed state occurrence has been underestimated for a long time. The ore-forming temperature, fluid composition (Cl O concentration, pH value, oxygen fugacity) and tectonic setting jointly affect the enrichment of indium. The tin-poor skarn type, cassiterite-sulfide type and lead-zinc polymetallic type deposits are the main enrichment carriers, and their mineralization is closely related to magmatic-hydrothermal evolution and fluid-rock interaction. At present, most studies rely on sphalerite geochemical indicators, and there are deficiencies in the migration and re-enrichment of indium in the supergene environment and the assessment of resource potential of small and medium-sized deposits. In the future, it is necessary to focus on the accurate identification of low-grade indium and the coupling mechanism of fluid and indium enrichment, so as to provide theoretical support for efficient exploration and comprehensive utilization of indium ore.

## Keywords

Indium, Scattered Elements, Mineralization Geochemistry, Resource Distribution, Occurrence State, Enrichment Mechanism

Copyright © 2026 by author(s) and Hans Publishers Inc.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY 4.0).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



Open Access

## 1. 引言

### 1.1. 研究背景与战略意义

铟是地壳丰度仅为 0.056 ppm 的稀散元素[1], 目前尚未发现独立的工业级铟矿床, 主要以伴生形式赋存于铅锌、锡多金属等矿床中。随着全球高新技术产业不断发展, 铟在铟锡氧化物(ITO)靶材、铜铟镓硒(CIGS)薄膜太阳能电池、化合物半导体(如磷化铟 InP)等产品中的需求持续攀升, 其战略地位愈发突出, 被多国家和地区列为关键矿产[2]。

全球铟资源分布极不均衡(见图 1 所示), 已探明储量中, 玻利维亚占 18%、俄罗斯占 13%、加拿大占 11%、中国占 26%; 中国保有资源量占全球 25.75%, 主要集中在云南、内蒙古自治区、广西壮族自治区等 14 个成矿区带[3][4], 是全球最大的铟生产国和消费国。2024 年中国原生铟产量达 760 t, 占全球总产量的 71%; 与此同时, 再生铟产业发展迅速, 2023 年中国废靶材回收量同比增长 268%, 2024 年再生铟产量达 1033 t, 首次成为铟供给的主导力量[3]。但中国铟产业长期面临“低端产品出口、高端产品进口”的发展困境, 高端 ITO 靶材、7N 级超高纯铟仍依赖日韩进口[5], 且面临全球碳中和背景下光伏、半导体领域的需

求激增压力——预计 2050 年全球铟需求将达 3850 t，其中 CIGS 光伏领域需求占比将超过 73% [3]。因此，深入揭示铟的成矿地球化学机制、厘清全球资源供需格局，对保障国家战略资源安全具有重要现实意义。

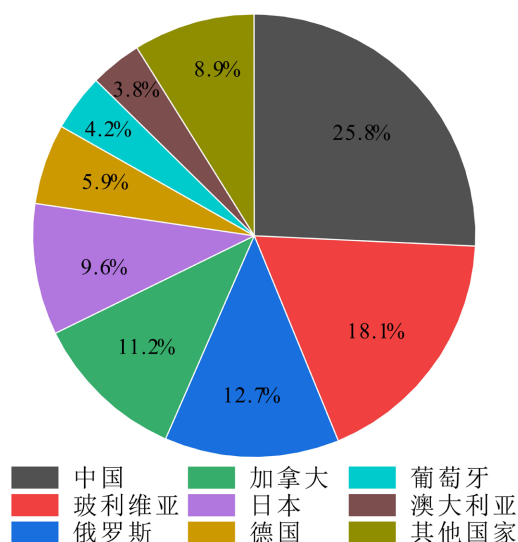


Figure 1. The proportion of indium mineral resources in each country in the world [28]

图 1. 全球各国铟矿资源量占比[28]

## 1.2. 核心科学问题与研究框架

尽管国内外学者已对铟的成矿作用与资源特征开展了大量研究，但仍存在三个核心科学问题亟待解决：1) 全球铟资源的储量估算、供需平衡与再生资源潜力尚未形成系统性认知，不同统计口径的数据差异显著 [3] [6]；2) 铟在不同矿物中的赋存形式与替代机制存在争议，微纳米尺度赋存状态的识别技术不足，且不同成矿系统(岩浆-热液、表生)中铟的富集规律与关键控制因素尚不明确 [7] [8]；3) 现有成矿研究的假设前提(如类质同象为唯一主要赋存形式、锡与铟必然共生)与局限性未被充分讨论，资源潜力评估存在偏差 [9]。

本文围绕上述核心问题，构建“全球资源格局-地球化学基础-赋存机制-成矿过程-研究局限-研究展望”的研究框架，系统整合近年来国内外研究成果(尤其是 2023~2026 年最新数据)，重点补充全球铟资源分布、产量消费与成矿机制的关键细节，旨在为铟矿成矿理论的完善与资源勘探实践提供参考。

## 2. 全球铟资源分布与供需格局

### 2.1. 地壳丰度与全球储量分布

铟在地球圈层中呈极不均匀分布，上地壳平均丰度仅 0.056 ppm [1]，显著低于锌(70 ppm)、铅(13 ppm)等常见金属元素。从岩石类型来看，铟在酸性岩浆岩(花岗岩平均 0.08 ppm)中含量略高于基性岩(玄武岩平均 0.03 ppm)与沉积岩(页岩平均 0.04 ppm) [6]，这与铟的亲岩浆流体特性密切相关。

全球铟资源主要集中于四类成矿带：1) 中国滇东南-桂西成矿带(云南个旧-都龙、广西壮族自治区大厂)，单个矿床铟资源量可达数千吨(如广西壮族自治区大厂矿田铟资源量超 5000 t) [10]；2) 南美安第斯成矿带(玻利维亚锡矿带)，以锡石-硫化物型矿床伴生铟为特征 [3]；3) 俄罗斯芬诺斯堪的亚地盾(Pitkäranta 矿区)，铟资源量估算达 1585~2536 t，主要赋存于矽卡岩型矿床的闪锌矿中 [11]；4) 北美科迪勒拉成矿带(加拿大、美国)，以铅锌多金属矿床伴生铟为主 [3]。

不同机构对全球铟储量的估算存在差异：Werner 等 [6] 基于 1512 个已知矿床统计，全球铟资源量至少

35.6 万 t，其中已量化资源量 7.6 万 t；而 USGS 数据显示，中国、玻利维亚、俄罗斯、加拿大四国合计占全球储量的 60%以上[3]。中国钢资源高度集中于云南(36%)、广西壮族自治区(22%)、内蒙古自治区(18%)，大型矿床包括云南都龙、广西壮族自治区大厂、内蒙古自治区大井(钢资源量 > 768 t)、青海锡铁山等[3] [4]。

## 2.2. 全球产量与消费结构

### 2.2.1. 产量分布：原生与再生并重

钢作为伴生金属，95%以上的原生钢来自锌冶炼副产品[6]，全球原生钢产量从 2018 年的 741 t 增长至 2024 年的 1077 t。中国原生钢产量从 2018 年的 300 t 增至 2024 年的 760 t，占全球份额从 40.5%升至 71% [3]，主要得益于锌精矿进口(高钢含量)与冶炼产能释放。

再生钢已成为全球钢供给的核心增长极。2020 年起全球再生钢产量超过原生钢，2023 年全球再生钢产量占比达 54%；中国再生钢产业起步较晚，但 2023 年实现突破，废 ITO 靶材回收产量达 828 t，2024 年增至 1033 t，占国内钢总产量的 60%。日本是再生钢技术领先国，92%的再生钢来自废 LCD 与 ITO 靶材，年回收能力达 150 t [3]，其技术路线以酸浸 - 电解精炼为主[12]。

### 2.2.2. 消费结构：传统领域与新兴领域并存

全球钢消费以 ITO 靶材为主(占比 78.5%)，主要用于 LCD 显示面板、触摸屏与异质结(HJT)太阳能电池。新兴消费领域中，化合物半导体(InP, InSb)与 CIGS 薄膜太阳能电池增长迅速：InP 市场规模预计从 2022 年的 30 亿美元增至 2028 年的 64 亿美元，年复合增长率 13.46% [3]；CIGS 光伏领域钢需求预计 2050 年将超过 ITO 靶材，中国 CIGS 领域钢需求或达 168~1141 t。

## 2.3. 供需平衡与资源安全挑战

全球钢市场目前处于供需宽松状态，2017~2023 年全球精炼钢产量年均增长 2.7%，消费量年均增长 1.1%，库存持续累积。但长期来看，存在三大挑战：1) 原生钢供给受制于锌冶炼产能——预计 2050 年满足钢需求需 7700 万 t 锌产量，将导致 4900 万 t 锌过剩与 2.13 亿 tCO<sub>2</sub> 排放[3]；2) 中国高端产品供给缺口显著，2022 年高纯度钢进口量达 86 t [3]；3) 再生资源回收潜力巨大但尚未充分开发，全球废 LCD 中钢含量达 530 mg/kg，CIGS 光伏废料中钢含量达 19%，中国废 LCD 与光伏面板回收潜力预计 2035 年居全球首位[3] [12]。

## 3. 钢的地球化学性质

### 3.1. 地球化学性质与迁移活性

钢的原子序数为 49，电子构型为[Kr] 4d<sup>10</sup>5s<sup>2</sup>5p<sup>1</sup>，易形成+3 价阳离子(In<sup>3+</sup>)，离子半径为 0.81 Å，与 Zn<sup>2+</sup> (0.74 Å)、Fe<sup>2+</sup> (0.72 Å)、Cu<sup>+</sup> (0.77 Å)等离子半径接近，为其类质同象替代提供了晶体化学基础[13]。钢的地球化学行为具有显著的亲硫性(硫化物相容性系数 > 10)，在岩浆演化过程中倾向于进入硫化物相，而在热液流体中主要以 InCl<sub>4</sub> 等络合物形式迁移[14]，其迁移能力与流体温度、盐度及 pH 值密切相关：高温(300°C~400°C)、高盐度、弱酸性流体有利于钢的溶解与搬运，而温度骤降、pH 值升高或硫逸度增加则促进钢的沉淀富集[15]。

### 3.2. 赋存状态的多元性与争议

钢的赋存形式主要分为三类，其中类质同象是传统认知的主导形式，但近年来的微观分析技术揭示了赋存形式的多元性与复杂性。

#### 3.2.1. 类质同象赋存

钢主要通过耦合替代进入硫化物晶格，最典型的替代机制为 In<sup>3+</sup> + Cu<sup>+</sup> ↔ 2Zn<sup>2+</sup>，该机制在全球多个矿

床中得到验证[13] [9]。西藏 Lawu 贫锡矽卡岩型矿床中，闪锌矿的 In 含量最高达 747 ppm，LA-ICP-MS 时间分辨质谱显示 In 与 Zn 信号呈同步波动，证实 In 通过类质同象进入闪锌矿晶格[9]；内蒙古自治区大井 Sn-Cu 多金属矿床的闪锌矿(Ia 型)中，In 平均含量达 0.18wt%，电子探针元素分布图显示 In 与 Cu 呈正相关关系，进一步支撑了耦合替代机制[16]。此外， $\text{In}^{3+}$  还可通过  $\text{In}^{3+} + \text{Ag}^+ + \text{Co}^{2+} \leftrightarrow 3\text{Zn}^{2+}$  等多元替代进入闪锌矿，这类替代在富 Co、Ag 的热液系统中更为常见[9]。

### 3.2.2. 微纳米包裹体赋存

随着透射电镜(TEM)与激光剥蚀电感耦合等离子体质谱(LA-ICP-MS)技术的发展，微纳米尺度铟矿物包裹体的赋存形式逐渐被识别。研究发现，在部分富铟闪锌矿中，存在  $\text{CuInS}_2$  (硫铟铜矿)纳米包裹体[17]，这类包裹体直径仅 5~50 nm，传统光学显微镜难以识别，导致其在早期研究中被误判为类质同象。广西壮族自治区大厂锡矿田黄铁矿中，铟含量介于  $0.491 \times 10^{-6}$ ~ $65.1 \times 10^{-6}$  之间，XRD 分析显示黄铁矿晶格参数略大于标准值，推测存在铟的纳米级硫化物包裹体[10]。俄罗斯 Pitkäranta 矿区的闪锌矿中，也发现了微量硫铟铜矿( $\text{CuInS}_2$ )包裹体，其铟贡献占比约 15%~20% [11]。这类赋存形式的发现挑战了“类质同象为唯一主导赋存形式”的传统假设，但其在全球铟资源中的贡献比例仍需精准量化。

### 3.2.3. 吸附态赋存

吸附态铟主要存在于表生环境的黏土矿物(如高岭石、伊利石)与铁锰氧化物表面，通过静电吸附或络合作用固定。云南香格里拉红山铜矿床的氧化带中，黏土矿物表面的铟吸附量可达 12.6 ppm，显著高于原生矿石中的平均含量[18]；青海锡铁山铅锌矿床的氧化带中，铁锰氧化物表面的铟含量可达原生矿石的 3~5 倍，形成明显的次生富集晕[19]。这类赋存形式的铟迁移性较强，在表生风化过程中可随地下水迁移，形成次生富集晕，但目前对其吸附-解吸机制与生态环境效应的研究极为薄弱。

## 3.3. 载体矿物的专属性特征

铟的赋存具有显著的矿物专属性，不同矿物对铟的容纳能力差异巨大：

**闪锌矿：**核心载体矿物，全球 95% 的铟产量来自闪锌矿的综合回收[6]。不同成因闪锌矿的铟含量差异显著：锡石-硫化物型矿床闪锌矿 In 含量最高(平均 500~2000 ppm)，如广西壮族自治区大厂矿田闪锌矿 In 含量可达 0.25wt% [20]；贫锡矽卡岩型矿床闪锌矿 In 含量次之(平均 100~700 ppm)，西藏 Lawu 矿床闪锌矿 II、III 型的 In 平均含量分别为 459 ppm、645 ppm [9]；铅锌多金属型矿床闪锌矿 In 含量相对较低(平均 50~300 ppm)，如湖南水口山矿床闪锌矿 In 含量介于 80~260 ppm 之间[21]。

**次要载体矿物：**黄铜矿、黄铁矿、锡石等。黄铜矿中铟含量通常为 20~400 ppm，西藏 Lawu 矿床黄铜矿 II 型的 In 平均含量达 293 ppm [9]；黄铁矿中铟含量较低(通常 < 10 ppm)，但广西壮族自治区大厂矿田高峰矿床的黄铁矿 In 含量可达 65.1 ppm [10]；锡石中铟含量一般为 10~50 ppm，但云南白牛厂矿床锡石的  $\text{In}_2\text{O}_3$  平均含量达 2.75%，换算为铟含量约 1.8wt% [22]。

**无工业意义载体矿物：**方铅矿、毒砂、磁黄铁矿等，In 含量通常 < 10 ppm [9] [16]，几乎不具备工业回收价值。

## 4. 铟的成矿机制与控制因素

### 4.1. 成矿系统与铟的富集规律

#### 4.1.1. 岩浆-热液成矿系统

可进一步分为三类亚型，其成矿机制与地质背景存在显著差异：

**锡石-硫化物型：**该类型矿床是铟最富的成矿类型，形成与花岗岩相关的高温热液环境(300℃~450℃)，

铟的物质来源主要为壳幔混熔花岗岩的部分熔融[23]。广西壮族自治区大厂矿田是典型代表,成矿岩浆为晚白垩世花岗闪长岩(年龄  $91.6 \pm 2.4$  Ma),铟随岩浆热液活动与锡、锌等元素同步迁移,在硫化物阶段通过类质同象进入闪锌矿晶格[24],矿床铟资源量超 5000 t,居世界首位[10]。俄罗斯 Pitkäranta 矿区的锡石-硫化物型矿床中,铟的富集与 Li-F 花岗岩的分异演化密切相关,花岗岩的高  $Fe/(Fe+Mg)$  比值(0.90)为铟的活化迁移提供了有利条件[11]。

贫锡矽卡岩型:传统认为铟的富集依赖锡的共存,但近年来西藏 Lawu 矿床与湖南黄沙坪矿床的研究打破了这一认知。西藏 Lawu 矿床为典型贫锡矽卡岩型 Cu-Pb-Zn 矿床,锡含量  $< 10$  ppm,但其闪锌矿 In 含量最高达 747 ppm,成矿温度为  $338^{\circ}\text{C} \sim 427^{\circ}\text{C}$ ,铟的富集主要受流体温度与 Cl<sup>-</sup> 浓度控制,Fe<sup>3+</sup> 与 Cu<sup>+</sup> 的存在促进了 In<sup>3+</sup> 的类质同象替代[9];湖南黄沙坪矽卡岩型 Zn-Pb 矿床的热力学模拟显示,铟富集成矿的临界条件为:温度  $201^{\circ}\text{C} \sim 316^{\circ}\text{C}$ 、pH 4.5~6.0、高氧逸度( $\log f\text{O}_2 = -32.2 \sim -29.7$ )与高硫逸度( $\log f\text{S}_2 = -13.42 \sim -7.11$ ),流体中 H<sub>2</sub>S 为主要硫物种,锌、铁以 Zn<sup>2+</sup>、Fe<sup>2+</sup> 形式存在,与砷黄铁矿、黄铜矿共生沉淀[8]。这一发现表明,贫锡矽卡岩型矿床是铟资源勘探的潜在靶区。

铅锌多金属型:该类型矿床分布最广,铟含量中等,主要形成于中低温热液环境( $200^{\circ}\text{C} \sim 350^{\circ}\text{C}$ ),物质来源以地层流体为主,岩浆流体提供部分成矿元素[4],成矿模式见图 2。内蒙古自治区甲乌拉铅锌银矿床的闪锌矿 In 含量介于 40~180 ppm 之间,成矿年龄为  $142.7 \pm 1.3$  Ma,铟的富集与流体-岩石相互作用导致的 Zn<sup>2+</sup> 晶格缺陷密切相关[25];云南兰坪铅锌矿床的研究表明,盆地流体与岩浆流体的混合是铟沉淀富集的关键,流体混合导致温度骤降(从  $300^{\circ}\text{C}$  降至  $200^{\circ}\text{C}$ ),In-Cl 络合物稳定性降低,促进铟进入闪锌矿晶格[26]。

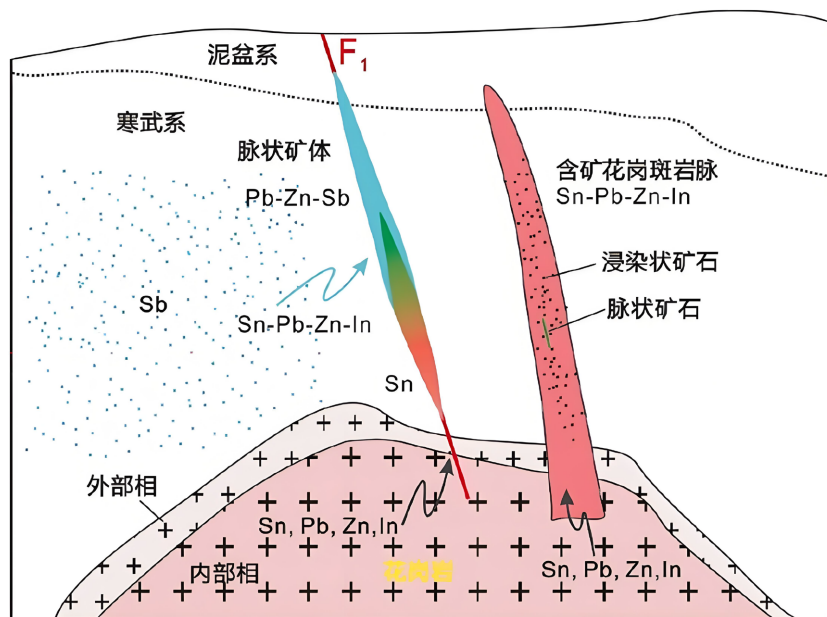


Figure 2. Metallogenic model of lead-zinc polymetallic indium deposit [29]

图 2. 铅锌多金属型铟矿成矿模式图[29]

#### 4.1.2. 表生风化成矿系统

表生环境中,原生硫化物的风化分解会释放铟,部分铟通过吸附作用在黏土矿物或铁锰氧化物表面形成次生富集,部分则随地下水迁移至沉积盆地形成次生矿床[19]。这类矿床的成矿机制以物理化学吸附为主,黏土矿物的羧基、羟基与铁锰氧化物的羟基通过静电作用固定 In<sup>3+</sup> [18]。但目前对表生环境铟的迁

移速率、吸附-解吸动力学机制、次生富集的临界条件等研究极为缺乏,限制了表生铟资源的勘探与评估。

## 4.2. 关键控制因素

### 4.2.1. 温度控制

温度是影响铟富集的核心因素,高温流体(300℃~450℃)更有利于铟的溶解与晶格替代。西藏 Lawu 矿床的 GGIMFis 地质温度计计算结果显示,闪锌矿 II、III、IV 型的结晶温度分别为 398℃、395℃、356℃,对应的 In 含量呈显著递减趋势[9];内蒙古自治区大井矿床的 Cu-Sn 阶段流体温度(350℃~400℃)显著高于 Pb-Zn 阶段(134℃~160℃),导致 Cu-Sn 阶段闪锌矿的 In 含量(平均 300~478 ppm)远高于 Pb-Zn 阶段(平均<70 ppm)[16];湖南黄沙坪矿床的闪锌矿中,早期高温阶段(316℃)形成的 Sp1 型闪锌矿 In 平均含量达 134.54 ppm,而晚期低温阶段(219℃)形成的 Sp2b 型闪锌矿 In 平均含量仅 34.43 ppm [8]。温度对铟富集的控制机制主要表现为:高温下闪锌矿晶格缺陷增多,类质同象替代的能量壁垒降低;同时,高温流体中 In-Cl 络合物的稳定性增强,延长了铟的迁移距离[14]。

### 4.2.2. 流体成分控制

流体的化学成分(尤其是 Cl<sup>-</sup>浓度、pH 值与氧化还原电位)直接影响铟的迁移与沉淀。高 Cl<sup>-</sup>浓度(>1 mol/L)的流体可形成稳定的 InCl<sub>4</sub><sup>-</sup>络合物,促进铟的长距离迁移,西藏 Lawu 矿床流体包裹体的 Cl<sup>-</sup>浓度达 1.2~1.8 mol/L,为铟的富集提供了有利条件[9];弱酸性流体(pH = 4.5-6.0)有利于 In<sup>3+</sup>的溶解,而 pH 值升高(>6.5)会导致 In(OH)<sub>3</sub>沉淀,终止铟的迁移[15],湖南黄沙坪矿床的热力学模拟证实,pH 4.5~6.0 是铟富集成矿的最佳区间[8];氧化还原电位(Eh)的降低(还原环境)会促进硫化物的沉淀,进而推动铟通过类质同象进入晶格,内蒙古自治区大井矿床 Cu-Sn 阶段的 Eh 值为-0.25~-0.15 V,显著低于 Pb-Zn 阶段,与铟的富集峰值高度吻合[16]。

### 4.2.3. 构造与岩浆背景控制

构造背景控制着成矿流体的运移通道与储矿空间,铟矿床主要分布于板块俯冲带、陆内造山带及深大断裂带附近。中国 14 个铟成矿区带均受深大断裂控制,如滇东南个旧-都龙成矿带受红河断裂带控制,大兴安岭成矿带受嫩江断裂带控制[4];俄罗斯 Pitkäranta 矿区的铟矿床位于 Salmi 斜长岩-霞石花岗岩岩基的外接触带,受 NE 向次级断裂与花岗岩穹窿构造的联合控制[11]。

岩浆背景对铟的富集具有关键制约作用:富铟矿床多与高分异花岗岩相关,尤其是壳幔混熔型花岗岩与 Li-F 花岗岩,这类花岗岩具有高硅、高钾、富氟的特征,氟的存在可降低岩浆黏度,促进铟的熔体-流体分配[27];花岗岩的部分熔融程度与分异演化阶段也影响铟的富集,晚期分异阶段的岩浆流体铟含量显著高于早期阶段[23]。

## 5. 铟矿研究的争议、局限性与未来研究方向

### 5.1. 核心假设前提的合理性争议

现有铟成矿地球化学与资源研究基于三个关键假设,但这些假设的合理性逐渐受到挑战:

假设 1:类质同象是铟的唯一主导赋存形式:传统研究认为类质同象占铟赋存的 90%以上,但微纳包裹体与吸附态赋存的发现表明,这一比例可能被高估。广西壮族自治区大厂矿田黄铁矿的 XRD 与 EPMA 联合分析显示,约 15%~20%的铟以纳米包裹体形式存在[10],而表生环境中吸附态铟的比例可达 30%以上[18]。

假设 2:闪锌矿 In 含量可直接反映矿床铟资源潜力:现有资源评估多以闪锌矿 In 含量为核心指标,但忽略了次要载体矿物(如黄铜矿、锡石)的贡献。云南白牛厂矿床的锡石 In 含量达 1.8wt%,其铟资源贡

献占比达 25% [22], 俄罗斯 Pitkäranta 矿区的黄铜矿与黄铁矿也贡献了约 10% 的铜资源 [11], 若仅以闪锌矿为评估对象, 会导致资源量低估。

假设 3: 铜的富集与锡呈正相关关系: 传统认为锡是铜富集的必要条件, 但西藏 Lawu 贫锡矽卡岩矿床 [9] 与湖南黄沙坪贫锡矽卡岩矿床 [8] 的研究表明, 无锡参与时铜仍可达到工业富集程度, 这一发现打破了“锡 - 铜共生”的传统认知。

## 5.2. 研究方法与技术的局限性

微观识别技术不足: 传统 EPMA 的检测极限(In 约 67 ppm)难以识别低品位铜的赋存形式, 对纳米级包裹体的分辨率不足; LA-ICP-MS 的光斑直径(通常 29~51  $\mu\text{m}$ )大于纳米包裹体尺寸, 导致测试数据为混合信号 [9]。

成矿温度估算单一: 现有研究多依赖闪锌矿 GGIMFis 地质温度计, 该方法对 Ge 含量敏感, 而部分矿床闪锌矿 Ge 含量低于检测极限, 导致温度估算结果不可靠 [16]; 流体包裹体显微测温受包裹体捕获后改造的影响, 难以反映真实成矿温度。

资源评估方法偏差: 不同机构的储量统计口径差异显著, 部分研究未考虑中小型矿床与再生资源的潜力, 中国中小型铜矿区占比达 60%, 其累计资源量占全国总资源量的 35% [4], 但相关研究仅占总量的 10% 以下。

## 5.3. 未来研究方向

资源评估优化: 建立“原生资源 + 再生资源”的综合评估体系, 整合大数据与机器学习方法, 精准量化全球铜资源潜力; 加强中小型矿床的地质调查与资源估算 [4]。

技术方法创新: 发展聚焦离子束 - 透射电镜(FIB-TEM)、同步辐射 X 射线吸收精细结构(XAFS)等技术, 实现微纳米尺度铜赋存形式的精准识别; 建立“EPMA + LA-ICP-MS + XRD”联合分析方法, 提高低品位铜的定量精度。

成矿机制深化: 开展贫锡成矿系统的岩浆 - 流体演化研究, 明确铜的物质来源与迁移路径; 通过高温高压实验模拟不同温压、流体成分条件下铜的类质同象替代效率, 建立铜富集的热力学模型 [8]。

再生资源利用: 开发废 LCD、CIGS 光伏面板等二次资源的高效回收技术, 优化酸浸 - 溶剂萃取 - 电解精炼工艺, 提高再生铜的回收率与纯度 [12]。

## 6. 结论

全球铜资源呈现“分布不均、供需失衡”的格局, 中国作为全球最大的铜生产国与消费国, 面临原生资源依赖锌冶炼、高端产品进口、再生潜力未充分释放的挑战。铜的成矿地球化学研究已取得显著进展, 明确了闪锌矿的核心载体地位、岩浆 - 热液系统的主导成矿作用, 以及温度、流体成分(Cl<sup>-</sup>浓度、pH 值、氧逸度)与构造背景的关键控制作用, 贫锡矽卡岩型、锡石 - 硫化物型及铅锌多金属型矿床是铜的主要富集载体。

但现有研究仍存在假设前提争议、技术方法局限与资源评估偏差等问题, 低品位铜的赋存识别、贫锡系统成矿机制、表生环境迁移等关键科学空白亟待突破。未来需通过技术创新、多学科交叉与野外 - 室内实验结合, 深化铜的成矿地球化学认知, 建立精准的资源评估与高效利用体系, 同时加强再生资源回收技术研发, 为保障全球铜资源安全提供理论与技术支撑。

## 参考文献

- [1] Rudnick, R.L. and Gao, S. (2014) Composition of the Continental Crust. In: Turekian, H.D. and Holland, K.K., Eds.,

- Treatise on Geochemistry*, Elsevier, 1-51. <https://doi.org/10.1016/b978-0-08-095975-7.00301-6>
- [2] 张生辉, 王振涛, 李永胜, 等. 中国关键矿产清单、应用与全球格局[J]. 矿产保护与利用, 2022, 42(5): 138-168.
- [3] Xiao, L., Wang, L., Zhao, T., Xu, J. and Liu, W. (2026) Indium Resource Industry Chain Status and Supply and Demand Trend Analysis. *Minerals Engineering*, **235**, Article ID: 109780. <https://doi.org/10.1016/j.mineng.2025.109780>
- [4] 余金杰, 陈其慎, 陈绍聪, 等. 中国钢资源的矿床类型划分、空间分布和开发利用现状[J]. 中国地质, 2025, 52(5): 1645-1656.
- [5] 陆挺, 刘璇, 张艳飞, 等. 基于产业链分析的中国钢锗镓产业发展战略研究[J]. 资源科学, 2015, 37(5): 1008-1017.
- [6] Werner, T.T., Mudd, G.M. and Jowitt, S.M. (2017) The World's By-Product and Critical Metal Resources Part III: A Global Assessment of Indium. *Ore Geology Reviews*, **86**, 939-956. <https://doi.org/10.1016/j.oregeorev.2017.01.015>
- [7] Zheng, Y., Yu, P., Li, Z., Xiong, S., Zhou, L., Zhou, J., et al. (2023) Critical Metals Ga, Ge and In in the Global Pb-Zn Deposits: Current Understanding, Challenges and Perspectives. *Journal of Earth Science*, **34**, 1308-1311. <https://doi.org/10.1007/s12583-023-1909-0>
- [8] Wu, Y., Zheng, Y., Yu, P., Huang, Y., Yu, J., Zhao, T., et al. (2025) Thermodynamic Simulation on Indium Enrichment Condition in the Huangshaping Skarn Zn-Pb System (South China). *Journal of Asian Earth Sciences*, **291**, Article ID: 106681. <https://doi.org/10.1016/j.jseaes.2025.106681>
- [9] Li, J., Xu, J., Zhao, T. and Chen, S. (2025) Indium Distribution in Sulfides from a Sn-Poor Skarn System: A Case Study of the Lawu Cu-Pb-Zn Deposit, Tibet. *Journal of Asian Earth Sciences*, **291**, Article ID: 106703. <https://doi.org/10.1016/j.jseaes.2025.106703>
- [10] 成永生. 黄铁矿中铜的产出特征与富集规律: 以大厂锡矿田为例[J]. 中国有色金属学报, 2016, 26(8): 2197-2208.
- [11] Ivashchenko, V. (2022) Geology, Geochemistry and Mineralogy of Indium Resources at Pitkäranta Mining District, Ladoga Karelia, Russia. *Journal of Geochemical Exploration*, **240**, Article ID: 107046. <https://doi.org/10.1016/j.gexplo.2022.107046>
- [12] Tian, Q., Meng, C., Xu, Z., Qiao, J. and Guo, X. (2026) A Review of Indium Separation and Extraction Technologies from Secondary Waste Resources. *Hydrometallurgy*, **242**, Article ID: 106690. <https://doi.org/10.1016/j.hydromet.2026.106690>
- [13] Cook, N.J., Ciobanu, C.L., Pring, A., Skinner, W., Shimizu, M., Danyushevsky, L., et al. (2009) Trace and Minor Elements in Sphalerite: A LA-ICPMS Study. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, **73**, 4761-4791. <https://doi.org/10.1016/j.gca.2009.05.045>
- [14] Seward, T.M., Wood, S.A. and Samson, I.M. (2000) Aqueous Geochemistry of Indium: Stability of In (III) Chloride Complexes at Elevated Temperatures and Pressures. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, **64**, 3515-3524.
- [15] Keith, M., Haase, K.M., Schwarz-Schampera, U., Klemm, R., Petersen, S. and Bach, W. (2014) Effects of Temperature, Sulfur, and Oxygen Fugacity on the Composition of Sphalerite from Submarine Hydrothermal Vents. *Geology*, **42**, 699-702. <https://doi.org/10.1130/g35655.1>
- [16] Ye, Z., Xu, J., Zhao, J., Chen, S., Chen, J. and Liu, W. (2023) Mineralogy of Indium Mineralization in the Dajing Sn-Cu Polymetallic Deposit in Inner Mongolia. *Ore Geology Reviews*, **159**, Article ID: 105564. <https://doi.org/10.1016/j.oregeorev.2023.105564>
- [17] Krause, J., Burisch, M., Bauer, M.E., et al. (2020) Nanoscale CuInS<sub>2</sub> inclusions in Sphalerite: Implications for Indium Mineralization. *American Mineralogist*, **105**, 1661-1672.
- [18] Peng, H., Mao, J., Pei, R., Zhang, C., Tian, G., Zhou, Y., et al. (2014) Geochronology of the Hongni-Hongshan Porphyry and Skarn Cu Deposit, Northwestern Yunnan Province, China: Implications for Mineralization of the Zhongdian Arc. *Journal of Asian Earth Sciences*, **79**, 682-695. <https://doi.org/10.1016/j.jseaes.2013.07.008>
- [19] Liang, X., Fu, J., Wang, C., Jiang, Y., Zhou, Y., Yang, Y., et al. (2014) Redefinition and Formation Age of the Tanjianshan Group in Xitieshan Region, Qinghai. *Acta Geologica Sinica—English Edition*, **88**, 394-409. <https://doi.org/10.1111/1755-6724.12204>
- [20] 李晓峰, 杨锋, 陈振宇, 等. 广西壮族自治区大厂锡矿铜的地球化学特征及成因机制初探[J]. 矿床地质, 2010, 29(5): 903-914.
- [21] 李永胜, 甄世民, 于晓飞, 等. 湖南水口山铅锌多金属矿田成矿岩体花岗岩闪长岩锆石 U-Pb 年龄、Hf 同位素及地质意义[J]. 地学前缘, 2020, 27(2): 332-352.
- [22] 李晓波. 云南省蒙自县白牛厂银多金属矿床成矿地质特征及成矿模式[D]: [硕士学位论文]. 长沙: 中南大学, 2005.
- [23] Zhao, T., Chen, C., He, X., Meng, L., Xu, J. and Liu, W. (2022) A Synthesis of the Geology, Spatial-Temporal Distribution and Enrichment Mechanism of Granite-Related Indium Deposits in China. *Ore Geology Reviews*, **146**, Article ID:

104932. <https://doi.org/10.1016/j.oregeorev.2022.104932>

- [24] Guo, J., Zhang, R., Sun, W., Ling, M., Hu, Y., Wu, K., *et al.* (2018) Genesis of Tin-Dominant Polymetallic Deposits in the Dachang District, South China: Insights from Cassiterite U-Pb Ages and Trace Element Compositions. *Ore Geology Reviews*, **95**, 863-879. <https://doi.org/10.1016/j.oregeorev.2018.03.023>
- [25] 李铁刚, 武广, 刘军, 等. 大兴安岭北部甲乌拉铅锌银矿床 Rb-Sr 同位素测年及其地质意义[J]. 岩石学报, 2014, 30(1): 257-270.
- [26] 钱焯, 陈秀法, 陈玉明, 等. 铅锌矿床中稀散元素的赋存状态与富集规律研究进展[J]. 吉林大学学报(地球科学版), 2025, 55(6): 1851-1866.
- [27] 翟裕生, 彭润民, 向运川, 等. 区域成矿研究法[M]. 北京: 中国大地出版社, 2004.
- [28] 张伟波, 陈秀法, 陈玉明, 等. 全球铜矿资源供需现状与我国开发利用建议[J]. 矿产保护与利用, 2019, 39(5): 1-8.
- [29] 丁涛. 香花岭矿田塘官铺花岗斑岩中锡多金属矿床中铜富集机制[D]: [硕士学位论文]. 长沙: 中南大学, 2023.