

锑矿床成因研究进展

向绍立, 王子乔, 张佳伟, 张旭奇

桂林理工大学地球科学学院, 广西 桂林

收稿日期: 2025年2月26日; 录用日期: 2025年4月2日; 发布日期: 2025年4月14日

摘要

金属锑是一种十分重要的战略资源, 素来就有“工业味精”之称, 学者们根据各自提出的划分标准对于锑矿的类型进行了多种划分, 锑矿资源在全球分布广泛, 主要产出于环太平洋成矿域、特提斯成矿域和中亚-天山成矿域, 我国锑矿床分布可划分为华南锑矿成矿带、昆仑-秦岭锑成矿带、阴山-天山锑成矿带及藏滇锑成矿带, 其中以华南锑矿成矿带的锑储量最大。产出于不同地质背景的锑矿床, 往往具有不同的成矿流体性质和来源, 来源主要有大气水、岩浆水、变质水、盆地水等。在成矿热液系统中, 锑矿中的矿物可以通过多种机制从热液中沉淀出来, 主要为流体混合和相分离、温度和/或压力等物理化学条件的变化、水/岩石相互作用。

关键词

锑矿, 成矿流体, 矿石沉淀机制

Research Progress on the Genesis of Antimony Deposits

Shaoli Xiang, Ziqiao Wang, Jiawei Zhang, Xuqi Zhang

College of Geosciences, Guilin University of Science and Technology, Guilin Guangxi

Received: Feb. 26th, 2025; accepted: Apr. 2nd, 2025; published: Apr. 14th, 2025

Abstract

Antimony metal is a very important strategic resource, has always been known as “industrial monosodium glutamate”, scholars according to their own classification standards for the type of antimony ore for a variety of division, antimony resources are widely distributed in the world, mainly produced in the Pacific Rim mineralization area, Tethys mineralization area and Central Asia-Tianshan mineralization area, China's antimony deposit distribution can be divided into South China antimony ore metallogenic belt, Kunlun-Qinling antimony metallogenic belt, Yinshan-Tianshan antimony minera-

lization belt and Tibetan Yunnan antimony mineralization belt, of which the South China antimony ore metallogenic belt has the largest antimony reserves. Antimony deposits produced in different geological backgrounds often have different metallogenic fluid properties and sources, mainly atmospheric water, magmatic water, metamorphic water, basin water, etc. In mineralizing hydrothermal systems, minerals in antimony ore can be precipitated from hydrothermal fluids through a variety of mechanisms, mainly fluid mixing and phase separation, changes in physicochemical conditions such as temperature and/or pressure, and water/rock interactions.

Keywords

Antimony Ore, Mineralizing Fluids, Ore Precipitation Mechanism

Copyright © 2025 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

在地球化学领域, 锑作为一种独特的元素, 具有鲜明的化学性质。其属于亲铜元素, 这意味着它对 S 以及 Cu、Pb、Ag 等元素展现出很强的亲和力, 与此同时锑还能够与 Cl^- 、 OH^- 等阴离子发生化学反应并结合。从价态方面来看, 锑在自然界中主要呈现 0 价、+3 和 +5 价三种价态, 其中常见的电价为 +3 和 +5 价, 这一价态特征与 As 极为相似。在漫长的地质演化进程中, 锑与多种元素相互作用, 形成了超过 100 多种含锑矿物, 涵盖了锑的硫化物、硫酸盐、氧化物和锑酸盐等[1][2]。在众多含锑矿物中, 辉锑矿(Sb_2S_3)是最为常见且重要的一种, 它广泛存在于世界各地的各类热液矿床之中。从工业角度而言, 辉锑矿(Sb_2S_3)由于其锑含量较高、易于开采和提炼等特点, 被工业界作为生产锑的主要含锑矿石[3][4]。此外, 锑在化学合成领域也展现出丰富的反应活性, 它能够与卤素发生反应, 形成诸如 SbF_3 、 SbF_5 、 SbCl_3 、 SbCl_5 等类型的化合物。在特定的化学环境下, 锑还可以进一步形成 SbF_4^- 、 SbF_5^{2-} 之类的络合阴离子团, 这些络合阴离子团在一些特殊的化学反应和矿物形成过程中发挥着关键作用。锑还能形成 $\text{Sb}(\text{OH})_6^-$ 、 SbOCl 之类含氧基或羟基络合物[2], 这些络合物的形成与锑的化学性质以及周围的物理化学条件密切相关。

金属锑在现代工业体系中占据着极为重要的战略地位, 素有“工业味精”的美誉。这一称号充分体现了锑在工业生产中不可或缺的作用, 尽管其用量相对较少, 但却能对产品的性能产生显著的提升效果。在应用领域方面, 大约 70% 的锑被应用于阻燃剂的生产。随着现代工业的快速发展, 对材料的防火安全性能要求日益提高, 锑系阻燃剂因其高效的阻燃性能而被广泛应用于塑料、橡胶、纺织品等众多领域, 有效降低了火灾发生的风险, 保障了人们的生命财产安全。除了阻燃剂领域, 锑还在蓄电池、玻璃和催化剂等工业领域发挥着重要作用。在蓄电池中, 锑的加入可以改善电池的性能, 提高电池的充放电效率和使用寿命; 在玻璃制造过程中, 锑能够作为澄清剂和脱色剂, 有效提高玻璃的透明度和质量; 在催化剂领域, 锑基催化剂具有独特的催化活性和选择性, 能够促进某些化学反应的进行, 提高生产效率和产品质量。由于锑在工业生产中的广泛应用, 它与社会经济发展和国防军工都有着紧密的联系[5][6]。在社会经济方面, 锑的稳定供应是保障相关产业稳定发展的关键因素; 在国防军工领域, 锑及其化合物被应用于制造弹药、导弹等武器装备, 对提升国防实力具有重要意义。

从资源战略角度来看, 锑具有不可再生的特性, 这意味着随着开采的不断进行, 其储量将逐渐减少。同时, 锑在许多应用领域中具有难以替代的作用, 目前尚未找到能够完全替代锑的其他元素或材料。而且, 锑的回收难度较大, 回收成本较高, 导致其回收利用率相对较低。然而, 随着全球经济的发展, 对锑

的消费需求却呈现出日益增长的趋势。这种供需矛盾使得锑具有了重要的资源战略意义。国际上,自 2018 至 2022 年,美国和欧盟一直将锑列为关键金属,这充分表明了锑在其国家战略资源体系中的重要地位。在中国,2016~2020 年的《全国矿产资源规划》中将其列为 24 种战略性矿产之一[5]-[8],体现了我国对锑资源的高度重视。我国作为锑资源大国,是锑的优势矿种之一。截止 2021 年,我国锑储量为 48 万吨,约占全球储量的 24%,矿石产量约 6 万吨[9],多年来在储量和产量方面均占据世界首位。然而,长期以来,由于我国锑矿行业存在无序竞争和过度开发的问题,导致锑矿资源的开采效率低下,资源浪费严重,生态环境遭到破坏。随着开采的持续进行,我国锑矿资源形势已不容乐观[2][8]-[10]。为了实现锑矿资源的可持续利用,我国亟需加强对锑矿资源的管理和保护,规范开采秩序,提高开采技术水平,加大资源回收利用力度,以应对日益严峻的资源形势。

综上所述,锑作为一种具有独特化学性质的元素,在工业生产和资源战略方面都具有重要意义。深入研究锑的化学性质、开发高效的锑矿开采和利用技术、加强资源管理和保护,对于保障我国乃至全球锑资源的可持续供应、促进相关产业的健康发展具有重要的理论和实践意义。

2. 矿床分类

在锑矿地质研究领域,准确且全面地对锑矿类型进行划分,是深入理解锑矿成矿机制、分布规律以及指导资源勘探开发的关键基础。目前,众多学者基于各自独特的研究视角与方法,提出了多样化的划分标准,从而构建了丰富多元的锑矿类型划分体系(如表 1)。

Table 1. Classification table of antimony deposits
表 1. 锑矿床分类表

分类标准			矿床分类		
容矿岩石或含矿岩系	碳酸盐岩型	碎屑岩型	侵入岩型	火山岩型	未固结沉积物型
成矿物质来源、成矿作用、地质构造背景、赋矿岩石组合、矿石矿物组合、矿体产状	喷流沉积改造型	沉积改造型	变质再造型、岩浆热液型、	火山热液型	外生堆积型
构造背景、成矿流体成因及容矿岩石类型	碳酸盐地层中热液型	碎屑岩地层中热液型	岩浆热液型、	火山热液型 (包括海相和陆相火山岩)	

从矿岩或含矿岩系视角审视,此类分类方法着重强调了岩石特性及其与锑矿化作用之间的内在关联[11]。碳酸盐岩型锑矿床在成矿动态进程中,碳酸钙、碳酸镁等矿物组分与含锑热液介质间发生了错综复杂的化学反应,这些反应为锑矿物的沉淀与富集构筑了有利条件。转向碎屑岩中的锑矿床,其赋存状态则紧密依赖于碎屑岩的沉积学特征。沉积过程中,锑元素伴随着碎屑物质的逐层累积而逐渐浓缩,随后经历成岩作用及构造活动,最终成矿。对于侵入岩体系内的锑矿床而言,其诞生与岩浆的侵入活动紧密相连。在岩浆冷却固化及结晶析出阶段,锑元素在适宜的物理化学环境引导下,于侵入岩体内或其接触带邻近区域沉淀富集。火山岩型锑矿床的形成则直接关联于火山喷发事件。火山活动期间,大量富含锑的热液及火山碎屑物质被喷发出地表,随着热液的迁移与火山碎屑的堆积,锑元素在火山岩介质中实现了沉淀与富集。至于未固结沉积物中的锑矿床,即外生堆积型锑矿床,其形成过程主要在地表环境中通过风化剥蚀、搬运迁移及沉积堆积等一系列外生地质作用实现。在此过程中,地表锑元素经溶解、搬运至适宜的沉积洼地,在未完全固结的沉积物层中逐步积累,最终演化成锑矿床。

依据成矿物质来源、成矿作用、地质构造背景、赋矿岩石组合、矿石矿物组合以及矿体产状等多方面因素进行划分,这种综合多因素的划分方式能够更全面、深入地反映锑矿形成的复杂过程[12]。喷流沉积改造型锑矿床,其形成起始于海底喷流活动。在海底扩张或板块运动的过程中,深部热液通过海底裂

隙喷出，携带大量锑等成矿物质，于海底沉积形成初始的矿层。后期受构造运动、热液活动等的改造，进一步富集形成锑矿床。沉积改造型锑矿床则是先通过沉积作用，使锑元素在沉积地层中初步富集，形成含锑的沉积岩。随后，受构造运动、热液活动等因素的影响，含锑沉积岩发生变质、变形，锑元素重新活化、迁移，在有利构造部位进一步富集成矿。变质再造型锑矿床是在区域变质作用下，原岩中锑元素在高温、高压以及化学活动性流体作用下，可能发生分解，锑元素被释放出来，在新的物理化学条件下，与其他矿物结合形成新的锑矿床。岩浆热液型锑矿床主要是由岩浆分异出的热液携带锑等成矿物质运移，在合适的构造和物理化学条件下沉淀成矿。火山热液型锑矿床与火山活动密切相关，火山喷发产生的热液中富含锑元素，这些热液在上升运移的过程中，与周围的岩石发生物质交换和化学反应，使锑元素在火山岩或其周边岩石中沉淀成矿。外生堆积型锑矿床，如前文所述，是在地表外生作用下形成的，通过风化、侵蚀、搬运和沉积等过程，锑元素在地表沉积环境中逐渐堆积形成矿床。

从构造背景、成矿流体成因及容矿岩石类型的角度划分，这种方式强调了构造、流体与岩石之间的相互作用对锑矿形成的影响[6] [10]。碳酸盐地层中热液型锑矿床，其形成受到碳酸盐地层的构造控制。在碳酸盐地层中，由于岩石的可溶性和脆性，容易形成各种裂隙和溶洞，这些构造为成矿热液的运移提供了通道。含锑热液在运移过程中，与碳酸盐地层发生化学反应，使锑元素沉淀富集。碎屑岩地层中热液型锑矿床，热液在碎屑岩地层中运移时，利用碎屑岩的孔隙和裂隙，将锑元素带到合适的部位沉淀。岩浆热液型锑矿床，再次强调了岩浆热液在成矿过程中的重要作用，岩浆热液携带的锑元素在围岩中沉淀形成矿床。火山热液型锑矿床，根据火山岩的海相和陆相属性，其成矿特征有所差异。海相火山岩中，由于海水的参与，成矿环境较为复杂，热液中的锑元素与海水中的某些成分相互作用，形成独特的锑矿类型。陆相火山岩中，成矿过程则主要受到火山喷发活动和陆相地质环境的影响，热液在陆相环境中运移、沉淀，形成锑矿。

不同的划分标准从不同的侧面揭示了锑矿的形成机制和特征，为锑矿地质研究提供了全面而深入的视角。这些划分体系相互补充、相互印证，对于准确理解锑矿的成矿过程、指导锑矿资源的勘探与开发具有不可估量的理论和实践意义。未来，随着研究的不断深入和技术的不断进步，锑矿类型划分体系有望进一步完善和细化，为锑矿资源的可持续利用提供更加坚实的理论支撑。

3. 分布范围

在全球锑矿资源的研究范畴中，锑矿的容矿岩石、产出地层、成矿时代、围岩蚀变以及空间分布等特征(如表 2)，一直是学界关注的重点。这些特征不仅反映了锑矿形成的复杂地质过程，还对锑矿资源的勘探与开发具有重要的指导意义。

Table 2. Distribution table of antimony deposits at home and abroad
表 2. 国内外锑矿床分布表

	容矿岩石	产出地层	改造成矿时代
国外	火成岩、火山碎屑岩	中、新生界(三叠系最多)	新生代、石炭纪、晚二叠世 - 早三叠世
国内	碳酸盐岩、浅变质岩类、硅质岩	三叠系、泥盆系、前寒武	中生代、泥盆纪

从容矿岩石的角度来看，世界大型锑矿的容矿岩石展现出独特的属性。大量的地质研究成果[10] [13]表明，其多为火成岩或火山碎屑岩。火成岩是岩浆在地球内部或喷出地表后冷凝形成的岩石，其形成过程涉及高温高压的复杂地质环境。在这种环境下，岩浆中的各种元素经历了复杂的分异和结晶过程，为锑元素的富集提供了特殊的物理化学条件。例如，在某些岩浆侵入体中，锑元素可能随着岩浆的演化，在特定的温压条件下，与其他矿物发生化学反应，从而沉淀富集形成锑矿。火山碎屑岩则是火山喷发过

程中产生的各种碎屑物质堆积固结而成。火山喷发时, 会携带大量的热液和矿物质, 这些热液中往往富含铈元素。随着火山碎屑的堆积和热液的运移, 铈元素在合适的地质构造部位沉淀下来, 形成铈矿。相比之下, 我国铈矿的主要容矿岩石呈现出不同的特点, 为沉积岩。沉积岩是在地表常温常压条件下, 通过风化、搬运、沉积等一系列外生地质作用形成的。在我国漫长的地质历史时期, 广泛的沉积环境为铈矿的形成提供了基础。在沉积过程中, 铈元素可能通过河流、海洋等水体的搬运, 在特定的沉积盆地中逐渐富集。我国铈矿的赋矿围岩类型多样, 其中碳酸盐岩占据主导地位。根据详实的地质统计数据, 以碳酸盐岩为赋矿围岩的铈矿床数量在全国铈矿床总数中占比达到 29%, 而其储量更是在全国储量中高达 64% [10] [14]。碳酸盐岩富含碳酸钙、碳酸镁等矿物成分, 其化学性质较为活泼。在与含铈热液发生化学反应时, 能够有效地促进铈元素的沉淀与富集。例如, 当含铈热液流经碳酸盐岩时, 热液中的铈离子可能与碳酸盐岩中的某些成分发生置换反应, 形成铈的矿物沉淀。浅变质岩类在全国铈矿床总数中的占比为 25%, 储量占比达 20%。浅变质岩是原岩在一定的温度、压力和化学活动性流体的作用下, 发生轻微变质作用而形成的。这种变质作用改变了原岩的矿物成分和结构构造, 使得浅变质岩对铈矿的形成与保存产生了重要影响。硅质岩类在铈矿床总数中占比 13% [10] [14], 硅质岩富含硅质矿物, 其特殊的矿物组成和结构特点, 在铈矿成矿体系中也发挥着独特的作用。

在产出地层方面, 国外铈矿床的分布具有明显的地层偏好性。研究发现, 其主要赋存于中、新生界地层, 其中三叠系地层中产出的铈矿床最为丰富, 占比可达 60% [13]。这与三叠纪时期全球特殊的地质构造背景密切相关。在三叠纪, 全球板块运动活跃, 大规模的岩浆活动、火山喷发以及沉积环境的变化, 为铈矿的形成创造了有利条件。例如, 在一些板块碰撞带附近, 强烈的构造运动导致地壳深部的物质被带到浅部, 为铈矿的成矿提供了物质来源。我国铈矿的地层分布则更为广泛, 从中元古界到新近系均有分布。主要赋存地层集中在三叠系、泥盆系和前寒武系[10][14]。三叠系地层中, 受到印支运动等地质构造活动的影响, 形成了一系列有利于铈矿成矿的构造环境和热液活动条件。泥盆系地层在长期的地质演化过程中, 通过沉积作用和后期的构造改造, 为铈矿的富集提供了合适的场所。前寒武系地层虽然经历了漫长而复杂的地质历史变迁, 但其中蕴含的古老地质构造和地球化学信息, 依然为铈矿的形成保留了一定的可能性。我国铈矿改造成矿的时代主要集中在中生代的燕山期。燕山期是我国地质构造活动极为活跃的时期, 大规模的岩浆侵入、褶皱断裂运动以及热液活动频繁发生, 为铈矿的改造与富集提供了强大的动力和物质来源。大型的矿床多集中在泥盆纪地层中, 湖南锡矿山(超大型)和广西大厂(超大型)便是典型代表[10] [14]。湖南锡矿山铈矿的形成与泥盆纪时期的沉积作用以及后期燕山期的构造改造密切相关。在泥盆纪, 该地区处于特定的沉积环境, 铈元素在沉积地层中初步富集。到了燕山期, 强烈的构造运动使得地层发生褶皱和断裂, 含铈热液沿着这些构造通道运移, 在合适的部位沉淀富集, 最终形成了规模巨大的铈矿床。广西大厂铈矿同样如此, 在泥盆纪地层的基础上, 经过多期次的地质作用, 逐渐形成了超大型铈矿床。我国铈矿成矿时代的集中性显著, 成矿期为印支 - 燕山期的矿床占比高达 91.33%, 仅有 8.47%的矿床成矿于喜山期、加里东期和华力西期[14]。喜山期的成矿作用主要与喜马拉雅造山运动相关, 该时期的强烈构造运动虽然对部分地区的铈矿形成产生了一定影响, 但相较于印支 - 燕山期, 其影响范围和强度相对较小。加里东期和华力西期的地质构造活动在我国部分地区也有所体现, 但在铈矿成矿方面的贡献相对有限。我国铈矿的围岩蚀变类型丰富多样, 以硅化为主, 其次为碳酸盐化、黄铁矿化、绢云母化、高岭土化、绿泥石化等[10]。硅化是含硅热液在与围岩发生化学反应的过程中, 将硅质成分带入围岩, 使围岩中的矿物成分发生改变, 形成富含硅质矿物的蚀变现象。这些蚀变类型的出现与铈矿的形成、演化密切相关, 它们不仅反映了铈矿成矿过程中的物理化学条件变化, 同时也为铈矿的找矿勘探提供了重要的指示标志。

从全球铈矿资源的空间分布来看, 铈矿资源分布广泛, 主要集中在环太平洋成矿域、特提斯成矿域

和中亚-天山成矿域(如图1)[2][6]。环太平洋成矿带汇聚了全球约77%的锑储量,其经济价值在全球锑矿资源中首屈一指。环太平洋地区处于多个板块的汇聚边界,板块的强烈碰撞、俯冲以及由此引发的大规模岩浆活动、火山喷发和热液活动,为锑矿的形成提供了丰富的物质来源和强大的动力条件。例如,在太平洋板块与美洲板块的碰撞带,强烈的构造运动导致地壳深部的锑元素被带到浅部,与热液相互作用,形成了众多锑矿床。特提斯成矿域是古特提斯洋和新特提斯洋在演化过程中形成的重要成矿区域。该区域经历了复杂的地质构造变迁,在不同的地质历史时期形成了多种类型的锑矿床。中亚-天山成矿域则处于中亚板块与周边板块的相互作用地带,其独特的地质构造背景和地球化学条件,也孕育了丰富的锑矿资源。我国作为世界上锑矿资源最为丰富的国家之一,无论是储量还是产量均位居世界首位。我国锑储量主要集中于湖南、广西、西藏、贵州和云南等地(如图2)[14]。湖南凭借其独特的地质构造和丰富的矿产资源,成为我国锑矿储量最为丰富的省份之一,著名的湖南锡矿山锑矿便是湖南锑矿资源的杰出代表。广西的地质构造复杂多样,在漫长的地质演化过程中,形成了众多锑矿床,广西大厂锑矿更是其中的佼佼者。西藏、贵州和云南等地也依托各自独特的地质条件,蕴藏着丰富的锑矿资源。从构造控矿的角度分析,我国锑矿床具有明显的线性分布特征,主要受区域性大断裂控制[10][15][16]。区域性大断裂作为地壳中的大型构造薄弱带,为含锑热液的运移提供了良好的通道。多数矿床定位于区域性大断裂旁侧次级断裂与背斜交汇处,这种特殊的构造部位不仅能够有效地汇聚含锑热液,同时还为锑矿的沉淀提供了稳定的容矿空间。学者张国林[12]基于对我国锑矿地质特征的深入研究,将我国锑矿床分布划分为华南锑矿成矿带、昆仑-秦岭锑矿成矿带、阴山-天山锑矿成矿带及藏滇锑矿成矿带。在这些成矿带中,华南锑矿成矿带的锑储量最大,湖南锡矿山和广西大厂这两个超大型锑矿床均坐落于此[10][12]。华南锑矿成矿带地处我国南方,地质构造复杂,经历了多期次的构造运动和岩浆活动,为锑矿的形成与富集提供了得天独厚的条件,进一步凸显了其在我国锑矿资源分布中的重要地位。昆仑-秦岭锑矿成矿带位于我国中部,受昆仑-秦岭构造带的影响,形成了一系列与锑矿成矿相关的地质构造和热液活动条件。阴山-天山锑矿成矿带处于我国北方,其独特的地质构造背景和地球化学环境,也孕育了一定规模的锑矿资源。藏滇锑矿成矿带位于我国西南边陲,受到印度板块与欧亚板块碰撞的影响,地质构造活动强烈,为锑矿的形成提供了强大的动力和物质来源。

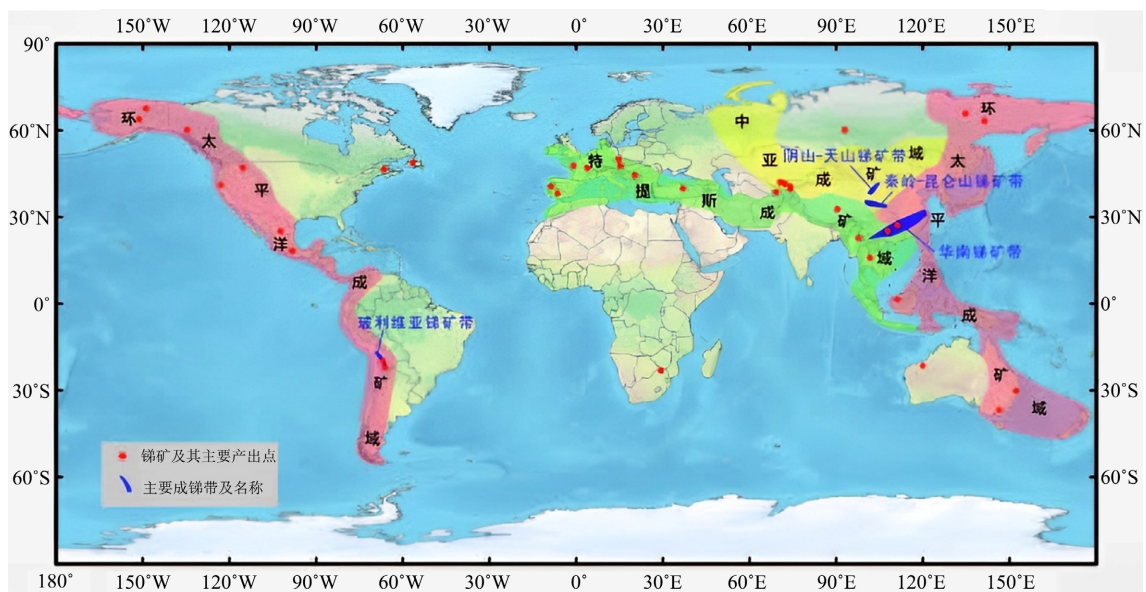


Figure 1. Global distribution map of representative antimony deposits [2]

图1. 全球典型含锑矿床分布示意图[2]

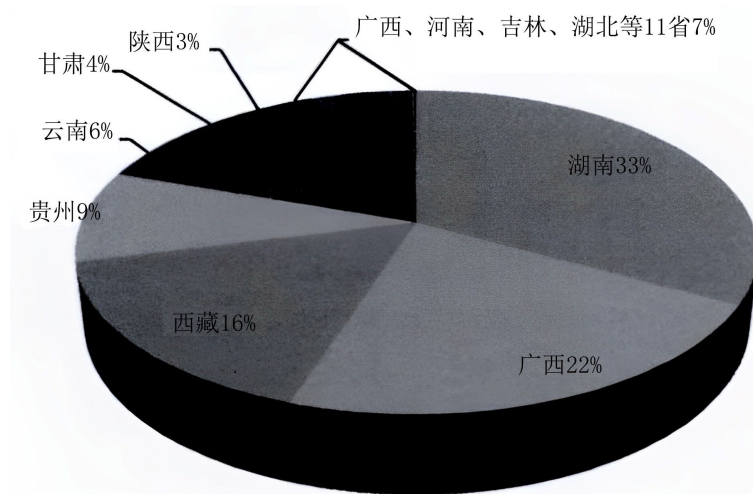


Figure 2. The distribution of known Sb resource in China [14]

图 2. 中国锑矿累计查明资源储量统计表[14]

综上所述，世界及我国锑矿在容矿岩石、产出地层、成矿时代、围岩蚀变以及空间分布等方面呈现出各自独特的特征。深入研究这些特征，对于全面理解锑矿的形成机制、指导锑矿资源的勘探与开发具有重要的理论和实践意义。未来，随着地质研究技术的不断进步和研究工作的持续深入，有望进一步揭示锑矿地质特征背后的复杂地质过程，为锑矿资源的可持续利用提供更加坚实的理论基础。

4. 成因研究

4.1. 成矿流体性质及来源

在矿床学研究领域，锑矿作为典型的中低温热液矿床，其成矿流体性质的探究是剖析矿床成因的关键基础。热液矿床的成矿流体来源问题一直是学界研究的热点与焦点。由于锑矿形成的地质背景千差万别，导致不同地区的锑矿在成矿流体性质和来源上呈现出显著的差异。目前已明确的成矿流体来源主要包括大气水、岩浆水、变质水以及盆地水等，这些不同来源的流体在锑矿的形成演化进程中发挥着独特且不可替代的作用。

湖南地区拥有极为丰富的锑矿储量，这使其在全球锑矿研究中占据着举足轻重的地位。众多科研工作者围绕湖南锑矿的成矿流体展开了大量深入且系统的研究。就板溪锑矿而言，借助流体包裹体研究技术，获取了一系列关键参数：其流体包裹体盐度范围处于 3.4%~7.7% wt%NaCl 当量，均一温度波动在 181℃~331℃，压力范围为 49~91 MPa，密度在 0.78~0.92 g/cm³ 之间，pH 值为 5.72 [17]。在此基础上，对华南板溪锑矿中硫化物的 He 和 Ar 同位素特征进行深入分析，结果表明其成矿流体源自深部地壳衍生的非岩浆流体，其中还混入了少量的大气降水[18]。进一步结合板溪锑矿中石英和辉锑矿的地质特征以及微量元素数据进行综合考量，最终明确其成矿流体来源于早白垩世伸展构造环境下的弱碱性盆地卤水[19]。

锡矿山锑矿作为全球规模最大的超大型锑矿床，长期以来备受关注。对其开展的研究显示，辉锑矿中的流体包裹体盐度为 0.2~15.4 wt%NaCl 当量，均一温度在 112℃~323℃之间，压力范围为 4~112 MPa，且主要集中于 5~20 MPa，密度为 0.81~0.991 g/cm³，平均密度为 0.914 g/cm³，成矿流体 pH 值从早阶段到晚阶段呈现出逐渐降低的态势，即从弱碱性逐渐转变为弱酸性[20]~[23]。通过对前人积累的元素地球化学数据进行全面且深入的综合分析，初步判断其成矿流体来源于深循环地下水[23]。不过，关于锡矿山锑矿成矿流体来源的研究仍存在多种观点。付山岭等人[24] [25]通过对锡矿山辉锑矿中 Hg 和原位 S 同位素展开研究后，认为其成矿流体为深循环大气水；丁建华等[6]在系统总结前人研究成果的基础上，提出其成

矿流体来源于大气降水与岩浆热液的混合；翟德高等[26]则利用 Sb 同位素数据，提出锡矿山具有变质热液来源，从而否定了岩浆热液来源的观点。这些不同观点的碰撞与交流，极大地推动了对锡矿山锑矿成矿流体来源的深入研究，促使学界对该问题的认识不断深化。

半坡锑矿的成矿流体研究结果表明，其成矿流体温度为 120℃~165℃，盐度处于 1.8~7.3 wt%NaCl 当量，pH 值在 4.02~7.12 之间，压力为 6.08×10^7 Pa [27] [28]，研究证实其成矿流体具有大气水来源。无独有偶，加拿大科迪勒拉地区的锑矿成矿流体同样被证实具有大气水来源[6] [29]。这一相似性暗示在不同地域的锑矿形成过程中，大气水在特定的地质条件下可能发挥着相似且重要的成矿作用，为全球范围内锑矿成矿规律的研究提供了极具价值的线索。

在国际研究方面，Dill 等学者[30]-[32]在对玻利维亚安第斯造山带中部和斯洛伐克西喀尔巴阡造山带锑矿进行研究时，提出了富锑的同构造期变质热液来源这一创新性观点。该观点为理解不同构造环境下锑矿的成矿流体来源提供了全新的视角，丰富了全球锑矿成矿理论体系。

晴隆锑(金)矿的成矿流体研究取得了一系列重要成果。其成矿流体温度范围为 129.4℃~294℃，压力为 103.97 MPa，盐度在 0.18~13.18 wt%NaCl 当量之间，密度为 0.93~1.03 g/cm³，具有低 pH 值以及存在碳氢化合物和 CO₂ 的显著特征[33] [34]。陈娴等[35]对晴隆锑矿中成矿流体的 He-Ar 同位素进行研究，结果显示成矿流体中不仅存在地壳 He，还存在大量的地幔 He，这表明含地幔 He 的高温流体可能来自其深部隐伏岩体。同时，S 同位素特征[36]也指示成矿流体来源于岩浆，并且存在大气水的侵入。这一研究成果充分揭示了晴隆锑(金)矿成矿流体来源的复杂性，为深入研究该地区的锑矿成矿机制提供了关键线索。

箭猪坡锑矿的流体包裹体均一温度为 113℃~328℃，压力在 46.5~99.7MPa 之间，盐度为 0.21~11.84 wt%NaCl 当量[37]。通过对流体包裹体以及 H-O 同位素的系统研究证实，其成矿热液来源于岩浆热液和盆地卤水的混合。值得注意的是，华山锑矿的成矿流体来源同样如此[6] [38]。这表明在某些特定的地质区域，岩浆热液和盆地卤水的混合可能是锑矿成矿的重要流体来源模式，为区域锑矿成矿规律的研究提供了重要参考。

中亚银-锑矿床的成矿流体含有高浓度氯化物，均一温度为 50℃~280℃，盐度为 0.1~40 wt%NaCl 当量，研究表明其成矿流体来源于岩浆热液[39]。这一研究成果对于深入理解中亚地区银-锑矿床的形成机制具有重要意义，为该地区的矿产资源勘探与开发提供了重要的理论支撑。

松溪锑矿的成矿流体则来源于岩浆热液与海水的混合[6]。这一独特的成矿流体来源模式，为研究不同地质环境下锑矿的形成提供了全新的案例，进一步丰富了全球锑矿成矿流体来源的研究内容，为深入探讨锑矿成矿规律提供了宝贵的研究素材。

综上所述，不同地区的锑矿因所处地质背景的显著差异，其成矿流体性质和来源呈现出丰富的多样性。深入研究锑矿成矿流体的性质和来源，对于全面、准确地揭示锑矿的形成机制，进而有效地指导锑矿资源的勘探与开发，具有不可估量的理论和实践意义。未来，随着研究技术的不断进步和研究工作的持续深入，有望进一步揭示锑矿成矿流体的复杂特征与来源规律，为锑矿资源的可持续利用提供更加坚实的理论基础。

4.2. 矿石沉淀机制

在成矿热液系统的复杂体系中，矿物从热液中沉淀的过程涉及多种复杂且相互关联的机制，这些机制是理解矿床形成的关键环节。其中，流体混合和相分离、温度和/或压力等物理化学条件的变化，以及水/岩石相互作用等，均在矿物沉淀过程中发挥着重要作用[23] [40] [41]。

锑在热液中的溶解度与诸多物理化学因素密切相关，包括温度、盐度、pH 值以及氧逸度[2]。大量针对热液体系下锑溶解度的实验研究表明，在纯水以及较高盐度的酸性热液体系中，温度对锑的溶解和辉

锑矿的沉淀起着关键的控制作用。随着温度的升高,辉锑矿的溶解度显著增加,研究数据显示,当温度下降 50℃时,辉锑矿的溶解度将降低一个数量级[41]-[47]。此外,前人通过对不同物理化学条件下成矿热液中锑溶解度的精确计算,揭示了 pH 值与锑溶解度之间的关系。当成矿热液由碱性向中性转变时,锑的溶解度明显降低;在 pH 值处于 7~5 的范围时,锑的溶解度变化相对较小;而当 pH 值小于 5 时,锑的溶解度则呈现上升趋势[48]。从热力学分析的角度来看,锑与氧逸度之间存在着阶段性的关系。在成矿前阶段,随着氧逸度的增加,锑的溶解度逐渐升高;在主成矿阶段,氧逸度与锑的溶解度之间的关联并不显著;而在成矿晚期阶段,随着氧逸度的降低,锑的溶解度也随之下降[48]。

众多实际矿床案例研究为上述理论提供了有力的支撑。以锡矿山锑矿为例,其 O、Sr 同位素特征清晰地指示出在矿石沉淀的开放系统中存在大气降水的入侵。大气降水与成矿热液的混合会导致温度急剧降低,这种温度的骤降能够使辉锑矿在热液中的溶解度降低一到几个数量级,进而有效降低辉锑矿的欠饱和程度,最终促使辉锑矿沉淀析出[23] [49]。苏文超等学者[50]对晴隆锑(金)矿床展开了深入的流体包裹体研究,并结合地球化学热力学实验,认为流体混合所引发的温度和盐度降低是锑成矿的关键控制因素。陈军等[33]基于矿物学、地球化学以及流体包裹体等多方面的证据进一步指出,晴隆锑(金)矿床中高温、高盐度的岩浆流体与较冷、低盐度的盆地碳酸流体相互混合,导致体系温度从 294℃急剧降至 161℃,氧逸度也从-37 降至-45,这一显著变化极大地降低了锑的溶解度,使得锑大量沉淀。当富含锑的成矿流体输送至大厂层富含有机物的中上部单元时,由于与有机物发生相互作用以及大气水的侵入,温度和氧逸度进一步下降,从而引发辉锑矿的进一步沉淀。孙晓明等[51]针对藏南沙拉岗锑矿的辉锑矿及共生石英中的流体包裹体进行研究后发现,较冷、低盐度、低压的大气降水与成矿热液持续混合,会促使大量气体释放,引发流体的沸腾作用,进而导致辉锑矿大量沉淀。

在探讨相分离与压力变化对锑矿沉淀的影响方面,也有丰富的研究成果。余盼等[52]通过对星子岩锑矿中与辉锑矿共生的石英和方解石的流体包裹体特征进行分析,认为成矿热液在运移过程中,随着温度和压力的降低,会发生相分离现象,从而促使辉锑矿沉淀。针对黔西南锑-金矿床的研究,通过对脉石矿物的流体包裹体和同位素地球化学分析[53]表明,当成矿流体运移至明显多孔的地层或断层破碎带时,流体压力会发生释放,进而引发相分离和沸腾现象,导致部分锑沉淀。后期大气水的侵入进一步降低了成矿流体的温度,使得大量锑得以沉淀。对沃溪金-锑-钨矿的地质特征和流体包裹体岩相学研究[54]也指出,成矿流体在运移过程中若发生压力的突然释放,会导致流体沸腾,进而促使辉锑矿沉淀成矿。

pH 值变化与流体-岩石反应在锑矿沉淀过程中同样扮演着重要角色。金景福等[55]通过对锑元素的化学行为以及流体包裹体的深入研究,指出在锡矿山锑矿的成矿过程中,由于成矿流体 pH 值的降低,会释放出大量的 H_2S 或 HS^- ,这将导致成矿流体中锑配合物(如 $H_2Sb_2S_4^0$ 、 HSb_2S_4 和 $HSb_2S_4^{2-}$ 等)发生分解或酸化,最终促使锑沉淀。付山岭等[19]综合板溪锑矿的流体包裹体、微量元素以及 He-Ar-S 同位素等多方面证据,认为板溪锑矿的弱碱性成矿流体在运移过程中, pH 值逐渐降低,同时在流体-岩石反应过程中发生硫化作用,这些因素共同作用,最终导致锑沉淀于裂隙之中。

此外, Hagemann 等[44]通过对澳大利亚 Wiluna 金矿的流体包裹体研究认为,成矿流体的减压或绝热冷却会导致成矿流体温度降低,进而降低辉锑矿的欠饱和程度,最终促使辉锑矿沉淀。这一研究成果不仅为理解该地区金矿的成矿机制提供了重要依据,同时也为探讨锑矿等其他金属矿床在类似物理化学条件变化下的成矿过程提供了参考。

锑矿在成矿热液系统中的沉淀过程是多种物理化学因素综合作用的结果。深入研究这些因素及其相互作用机制,对于准确理解锑矿的成矿过程、指导锑矿资源的勘探与开发具有重要的理论和实践意义。未来,随着研究技术的不断进步和研究工作的深入开展,有望进一步揭示锑矿成矿热液系统中矿物沉淀的复杂机制,为锑矿资源的可持续利用提供更加坚实的理论基础。

5. 结论

(1) 金属锑是一种十分重要的战略资源, 素来就有“工业味精”之称, 学者们根据各自提出的划分标准对于锑矿的类型进行了多种划分, 锑矿资源在全球分布广泛, 主要产出于环太平洋成矿域、特提斯成矿域和中亚-天山成矿域, 我国锑矿床分布可划分为华南锑矿成矿带、昆仑-秦岭锑成矿带、阴山-天山锑成矿带及藏滇锑成矿带, 其中以华南锑矿成矿带的锑储量最大。

(2) 产出于不同地质背景的锑矿床, 往往具有不同的成矿流体性质和来源, 来源主要有大气水、岩浆水、变质水、盆地水等。

(3) 锑矿中的矿物可以通过多种机制从热液中沉淀出来, 主要为流体混合和相分离、温度和/或压力等物理化学条件的变化、水/岩石相互作用

参考文献

- [1] Boyle, R.W. and Jonasson, I.R. (1984) The Geochemistry of Antimony and Its Use as an Indicator Element in Geochemical Prospecting. *Journal of Geochemical Exploration*, **20**, 223-302.
[https://doi.org/10.1016/0375-6742\(84\)90071-2](https://doi.org/10.1016/0375-6742(84)90071-2)
- [2] 张天羽, 李聪颖, 孙赛军, 等. 锑的地球化学性质与华南锑矿带成因初探[J]. 岩石学报, 2020, 36(1): 44-54.
- [3] Williams-Jones, A.E. and Norman, C. (1997) Controls of Mineral Parageneses in the System Fe-Sb-S-O. *Economic Geology*, **92**, 308-324. <https://doi.org/10.2113/gsecongeo.92.3.308>
- [4] Long, Z.Y., Qiu, K.F., Santosh, M., et al. (2022) Fingerprinting the Metal Source and Cycling of the World's Largest Antimony Deposit in Xikuangshan, China. *GSA Bulletin*, **135**, 286-294.
- [5] 董延涛, 袁博, 牛颖超. 我国锑矿资源产业高质量发展研究[J]. 现代矿业, 2020, 36(10): 19-21.
- [6] Ding, J., Zhang, Y., Ma, Y., Wang, Y., Zhang, J. and Zhang, T. (2021) Metallogenic Characteristics and Resource Potential of Antimony in China. *Journal of Geochemical Exploration*, **230**, Article ID: 106834.
<https://doi.org/10.1016/j.gexplo.2021.106834>
- [7] Tzamos, E., Grieco, G., Bussolesi, M., et al. (2019) Mineralogical and Geochemical Investigation of Sb-Bearing Minerals from Greek Ores. *15th International Congress of the Geological Society of Greece*, Athens, 22-24 May 2019, 1-3.
- [8] 李中平. 中国锑行业发展现状及高质量发展建议[J]. 中国国土资源经济, 2021, 34(3): 17-20, 68.
- [9] USGS (2022) Mineral Commodity Summaries 2022.
- [10] 王永磊, 徐珏, 张长青, 等. 中国锑矿成矿规律概要[J]. 地质学报, 2014, 88(12): 2208-2215.
- [11] 余金杰, 闫升好. 锑矿床研究若干问题初探[J]. 矿床地质, 2000, 19(2): 166-172.
- [12] 张国林, 姚金炎, 谷相平. 中国锑矿床类型及时空分布规律[J]. 矿产与地质, 1998, 12(5): 19-25.
- [13] 易建斌. 全球锑矿床成矿学基本特征及超大型锑矿床成矿背景初探[J]. 大地构造与成矿学, 1994(3): 199-208.
- [14] 丁建华, 杨毅恒, 邓凡. 中国锑矿资源潜力及成矿预测[J]. 中国地质, 2013, 40(3): 846-858.
- [15] 肖启明, 曾笃仁, 金富秋, 等. 中国锑矿床时空分布规律及找矿方向[J]. 地质与勘探, 1992(12): 9-14.
- [16] Jiada, W. (1993) Antimony Vein Deposits of China. *Ore Geology Reviews*, **8**, 213-232.
[https://doi.org/10.1016/0169-1368\(93\)90017-s](https://doi.org/10.1016/0169-1368(93)90017-s)
- [17] 唐宇蕾, 孔华, 吴玺虹, 等. 板溪锑矿床流体包裹体研究[J]. 地质找矿论丛, 2017, 32(3): 391-396.
- [18] Li, H., Wu, Q., Evans, N.J., Zhou, Z., Kong, H., Xi, X., et al. (2018) Geochemistry and Geochronology of the Banxi Sb Deposit: Implications for Fluid Origin and the Evolution of Sb Mineralization in Central-Western Hunan, South China. *Gondwana Research*, **55**, 112-134. <https://doi.org/10.1016/j.gr.2017.11.010>
- [19] Fu, S., Wang, T., Yan, J., Pan, L., Wei, L., Lan, Q., et al. (2022) Formation of the Banxi Sb Deposit in Eastern Yangtze Block: Evidence from Individual Fluid Inclusion Analyses, Trace Element Chemistry, and He-Ar-S Isotopes. *Ore Geology Reviews*, **146**, Article ID: 104949. <https://doi.org/10.1016/j.oregeorev.2022.104949>
- [20] Deng, C., Zhang, J., Hu, R., Luo, K., Zhu, Y. and Yin, R. (2021) Mercury Isotope Constraints on the Genesis of Late Mesozoic Sb Deposits in South China. *Science China Earth Sciences*, **65**, 269-281.
<https://doi.org/10.1007/s11430-021-9851-x>
- [21] 林芳梅. 湘中锡矿山锑矿床成矿流体研究[D]: [硕士学位论文]. 长沙: 中南大学, 2014.

- [22] 金景福. 超大型锑矿床定位机制剖析——以锡矿山锑矿床为例[J]. 矿物岩石地球化学通报, 2002, 21(3): 145-151.
- [23] A'xiang, H. and Jiantang, P. (2018) Fluid Inclusions and Ore Precipitation Mechanism in the Giant Xikuangshan Mesothermal Antimony Deposit, South China: Conventional and Infrared Microthermometric Constraints. *Ore Geology Reviews*, **95**, 49-64. <https://doi.org/10.1016/j.oregeorev.2018.02.005>
- [24] Fu, S., Hu, R., Yin, R., Yan, J., Mi, X., Song, Z., *et al.* (2019) Mercury and in Situ Sulfur Isotopes as Constraints on the Metal and Sulfur Sources for the World's Largest Sb Deposit at Xikuangshan, Southern China. *Mineralium Deposita*, **55**, 1353-1364. <https://doi.org/10.1007/s00126-019-00940-1>
- [25] Fu, S., Lan, Q. and Yan, J. (2020) Trace Element Chemistry of Hydrothermal Quartz and Its Genetic Significance: A Case Study from the Xikuangshan and Woxi Giant Sb Deposits in Southern China. *Ore Geology Reviews*, **126**, Article ID: 103732. <https://doi.org/10.1016/j.oregeorev.2020.103732>
- [26] Zhai, D., Mathur, R., Liu, S., Liu, J., Godfrey, L., Wang, K., *et al.* (2021) Antimony Isotope Fractionation in Hydrothermal Systems. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, **306**, 84-97. <https://doi.org/10.1016/j.gca.2021.05.031>
- [27] 李俊, 宋焕斌. 贵州半坡锑矿床成矿流体地球化学[J]. 昆明理工大学学报, 1999(1): 79-85.
- [28] 肖宪国. 贵州半坡锑矿床年代学、地球化学及成因[D]: [博士学位论文]. 昆明: 昆明理工大学, 2014.
- [29] Nesbitt, B.E., Muehlenbachs, K. and Murowchick, J.B. (1989) Genetic Implications of Stable Isotope Characteristics of Mesothermal Au Deposits and Related Sb and Hg Deposits in the Canadian Cordillera. *Economic Geology*, **84**, 1489-1506. <https://doi.org/10.2113/gsecongeo.84.6.1489>
- [30] Dill, H.G., Weiser, T., Bernhardt, I.R. and Kilibarda, C.R. (1995) The Composite Gold-Antimony Vein Deposit at Kharma (Bolivia). *Economic Geology*, **90**, 51-66. <https://doi.org/10.2113/gsecongeo.90.1.51>
- [31] Dill, H.G., Pertold, Z. and Riera Kilibarda, C. (1997) Sediment-hosted and Volcanic-Hosted Sb Vein Mineralization in the Potosi Region, Central Bolivia. *Economic Geology*, **92**, 623-632. <https://doi.org/10.2113/gsecongeo.92.5.623>
- [32] Dill, H.G. (1998) Evolution of Sb Mineralisation in Modern Fold Belts: A Comparison of the Sb Mineralisation in the Central Andes (Bolivia) and the Western Carpathians (Slovakia). *Mineralium Deposita*, **33**, 359-378. <https://doi.org/10.1007/s001260050155>
- [33] Chen, J., Yang, R., Du, L., Zheng, L., Gao, J., Lai, C., *et al.* (2018) Mineralogy, Geochemistry and Fluid Inclusions of the Qinglong Sb-(Au) Deposit, Youjiang Basin (Guizhou, SW China). *Ore Geology Reviews*, **92**, 1-18. <https://doi.org/10.1016/j.oregeorev.2017.11.009>
- [34] 熊灿娟, 刘建中, 刘帅, 等. 晴隆大厂锑矿流体包裹体研究[J]. 贵州大学学报(自然科学版), 2013, 30(6): 47-52.
- [35] 陈娴, 苏文超, 黄勇. 贵州晴隆锑矿床成矿流体 He-Ar 同位素地球化学[J]. 岩石学报, 2016, 32(11): 3312-3320.
- [36] Chen, J., Huang, Z., Yang, R., Du, L. and Liao, M. (2021) Gold and Antimony Metallogenic Relations and Ore-Forming Process of Qinglong Sb(Au) Deposit in Youjiang Basin, SW China: Sulfide Trace Elements and Sulfur Isotopes. *Geoscience Frontiers*, **12**, 605-623. <https://doi.org/10.1016/j.gsf.2020.08.010>
- [37] 常江, 李益智, 赵京, 等. 广西五圩矿田箭猪坡铅锌矿床流体包裹体特征及其地质意义[J]. 矿产与地质, 2016, 30(2): 270-277.
- [38] Zhang, J., Huang, W., Liang, H., Wu, J. and Chen, X. (2018) Genesis of the Jianzhupo Sb-Pb-Zn-Ag Deposit and Formation of an Ore Shoot in the Wuxu Ore Field, Guangxi, South China. *Ore Geology Reviews*, **102**, 654-665. <https://doi.org/10.1016/j.oregeorev.2018.09.026>
- [39] Pavlova, G.G. and Borovikov, A.A. (2010) Silver-Antimony Deposits of Central Asia: Physico-Chemical Model of Formation and Sources of Mineralisation. *Australian Journal of Earth Sciences*, **57**, 755-775. <https://doi.org/10.1080/08120091003736540>
- [40] Wilkinson, J.J. (2001) Fluid Inclusions in Hydrothermal Ore Deposits. *Lithos*, **55**, 229-272. [https://doi.org/10.1016/s0024-4937\(00\)00047-5](https://doi.org/10.1016/s0024-4937(00)00047-5)
- [41] Pokrovski, G.S., Borisova, A.Y., Roux, J., Hazemann, J., Petdang, A., Tella, M., *et al.* (2006) Antimony Speciation in Saline Hydrothermal Fluids: A Combined X-Ray Absorption Fine Structure Spectroscopy and Solubility Study. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, **70**, 4196-4214. <https://doi.org/10.1016/j.gca.2006.06.1549>
- [42] Krupp, R.E. (1988) Solubility of Stibnite in Hydrogen Sulfide Solutions, Speciation, and Equilibrium Constants, from 25 to 350°C. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, **52**, 3005-3015. [https://doi.org/10.1016/0016-7037\(88\)90164-0](https://doi.org/10.1016/0016-7037(88)90164-0)
- [43] Munoz, M., Courjault-Radé, P. and Tollon, F. (1992) The Massive Stibnite Veins of the French Palaeozoic Basement: A Metallogenic Marker of Late Variscan Brittle Extension. *Terra Nova*, **4**, 171-177. <https://doi.org/10.1111/j.1365-3121.1992.tb00468.x>
- [44] Hagemann, S.G. and Lüders, V. (2003) P-T-X Conditions of Hydrothermal Fluids and Precipitation Mechanism of Stibnite-Gold Mineralization at the Wiluna Lode-Gold Deposits, Western Australia: Conventional and Infrared Microthermometric

- Constraints. *Mineralium Deposita*, **38**, 936-952. <https://doi.org/10.1007/s00126-003-0351-6>
- [45] Spycher, N.F. and Reed, M.H. (1989) As (III) and Sb(III) Sulfide Complexes: An Evaluation of Stoichiometry and Stability from Existing Experimental Data. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, **53**, 2185-2194. [https://doi.org/10.1016/0016-7037\(89\)90342-6](https://doi.org/10.1016/0016-7037(89)90342-6)
- [46] Wood, S.A., Crerar, D.A. and Borcsik, M.P. (1987) Solubility of the Assemblage Pyrite-Pyrrhotite-Magnetite-Sphalerite-Galena-Gold-Stibnite-Bismuthinite-Argen-Tite-Molybdenite in H₂O-NaCl-CO₂ Solutions from 200 Degrees to 350 Degrees C Degrees. *Economic Geology*, **82**, 1864-1887. <https://doi.org/10.2113/gsecongeo.82.7.1864>
- [47] Zotov, A.V., Shikina, N.D. and Akinfiyev, N.N. (2003) Thermodynamic Properties of the Sb(III) Hydroxide Complex Sb(OH)_{3(aq)} at Hydrothermal Conditions. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, **67**, 1821-1836. [https://doi.org/10.1016/s0016-7037\(02\)01281-4](https://doi.org/10.1016/s0016-7037(02)01281-4)
- [48] 朱赖民, 胡瑞忠. 黔西南微细浸染型金矿床中金和锑共生分异现象及其热力学分析[J]. 中国科学(D 辑: 地球科学), 1999(6): 481-488.
- [49] Obolensky, A.A., Gushchina, L.V., Borisenko, A.S., Borovikov, A.A. and Pavlova, G.G. (2007) Antimony in Hydrothermal Processes: Solubility, Conditions of Transfer, and Metal-Bearing Capacity of Solutions. *Russian Geology and Geophysics*, **48**, 992-1001. <https://doi.org/10.1016/j.rgg.2007.11.006>
- [50] 苏文超, 朱路艳, 格西, 等. 贵州晴隆大厂锑矿床辉锑矿中流体包裹体的红外显微测温学研究[J]. 岩石学报, 2015, 31(4): 918-924.
- [51] 孙晓明, 莫儒伟, 翟伟, 等. 藏南沙拉岗锑矿流体包裹体红外显微测温研究[J]. 岩石学报, 2014, 30(1): 189-198.
- [52] 余盼, 郑义, 王岳军, 等. 湖南新宁星子岩锑矿流体包裹体特征及矿床成因[J]. 地学前缘, 2018, 25(5): 266-276.
- [53] Wang, Z., Xia, Y., Song, X., Liu, J., Yang, C. and Yan, B. (2012) Study on the Evolution of Ore-Formation Fluids for Au-Sb Ore Deposits and the Mechanism of Au-Sb Paragenesis and Differentiation in the Southwestern Part of Guizhou Province, China. *Chinese Journal of Geochemistry*, **32**, 56-68. <https://doi.org/10.1007/s11631-013-0607-5>
- [54] Zhu, Y. and Peng, J. (2015) Infrared Microthermometric and Noble Gas Isotope Study of Fluid Inclusions in Ore Minerals at the Woxi Orogenic Au-Sb-W Deposit, Western Hunan, South China. *Ore Geology Reviews*, **65**, 55-69. <https://doi.org/10.1016/j.oregeorev.2014.08.014>
- [55] 金景福, 陶琰, 曾令交. 锡矿山式锑矿床的成矿流体研究[J]. 矿物岩石地球化学通报, 2001(3): 156-164.