第 31 卷第 5 期
2025 年 10 月

地 质 力 学 学 报
JOURNAL OF GEOMECHANICS

Vol. 31 No. 5
Oct. 2025

引用格式：肖昌浩，邓军，2025. 热液锡矿床构造控矿作用[J]. 地质力学学报，31（5）：898−925. DOI：10.12090/j.issn.1006-6616.2025148

Citation: XIAO C H，DENG J，2025. Structural controls on hydrothermal tin deposit[J]. Journal of Geomechanics，31（5）：898−925. DOI：10.12090/j.issn.1006-6616.2025148

热液锡矿床构造控矿作用

肖昌浩[1,2,3]，邓　军[4,5,6]

XIAO Changhao[1,2,3]，DENG Jun[4,5,6]

1. 中国地质科学院地质力学研究所动力成岩成矿实验室，北京 100081；
2. 深地探测与矿产勘查全国重点实验室，北京 100094；
3. 自然资源部古地磁与古构造重建重点实验室，北京 100081；
4. 中国地质大学（北京）地球科学与资源学院，北京 100083；
5. 中国地质大学（北京）地质过程与成矿预测全国重点实验室，北京 100083；
6. 山东黄金集团地质研究院，山东 济南 250101

1. *Laboratory of Dynamic Diagenesis and Metallogenesis*, *Institute of Geomechanics*, *Chinese Academy of Geological Sciences*, *Beijing* 100081, *China*;
2. *State Key Laboratory of Deep Earth and Mineral Exploration*, *Institute of Geomechanics*, *Chinese Academy of Geological Sciences*, *Beijing* 100094, *China*;
3. *Key Laboratory of Paleomagnetism and Tectonic Reconstruction*, *Ministry of Natural Resources*, *Beijing* 100081, *China*;
4. *School of Earth Sciences and Resources*, *China University of Geosciences* (Beijing), *Beijing* 100083, *China*;
5. *State Key Laboratory of Geological Processes and Mineral Resources*,*China University of Geosciences* (Beijing), *Beijing* 100083, *China*;
6. *Institute of Geological Research*, *Shandong Gold Group Co.*, *LTD*, *Ji'nan* 250101, *Shandong*, *China*

Structural controls on hydrothermal tin deposit

Abstract: ［**Objective**］As a critical mineral supporting strategic sectors such as the information industry, aerospace, and defense technology, tin exhibits an extremely uneven distribution of global resources. Conducting comparative studies on major global tin-producing regions is of great significance for understanding the metallogeny of tin deposits and for global tin exploration. To better comprehend the tectonic settings of tin deposit formation in different structural environments and to understand the structural styles of tin deposits, this paper systematically reviews the tectonic environments of typical tin deposits in continental rifts and three types of convergent plate boundaries (Andean-type continental margin, Western Pacific continental margin, collisional orogenic belt). We summarize the structural styles of tin deposits and present the following findings: ［**Conclusion**］(1) Numerical simulations of tin transport and cassiterite precipitation from hydrothermal fluids indicate that incomplete buffering of ore-forming hydrothermal fluids by granitic wallrock is a common characteristic of many magmatic-hydrothermal tin deposits. This highlights the importance of structural pathways for hydrothermal tin mineralization. (2) Regardless of the tectonic setting—be it an extensional rift, a compressional Andean-type continental margin, an extensional Western Pacific continental margin back-arc, or an extensional post-collisional tectonic settings—hydrothermal tin mineralization aligns with the magmatic-hydrothermal tin deposit model, which posits that highly fractionated felsic rocks dominate tin mineralization. Extensional/transtensional tectonic settings

基金项目：深地国家科技重大专项（2024ZD1001701）；广西壮族自治区重点研发计划项目（2024AB21027）；中国地质科学院地质力学研究所基本科研业务费项目（DZLXJK202521）；中国地质调查局地质调查项目（DD20240127）

This research is financially supported by the National Science and Technology Major Project on Deep Earth Exploration (Grant No. 2024ZD1001701), the Key Research and Development Program of Guangxi Zhuang Autonomous Region (Grant No. 2024AB21027), the CGS Research Fund (Grant No. DZLXJK202521), and the Geological Survey Project of the China Geological Survey (Grant No. DD20240127).

第一作者：肖昌浩（1986—），男，研究员，主要从事矿田构造与成矿规律研究。Email：xiaochanghao1986@126.com

通信作者：邓军（1958—），男，教授，长期从事矿床学研究。Email: djun@cugb.edu.cn

收稿日期：2025−10−09；**修回日期**：2025−10−31；**录用日期**：2025−10−31；**网络出版日期**：2025−11−06；**责任编辑**：范二平

are favorable for the formation of hydrothermal tin deposits. Additionally, recent studies have reported pre-concentration of tin due to metamorphism during syn-accretionary orogenesis, detailing the release of tin during prograde metamorphism and the formation of cassiterite during retrograde metamorphism through biotite chloritization. These findings lay the groundwork for the development of theories about collision-related tin metallogenesis. (3) Magmatic-hydrothermal tin deposits are primarily skarn-type and quartz vein-type, often occurring together. Within and around tin-bearing intrusion, tin-bearing magmatic cooling contraction fractures, water-rock separation fractures, magmatic emplacement compression fractures, and regional tectonic stress superposition fractures commonly develop. Away from the tin-bearing intrusions, mineralization is strongly controlled by rheological differences in rocks or faults (cross-cutting and bedding-parallel faults), forming diverse structure-mineralization networks. Based on the absence or presence of breccias in the structure-mineralization network, ore-bearing vein structures can be classified into two categories. The first category includes structures without breccias, which, in the order of increasing complexity, are: simple veins, composite simple-vein systems, “lit-par-lit” vein systems, symmetrical complex vein systems, and asymmetrical complex vein systems. The morphologies and extensions of single veins are closely related to the mechanical properties of the host structures. The second category includes structures with breccias, which, in order of increasing complexity, are: anastomosing veins in shear zone systems, brecciated vein systems, vein and hanging-wall stockwork systems, and multiple brecciation vein systems. [**Significance**] The determination of tectonic sequences and deformation partitioning plays a crucial role in studying the structural control of hydrothermal tin deposits. Enhancing detailed mapping of structures in typical deposits/districts, combined with numerical simulations and rheological experiments on rocks, represents the future direction for research on structural controls of hydrothermal tin deposits.

Keywords: hydrothermal tin deposit; collisional orogenic tin deposits; tectonic setting; extensional/transtensional tectonic regime; structural style

摘　要：锡作为支撑信息产业、航空航天及国防科技等战略领域的关键矿产，其资源分布在全球极不均匀。开展全球主要锡矿产区对比研究，对理解锡矿成矿规律及全球锡矿勘查和开采具有重要意义。为了更好地理解不同构造背景下锡矿床形成的构造环境及不同类型锡矿床的构造控矿样式，通过系统梳理大陆裂谷和 3 种汇聚型板块边界典型的锡矿床产出构造环境，并总结了常见锡矿床的构造控矿样式，取得了如下认识：第一，针对热液流体中锡的迁移与锡石沉淀的数值模拟表明，成矿热液未被花岗质围岩完全缓冲是导致锡有效运移和局部富集的关键；这一过程必须依赖高效的构造通道才能实现，从而凸显了构造在热液锡矿成矿中的核心控制作用。第二，无论是在裂谷伸展、安第斯型大陆边缘挤压、西太平洋型大陆边缘弧后伸展以及碰撞造山后伸展哪种构造背景下，热液锡矿床成矿仍符合岩浆热液型锡矿成矿模型的一贯主张，即上述伸展背景下高分异的长英质岩石主导锡成矿作用，伸展/张扭性构造背景有利于热液锡矿床形成。此外，近年部分学者报道了同增生造山过程中变质作用导致锡的预富集，并详细揭示了进变质过程中锡的活化和退变质过程中黑云母绿泥石化释放 Sn 形成锡石的过程。上述研究为碰撞造山型锡矿成矿理论发展奠定了基础。第三，岩浆热液型锡矿床以矽卡岩型和石英脉型锡矿床为主，通常二者常伴生出现。成锡岩体内部及周缘发育含锡的岩浆冷凝收缩裂隙、水岩分离裂隙、岩浆侵位挤压裂隙和区域构造应力叠加裂隙等。远离成锡岩体受岩石流变学差异或断裂（切层断层和顺层断层）的强烈控制，形成多样的矿化网络结构。根据矿化网络结构内是否发育角砾，可以把含矿脉分为 2 类。一类是不发育角砾的容矿构造，按复杂程度逐渐增加分为单脉、单脉复合系统、“非”字型脉系统、对称复合脉系统和不对称复合脉系统。单脉的形态及延伸与容矿构造力学性质关系密切。另一类是发育角砾的容矿构造，按复杂程度逐渐增加分为产于剪切带内对称脉、角砾脉系统、脉与顶板网脉复合系统、多角砾脉复合系统。构造序次和构造分异的厘定对热液锡矿床构造控矿作用的研究具有重要作用，加强典型矿床/矿集区构造序次和构造分异的精细填图并结合数值模拟和岩石流变学实验研究是热液锡矿床构造控矿作用研究的发展方向。

关键词：热液锡矿床；碰撞造山型锡矿床；大地构造背景；伸展/张扭构造体制；构造控矿样式

中图分类号：P548; P613　　**文献标识码：**A　　**文章编号：**1006−6616(2025)05−0898−28

DOI：10.12090/j.issn.1006-6616.2025148

0 引言

锡作为支撑信息产业、航空航天及国防科技等战略领域的重要工业原料，被世界各国列为关键矿产（毛景文等，2023）。然而全球锡矿资源分布极度不均匀，主要分布在西非、东亚–东南亚（中国、印度尼西亚、马来西亚、缅甸）、澳大利亚、南美洲（玻利维亚、秘鲁）以及欧洲康沃尔等地区，上述地区的锡矿储量占全球锡储量的85%以上（Lehmann, 2021; USGS, 2025）。因此，开展上述地区热液锡矿床的成矿理论研究对全球锡矿勘查和开采具有重要意义。Taylor（1979）提出全球范围内的八大锡矿成矿带，即北美锡矿带、南美锡矿带、澳大利亚东部锡矿带、东南亚锡矿带、中国华南锡矿带、俄罗斯远东锡矿带、非洲锡矿带以及欧洲锡矿带。已有研究显示，上述锡矿带可产在不同构造环境中且通常伴随同期岩浆活动，后者为矿床提供了热源和流体来源，在活化金属元素、迁移金属物质及形成热液锡矿床的过程中起到关键作用（Lehmann, 2021）。20世纪70年代以来，关于成锡花岗岩性质、演化与锡成矿作用关系（Olade, 1980; Lehmann, 1987; Taylor and Wall, 1992）、锡石年代学（Yuan et al., 2008; Carr et al., 2017; Zhang et al., 2017）、壳–幔相互作用与锡成矿（Xiao et al., 2019; Guo et al., 2022; Wang et al., 2024）、锡在熔体–流体相间的分配行为（Schmidt et al., 2020; Carocci et al., 2022; Zhao et al., 2022）、锡在流体中的迁移形式（Carocci, 2019; Liu et al., 2023）等诸多方面取得一系列经典认识。尽管如此，关于锡成矿构造背景的研究仍呈现多样性。19世纪中叶—20世纪中叶，基于槽台学说理论，相关学者指出锡矿主要形成于地槽褶皱回返的造山晚期（Lehmann, 2021）。随着20世纪60年代中后期板块构造的兴起和发展，Mitchell（1979）基于板块构造理论提出了裂谷（以非洲尼日利亚、巴西和西南非喀麦隆为例）、俯冲（以玻利维亚锡矿带，日本西南部和东马来西亚为例）和碰撞（以英国西南部康沃尔和马来西亚中央带为例）相关的锡矿带。近年来的研究进一步细化了对汇聚背景成矿的认识，提出了后俯冲相关锡矿带（Mao et al., 2021）；同时，更多学者通过对比挤压背景和伸展背景下高分异S型花岗岩地球化学特征及同位素组成，发现二者并无差异（Romer and Kroner, 2015; Xu et al., 2022）；但形成于伸展背景下的高分异S型花岗岩，其相关的锡矿化规模和经济价值远大于挤压背景下的同类岩石（Romer and Kroner, 2015）。Xu et al.（2022）和Xiao et al.（2025）分别以滇东南个旧矿田、右江盆地平那钨–锡矿床为例，揭示了张性或张扭性构造背景有利于热液锡矿床形成的特征。因此，系统梳理不同构造背景下成锡岩体侵位时构造环境、控矿构造样式是理解不同构造背景锡矿床形成的关键。

为了更好理解热液锡矿床成矿构造环境，文章首先介绍了作者团队近年在热液流体中锡的迁移及锡石沉淀研究的进展；随后总结了大陆裂谷和3种汇聚型板块边界典型的锡矿床产出构造环境，并梳理了常见锡矿床的构造控矿样式。最后结合矿田构造学科发展现状，浅谈热液锡矿床构造控矿研究发展趋势。

1 热液流体中锡的迁移及锡石沉淀

成锡花岗岩（介于石英–铁橄榄石–磁铁矿与镍–氧化镍缓冲体系之间）通常结晶自准铝质至过铝质花岗质熔体中（Lehmann, 1987; Mlynarczyk et al., 2003）。以往研究认为花岗质熔体以Sn^{2+}为主（Linnen et al., 1995; Farges et al., 2006; Che et al., 2013）。基于锡在岩浆阶段以二价态为主导的特性，近几十年来在还原性水热条件下积累了关于锡赋存形态及锡石溶解度的广泛实验数据。基于此，成矿流体中的锡通常被解释为主要以$SnCl^{+}$络合物的形式迁移（Heinrich, 1990; Halter et al., 1998）。在目前普遍接受的锡成矿模型中，锡石沉淀的必要条件是发生氧化还原作用/耗氢反应（Heinrich, 1990; Lehmann, 2021）。近期原位高温实验和分子动力学模拟发现，在还原性溶液中存在显著含量的锡（IV）氯化物络合物，这对早期关于成矿流体中锡（II）占主导地位的认知提出了质疑（Schmidt, 2018）。

Naumov et al.（2011）对320个锡和锡–钨矿床统计显示，锡成矿流体属于NaCl盐水（$\pm CO_2$）体系。热液锡矿床脉石矿物中常见含CO_2的流体包裹体（Borges et al., 2009）。这些含碳流体包裹体被认为是岩浆或变质成因（Linnen, 1998; Van Daele et al., 2018）。统计结果显示锡成矿阶段流体包裹体均一温度为300～500 ℃，这一温度区间与已发表的数据基本吻合（Korges et al., 2018; Myint et al., 2018; Cao et al., 2021; Han et al., 2023; Makutu et al., 2024）。锡成矿流体盐度通常小于10%，成矿流体压力为50～150 MPa（Naumov et al., 2011）。锡矿化流体通常呈酸性，

流经花岗岩后会形成石英−白云母−萤石−黄玉的典型矿物组合(云英岩; Launay et al., 2023)。基于锡矿床中常见矿物组合及矿物−溶液平衡关系的约束，成矿流体的 pH 值范围为 4～6(Patterson et al., 1981; Polya, 1989)。在其来源处，矿化流体可能比上述 pH 值更具酸性。氧逸度值(f_{O_2})分别基于流体包裹体气相成分(CO_2 与 CH_4)和矿物平衡关系估算得出，其数值多介于石英−铁橄榄石−磁铁矿(QFM)与镍−氧化镍(NNO)缓冲矿物组合的氧逸度区间(Patterson et al., 1981; Schmidt and Jahn, 2024)。世界主要锡矿区典型矿床流体包裹体锡含量数据显示成锡流体的锡含量分布范围为 1×10^{-6}～10000×10^{-6}，平均值为 529×10^{-6} (Korges et al., 2018; Legros et al., 2019)；其中 10×10^{-6}～1000×10^{-6} 浓度区间占总数据量的 83% (Liu et al., 2023)。

Liu et al.(2023)通过评估大量实验数据，并应用锡水溶物种热力学性质估算方法及热力学数值模拟，得到在岩浆热液条件下 Sn(II)的含氯络合物主要有 $SnCl^+$、$SnCl_2$(aq)、$SnCl^{3-}$。典型成矿条件下的地球化学计算模拟结果表明，热液中 Sn(II)/Sn(IV)比值与温度、氧逸度、HCl 含量有关。即使在氧逸度(f_{O_2})处于 NNO(f_{O_2}=NNO)的还原条件下，Sn(IV)含量在高 HCl 浓度的热液中也非常可观。在这种情况下(更可能发生在成矿早阶段)，氧化还原反应不再是锡石沉淀的必要条件。当 f_{O_2} 值不变，单纯降温可使成矿流体的氧逸度水平向更为氧化水平转变并使锡石沉淀，因而氧化还原介质并非是锡石沉淀的必要条件。这就解释了为什么锡矿体可赋存于不提供氧化介质的岩石(如砂岩、石英岩等)中。锡石在酸性、氧化条件下[NNO < f_{O_2} ≤ HM(赤铁矿−磁铁矿)]的溶解度也可达到典型锡矿流体包裹体锡含量的水平，但其成矿潜力弱于还原性流体。基于流体—矿物相平衡计算得到的锡成矿流体 pH=4～6，成矿热液未被花岗岩类围岩完全缓冲是许多岩浆热液型锡矿床的共同特征，这也凸显了构造通道对热液成锡矿的重要意义。

2　热液锡矿床成矿构造环境

全球构造在矿床形成和分布中的核心作用被广泛认可(Garson and Mitchell, 1977; Kroner and Romer, 2013)。根据世界锡矿产区主要分布的大地构造位置，对大陆裂谷及 3 种汇聚型板块边界构造背景下的锡矿带特征进行系统阐述(图 1，图 2)。其中，由中国学者所提出的后俯冲相关锡矿带，亦被纳入与俯冲作用有关的锡矿带范畴中一并探讨。

2.1　大陆裂谷带

2.1.1　构造背景

大陆裂谷在成因上被认为与地壳热点/地幔柱有关，并发育在相对于下伏地幔静止或仅缓慢移动的岩石圈板块上的大陆之上(Sillitoe, 1974)。从热点向外辐射的裂谷形成相互关联的体系，其特征是

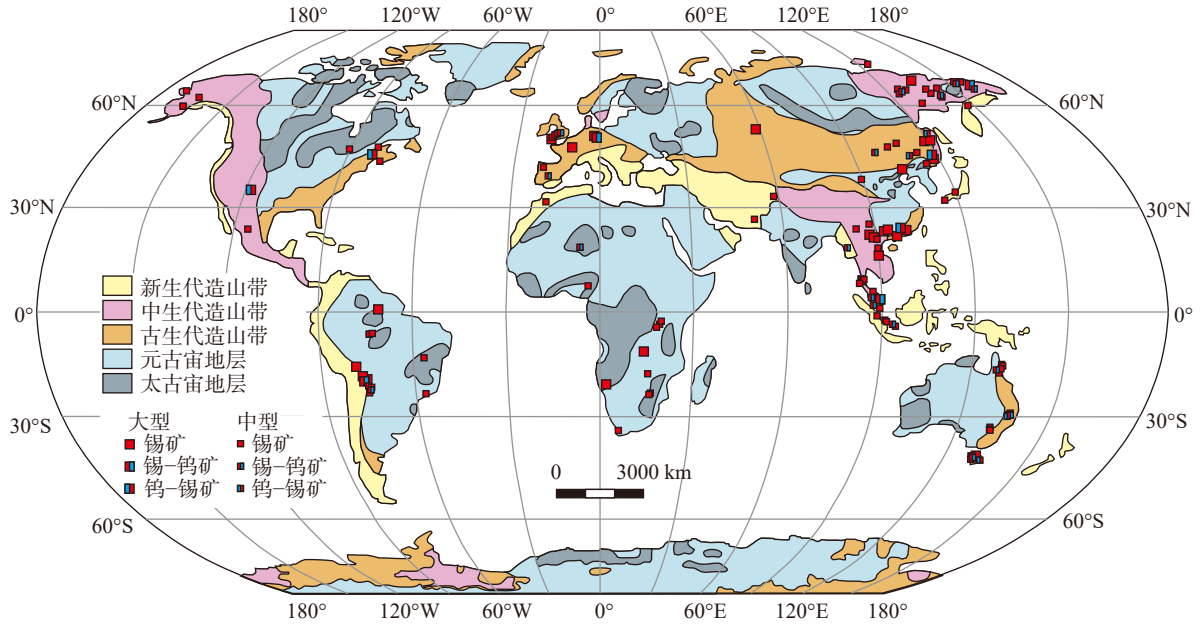
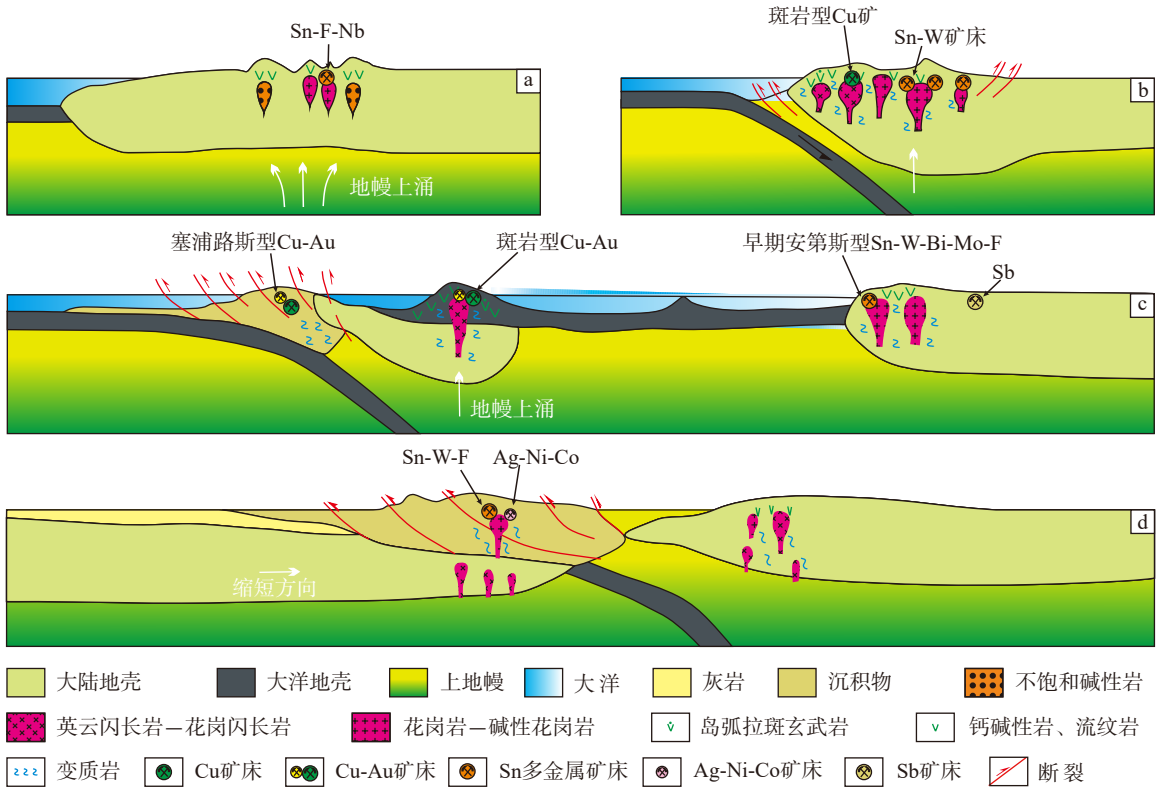


图 1　全球热液锡矿床分布图(据 Taylor, 1979; 杨林等, 2023 修改)

Fig. 1　Map showing the global distribution of tin and tungsten deposits (modified after Taylor, 1979; Yang et al., 2023)



a—陆内裂谷；b—安第斯型大陆边缘；c—西太平洋大陆边缘；d—碰撞造山带

图2 全球主要锡成矿省产出构造环境示意图（据Taylor，1979修改）

Fig. 2 Structural environment of major global tin provinces (modified after Taylor, 1979)

(a) Intra-continental rifting; (b) Andean-type continental margin; (c) Western Pacific continental margin; (d) Collisional orogenic belt

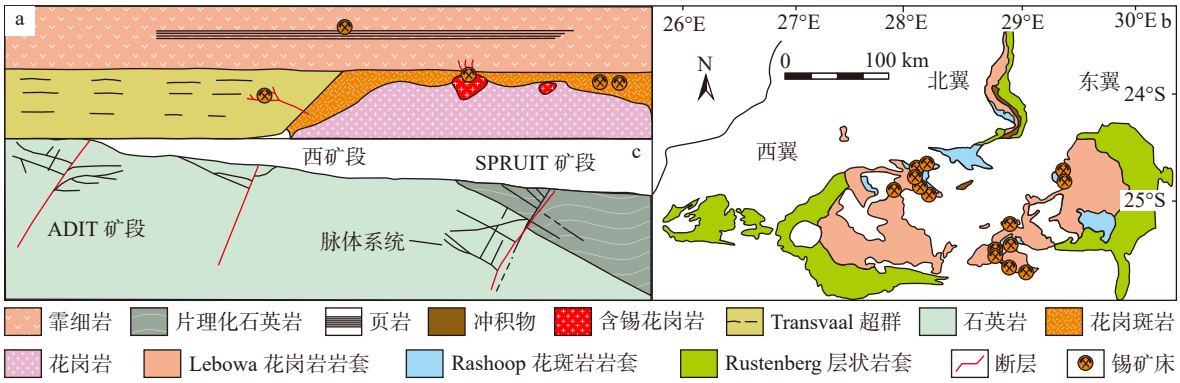
一个具有上隆侧翼的断陷带。伴生的火山多为碱性火山，喷发出流纹岩质和不饱和的碱性熔岩及凝灰岩，其下伏侵入岩包括长英质花岗岩类。这些长英质岩体出溶高盐度含锡流体，其中一部分进入冷却晶体粥的粒间孔隙，形成云英岩型锡矿体；另一部分进入区域应力控制的优势方位断裂系统形成脉状锡成矿系统。随着持续发育，拉斑玄武岩沿轴向带侵入，裂谷被纵向分割成两半，中间由扩张的洋脊系统分隔。最终，邻近原裂谷的洋盆可能因俯冲作用而闭合，裂谷岩石可能在碰撞过程中与另一大陆边缘的岩石发生构造并置。许多裂谷未能发育成洋脊，这可能是大陆开始相对于下伏地幔移动所致（Sillitoe, 1974），这些裂谷作为夭折的大陆内裂谷得以保存下来。裂谷侧翼的花岗岩类岩石可能因其构造环境稳定而得以保存，有利于高分异、成锡花岗岩的形成。

2.1.2 典型成矿省/矿集区

与裂谷相关的典型锡矿床主要产于南非的布什维尔德（Bushveld）锡矿集区和巴西皮廷加（Pitinga）锡成矿省。

（1）南非布什维尔德锡矿集区

20.5亿年的布什维尔德杂岩是全球规模最大的克拉通内火山岩序列，其分布范围受卡普瓦尔克拉通内的多个地壳尺度剪切带所控制（Ollila, 1984; Clarke et al., 2009; Vantongeren and Mathez, 2012; 图3a）。布什维尔德双峰式杂岩由55.5×10^4 km^{3}基性—超基性岩和60×10^4 km^{3}长英质岩石组成（Kinnaird, 2005; Cawthorn, 2015; 图3b）。该杂岩体底部为鲁伊伯格群（Rooiberg Group）的火山岩，之上覆盖着鲁斯腾堡层状岩套（Rustenburg Layered Suite）的层状镁铁质侵入体，最上部为莱博瓦花岗岩套（Lebowa Granite）和拉舒普花岗斑岩套（Rashoop Granophyre Suite）的长英质岩系（Cawthorn, 2015）。相关学者研究显示与新元古代早期大陆裂解相关的伸展事件影响了西非克拉通（Kinnaird, 2005; Clarke et al., 2009）。因此，目前被广泛认可的模型是将整个布什维尔德大火成岩省（Bushveld LIP）归因于地幔柱活动，该活动导致大陆岩石圈下部及下



a—南非布什维尔德杂岩有关锡矿床构造模型；b—布什维尔德杂岩地质图；c—罗伊贝赫（Rooiberg）锡矿田莱乌波特（Leeupoort）地区矿化–地质剖面（据 Vonopartis et al., 2020 修改）

图 3　南非布什维尔德锡矿集区构造–岩浆–锡矿化特征

Fig. 3　Tectonic–magmatic–tin mineralization characteristics of the Bushveld Tin Province, South Africa

(a) Structural Model of the tin deposits associated with the Bushveld Complex, South Africa; (b) Geological map of the Bushveld Complex, South Africa; (c) Section of the Leeupoor region of the Rooiberg tin field (modifided after Vonopartis et al., 2020)

地壳发生部分熔融（Ashley, 1984; Cawthorn, 2015; Skursch et al., 2022），但是关于岩浆房的规模与性质仍存在争议。

南非的锡矿床主要为与布什维尔德杂岩体（Bushveld Complex）花岗岩相关的管状矿体、浸染状矿体和脉状矿体（图 3c），尤其集中分布于布什维尔德杂岩体北翼南非林波波省（Limpopo Province）的沃特贝格地区（Zeh et al., 2015; Mungall et al., 2016; Vonopartis et al., 2020; Nazari-Dehkordi and Robb, 2022; Nazari-Dehkordi et al., 2024）。管状矿体和浸染状矿体主要产于花岗岩中，脉状矿体主要沿着陡倾斜断裂系统及周边分布。

（2）巴西皮廷加锡成矿省

亚马逊克拉通的锡矿省提供了巴西 95% 的锡产量，这些锡成矿省的年锡矿产量在 1.4×10^4～1.9×10^4t，锡储量为 40×10^4t，其中大部分储量位于约 18 亿年前（～1.8 Ga）形成的皮廷加锡矿省（Pitinga Tin Province; Lenharo et al., 2003; Costi et al., 2009; Bastos Neto et al., 2014）和约 10 亿年左右形成的罗纳迪尼亚锡成矿省（Rondonia tin province; Bettencourt et al., 2005）。

巴西皮廷加锡成矿省位于亚马逊克拉通，该锡成矿省记录了地球上最为漫长的演化型稀有金属长英质岩浆活动序列之一（Lenharo et al., 2002）。这些花岗岩体形成于 1.8～1.0 Ga（Costi et al., 2002; Guimarães et al., 2022），被认为是罗迪尼亚超大陆拼合期间，由格林维尔期造山运动引发的稳定克拉通区的大型断裂作用和裂谷作用的产物（Bettencourt et al., 2005）。这些长英质岩石由 10 个著名的花岗岩岩套组成，时间跨度近 9 亿年（Guimarães et al., 2022）。

2.1.3　与裂谷相关的锡矿产出特征

与裂谷相关的锡矿化主要与长英质类岩石有关，这些长英质岩体大多侵位于夭折大陆内裂谷（即未能发育成大洋盆地的裂谷）发展的早阶段。侵入前的围岩通常是古老造山带的变质岩，或是略早于侵入岩体的、与裂谷相关的大陆沉积物和硅质火山岩。矿化岩体多为浅成长英质岩体，常呈次火山环状杂岩的形式产出，也有部分矿化出现在上覆被侵入的火山岩中。含锡的深成岩体主要是黑云母花岗岩，但也有正长岩和过碱性花岗岩存在。这些花岗岩属于非造山型，其侵入和矿化过程中伴随的变形或变质作用很微弱。矿石矿物以锡石为主，含有少量黑钨矿和铌钽铁矿；黄玉、萤石和锂云母较发育。矿化作用发生在浅成花岗岩体内及其邻近围岩的矿脉中，也出现在硅质火山岩中。

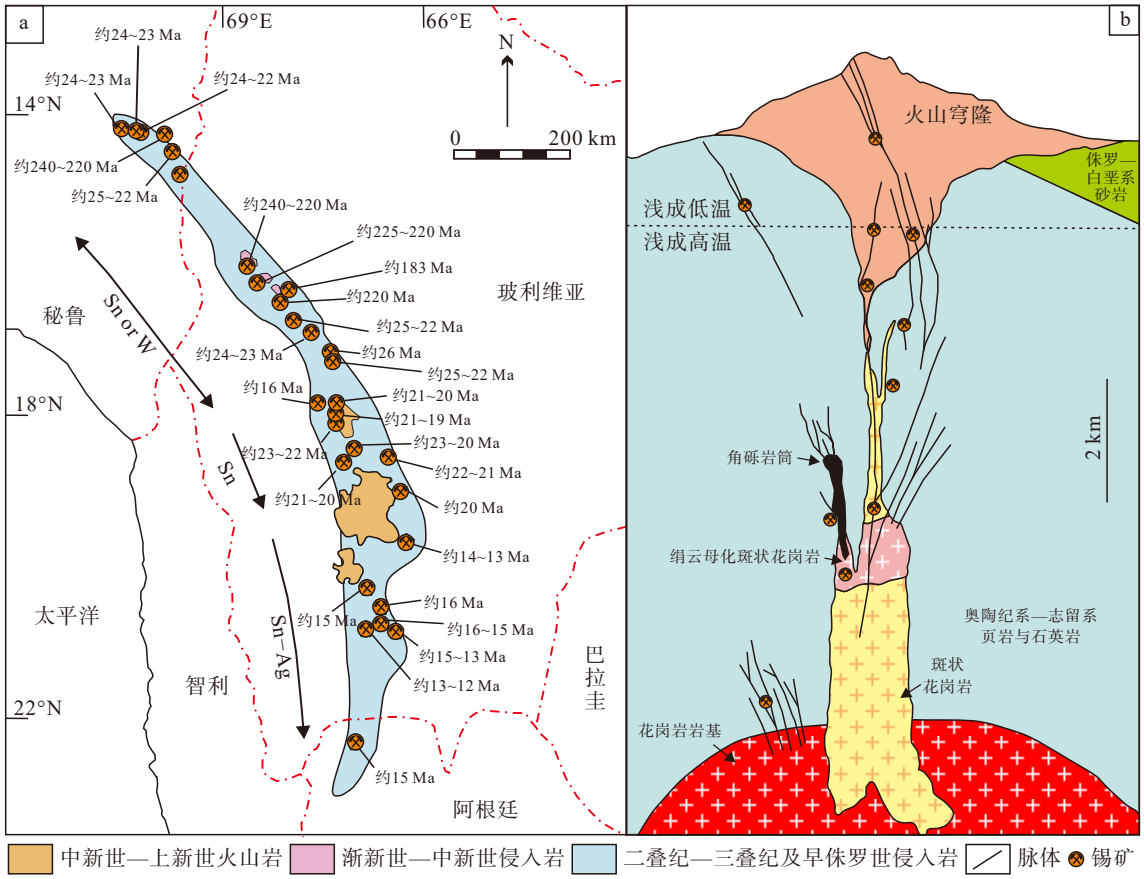
2.2　安第斯型大陆边缘

位于中安第斯山脉的玻利维亚锡矿带是全球最大的锡成矿带之一，2019 年其锡产量约占全球的 6%；此外，其还生产了全球约 5% 的白银和 1.5% 的钨（USGS, 2025）。玻利维亚锡矿带具有全球品位最高、成矿具有明显分带性的特点，是现代板块俯冲与成矿研究的典范。

2.2.1　构造背景

玻利维亚锡矿带位于向大陆凸出的弧系中，从

秘鲁的喀喀湖（Lake Titicaca）西北约130 km处［世界级的圣拉斐尔（San Rafael）锡矿床］穿过玻利维亚，直至阿根廷西北部（Pirquitas Ag-Zn-Pb-Sn矿床；图4）。在走向上北半部（主要为北西—南东向）和南半部（主要为南北向）截然不同，两段在安第斯弧弯（elbow of the Andes）、玻利维亚弧弯（Bolivian orocline）或阿里卡转折（Arica deflection）处连接（Ahlfeld, 1936; Mlynarczyk and Williams-Jones, 2005）。从大洋向大陆方向依次呈现大洋−海沟−火山弧−弧前盆地的构造组合，火山弧直接叠加在大陆边缘形成陆缘弧（图4a）。与西太平洋型大陆边缘相比，其缺乏独立的岛弧—弧后盆地系统，海沟直接逼近大陆边缘（李三忠等，2019）。安第斯型俯冲带倾角较缓（约30°），大陆板块以挤压变形为主，南美大陆对纳斯卡板块的逆掩形成南美的安第斯陆边弧（Sempere et al., 2002）。晚中生代期间太平洋板块向北运动，美洲大陆西缘则是大量来自赤道方向的外来地体拼贴增生的场所。



a—玻利维亚锡矿带主要矿床、岩体及火山沉积分布图；b—玻利维亚锡矿带火山−次火山成因浅成低温热液与异位高温热液矿床示意剖面模型（据Gemmrich et al., 2021修改）

图4 玻利维亚锡矿带矿化分布图

Fig. 4 Distribution of the mineralization in the Bolivian Tin Belt

(a) Location of the main ore deposits, plutons, and volcanic deposits along the Bolivian Tin Belt; (b) Schematic cross-section of volcanic- and subvolcanic-hosted epithermal and xenothermal deposits in the Bolivian Tin Belt (modifided after Gemmrich et al., 2021)

玻利维亚锡矿带基底由前寒武变质砂岩组成，其盖层底部发育早古生代形成于弧后盆地的厚层海相碎屑沉积岩。其上依次覆盖着晚古生代浅海相—陆相沉积的砂岩与粉砂岩，以及中生代厚层陆相沉积地层（Redwood and Rice, 1997）。顶部被古近纪—新近纪沉积物所覆盖（王嘉旭等，2025）。自晚中生代以来，强烈的构造变形造成早古生代地层大量剥露至地表。新生代自西向东强烈的地壳俯冲挤压形成科迪勒拉俯冲带，并伴随强烈的岩浆活动及相关锡多金属成矿作用（Mcquarrie, 2002; Gillis et al., 2006; Sigloch et al., 2008; Arce-Burgoa and Goldfarb, 2009; Cacho et al., 2019）。

玻利维亚锡矿带的成矿作用与安第斯造山运动相关的 2 期岩浆活动有关：一期为三叠纪到侏罗纪的淡色花岗岩，另一期为渐新世至中新世的深成岩体、次火山和火山喷发杂岩（Sillitoe et al., 1975; Markovic et al., 2025）。三叠纪花岗岩被认为形成于安第斯型挤压造山背景下的弧后环境，属于与裂谷作用相关的典型岩浆活动（Lehmann et al., 1990; Kempe et al., 2008; Harlaux et al., 2023; Markovic et al., 2025）。该裂谷系在后期发生构造反转，其轴部与现今东科迪勒拉山脉的轴向基本一致（Sempere et al., 2002）。在东科迪勒拉山脉的核心地带，即玻利维亚锡矿带北段，最古老的花岗岩类包括 Huato、Illampu、Yani、Huayna Potosi、Zongo 和 Taquesi 岩基，形成时代约为 280～200 Ma；最年轻的岩体如 Illimani、Quimsa Cruz 和 San Cruz 岩基则形成于约 26～23 Ma（图 4a）。在玻利维亚锡矿带秘鲁段，即卡拉巴亚山脉（Cordillera de Carabaya），最古老的花岗岩类（San Gabán、Ccocha、Limbani 和 Aricoma 岩基）形成于三叠纪至早侏罗世年龄（约 240～190 Ma）。在玻利维亚锡矿带北端，内瓦多德阿利亚内（Nevado de Allinocapa）过碱性火山−深成岩包含成分复杂的正长岩、二长岩和霞石正长岩，侵位年龄介于 175～181 Ma 之间（Stewart et al., 1974; Kontak et al., 1990）。而最年轻的已定年花岗岩类（圣拉斐尔和圣多明各岩株）及其对应的皮科塔尼群（Picotani Group）火山碎屑岩属于晚渐新世（Sandeman et al., 1997）。在雷亚尔山脉（Cordillera Real）以南，广泛发育破火山杂岩以及巨厚的晚上新世至中新世英安质−流纹质熔结凝灰岩。这些火山建造的形成，与向南迁移的胡安费尔南德斯海岭（Juan Fernández Ridge）俯冲所引起的幔源熔体产率变化，以及局部下地壳与岩石圈地幔拆沉作用密切相关（De Silva and Kay, 2018）。

2.2.2　典型矿化特征

在玻利维亚锡矿带东北部地区，矿床类型主要是与三叠纪和渐新世岩基有关的锡−钨（Sn-W）脉和“层状”（strata-bound mineralization，层控矿化）类型；而在该带的最南段，矿化形成于中新世，通常更浅，并以锡、锡−钨和锡多金属脉的形式形成于浅成低温（epithermal）和浅成高温（xenothermal）环境中。矿化岩株及其邻近围岩通常呈现垂向和侧向分带的热液蚀变，在高温矿化中心富含石英−电气石−白云母组合，向外渐变为绢英岩化、青磐岩化，以及偶尔出现的硅化、高级泥化岩帽（lithocaps）。岩帽仅见于玻利维亚锡矿带南部，与矿化有成因联系的火山穹隆仅受到浅度剥蚀（Sillitoe et al., 1975）。

2.2.3　与安第斯型俯冲相关的锡矿产出特征

玻利维亚锡矿带的锡矿化主要与三叠纪和渐新世长英质类岩石有关，这些长英质岩体主要由于浅的俯冲作用导致的强烈熔融的软流圈地幔楔向东迁移并对厚层大陆壳进行底垫作用，同时伴随逆冲剪切生热、地壳增厚产生的放射热以及下地壳向地幔的沉降共同引起的内弧带下方厚层变沉积岩序列和片麻岩基底的广泛深熔作用而产生的大量铝质富锡岩浆。

2.3　西太平洋型大陆边缘

西太平洋型大陆边缘形成于太平洋板块向西高角度俯冲，该特征不同于东太平洋陆缘总体东向的低角度俯冲（李三忠等，2019），是全球最大的锡矿带，长 2800 km，宽 400 km，南北向展布，主要分布于中国、缅甸、印度尼西亚、老挝、马来西亚、澳大利亚、俄罗斯等国家。锡储量占全球 60% 以上（USGS, 2025）。

2.3.1　构造背景

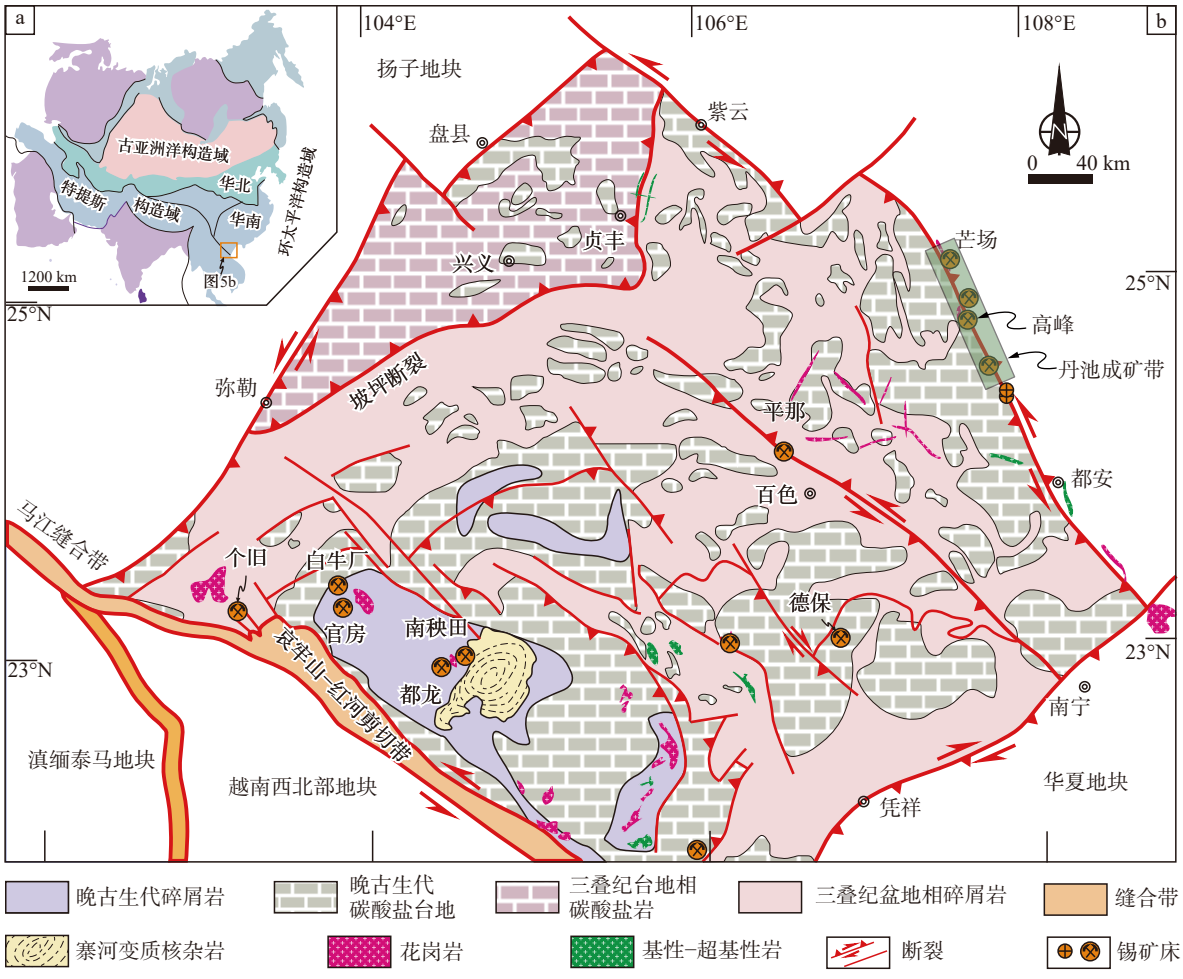
研究显示西太平洋型大陆边缘锡矿带成锡岩浆作用和锡成矿时代主要集中于 130～70 Ma（Yang et al., 2020; Sun et al., 2025）。马来半岛南部及越南的白垩纪花岗岩（可能形成于科迪勒拉型弧环境）与中国东南部花岗质岩浆活动的终结大致同期（Roger et al., 2012; Shellnutt et al., 2013），且同时对应科希斯坦−拉达克弧与印度板块碰撞及印度板块向北漂移显著加速时期（Chatterjee et al., 2013）。这些特征反映了 90～80 Ma 期间的重大板块重组事件：古太平洋板块和印度板块相对于亚洲板块的运动方向改变，导致西太平洋俯冲带沿线岩浆活动停滞（Romer and Kroner, 2016）。西太平洋型大陆边缘晚白垩世锡成矿作用动力学背景争议较大。部分学者因为特提斯洋俯冲海沟现在远离华南地块，而强调古太平洋俯冲的影响；部分学者对东南亚地区的板片重建发现新特提斯的俯冲带在白垩纪时离华南较近，其俯冲完全可以影响到华南地区。后来通过海南岛和西藏地区相关的白垩纪岩浆岩研究也证实这一推断（Sun and Li, 2023）。从而提出了新特提斯洋俯冲板片发生后撤的动力学模型（Sun and Li, 2023）和新特提斯洋俯冲后伸展背景下地壳减压熔融形成成锡花岗岩模型（徐容等，2018）。另一部分学者提出古太平洋俯冲板片东南向的后撤及伴

随的海沟后退驱动了弧后伸展(Li and Li, 2007)。其他假设则倾向于古太平洋俯冲板片陡倾化(Zhou and Li, 2000)、板片断离(Li et al., 2014)和岩石圈拆沉(Xu et al., 2019)等成因机制。Yang(2013)指出晚白垩世(89～83 Ma)伊佐奈岐板块沿欧亚大陆东部边缘斜向汇聚导致在压扭体制之后引发伸展作用与岩浆活动。这一过程可能是导致东亚大陆边缘强烈走滑盆地演化、岩浆-成矿作用及变质活动的主要原因。

2.3.2 典型成矿省/矿集区

华南右江盆地是西太平洋型大陆边缘锡成矿带重要组成之一，位于华南板块西缘，地处几个大的构造单元的交接部位，地质构造复杂，具有构造演化过程复杂及中生代岩浆-构造-成矿记录保存完整等特性(曾允孚等, 1995; 华仁民等, 1997)。右江盆地分跨扬子板块和右江造山带，整体位于2个构造单元的结合部位的东侧。盆地边缘发现多个世界级锡矿床，如大厂、个旧、都龙锡矿田，锡矿储量全国第一，达442×10^4 t(图5)。

右江盆地受古特提斯构造域和古太平洋构造域的双重影响，发育多重构造变形序列并伴随多期岩浆活动与成矿作用。其中晚白垩世锡成矿作用与中生代以来构造岩浆演化关系密切(Xiao et al., 2025)。右江盆地东西两侧主要锡矿集区具有较为相似的成矿特征，晚白垩世主要发育以下锡矿化样式：①晚白垩世黑云母花岗岩与碳酸盐岩接触带附近的矽卡岩型锡石硫化物矿体或晚白垩世黑云母花岗岩顶部的云英岩型矿体，通常以前者为主，矿



a—研究区大地构造位置图；b—南盘江-右江成矿带锡金多金属矿集区大地构造位置及锡多金属矿床分布图(Xiao et al., 2022)

图5 南盘江-右江成矿带地质与锡钨矿床分布图

Fig. 5 Geology and distribution of Sn-W deposits in the Nanpanjiang–Youjiang metallogenic belt

(a) Tectonic map of the study area showing continental blocks and bounding sutures; (b) Schematic geological map of the Nanpanjiang–Youjiang metallogenic belt and the distribution of polymetallic Sn deposits (modified after Xiao et al., 2022)

化以 Cu-Zn-Sn 为主。②似层状锡石硫化物矿体，该类型控矿构造类型由北东—南西向挤压阶段形成北西向褶皱发生不同岩性界面附近（如硅钙界面、玄武岩夹层等）层间剪切破碎带及褶皱轴部伴生的张性、剪性裂隙。在燕山晚期拉张剪切作用以及岩体上拱作用下，早期先存层间破碎带进一步虚脱张开，成为该区最重要的控矿构造类型，几乎所有的层状矿体都受此构造控制，该类型矿体规模最大、储量最多；③大脉带矿体，主产于陡倾斜构造中或背斜轴部倾伏端的横张裂隙，呈大脉状产出。矿化以石英脉型硫化物为主；④细脉带矿体，在各矿集区广泛发育，主要产于成矿岩体顶部，呈石英硫化物脉（如大厂矿田东矿带）、电气石−石英脉和电气石−锂云母脉（个旧矿田老厂矿床）等；⑤古溶洞充填型矿体，该类型矿体主要产于桂西丹池成矿带，如桂西大厂矿田高峰矿床和五圩矿田拔旺矿床（Zhang et al., 2023）。锡石高精 U-Pb 年代学研究显示大厂矿田和个旧矿田不同类型锡矿体形成时间一致（郭佳, 2019; Xiao et al., 2022; Zhu et al., 2025）。最新研究揭示构造流体压力差驱动成矿流体至不同容矿构造空间就位是形成上述不同锡矿体的主要机制（Zhang and Xiao, 2025）。关于右江盆地锡成矿动力学背景尚无定论（古太平洋板块俯冲回撤或新特提斯洋板片向北俯冲；Mao et al., 2021; Sun and Li, 2023），但已有研究显示张扭性构造环境有利于该区域锡矿的形成（Xiao et al., 2025）。

2.3.3　与西太平洋型俯冲相关的锡矿产出特征

西太平洋型俯冲带晚白垩世花岗质岩浆活动与洋壳俯冲作用相关。锡、钨矿化通常发生在俯冲体系重组阶段，这类重组事件可能引发地幔热对流，其成因包括与弧后扩张或板片拆离相关的软流圈上涌。断裂带沿线的矿化作用则与该带内部的伸展断裂相关，这些区域为地幔热源及地幔物质的输入提供了通道。专属性含锡花岗岩常携带大量镁铁质微包体，且局部与碱性岩、花岗闪长岩及镁铁质岩伴生，也证实了地幔物质参与了该类花岗岩的形成（Cheng et al., 2013; Wang et al., 2024）。

2.4　碰撞造山带

碰撞造山带锡矿研究是热液锡矿床研究的薄弱环节，原因在于目前全球产于碰撞造山带锡矿床数量远少于其他构造环境的热液锡矿床。通过对比伸展构造背景的成锡花岗岩与挤压（碰撞）构造背景的长英质岩石全岩地球化学特征，二者在地球化学成分不存在差异，进而提出了伸展构造背景有利于热液锡矿床的形成（Romer and Kroner, 2016; Xu et al., 2022）。近年来，中国学者提出了碰撞造山背景下与藏南拆离系内淡色花岗岩有关的锡成矿模型（Wang et al., 2018; Cao et al., 2020, 2021），拓展了陆陆碰撞造山体制下的热液锡矿成矿理论。

2.4.1　构造背景

大陆碰撞带经历了大洋岩石圈俯冲和大陆碰撞，发生了板片回卷、板片断离、大陆俯冲、岩石圈增厚和岩石圈拆沉等一系列深部过程（朱弟成等, 2025）。这些深部过程诱发的强烈幔源和壳源岩浆活动不仅导致大陆地壳生长与再造，实现大陆地壳成分成熟和倾向性保存，也导致金属成矿元素的活化、迁移与富集，促进大型–超大型金属矿床的形成（郑永飞等, 2022）。目前全球已报道并被接受与大陆碰撞有关的锡矿床主要分布在中国喜马拉雅山造山带、欧洲华力西（或海西，Variscan）造山带和马来西亚中—晚三叠世锡矿带。

2.4.2　典型成矿省/矿集区

（1）喜马拉雅碰撞锡矿带

喜马拉雅造山带位于欧亚板块和印度板块之间，东西向展布，绵延超过 1000 km（图 6），是印度板块与欧亚板块新生代强烈碰撞作用的产物（Yin and Harrison, 2000）。该造山带自北向南划分为特提斯喜马拉雅、高喜马拉雅、低喜马拉雅和次喜马拉雅 4 个构造单元，单元之间由藏南拆离系、主中央逆冲断层和主边界逆冲断层所分割（Yin and Harrison, 2000）。特提斯喜马拉雅沉积岩系位于藏南拆离系之上，主要由寒武系至始新世的特提斯海相沉积岩组成，为未变质—低级变质的角闪岩相变质岩系；藏南拆离系之下，为由角闪岩相至麻粒岩组成的高喜马拉雅结晶岩系（Searle and Godin, 2003）。造山带内发育大量与造山带平行的变形和未变形新生代淡色花岗岩（吴福元等, 2015）。淡色花岗岩分南、北 2 个带，北带位于特提斯喜马拉雅单元内；南带主要沿着藏南拆离系分布，多以岩席形式产出（吴福元等, 2015）。研究显示淡色花岗岩为典型高分异花岗岩，具有巨大的稀有金属成矿潜力（吴福元等, 2015）。

近年越来越多研究显示喜马拉雅淡色花岗岩带中具有稀有金属和钨−锡成矿作用（王汝成等, 2017; 付建刚等, 2020; 吴福元等, 2021; 谢磊等, 2021; 张志等, 2025）。尤其是特提斯喜马拉雅长期

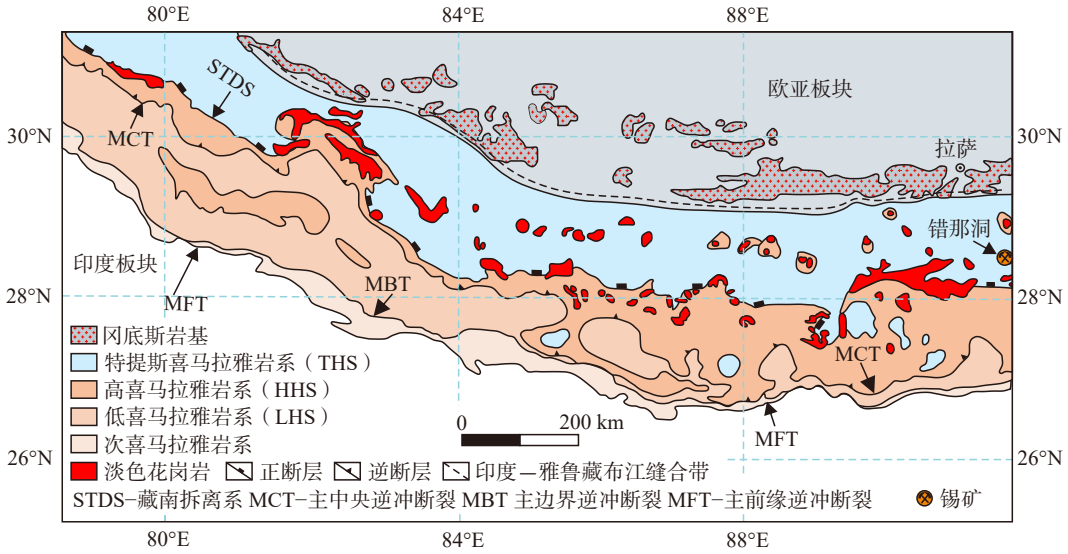


图 6 喜马拉雅造山带区域构造与错那洞锡钨铍矿床位置图（据吴福元等，2015修改）

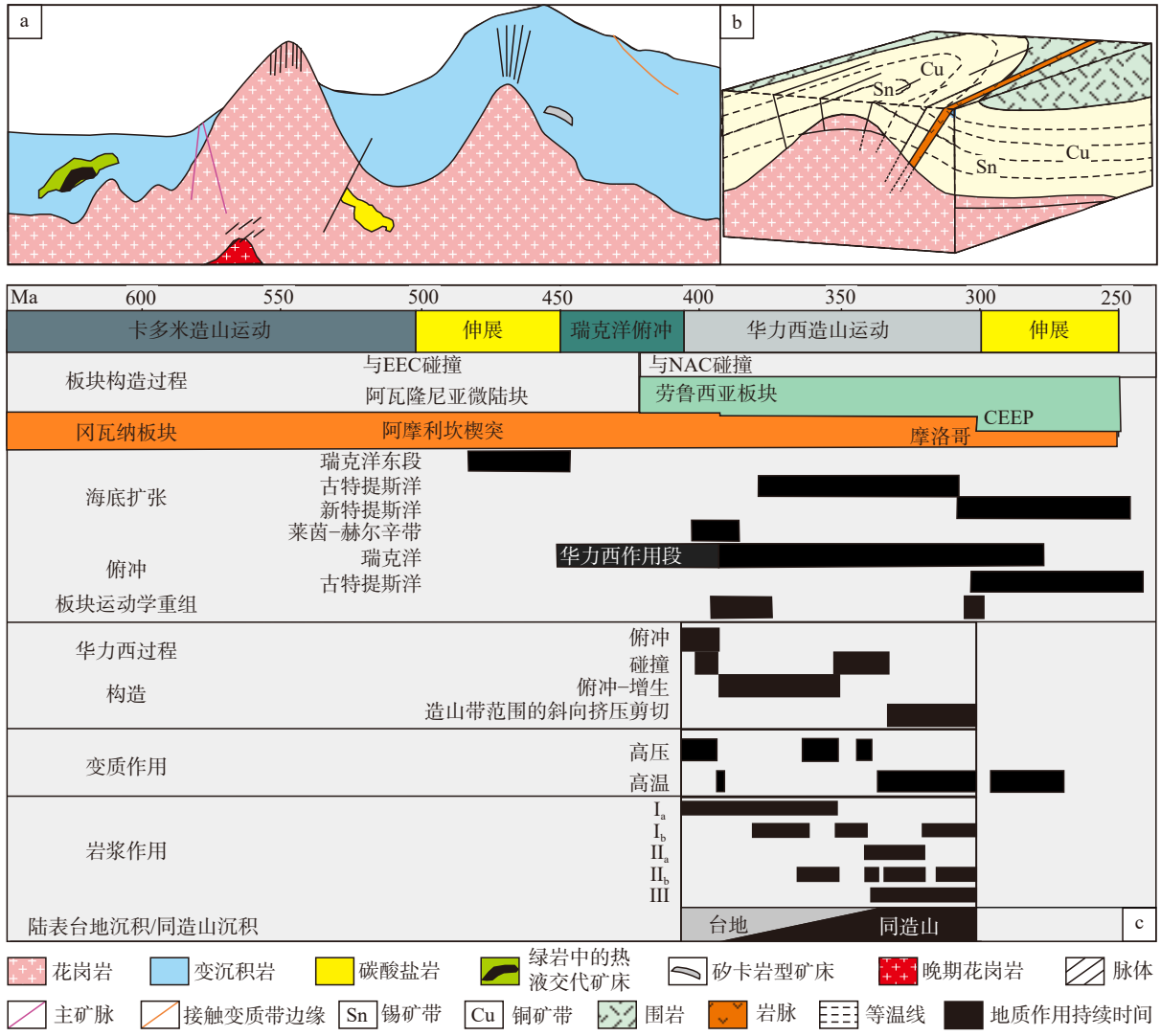
Fig. 6 Regional tectonic map of the Himalayan Orogenic Belt with the location of the Cainadong tin-tungsten-beryllium deposit (modified after Wu et al., 2015)

被认为属于中低温 Pb-Zn-Ag-Au-Sb 成矿带，但2016年在该带首次发现了超大型错那洞铍−锡−钨矿床(李光明等，2017)。错那洞穹隆位于特提斯喜马拉雅片麻岩穹隆带的东部，控制了伟晶岩型铍矿和锡石硫化物型锡−钨−铍矿的产出。其中，错那洞穹隆构造中的锡−钨矿主要有锡石硫化物型及矽卡岩型2种，其中矽卡岩型钨锡矿分布不均匀。锡石硫化物型锡−钨−铍矿为错那洞地区发现的主要工业矿体，锡为主成矿元素，共生钨，伴生铍和萤石，以祥林矿床为典型代表。矿体受穹隆构造中的层间拆离构造控制，呈似层状、薄板状产出，局部呈透镜体产出(张志等，2025)。矿石矿物主要可见锡石、白钨矿、绿柱石、黑钨矿、萤石等，脉石矿物主要由石英、黑云母、白云母、长石、金云母、绢云母、电气石等组成。相关学者通过锆石 U-Pb 和独居石 U-Th-Pb 精确厘定错那洞穹隆中共发育3期淡色花岗岩，分别为34～20 Ma变形二云母花岗岩、20～18 Ma含石榴石二云母花岗岩和16～15 Ma含石榴石白云母花岗岩。锡石 U-Pb 和白云母 Ar-Ar 同位素测年结果表明错那洞穹隆中主要发生过2期 Be-Sn-W 多金属成矿作用：18～17 Ma的云英岩型 Sn 矿化和15～14 Ma的伟晶岩型 Be、矽卡岩型 Be-W-Sn 和热液脉型 Be-Sn-W 矿化(Cao et al., 2020; 代作文，2020)。

关于喜马拉雅大陆碰撞带成矿系统及成矿动力学背景研究已取得卓有成效进展，侯增谦(2010)提出主碰撞陆陆汇聚环境、晚碰撞构造转换环境和后碰撞地壳伸展环境大陆三段式碰撞。伴随三段式碰撞而分别出现的压−张交替或压扭／张扭转换的应力场演变，分别形成主碰撞相关的 Sn-W 矿床和 MVT 型 Pb-Zn 矿床、晚碰撞相关的斑岩型 Cu-Au 矿床和碳酸岩型 REE 矿床及后碰撞相关的斑岩型铜矿床和与淡色花岗岩有关的 Li-Be-W-Sn 矿床(侯增谦等，2025)。结合相关学者对错那洞淡色花岗岩成岩及成矿年代学、岩石地球化学、稳定同位素地球化学研究表明，错那洞 Be-Sn-W 矿床形成于喜马拉雅后碰撞伸展阶段淡色花岗岩持续岩浆演化而成。综上，与淡色花岗岩有关的稀有金属+Sn-W 矿床的形成要求为：活化改造地壳的部分熔融、拆离构造驱动的岩浆分异或者热驱动的岩浆高度分异。

(2)英国康沃尔锡矿集区

康沃尔锡矿带位于英国西南部，曾是世界上最著名的产锡区之一，是欧洲华力西(Variscan)造山带中重要的锡矿集区之一。该区域地质构造呈现为一条晚石炭世二长花岗岩带，花岗岩侵入到一套强烈褶皱的由页岩、砂岩、零星灰岩和大量细碧质火山岩构成的泥盆纪−石炭纪地层中(Chen et al., 1993; 图 7a)，地层和花岗岩又被石英斑岩脉群和石英电气石脉及锡矿脉所切割(Hawkes, 1974)。早期矿脉呈北东东—南西西向展布，晚期成近南北向中高角度产出。矿化具有明显分带性，从中心向外分别为 Sn→Cu→Pb-Zn(图 7b)。矿石矿物主要有锡



EEC—东欧克拉通；NAC—北美克拉通；CEEP—中欧伸展省

a—英格兰西南部康沃尔地区原生锡矿床示意图；b—英格兰西南部康沃尔地区矿化分带示意图（据 Taylor, 1979 修改）；c—基于冈瓦纳大陆与劳伦大陆板块构造背景的欧洲与北非华力西造山运动时序框架（据 Kroner and Romer., 2013 修改）

图 7　英国康沃尔锡矿集区构造演化与锡矿化样式及矿化分带图

Fig. 7　Tectonic evolution and tin mineralization patterns and zonation in the Cornwall tin district, southwest England

(a) Diagrammatic representation of primary tin deposit in the south-west of England (Cornwall); (b) Mineralization zonation of Cornwall, south-west of England (modified after Taylor, 1979); (c) Time frame for the Variscan orogeny in Europe and Northern Africa in the plate tectonic context of the interaction of Gondwana and Laurussiad (modified after Kroner and Romer., 2013).

Abbreviations: EEC—East European Craton; NAC—North American Craton; CEEP—Central European Extensional Province

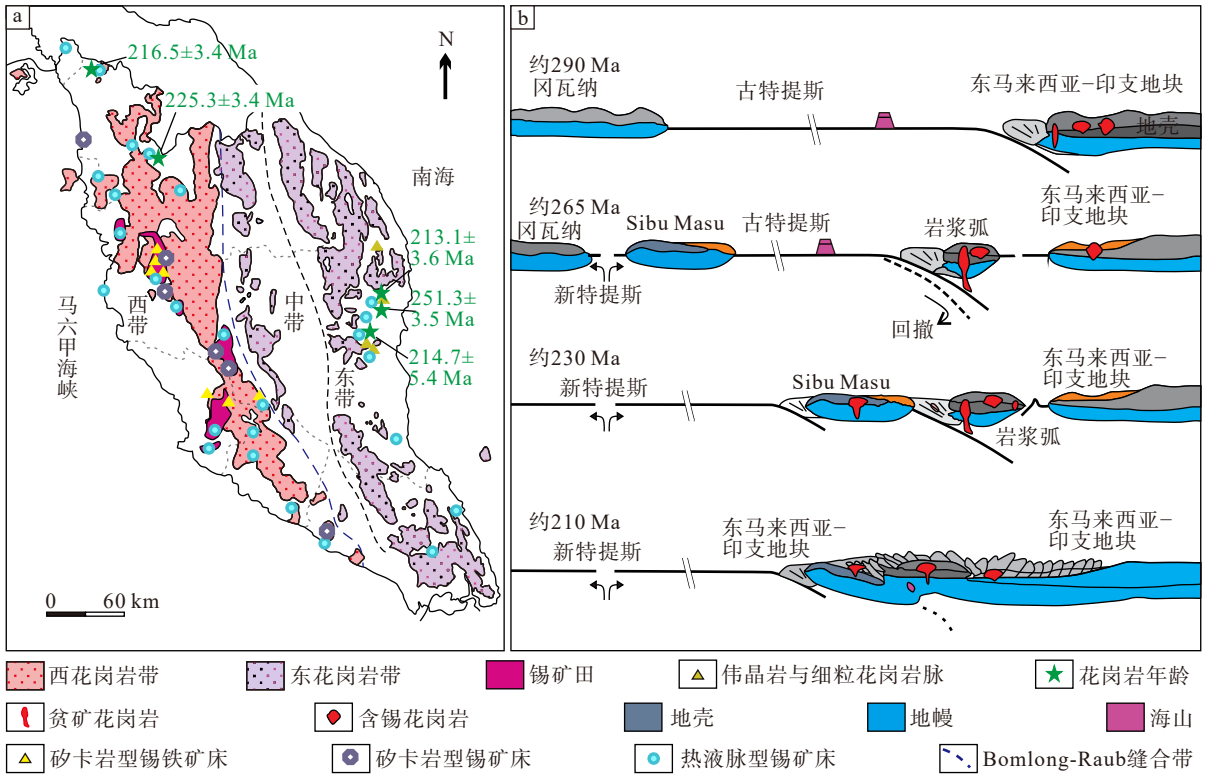
石、黑钨矿、黄铜矿、毒砂、闪锌矿、方铅矿、白云母、电气石、石英等。

康沃尔花岗岩基位于华力西造山带外缘的褶皱冲断带中，由若干岩体组成，侵入时代介于 293～275 Ma，早于华力西造山运动年龄 7～25 Ma。而锡（铜）矿脉于成矿岩体就位后 3～4 Ma 内形成（Chen et al., 1993）。这些早二叠世岩浆岩形成于 Acadian 后造山伸展构造背景（Shail et al., 2003）。此外最新的锡石 U-Pb 年龄显示欧洲部分锡（钨）矿产形成于 395～365 Ma 和 340～320 Ma（Romer et al., 2022；图 7c）。前者始于冈瓦纳大陆与劳伦大陆的初始碰撞，该碰撞事件引发不列颠与爱尔兰地区发生早泥盆世 Acadian 造山运动。同造山过程中，变质作用导致锡的活化，为后期花岗岩熔融提供高 Sn 含量的源岩（Romer et al., 2022；Kroner and Romer, 2025）。Sarkar et al.（2025）首次揭示变质作用对锡富

集的关键作用，即通过U-Pb锡石定年（395～365 Ma）证明，Sn在进变质阶段（约400 Ma）已进入岩石并详细揭示了Sn在进变质（伴随Si、Fe富集）和退变质（伴随K、Rb、Ba流失）两阶段分别被活化，并形成两代锡石。在约350～340 Ma冈瓦纳大陆与劳伦大陆的最终碰撞，幔源熔体通过热平流作用输送热量，引发了地壳熔融及锡钨花岗岩的侵位（Kontak et al., 2005）。瑞克洋残余海盆（Rheic Ocean）的最终闭合促使毛里塔尼德/阿勒格尼（Mauritanide/Alleghenian）造山带形成，并由此在中欧、西欧地区引发全域性伸展构造环境并伴随了大规模同期锡成矿作用（Kroner and Romer, 2013; Romer and Kroner, 2015）。

（3）马来西亚三叠纪锡矿带

马来西亚半岛可以划分为西、中、东3个带（图8a）。马来西亚半岛花岗岩类主要以黑云母花岗岩、黑云角闪二长花岗岩为主。锆石U-Pb年龄集中在290～270 Ma和230～210 Ma（Yang et al., 2020）。晚三叠世成锡黑云母花岗岩全岩ε_{Nd}和ε_{Hf}负异常及老的Hf两阶段模式年龄指示其具壳源弧岩浆特征，被归为S型花岗岩，主要分布在西带，少量分布在东带。锡矿化主要集中在西矿带和东矿带，与出露的S型花岗岩关系密切（Yeap, 1993）。而早二叠世黑云角闪花岗岩认为具有I型花岗岩属性，主要出露在中、东矿带，与锡成矿无关（Schwartz et al., 1995）。



a—马来西亚半岛简化地质图及锡矿床与花岗岩分布特征；b—马来西亚半岛古特提斯洋演化过程的构造示意模型图（据Yang et al., 2020修改）

图8 马来西亚半岛古特提斯洋演化过程及岩浆-锡矿床分布图

Fig. 8 Paleo-Tethyan evolution and the distribution of granitoid tin deposits in Peninsular Malaysia

(a) Simplified geologic map of Peninsular Malaysia showing the distribution of tin deposits and granites; (b) Schematic tectonic cartoons showing the Paleo-Tethyan evolution of Peninsular Malaysia (modified after Yang et al., 2020)

马来西亚半岛发育脉状、矽卡岩型和伟晶岩型3种类型锡矿化（Yeap, 1993）。热液脉状锡矿化普遍发育，而矽卡岩型和伟晶岩型锡矿床主要集中在西带（Yang et al., 2020）。锡石U-Pb高精度年代学研究揭示早—中二叠世锡成矿作用及成锡花岗岩主要分布在马来西亚半岛东带（Yang et al., 2020; Sun et al., 2025）。晚三叠世锡成矿作用主要发生在主干山脉，少量矿化出现在马来西亚半岛的东部带。与晚三叠世锡矿有关的花岗岩具有强的ε_{Nd}和ε_{Hf}负异常（Wai-Pan Ng et al., 2015a; Phyo et al., 2025）。这些含锡花岗岩被认为是古特提斯洋闭合后，东马来西亚-印度板块向滇缅泰马板块之下向西俯冲碰撞相

关的岩浆作用产物（图 8b; Cobbing et al., 1986; Cobbing, 1990; Schwartz et al., 1995; Wai-Pan Ng et al., 2015b; Htun et al., 2025）。

2.4.3　与碰撞造山相关的锡矿产出特征

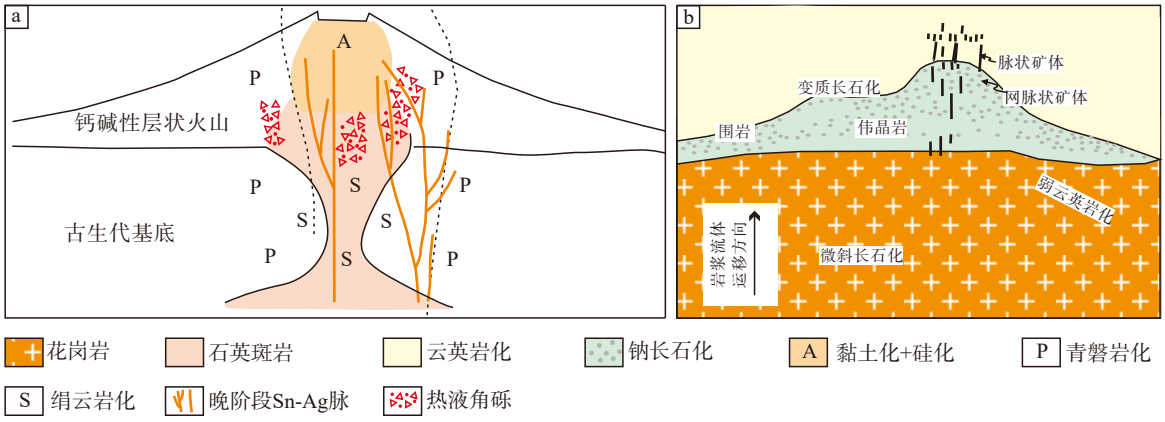
典型造山带内锡矿床产出构造环境，除欧洲 Variscan 造山带内 Erzgebirge 锡矿集区报道了同造山过程中变质作用活化锡外，其他碰撞造山带内锡矿床均产于造山后伸展构造环境。大陆碰撞引发地壳加厚与深熔，产生富 W-Sn 壳源花岗岩；在后碰撞地壳伸展成矿期，活化改造地壳的部分熔融、拆离构造驱动的岩浆分异或者热驱动的岩浆高度分异，从而形成热液锡矿床。

3　锡矿床构造控矿样式

统计全球主要锡矿成矿区（东南亚、华南、中安第斯山脉和英国康沃尔），锡矿主要类型有云英岩型和斑岩型、矽卡岩型、电气石石英脉型、硫化物石英脉型（Lehmann, 2021）。下面系统介绍不同类型锡矿床构造控矿样式及形成机制。

3.1　云英岩型和斑岩型锡矿床

云英岩型和斑岩型锡矿床均是产于成锡岩体内，二者在华南锡成矿省分别占比 5% 和 3%（Mao et al., 2019）。云英岩化和斑岩型矿床中热液蚀变通常是成锡岩体顶部长石和云母类矿物经历热液蚀变形成石英和绢云母的过程（图 9）。无论是云英岩型锡矿床还是斑岩型锡矿床，温度控制了上述 2 类矿床的蚀变和矿化分带。在岩体顶部的密集裂隙系统有利于成矿流体高效上升和热量的传导，因而在上述 2 类热液矿床中经常可见脉状或网脉状锡矿矿化。



a—玻利维亚锡矿带斑岩型矿床构造蚀变系统（据 Sillitoe et al., 1975 修改）；b—云英岩模型（据 Pirajno, 1992 修改）

图 9　云英岩型和斑岩型锡矿床示意图

Fig. 9　Schematic diagram of porphyry and greisen tin deposits

(a) Composite reconstruction of a typical Bolivian tin deposit system (modified after Sillitoe et al., 1975); (b) A model of greisen formation (modified after Pirajno., 1992)

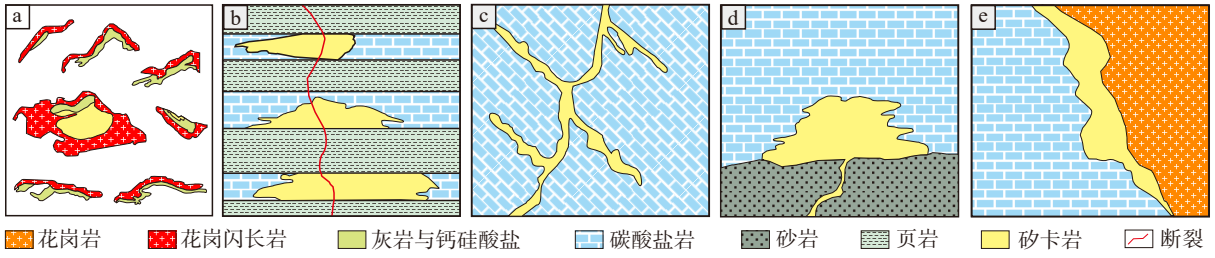
关于上述 2 类矿床容矿裂隙成因，归纳起来存在以下 4 种成因观点。①岩浆冷凝收缩裂隙，形成于成锡岩体冷却过程中，由于总体积收缩，固结岩石内部任意点均对相邻任意方向的质点产生较均匀的张应力，从而产生张性破裂，裂隙随着岩浆冷却从岩体边部大致平行岩体外接触面开始，呈圈层逐渐向岩体内部发展（Titley et al., 1986）。②水岩分离裂隙，形成于富水和挥发分、规模较大的浅成侵入岩中，裂隙主要产于成锡岩体顶端及周缘或呈陡立的容矿裂隙与角砾岩筒贯穿岩体顶部至地表（Guillou-Frottier and Burov, 2003）。通常同期斑岩水岩分离裂隙形成晚于冷凝收缩裂隙，因此可以改造冷凝收缩裂隙，使裂隙延伸变长、开放程度更高（Sillitoe, 2010）。③岩浆侵位挤压裂隙，该裂隙主要因成锡岩体顶部集中的应力使得侵入体上方得以形成此类放射状及同心状裂隙。岩浆侵位挤压裂隙的发育程度及形态受区域构造应力场、岩体规模和形态、岩浆黏度、岩浆上侵方式和速度、岩浆冷却速度等因素控制（Cannell et al., 2005）。但岩浆侵位挤压过程并未考虑与岩浆相关岩石的温度及其

流变学特性，即使岩体冷却，足够高的温度也可以改变脆韧性转化域的位置，从而改变容矿裂隙样式组合（Fournier, 1999）。④区域构造应力叠加裂隙，该裂隙具有特定的方向性，表现出一定的优选方向，与区域主构造线平行，为矿脉群的形成提供容矿空间。如桂西平那钨锡矿床，矿体成薄板状脉群平行展布（Xiao et al., 2025）。

3.2 矽卡岩型锡矿床

矽卡岩型锡矿床是锡矿的主要类型，通常由碳酸盐岩发育而成，偶尔也可由变玄武岩（如英国西康沃尔地区）形成，其成因是这些岩石受到侵入花岗岩类所带来的热力及后续热液矿化作用的影响（Meinert et al., 2005; Pirajno, 2008）。锡矽卡岩几乎只与高分异的S型花岗岩相关，这些花岗岩是由大陆地壳部分熔融产生的（Lehmann, 2021）。矽卡岩的形成受侵入体与围岩之间的氧化还原梯度、岩浆岩地球化学属性、围岩组合和渗透性、形成深度以及与成矿岩体的距离等多因素控制（Chang et al., 2019），但是关于构造样式在矽卡岩矿床形成过程中的作用被关注较少。矽卡岩按离岩体远近可以分为近端和远端矽卡岩2种类型。近端矽卡岩产于侵入体内部或周缘，往往呈块状、透镜状或港湾状等，在侵入体更内部则呈现为脉状（Chang et al., 2019; 图10a）。

当矽卡岩形成于不规则岩体接触面时，可能表明这些区域代表原始渗透性的前矽卡岩期或同矽卡岩期断裂系统的所在地，也可能意味着花岗质岩浆在此类区域因流体向碳酸盐岩层流失而停止侵入或发生“淬熄”（Kwak, 1987）。此时，地层中的原生构造（岩性界面、能干性界面等）及次生构造对矽卡岩锡矿化的形态及规模具有重要的控制作用（图10b—10d）。围岩层理或能干性界面等与岩体接触面大致平行时，矽卡岩矿体往往沿接触带形成与之相邻且平行的板状体（图10b）。在此类情况下，若接触带与碳酸盐岩层展布范围相当，则矽卡岩矿体可具备巨大的横向延伸范围（图10c）。反之，当接触面横切层理或能干性界面等时，矽卡岩常沿某些特定有利岩层形成透镜状至致密矿体（图10e）。在此类存在块状碳酸盐岩单元的情形下，置换作用往往沿碳酸盐岩与角岩的接触界面在更远距离发生。该现象在中国大厂锡矿田拉么矿床广泛发育。



a—美国加利福尼亚州内华达山脉深成岩接触带与矽卡岩体的关系；b—碳酸盐岩夹层层间交代矽卡岩构造控矿样式；c—碳酸盐岩顺层交代矽卡岩构造控矿样式；d—碳酸盐岩与砂岩Si-Ca界面矽卡岩构造控矿样式；e—花岗岩接触带矽卡岩构造控矿样式（据Kwak, 1987修改）

图10 矽卡岩型锡矿床构造控矿样式

Fig. 10 Ore-bearing structural styles of skarn tin deposits

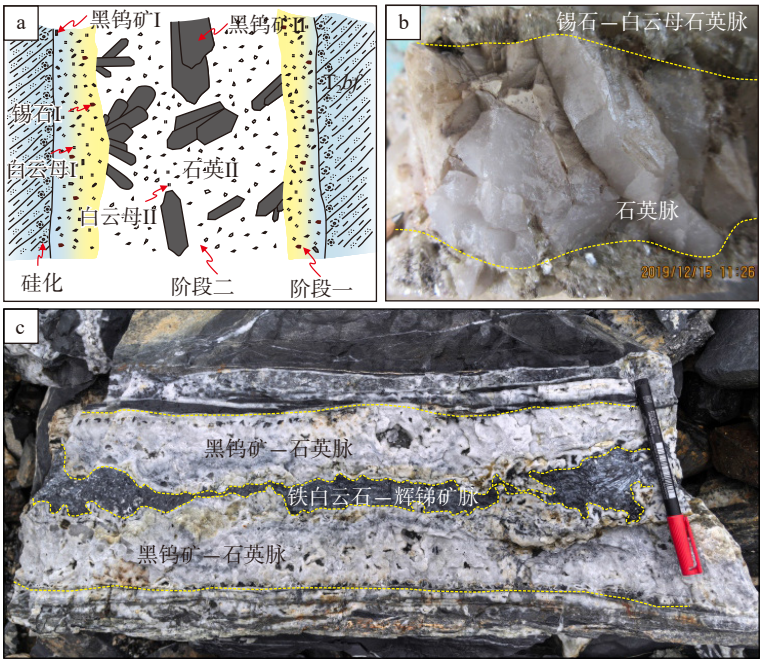
(a) Relationship between plutonic contacts and skarn bodies in the Sierra Nevada Mountains, California, USA; (b) Structural style of interbedded skarn in carbonate rocks; (c) Structural style of skarn in stratiform carbonate rocks; (d) Structural style of skarn at the Si–Ca interface; (e) Structural style of skarn at the contact between granite and carbonates (modified after Kwak, 1987)

远端矽卡岩型锡矿床的位置可能受岩性边界或断层的强烈控制，包括切层断层和顺层断层（图10b），可能导致矽卡岩出现在不同成分的岩层之间，如Si-Ca界面（图10b—10c）形成“非”字型交代（Xiao et al., 2022; 2023b）。远端矽卡岩锡矿床下方的主断层及其伴生次级断裂常构成初始的高渗透带，这些构造对后期矽卡岩矿化定位至关重要。岩石的各向异性可能曾作为成矿流体的运移通道，从而导致不同的构造样式控制了不同类型矿体的产出。以广西大厂矿田高峰锡矿床为例，近南北向陡立的大厂断裂及其平行的次级断裂是矿区主要的导岩导矿断裂，断裂经历多期构造活动，既有锡矿体产出又是后期东西岩墙侵位的主要通道（蔡明海等，2004）。不同成分的岩层之间的层间剪切断裂控制了91～97号等似层状锡矿体的产出，礁灰岩顶底板的层间剪切控制了礁灰岩内部剪切扩张区

内 100 和 105 号矿体的产出。

3.3　石英脉型锡矿床

石英脉型锡矿床是锡矿化的主要类型之一，相关学者将其划分为含锡石英电气石脉型和含锡硫化物石英脉型（Mao et al., 2019）。尽管二者在化学成分上存在差异，但在构造样式上有诸多相似之处。石英脉型锡矿化在热液锡矿床广泛发育，成锡的石英脉通常在脉壁发育绢云母（电气石），这些矿物通常呈条带状分布，并由多种矿物组成，如广西百色新发现的平那钨–锡矿床和马来西亚 Kuala Lumpur 地区。早期结晶的锡石和白云母分布于脉壁，而脉体中央则主要为石英和多金属硫化物矿化。部分矿床受构造应力的改变或多期流体成矿的影响，同一构造空间可以形成同一期成矿流体不同成矿世代的矿物或同一构造空间形成不同期次成矿类型。前者如广西百色平那钨锡矿，沿着两壁以锡石白云母石英为主，脉中间为黑钨矿硫化物石英脉。早期石英呈细粒垂直边壁对称生长，而晚期石英呈大型晶体斜交边壁生长（图 11a、11b）。早期锡石 U-Pb 测年和晚期白云母 ^{40}Ar-^{39}Ar 测年显示二者均形成于晚白垩世（Xiao et al., 2025）。后者如广西大厂矿田可见同一脉体充填两期不同类型的矿化。早期锡石–黑钨矿–闪锌矿–石英脉沿两壁向脉中心生长，晚期辉锑矿碳酸盐岩脉产于脉体中间（图 11c）。年代学研究显示早期锡成矿阶段形成于晚白垩世，晚期锑成矿发生于早古新世（Xiao et al., 2022；肖昌浩等，2024）。



a—广西平那钨锡矿床锡石–白云母–石英脉；b—广西平那钨锡矿床石英–黑钨矿脉与锡石–白云母–石英脉产于同–含矿构造空间；c—广西大厂矿田黑钨矿–石英脉与辉锑矿–铁白云石脉产于同一容矿裂隙

图 11　石英脉型锡矿床构造控矿样式

Fig. 11　Ore-bearing structural styles of quartz vein type tin deposits

(a) Cassiterite–muscovite–bordered quartz vein from the Pingna W–Sn deposit, Guangxi; (b) Quartz–wolframite vein and cassiterite–muscovite–bordered quartz veins coexist within the same ore-bearing fracture from the Pingna W–Sn deposit; (c) Wolframite–quartz and stibnite–ankerite veins occur within the same ore-bearing fracture from the Dachang district, Guangxi

英国康沃尔锡矿集区以发育全球锡矿品位最高的脉状锡矿体为特色，矿脉在空间上与石炭纪—二叠纪多期次岩浆作用相关。相关学者根据矿脉内是否发育角砾把含矿脉分为 2 类（Hosking, 1988；图 12）。不发育角砾的容矿构造按复杂程度逐渐增加分为单脉、单脉复合系统、“非”字脉系统、对称复合脉系统和不对称复合脉系统。单脉的形态及延伸与容矿构造力学性质关系密切，如先扭后张的容矿构造会形成沿走向和倾向延伸较远的板状矿脉（群）。英国康沃尔锡矿集区和广西平那钨–锡矿

床单个矿脉走向长度可达1 km至数千米，且矿化沿倾斜方向可延伸1000 m以上。发育角砾的容矿构造按复杂程度逐渐增加分为产于剪切带内对称脉、角砾脉系统、脉与顶板网脉复合系统、多角砾脉复合系统。

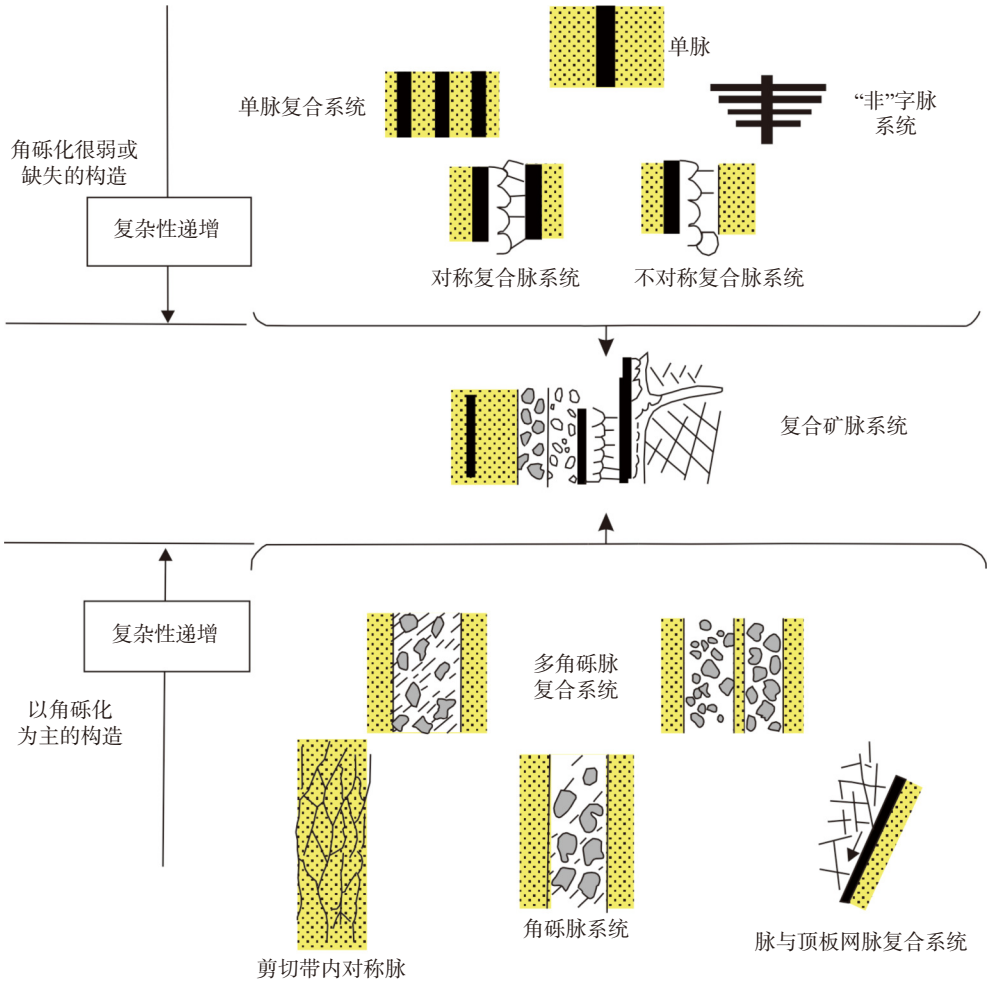


图12 含锡矿脉矿化网络结构（据Hosking, 1988修改）

Fig. 12 Tin-bearing vein structures (modified after Hosking, 1988)

4 热液锡矿床构造控矿研究发展趋势

4.1 精细刻画

热液锡矿床构造控矿研究主要聚焦在区域构造演化、容矿构造的几何学、运动学、年代学、动力学以及构造与矿体就位的耦合机制（De Roo, 1988; Romer and Kroner, 2016; Michaud et al., 2020; Xiao et al., 2022, 2025; Xu et al., 2022; 杨立强等, 2024）。已有研究显示，世界主要锡产区均经历多期构造复合叠加成矿，不同的构造背景均可能形成锡矿床。如英国康沃尔锡矿集区同时发育早泥盆世同造山锡作用和晚泥盆世造山后伸展锡成矿作用（Romer et al., 2022）、马来半岛同时发育早二叠世与俯冲相关的锡成矿作用和晚三叠世与造山相关的锡成矿作用（Yang et al., 2020）。因此，精细刻画不同期次构造变形样式组合是探讨产于不同容矿构造样式的前提和理解矿床成因及查明矿体定位规律的基础。

在热液矿床构造控矿精细刻画研究中，构造序次的确是一个不可回避的问题。构造序次是地质力学和构造地质学的重要概念，是指在同一场地壳运动中，岩块或地块在遭受同一时期、同一动力作用方式持续作用下，所形成的不同性质和排列方位的各项结构面先后出现的次序，或者是由于边界条件的局部改变，各项构造形迹的挨次控制关系（陈柏林, 2024）。然而，在实际应用中由于不同学者对

这一概念的理解不尽相同，导致在构造解析中有争议和误解。如在构造形迹与区域构造耦合研究中常出现把不同性质（压性、张性、走滑）断裂或逆冲推覆构造前锋高角度走滑断裂当作多期构造活动的产物，或是由于脆性构造缺少精确年代学证据，导致把低序次与高序次构造混为一谈的现象。因此，扎实的野外精细填图和构造变形样式组合为整体的思想是开展锡矿体构造定位研究的基础。

随着地球物理观测与地球化学分析广泛应用于构造地质学研究之中，上述方法的应用促进了以定量化手段研究深浅构造耦合及构造控矿规律的深入。如广西五圩矿田通过重磁联合反演查明了深部隐伏岩体的形态特征及矿体矿化破碎带深部延展，指出含矿破碎带深部变缓，为深部层状矿体勘查提供地球物理依据（赵毅等，2020）。

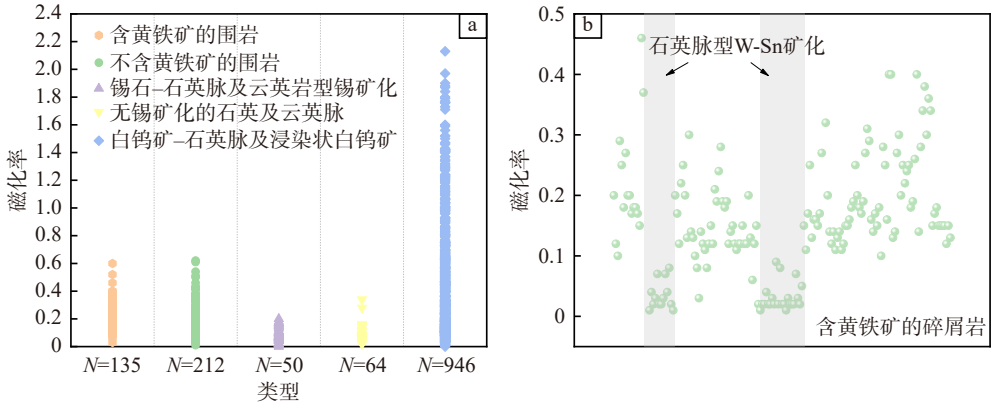
4.2　数值模拟和岩石流变学实验相结合

在实现精细刻画的基础上，更深层次的目标在于理解成矿过程本身。矿床的形成，实质上是构造变形−流体流动−化学反应多物理化学场耦合的产物。构造−流体与成矿的耦合关系是目前矿床学研究的前沿问题，是正确理解成矿过程和矿体定位的基础（Hobbs, 2023）。赋矿围岩和矿石的物性参数测量及物理实验模拟是查明容矿裂隙破裂和扩展方式的重要手段。如岩石孔隙度和渗透率测试（Brace, 1984; Giger et al., 2007; Zhang et al., 2019）、岩石三轴变形试验揭示了裂隙破裂和扩展方式（Haimson and Chang, 2000; Haimson, 2006）；粒子图像测速系统（PIV）的砂箱模拟实验被用于分析构造变形过程中物质的运动方式、形成机制和演化规律，并进行定量解释（Marshak et al., 2019; Venâncio and Da Silva, 2023）。此外，部分学者通过流体包裹体计算成矿流体与母岩应力差，定量刻画构造−流体模型，揭示成矿流体驱动机制，从而有效解释了同一锡矿集区不同类型锡矿体的就位机制（Chi et al., 1993）。然而，由于岩石物性参数原位测量与实验测量误差达3～4个数量级（Townend and Zoback, 2000）且砂箱模拟在模拟挤压变形时存在天然不足，因此越来越多的学者将数值模拟引入构造变形研究中。数值模拟实验研究能够有效整合地质学、地球物理学和地球化学等领域的研究成果，基于基本的物理学原理来构建和模拟不受时空限制的地质模型，其已成为现代地球科学研究的关键工具之一（王洋等，2025）。随着数值模拟的引入，构造变形研究从以往简单的模拟方法扩展到复杂的数值与物理模拟和岩石流变学实验相结合的发展范式。如 Liu et al.（2023）梳理近 50 年以来锡石溶解度相关组分实验数据，建立了锡石在 HCl-NaCl-H_2O 体系的地球化学热力学模型。平衡计算表明，在典型锡成矿条件下，成矿流体未完全被花岗岩、灰岩等围岩缓冲，其 pH 应处于更加酸性的水平。上述现象表明，从源区到成矿就位场所的聚焦性流动（水岩比高）是成大矿、高品位锡矿石的前提，这凸显了构造通道引导下的成矿流体聚焦性流动在锡成矿中的重要作用。随着商业化数值模拟软件（如 FLAC3D、ANSYS 等）及开源数值模拟平台（如 CHNOSZ）的快速发展，数值模拟越来越广泛用于构造应力场、构造流体耦合及矿体定位规律等方面。

4.3　三维可视化与岩石物性参数数据联合应用

随着 20 世纪 80 年代后期计算机图形学应用的拓展，三维可视化广泛用于地质学研究，推动地质学科由二维平面研究向三维可视化的转变（武强和徐华，2004; 陈建平等，2007）。在构造地质学研究中，三维可视化模型能有效地表达地质构造的空间关系。然而，其对断裂性质、活动期次以及断层相关褶皱等复杂动力学过程的描述能力仍显不足（曹代勇等，2001; Stenhouse et al., 2020）。因此，越来越多的研究由传统地层、构造、岩浆、矿体等地质要素的空间展示转向成矿流体迁移路径及就位规律的刻画（Cline et al., 1992）。如 Launay et al.（2018）通过构造−流体−矿化地球化学分析并结合三维空间展布，揭示了葡萄牙 Panasqueira W-Sn 矿床成矿流体运移方向与蚀变和钨锡矿化关系。该研究尽管是刻画构造与蚀变空间展布关系，但由此得到启示，含锡成矿流体聚焦在特定构造空间与围岩发生强烈的水岩反应必然显著改变围岩各项物性参数（如渗透率、电性、磁性、密度等）。目前国内绝大多数大型/超大型矿集区/矿床均有海量的地球物理原始数据，野外扎实的原位物性参数测量结合三维可视化技术，必将为热液锡矿构造控矿作用研究提供新的增长点。近年，作者团队也开展了相关研究的探索工作，对右江盆地百色平那钨−锡矿床 ZK0401 钻孔开展了全孔岩心原位磁化率测量，测量结果显示石英脉型白钨矿体磁化率主要集中于 0.01～0.09，显著低于浸染状白钨矿体磁化率（0.12～2.13，主要集中于 0.5～0.7）；对于碎屑岩（围岩）而言，含黄铁矿层的磁化率范围是 0.03～0.6，均值 0.196；而不含黄铁矿碎

屑岩的磁化率范围为0.01～0.62，均值0.175。碎屑岩中黄铁矿含量与磁化率成正比。含锡石英脉、含锡白云母石英脉与不含矿石英脉的磁化率并无明显区别，因此磁化率不能有效判别2种类型锡矿化。然而，对于石英脉型钨锡矿化，顶、底板围岩为含黄铁矿碎屑岩，磁化率垂向显示高→低→特征（图13）。尽管碎屑岩中黄铁矿的存在提高了岩石磁化率，但鉴于浸染状白钨矿磁化率显著高于碎屑岩磁化率，因此，岩石磁化率可以作为该区域碎屑岩覆盖区浸染状白钨矿化的有效判别标志。



N—样本数量

a—广西百色平那钨–锡矿床不同地质体磁化率统计图；b—石英脉型钨–锡矿化顶底板围岩磁化率分布特征

图13 广西百色平那钨–锡矿床不同地质体磁化率与石英脉型钨–锡矿脉关系

Fig. 13 The relationship between the magnetic susceptibility of geological units and quartz-vein type tungsten–tin veins in the Pingna W–Sn deposit, Baise, Guangxi

(a) Magnetic susceptibility of different geological bodies in the Pingna tungsten–tin deposit, Baise, Guangxi; (b) Magnetic susceptibility of host rocks in the footwall and hanging wall of quartz vein-type tungsten–tin mineralization

综上，随着构造地质学科和锡矿成矿理论的发展和构造物理–数值模拟的发展及计算机图形学应用的拓展，热液锡矿床构造控矿研究由传统的构造解析转向精细多级序构造解析和深浅构造耦合研究，从单一的构造解析向构造流体动力学发展；从简单的构造物理模拟向复杂的数值模拟与岩石流变学相结合；空间维度的分析也由二维空间转向三维空间的立体展示，更加直观解释构造对锡矿体定位规律。

5 结束语

（1）伸展/张扭性构造环境有利于陆内裂谷、俯冲和碰撞造山后构造背景下热液锡矿床形成，造山型锡矿床成矿理论可能是锡矿成矿理论研究新的增长点

正如引言部分所论述，相关学者在成锡花岗岩性质及演化与锡成矿理论方面已经取得了丰硕的成果，相关理论基本趋于成熟。但在锡成矿构造背景研究方面呈现多样性。如部分国外学者对中国华南锡成矿省动力学背景提出极大的质疑，对古太平洋板块俯冲动力学模型也提出了强烈质疑（Romer and Kroner, 2022），并创新提出红河–小江区域共轭断裂构造分异控制了华南锡成矿省的产出（Xu et al., 2022）。然而，该模型可能忽略了关键的地质事实，其将2个完全不同时代的断裂从几何学的角度划分为共轭断裂，从而提出来所谓新的动力学模型。因此，文章第2部分梳理了全球主要锡矿区的构造背景，并揭示了一个核心规律：无论产于大陆裂谷还是各类汇聚板块边界，具有经济价值的大型/超大型锡矿床，归根到底都形成于伸展/张扭性构造环境。部分学者从成锡花岗岩和非成锡花岗岩岩石地球化学及同位素组成研究也证实伸展背景下的高分异S型花岗岩成锡经济规模远超挤压背景（Romer and Kroner, 2015）。据粗略统计，目前发表的论文中超过90%集中在产于伸展/张扭性构造环境中的锡矿床。这可能是因为张性应力场降低岩石屈服强度，促进裂隙网络的形成；此类裂隙的走向垂直于最小主应力轴（即垂直于σ_3）。要形成以垂直走向为主的交织状张性裂隙网络，需要存在

水平方向的 σ_3。这种应力张量方向常见于伸展构造环境、走滑构造环境及其张扭性构造环境。其次，水平方向的 σ_3 有利于出溶流体向上运移。然而，近年中国地质工作者在喜马拉雅碰撞带发现的大型错那洞铍−锡−钨矿床形成于造山后伸展环境，其成矿机理仍未超越传统岩浆热液型锡矿成矿模型一贯主张的锡矿成矿理论（Cao et al., 2020; 代作文, 2020）。值得注意的是，Xiao et al.（2023）于 2018 年首次在华南发现了同变质−变形锡矿床。与此同时，国外研究团队近年持续报道了碰撞造山过程中变质作用对 Sn 的活化、迁移、富集过程（Romer et al., 2022; Kroner and Romer, 2025; Sarkar et al., 2025）。上述研究首次证明俯冲−增生造山过程中流体活动可以导致锡的预富集，并详细揭示了进变质过程中锡的活化和退变质过程中黑云母绿泥石化释放 Sn 形成锡石。相关研究突破了传统锡矿成矿理论，即俯冲过程中沉积物的化学风化残留（如黏土矿物吸附 Sn）、变质流体的迁移（如 Sn-Cl 络合物形成）以及剪切带内流体的局部汇聚（如锡石在剪切带内沉淀），共同为后期花岗岩熔融提供高 Sn 含量的源岩。这一过程无需显著岩浆分异即可形成富锡熔体。上述研究不足之处在于变质过程本身并未形成经济价值的锡矿，而只是预富集作用，是否足以独立形成经济矿床仍需要碰撞造山型锡矿床来检验。中国陆区的大陆碰撞造山作用最典型、最丰富、最强烈、最复杂（陈衍景, 2013），具备创新造山型锡矿床成矿理论的天然条件。加强同变质−变形锡矿床的研究必将成为锡矿成矿理论新的增长点。

（2）构造序次和构造分异的厘定对热液锡矿床构造控矿作用的研究具有重要作用

构造序次和构造分异是矿田构造研究的基本概念之一，然而在矿床学研究和实际应用中脱节相对严重。正如陈柏林（2024）指出不同序次构造之间具有时差性、派生性、绝对性、可隐性等特点，低序次构造往往展布在高一序次构造所影响的范围内，受局部构造应力场控制。由于构造年代学研究是构造地质学研究的难点，在实际应用中常把不同期次的构造混为一谈和把同一期构造不同序次混为一谈。随着方解石和独居石等热液矿物原位 U-Pb 年代学技术和云母原位 Rb-Sr 年代学技术的突破，近年在多级序构造控矿方面爆发诸多成果（Gorojovsky and Alard, 2020; Tillberg et al., 2020; Brown et al., 2022; Monchal et al., 2023; Mottram et al., 2024; Bowie et al., 2025）。因此，将新的原位测年技术引入构造期次和构造序次研究对精确厘定构造演化及判断不同序次构造控矿范围具有重要意义。

构造分异/应变分解（deformation/strain partitioning）是自然界中一种常用于描述构造变形的运动模型。Fitch（1972）在研究板块斜向汇聚过程中首次认识到板块间的斜向汇聚变形被俯冲带和与之平行的弧前走滑带所吸收，并首次提出了构造分异的概念。随后不同学者在研究变质变形时认识到由于岩石流变学的差异，不均一的各部位变形机制和变形样式不同，进一步丰富和完善了对于构造分异的认识并用于解释矿化集中现象（Bell, 1985; 1988; Tikoff and Teyssier, 1994; Piquer et al., 2021; Xiao et al., 2023a）。然而，一些矿床学研究者在对典型矿集区的研究过程中把不同性质或具有切割关系的构造划分为不同期次，有的研究工作甚至在一个矿床的构造演化中划分出多达 10 期构造变形。其实往往一期构造变形在同一个矿床/矿集区能形成不同性质、不同方向的断裂，从而控制不同类型的矿化。Xiao et al.（2023a）在辽东青城子金矿集区的研究中，采用构造分异的概念很好地解释了矿集区不同方向、不同性质断裂控制（东西向白云逆冲断层、北西向压扭性右行走滑断层和北东向张扭性右行走滑断层）蚀变岩型和石英脉型金矿石沉淀的机理。该模型同样能很好地解释了胶东金矿蚀变岩型和石英脉型金矿的空间产出以及黔西南金矿集区金−锑−萤石空间分布规律。另一实例来自 Xiao et al.（2022）近年开展的大厂矿田构造控矿机理探索工作，首先揭示了大厂矿田容矿构造中生代以来经历了晚三叠世挤压和晚白垩世伸展，从而造成了该矿田丰富的容矿构造样式和繁多的矿化类型种类（Fu et al., 1993; Jiang et al., 1999; 蔡明海等, 2004; 汪劲草等, 2016; 吴玉等, 2019; Xiao et al., 2022）。构造序次和构造分异理念同样很好地证明了大厂矿田层状锡矿体和脉状锡矿体容矿构造经历了 2 期变形，但均形成于晚白垩世笼箱盖岩体出溶含锡流体的顺层断层和陡断裂的充填交代中，并创新提出构造流体压力差控制了大厂矿田不同位置矿体的空间产出（Zhang and Xiao, 2025）。综上，开展典型矿床/矿集区构造序次和构造分异的精细填图同样适用于热液锡矿床构造控矿研究。

致谢：第一作者自2013年进入地质力学研究所从事矿田构造研究以来，系统学习地质力学理论及相关内容，大量阅读了地质力学（矿田构造为主）经典文献，跟随矿田构造研究室陈正乐、陈柏林等60后老师们不断成长，深刻领会了矿田构造研究思路、方法及服务国家重大需求的实用性，获益匪浅。本文是笔者从事矿田构造研究工作的阶段总结，谨以此文祝贺《地质力学学报》创刊30周年！感谢肖昌浩课题组学生张宇、张闰峰、单世玉、许嘉伟、冯则泽整理图件。感谢两位审稿人和执行主编王宗秀研究员提出的大量建设性意见。

References

AHLFELD F, 1936. The Bolivian tin belt[J]. Economic Geology, 31(1): 48-72.

ARCE-BURGOA O R, GOLDFARB R J, 2009. Metallogeny of Bolivia[J]. SEG Discovery(79): 1-15.

ASHLEY P M, 1984. Sodic granitoids and felsic gneisses associated with uranium-thorium mineralisation, Crockers Well, South Australia[J]. Mineralium Deposita, 19(1): 7-18.

BASTOS NETO A C, FERRON J T M M, CHAUVET A, et al., 2014. U–Pb dating of the Madeira Suite and structural control of the albite-enriched granite at Pitinga (Amazonia, Brazil): evolution of the A-type magmatism and implications for the genesis of the Madeira Sn–Ta–Nb (REE, cryolite) world-class deposit[J]. Precambrian Research, 243: 181-196.

BELL T H, 1985. Deformation partitioning and porphyroblast rotation in meta-morphic rocks: a radical reinterpretation[J]. Journal of Metamorphic Geology, 3(2): 109-118.

BELL T H, PERKINS W G, SWAGER C P, 1988. Structural controls on development and localization of syntectonic copper mineralization at Mount Isa, Queensland[J]. Economic Geology, 83(1): 69-85.

BETTENCOURT J S, SPARRENBERGER I, LEITE JUNIOR W B, et al. , 2005. $^{40}Ar/^{39}Ar$ step heating laser system dating of zinnwaldite and muscovite from tin deposits of the Rondonia Tin Province, Brazil: evidence for multiple mineralization episodes[M]//Resumos. Sao Paulo: Instituto de Geociências, Universidade de São Paulo.

BORGES R M K, VILLAS R N N, FUZIKAWA K, et al., 2009. Phase separation, fluid mixing, and origin of the greisens and potassic episyenite associated with the Água Boa pluton, Pitinga tin province, Amazonian Craton, Brazil[J]. Journal of South American Earth Sciences, 27(2-3): 161-183.

BOWIE S, MOTTRAM C, RASBURY E T, et al., 2025. U redox state tracked in mineralized hydrothermal carbonate with implications for U-Pb geochronology[J]. Communications Earth & Environment, 6(1): 362.

BRACE W F, 1984. Permeability of crystalline rocks: new in situ measurements[J]. Journal of Geophysical Research: Solid Earth, 89(B6): 4327-4330.

BROWN D A, SIMPSON A, HAND M, et al., 2022. Laser-ablation Lu-Hf dating reveals Laurentian garnet in subducted rocks from southern Australia[J]. Geology, 50(7): 837-842.

CACHO A, MELGAREJO J C, CAMPRUBÍ A, et al., 2019. Mineralogy and distribution of critical elements in the Sn–W–Pb–Ag–Zn Huanuni Deposit, Bolivia[J]. Minerals, 9(12): 753.

CAI M H, LIANG T, WU D C, et al., 2004. Structure characteristics and mineralization controls of the Nandan-Hechi metallogenic belt in Guangxi Province[J]. Geology and Prospecting, 40(6): 5-10. (in Chinese with English abstract)

CANNELL J, COOKE D R, WALSHE J L, et al., 2005. Geology, mineralization, alteration, and structural evolution of the El teniente porphyry Cu-Mo deposit[J]. Economic Geology, 100(5): 979-1003.

CAO D Y, LI Q Y, ZHU X D, et al., 2001. Study on the 3D visual model of geological structure[J]. Geology and Exploration, 37(4): 60-62. (in Chinese with English abstract)

CAO H W, LI G M, ZHANG Z, et al., 2020. Miocene Sn polymetallic mineralization in the Tethyan Himalaya, southeastern Tibet: a case study of the Cuonadong deposit[J]. Ore Geology Reviews, 119: 103403.

CAO H W, LI G M, ZHANG R Q, et al., 2021. Genesis of the Cuonadong tin polymetallic deposit in the Tethyan Himalaya: evidence from geology, geochronology, fluid inclusions and multiple isotopes[J]. Gondwana Research, 92: 72-101.

CAROCCI E, 2019. Tungsten transport and deposition in magmatic-hydrothermal environments: the example of Panasqueira (Portugal)[D]. Nancy: Université de Lorraine.

CAROCCI E, TRUCHE L, CATHELINEAU M, et al., 2022. Tungsten (VI) speciation in hydrothermal solutions up to 400°C as revealed by in-situ Raman spectroscopy[J]. Geochimica et Cosmochimica Acta, 317: 306-324.

CARR P A, NORMAN M D, BENNETT V C, 2017. Assessment of crystallographic orientation effects on secondary ion mass spectrometry (SIMS) analysis of cassiterite[J]. Chemical Geology, 467: 122-133.

CAWTHORN R G, 2015. The bushveld complex, South Africa[M]//CHARLIER B, NAMUR O, LATYPOV R, et al. Layered intrusions. Dordrecht: Springer: 517-587.

CHANG Z S, SHU Q H, MEINERT L D, 2019. Chapter 6 skarn deposits of China[M]//CHANG Z S, GOLDFARB R J. Mineral deposits of China. Beijing: Society of Economic Geologists: 189-234.

CHATTERJEE S, GOSWAMI A, SCOTESE C R, 2013. The longest voyage: tectonic, magmatic, and paleoclimatic evolution of the Indian plate during its northward flight from Gondwana to Asia[J]. Gondwana Research, 23(1): 238-267.

CHE X D, LINNEN R L, WANG R C, et al., 2013. Tungsten solubility in evolved granitic melts: an evaluation of magmatic wolframite[J]. Geochimica et Cosmochimica Acta, 106: 84-98.

CHEN B L, 2024. Structural generation and its application in ore-prospecting: take hydrothermal uranium deposits in South China as an example[J]. Acta Geologica Sinica, 98(7): 2173-2192. (in Chinese with English abstract)

CHEN J P, LV P, WU W, et al., 2007. A 3D method for predicting blind orebodies, based on a 3D visualization model and its application[J]. Earth

Science Frontiers, 14(5): 54-62. (in Chinese with English abstract)

CHEN Y, CLARK A H, FARRAR E, et al., 1993. Diachronous and independent histories of plutonism and mineralization in the Cornubian Batholith, southwest England[J]. Journal of the Geological Society, 150(6): 1183-1191.

CHEN Y J, 2013. The development of continental collision metallogeny and its application[J]. Acta Petrologica Sinica, 29(1): 1-17. (in Chinese with English abstract)

CHENG Y B, MAO J W, SPANDLER C, 2013. Petrogenesis and geodynamic implications of the Gejiu igneous complex in the western Cathaysia block, South China[J]. Lithos, 175-176: 213-229.

CHI G X, GUHA J, LU H Z, 1993. Separation mechanism in the formation of proximal and distal tin polymetallic deposits, Xinlu ore field, southern China; evidence from fluid inclusion data[J]. Economic Geology, 88(4): 916-933.

CLARKE B, UKEN R, REINHARDT J, 2009. Structural and compositional constraints on the emplacement of the Bushveld Complex, South Africa[J]. Lithos, 111(1-2): 21-36.

CLINE J S, BODNAR R J, RIMSTIDT J D, 1992. Numerical simulation of fluid flow and silica transport and deposition in boiling hydrothermal solutions: application to epithermal gold deposits[J]. Journal of Geophysical Research: Solid Earth, 97(B6): 9085-9103.

COBBING E J, MALLICK D I J, PITFIELD P E J, et al., 1986. The granites of the Southeast Asian Tin Belt[J]. Journal of the Geological Society, 143(3): 537-550.

COBBING E J, 1990. A comparison of granites and their tectonic settings from the South American Andes and the Southeast Asian tin belt[M]//KAY S M, RAPELA C W. Plutonism from Antarctica to Alaska. Geological Society of America: 193-204.

COSTI H T, DALL'AGNOL R, BORGES R M K, et al., 2002. Tin-bearing sodic Episyenites associated with the Proterozoic, A-type Água Boa Granite, Pitinga Mine, Amazonian Craton, Brazil[J]. Gondwana Research, 5(2): 435-451.

COSTI H T, DALL'AGNOL R, PICHAVANT M, et al., 2009. The peralkaline tin-mineralized madeira cryolite albite-rich granite of Pitinga, Amazonian craton, Brazil: petrography, mineralogy and crystallization processes[J]. The Canadian Mineralogist, 47(6): 1301-1327.

DAI Z W, 2020. Study on mineralization of the Cuonadong Be-Sn-W polymetallic deposit, Tibet, China[D]. Chengdu: Chengdu University of Technology. (in Chinese with English abstract)

DE ROO J A, 1988. Structural controls on the emplacement of the vein-type tungsten-tin ore at Mount Carbine, Queensland, Australia[J]. Economic Geology, 83(6): 1170-1180.

DE SILVA S L, KAY S M, 2018. Turning up the heat: high-flux magmatism in the central Andes[J]. Elements, 14(4): 245-250.

FARGES F O, LINNEN R L, BROWN JR G E, 2006. Redox and speciation of tin in hydrous silicate glasses: a comparison with Nb, Ta, Mo and W[J]. The Canadian Mineralogist, 44(3): 795-810.

FITCH T J, 1972. Plate convergence, transcurrent faults, and internal deformation adjacent to Southeast Asia and the western Pacific[J]. Journal of Geophysical Research, 77(23): 4432-4460.

FOURNIER R O, 1999. Hydrothermal processes related to movement of fluid from plastic into brittle rock in the magmatic-epithermal environment[J]. Economic Geology, 94(8): 1193-1211.

FU J G, LI G M, WANG G H, et al., 2020. Syntectonic skarn characteristics and mineralization age of associated Be-W-Sn rare metal deposit in Cuonadong Dome, Southern Tibet, China[J]. Journal of Jilin University (Earth Science Edition), 50(5): 1304-1322. (in Chinese with English abstract)

FU M, KWAK T A P, MERNAGH T P, 1993. Fluid inclusion studies of zoning in the Dachang tin-polymetallic ore field, People's Republic of China[J]. Economic Geology, 88(2): 283-300.

GARSON M S, MITCHELL A H G, 1977. Mineralization at destructive plate boundaries: a brief review[J]. Geological Society, London, Special Publications, 7(1): 81-97.

GEMMRICH L, TORRÓ L, MELGAREJO J C, et al., 2021. Trace element composition and U-Pb ages of cassiterite from the Bolivian tin belt[J]. Mineralium Deposita, 56(8): 1491-1520.

GIGER S B, TENTHOREY E, COX S F, et al., 2007. Permeability evolution in quartz fault gouges under hydrothermal conditions[J]. Journal of Geophysical Research: Solid Earth, 112(B7): B07202.

GILLIS R J, HORTON B K, GROVE M, 2006. Thermochronology, geochronology, and upper crustal structure of the Cordillera Real: implications for Cenozoic exhumation of the central Andean plateau[J]. Tectonics, 25(6): TC6007.

GOROJOVSKY L, ALARD O, 2020. Optimisation of laser and mass spectrometer parameters for the *in situ* analysis of Rb/Sr ratios by LA-ICP-MS/MS[J]. Journal of Analytical Atomic Spectrometry, 35(10): 2322-2336.

GUILLOU-FROTTIER L, BUROV E, 2003. The development and fracturing of plutonic apexes: implications for porphyry ore deposits[J]. Earth and Planetary Science Letters, 214(1-2): 341-356.

GUIMARÃES F S, ZHANG R Q, LEHMANN B, et al., 2022. Cassiterite U-Pb geochronology of the Santa Barbara tin district, Rondônia tin province, Brazil[J]. Economic Geology, 117(3): 719-729.

GUO J, 2019. Tin mineralization events and fertility of granitoids in the Youjiang Basin, South China: the Gejiu and Dachang Sn-polymetallic districts as examples[D]. Guangzhou: University of Chinese Academy of Sciences (Guangzhou Institute of Geochemistry, Chinese Academy of Sciences). (in Chinese with English abstract)

GUO J, WU K, SELTMANN R, et al., 2022. Unraveling the link between mantle upwelling and formation of Sn-bearing granitic rocks in the world-class Dachang tin district, South China[J]. GSA Bulletin, 134(3-4): 1043-1064.

HAIMSON B, CHANG C, 2000. A new true triaxial cell for testing mechanical properties of rock, and its use to determine rock strength and deformability of Westerly granite[J]. International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences, 37(1-2): 285-296.

HAIMSON B, 2006. True triaxial stresses and the brittle fracture of rock[J]. Pure and Applied Geophysics, 163(5-6): 1101-1130.

HALTER W E, WILLIAMS-JONES A E, KONTAK D J, 1998. Modeling fluid–rock interaction during greisenization at the East Kemptville tin deposit: implications for mineralization[J]. Chemical Geology, 150(1-2): 1-17.

HAN L, PAN J Y, NI P, et al., 2023. Cassiterite deposition induced by cool-

ing of a single-phase magmatic fluid: evidence from SEM-CL and fluid inclusion LA-ICP-MS analysis[J]. Geochimica et Cosmochimica Acta, 342: 108-127.

HARLAUX M, KONTAK D J, CLARK A H, et al., 2023. depositing >1.5 mt of tin within <1 m. y. of initial granitic intrusion in the San Rafael Tin (-copper) deposit, southeastern Peru[J]. Economic Geology, 118(6): 1371-1396.

HAWKES J R, 1974. Volcanism and metallogenesis: the tin province of South-West England[J]. Bulletin Volcanologique, 38(3): 1125-1146.

HEINRICH C A, 1990. The chemistry of hydrothermal tin(-tungsten) ore deposition[J]. Economic Geology, 85(3): 457-481.

HOBBS B E, 2023. The use of structural geology in the mineral exploration industry[J]. Australian Journal of Earth Sciences, 70(7): 899-907.

HOSKING K F G, 1988. The world's major types of tin deposit[M]//HUTCHISON C S. Geology of tin deposits in Asia and the Pacific. Berlin, Heidelberg: Springer: 3-49.

HOU Z Q, 2010. Metallogensis of continental collision[J]. Acta Geologica Sinica, 84(1): 30-58. (in Chinese with English abstract)

HOU Z Q, YANG Z M, ZHANG H R, et al. , 2025. Metallogenesis in collisional orogens: new insights and advances[J/OL]. Earth Science Frontiers, 1-36. [2025-10-07]. https://doi.org/10.13745/j.esf.sf.2025.4.49. (in Chinese with English abstract)

HTUN K T, ZAW K, BELOUSOV I, et al., 2025. U-Pb zircon and cassiterite geochronology of Sn-W bearing granitoids at the Tagu mining area in the Myeik region, Southern Myanmar: insight into ore genesis and metallogenic implication[J]. Geosystems and Geoenvironment, 4(3): 100416.

HUA R M, ZHU J C, ZHAO Y Y, et al., 1997. Preliminary study on metallogenetic series of nonferrous metal deposits in Youjiang fold belt[J]. Geological Journal of China Universities, 3(2): 183-191. (in Chinese with English abstract)

JIANG S Y, HAN F, SHEN J Z, et al., 1999. Chemical and Rb-Sr, Sm-Nd isotopic systematics of tourmaline from the Dachang Sn-polymetallic ore deposit, Guangxi Province, P. R. China[J]. Chemical Geology, 157(1-2): 49-67.

KEMPE U, LEHMANN B, WOLF D, et al., 2008. U-Pb SHRIMP geochronology of Th-poor, hydrothermal monazite: an example from the Llallagua tin-porphyry deposit, Bolivia[J]. Geochimica et Cosmochimica Acta, 72(17): 4352-4366.

KINNAIRD J A, 2005. The Bushveld large igneous province[D]. Johannesburg, South Africa: The University of the Witwatersrand: 39.

KONTAK D J, FARRAR E, CLARK A H, et al., 1990. Eocene tectonothermal rejuvenation of an upper Paleozoic-lower Mesozoic terrane in the Cordillera de Carabaya, Puno, southeastern Peru, revealed by K-Ar and $^{40}Ar/^{39}Ar$ dating[J]. Journal of South American Earth Sciences, 3(4): 231-246.

KONTAK D J, CREASER R A, HEAMAN L M, et al., 2005. U-Pb tantalite, Re-Os molybdenite, and $^{40}Ar/^{39}Ar$ muscovite dating of the Brazil Lake pegmatite, Nova Scotia: a possible shear-zone related origin for an LCT-type pegmatite[J]. Atlantic Geoscience, 41(1): 655.

KORGES M, WEIS P, LÜDERS V, et al., 2018. Depressurization and boiling of a single magmatic fluid as a mechanism for tin-tungsten deposit formation[J]. Geology, 46(1): 75-78.

KRONER U, ROMER R L, 2013. Two plates: many subduction zones: the Variscan orogeny reconsidered[J]. Gondwana Research, 24(1): 298-329.

KRONER U, ROMER R, 2025. Continental accretionary tectonics of western Pangea and the formation of Sn, W and Li deposits[C]//Proceedings of EGU general assembly 2025. Vienna: EGU.

KWAK T A P, 1987. W-Sn skarn deposits and related metamorphic skarns and granitoids[M]. Amsterdam: Elsevier.

LAUNAY G, SIZARET S, GUILLOU-FROTTIER L, et al., 2018. Deciphering fluid flow at the magmatic-hydrothermal transition: a case study from the world-class Panasqueira W-Sn-(Cu) ore deposit (Portugal)[J]. Earth and Planetary Science Letters, 499: 1-12.

LAUNAY G, BRANQUET Y, SIZARET S, et al., 2023. How greisenization could trigger the formation of large vein-and-greisen Sn-W deposits: a numerical investigation applied to the Panasqueira deposit[J]. Ore Geology Reviews, 153: 105299.

LEGROS H, RICHARD A, TARANTOLA A, et al., 2019. Multiple fluids involved in granite-related W-Sn deposits from the world-class Jiangxi province (China)[J]. Chemical Geology, 508: 92-115.

LEHMANN B, 1987. Tin granites, geochemical heritage, magmatic differentiation[J]. Geologische Rundschau, 76(1): 177-185.

LEHMANN B, ISHIHARA S, MICHEL H, et al., 1990. The Bolivian tin province and regional tin distribution in the Central Andes; a reassessment[J]. Economic Geology, 85(5): 1044-1058.

LEHMANN B, 2021. Formation of tin ore deposits: a reassessment[J]. Lithos, 402-403: 105756.

LENHARO S L R, MOURA M A, BOTELHO N F, 2002. Petrogenetic and mineralization processes in Paleo- to Mesoproterozoic rapakivi granites: examples from Pitinga and Goiás, Brazil[J]. Precambrian Research, 119(1-4): 277-299.

LENHARO S L R, POLLARD P J, BORN H, 2003. Petrology and textural evolution of granites associated with tin and rare-metals mineralization at the Pitinga mine, Amazonas, Brazil[J]. Lithos, 66(1-2): 37-61.

LI G M, ZHANG L K, JIAO Y J, et al., 2017. First discovery and implications of Cuonadong superlarge Be-W-Sn polymetallic deposit in Himalayan metallogenic belt, southern Tibet[J]. Mineral Deposits, 36(4): 1003-1008. (in Chinese with English abstract)

LI J H, ZHANG Y Q, DONG S W, et al., 2014. Cretaceous tectonic evolution of South China: a preliminary synthesis[J]. Earth-Science Reviews, 134: 98-136.

LI S Z, CAO X Z, WANG G Z, et al., 2019. Meso-cenozoic tectonic evolution and plate reconstruction of the Pacific Plate[J]. Journal of Geomechanics, 25(5): 642-677. (in Chinese with English abstract)

LI Z X, LI X H, 2007. Formation of the 1300-km-wide intracontinental orogen and postorogenic magmatic province in Mesozoic South China: a flat-slab subduction model[J]. Geology, 35(2): 179-182.

LINNEN R L, PICHAVANT M, HOLTZ F, et al., 1995. The effect of f_{O2} on the solubility, diffusion, and speciation of tin in haplogranitic melt at 850°C and 2 kbar[J]. Geochimica et Cosmochimica Acta, 59(8): 1579-1588.

LINNEN R L, 1998. The solubility of Nb-Ta-Zr-Hf-W in granitic melts with Li and Li + F; constraints for mineralization in rare metal granites and pegmatites[J]. Economic Geology, 93(7): 1013-1025.

LIU X C, YU P P, XIAO C H, 2023. Tin transport and cassiterite precipitation from hydrothermal fluids[J]. Geoscience Frontiers, 14(6): 101624.

MAKUTU D K, SEO J H, LEE B H, et al., 2024. Magmatic-hydrothermal evolution of Sn-W granites in the Kibara belt, Democratic Republic of Congo: ^{40}Ar-^{39}Ar dating and LA-ICP-MS microanalysis of cassiterites and cassiterite-hosted fluid inclusions[J]. Ore Geology Reviews, 175: 106400.

MAO J W, OUYANG H G, SONG S W, et al. , 2019. Chapter 10 Geology and metallogeny of tungsten and tin deposits in China[M]//CHANG Z S, GOLDFARB R J. Mineral deposits of China. Beijing: Society of Economic Geologists: 411-482.

MAO J W, LIU P, GOLDFARB R J, et al., 2021. Cretaceous large-scale metal accumulation triggered by post-subductional large-scale extension, East Asia[J]. Ore Geology Reviews, 136: 104270.

MAO J W, SONG S W, LIU P, et al., 2023. Current progress and development trend of the research on tin deposits[J]. Acta Petrologica Sinica, 39(5): 1233-1240. (in Chinese with English abstract)

MARKOVIC S, SZYMANOWSKI D, TAVAZZANI L, et al., 2025. Timescales of magmatic-hydrothermal activity at the giant San Rafael tin deposit (Peru)[J]. Earth and Planetary Science Letters, 671: 119624.

MARSHAK S, HAQ S S B, SEN P, 2019. Ramp initiation in fold-thrust belts: insight from PIV analysis of sandbox models[J]. Journal of Structural Geology, 118: 308-323.

MCQUARRIE N, 2002. The kinematic history of the central Andean fold-thrust belt, Bolivia: implications for building a high plateau[J]. GSA Bulletin, 114(8): 950-963.

MEINERT L D, DIPPLE G M, NICOLESCU S, et al. , 2005. World skarn deposits[M]//HEDENQUIST J W, THOMPSON J F H, GOLDFARB R J, et al. One hundredth anniversary volume. Littleton, Colorado: Society of Economic Geologists: 299-336.

MICHAUD J A S, GUMIAUX C, PICHAVANT M, et al., 2020. From magmatic to hydrothermal Sn-Li-(Nb-Ta-W) mineralization: the Argemela area (central Portugal)[J]. Ore Geology Reviews, 116: 103215.

MITCHELL A H G, 1979. Rift-, subduction-and collision-related tin belts[J]. Bulletin of the Geological Society of Malaysia, 11: 81-102.

MLYNARCZYK M S J, SHERLOCK R L, WILLIAMS-JONES A E, 2003. San Rafael, Peru: geology and structure of the worlds richest tin lode[J]. Mineralium Deposita, 38(5): 555-567.

MLYNARCZYK M S J, WILLIAMS-JONES A E, 2005. The role of collisional tectonics in the metallogeny of the Central Andean tin belt[J]. Earth and Planetary Science Letters, 240(3-4): 656-667.

MONCHAL V, DROST K, CHEW D, 2023. Precise U-Pb dating of incremental calcite slickenfiber growth: evidence for far-field Eocene fold reactivation in Ireland[J]. Geology, 51(7): 611-615.

MOTTRAM C M, KELLETT D A, BARRESI T, et al., 2024. Tracking the porphyry-epithermal mineralization transition using U-Pb carbonate dating[J]. Geology, 52(9): 723-728.

MUNGALL J E, KAMO S L, MCQUADE S, 2016. U–Pb geochronology documents out-of-sequence emplacement of ultramafic layers in the Bushveld Igneous Complex of South Africa[J]. Nature Communications, 7(1): 13385.

MYINT A Z, YONEZU K, BOYCE A J, et al., 2018. Stable isotope and geochronological study of the Mawchi Sn-W deposit, Myanmar: implications for timing of mineralization and ore genesis[J]. Ore Geology Reviews, 95: 663-679.

NAUMOV V B, DOROFEEV V A, MIRONOVA O F, 2011. Physicochemical parameters of the formation of hydrothermal deposits: a fluid inclusion study. I. Tin and tungsten deposits[J]. Geochemistry International, 49(10): 1002-1021.

NAZARI-DEHKORDI T, ROBB L, 2022. Zircon mineral chemistry and implications for magmatic-hydrothermal evolution of the granite-hosted Zaaiplaats Sn deposit, Bushveld Large Igneous Province, South Africa[J]. Lithos, 416-417: 106672.

NAZARI-DEHKORDI T, HOFMANN A, ROBB L, et al., 2024. The union tin member of the Rooiberg group: geodynamic implications for the bushveld large Igneous Province, South Africa[J]. Precambrian Research, 412: 107538.

OLADE M A, 1980. Geochemical characteristics of tin-bearing and tin-barren granites, northern Nigeria[J]. Economic Geology, 75(1): 71-82.

OLLILA J T, 1984. The crystallization of a tin-bearing granitoid suite: the Bushveld granites in the Zaaiplaats area, South Africa[J]. Bulletin of the Geological Society of Finland, 56(1-2): 75-88.

PATTERSON D J, OHMOTO H, SOLOMON M, 1981. Geologic setting and genesis of cassiterite-sulfide mineralization at Renison Bell, western Tasmania[J]. Economic Geology, 76(2): 393-438.

PHYO A P, LI H, HU X J, et al., 2025. Geology, geochemistry, and zircon U-Pb geochronology of the Nanthila and Pedet granites in the Myeik Sn-W district, Tanintharyi region, southern Myanmar[J]. Ore Geology Reviews, 178: 106488.

PIQUER J, SANCHEZ-ALFARO P, PÉREZ-FLORES P, 2021. A new model for the optimal structural context for giant porphyry copper deposit formation[J]. Geology, 49(5): 597-601.

PIRAJNO F, 1992. Greisen systems[M]//PIRAJNO F. Hydrothermal mineral deposits: principles and fundamental concepts for the exploration geologist. Berlin, Heidelberg: Springer: 280-324.

PIRAJNO F, 2008. Hydrothermal processes and mineral systems[M]. Dordrecht: Springer.

POLYA D A, 1989. Chemistry of the main-stage ore-forming fluids of the Panasqueira W-Cu(Ag)-Sn deposit, Portugal; implications for models of ore genesis[J]. Economic Geology, 84(5): 1134-1152.

REDWOOD S D, RICE C M, 1997. Petrogenesis of Miocene basic shoshonitic lavas in the Bolivian Andes and implications for hydrothermal gold, silver and tin deposits[J]. Journal of South American Earth Sciences, 10(3-4): 203-221.

ROGER F, MALUSKI H, LEPVRIER C, et al., 2012. LA-ICPMS zircons U/Pb dating of Permo-Triassic and Cretaceous magmatisms in Northern Vietnam – Geodynamical implications[J]. Journal of Asian Earth Sciences, 48: 72-82.

ROMER R L, KRONER U, 2015. Sediment and weathering control on the distribution of Paleozoic magmatic tin–tungsten mineralization[J]. Mineralium Deposita, 50(3): 327-338.

ROMER R L, KRONER U, 2016. Phanerozoic tin and tungsten mineralization-Tectonic controls on the distribution of enriched protoliths and heat sources for crustal melting[J]. Gondwana Research, 31: 60-95.

ROMER R L, KRONER U, 2022. Provenance control on the distribution of endogenic Sn-W, Au, and U mineralization within the Gondwana-Laurussia plate boundary zone[M]//KUIPER Y D, MURPHY J B, NANCE R D, et al. New developments in the Appalachian-Caledonian-Variscan Orogen. Geological Society of America.

ROMER R L, KRONER U, SCHMIDT C, et al., 2022. Mobilization of tin during continental subduction-accretion processes[J]. Geology, 50(12): 1361-1365.

SANDEMAN H A, CLARK A H, FARRAR E, et al., 1997. Lithostratigraphy, petrology and ^{40}Ar-^{39}Ar geochronology of the Crucero Supergroup, Puno department, SE Peru[J]. Journal of South American Earth Sciences, 10(3-4): 223-245.

SARKAR O, ROMER R L, KRONER U, et al. , 2025. Mobilization of tin during metamorphism in the Variscan Orogeny[C]//Proceedings of EGU general assembly 2025. Vienna: EGU.

SCHMIDT C, 2018. Formation of hydrothermal tin deposits: Raman spectroscopic evidence for an important role of aqueous Sn(IV) species[J]. Geochimica et Cosmochimica Acta, 220: 499-511.

SCHMIDT C, ROMER R L, WOHLGEMUTH-UEBERWASSER C C, et al., 2020. Partitioning of Sn and W between granitic melt and aqueous fluid[J]. Ore Geology Reviews, 117: 103263.

SCHMIDT C, JAHN S, 2024. Raman spectra of oxidized sulfur species in hydrothermal fluids[J]. Journal of Volcanology and Geothermal Research, 454: 108146.

SCHWARTZ M O, RAJAH S S, ASKURY A K, et al., 1995. The Southeast Asian tin belt[J]. Earth-Science Reviews, 38(2-4): 95-293.

SEARLE M P, GODIN L, 2003. The South Tibetan detachment and the Manaslu Leucogranite: a structural reinterpretation and restoration of the Annapurna - Manaslu Himalaya, Nepal[J]. The Journal of Geology, 111(5): 505-523.

SEMPERE T, CARLIER G, SOLER P, et al., 2002. Late Permian–Middle Jurassic lithospheric thinning in Peru and Bolivia, and its bearing on Andean-age tectonics[J]. Tectonophysics, 345(1-4): 153-181.

SHAIL R K, STUART F M, WILKINSON J J, et al., 2003. The role of post-Variscan extensional tectonics and mantle melting in the generation of the Lower Permian granites and the giant W-As-Sn-Cu-Zn-Pb orefield of SW England[J]. Transactions of the Institutions of Mining and Metallurgy, Section B. Applied Earth Science, 112(2): 127-129.

SHELLNUTT J G, LAN C Y, VAN LONG T, et al. , 2013. Formation of Cretaceous Cordilleran and post-orogenic granites and their microgranular enclaves from the Dalat zone, southern Vietnam: tectonic implications for the evolution of Southeast Asia[J]. Lithos, 182-183: 229-241.

SIGLOCH K, MCQUARRIE N, NOLET G, 2008. Two-stage subduction history under North America inferred from multiple-frequency tomography[J]. Nature Geoscience, 1(7): 458-462.

SILLITOE R H, 1974. Tin mineralisation above mantle hot spots[J]. Nature, 248(5448): 497-499.

SILLITOE R H, HALLS C, GRANT J N, 1975. Porphyry tin deposits in Bolivia[J]. Economic Geology, 70(5): 913-927.

SILLITOE R H, 2010. Porphyry copper systems[J]. Economic Geology, 105(1): 3-41.

SKURSCH O, CORFU F, TEGNER C, et al., 2022. Zircon U-Pb chronology and Hf isotopes of the Lebowa Granite Suite and petrogenesis of the Bushveld Complex, South Africa[J]. Contributions to Mineralogy and Petrology, 177(2): 26.

STENHOUSE P, HAYTHORNTHWAITE J, JONES O, 2020. Chapter 8: recognition and integration of structural controls in 3-D geologic modeling: good practice and common pitfalls[M]//ROWLAND J V, RHYS D A. Applied structural geology of ore-forming hydrothermal systems. Society of Economic Geologists: 247-270.

STEWART J W, EVERNDEN J F, SNELLING N J, 1974. Age determinations from Andean Peru: a reconnaissance survey[J]. GSA Bulletin, 85(7): 1107-1116.

SUN W D, LI S G, 2023. Reconstruction of the Pacific plate: constraints from ocean floor and eastern China[J]. The Innovation Geoscience, 1(1): 100013.

SUN X, ZHENG M J, PEI T, et al., 2025. Reassessing the spatial and temporal evolution of the Southeast Asian Tin Belt: insights into recurrent tin mineralization[J]. Earth-Science Reviews, 270: 105233.

TAYLOR J R, WALL V J, 1992. The behavior of tin in granitoid magmas[J]. Economic Geology, 87(2): 403-420.

TAYLOR R G, 1979. Geology of tin deposits[M]. Amsterdam: Elsevier.

TIKOFF B, TEYSSIER C, 1994. Strain modeling of displacement-field partitioning in transpressional orogens[J]. Journal of Structural Geology, 16(11): 1575-1588.

TILLBERG M, DRAKE H, ZACK T, et al., 2020. *In situ* Rb-Sr dating of slickenfibres in deep crystalline basement faults[J]. Scientific Reports, 10(1): 562.

TITLEY S R, THOMPSON R C, HAYNES F M, et al., 1986. Evolution of fractures and alteration in the Sierrita-Esperanza hydrothermal system, Pima County, Arizona[J]. Economic Geology, 81(2): 343-370.

TOWNEND J, ZOBACK M D, 2000. How faulting keeps the crust strong[J]. Geology, 28(5): 399-402.

USGS, 2025. Mineral commodity summaries[R]. Reston, Virginia: U. S. Geological Survey: 212.

VAN DAELE J, HULSBOSCH N, DEWAELE S, et al., 2018. Mixing of magmatic-hydrothermal and metamorphic fluids and the origin of peribatholitic Sn vein-type deposits in Rwanda[J]. Ore Geology Reviews, 101: 481-501.

VANTONGEREN J A, MATHEZ E A, 2012. Large-scale liquid immiscibility at the top of the Bushveld Complex, South Africa[J]. Geology, 40(6): 491-494.

VENÂNCIO M B, DA SILVA F C A, 2023. Structures evolution along strike-slip fault zones: the role of rheology revealed by PIV analysis of analog modeling[J]. Tectonophysics, 851: 229764.

VONOPARTIS L, NEX P, KINNAIRD J, et al., 2020. Evaluating the changes from Endogranitic magmatic to magmatic-hydrothermal mineralization: the Zaaiplaats tin granites, bushveld igneous complex, South Africa[J]. Minerals, 10(4): 379.

WAI-PAN NG S, CHUNG S L, ROBB L J, et al., 2015a. Petrogenesis of Malaysian granitoids in the Southeast Asian tin belt: part 1. Geochemical and Sr-Nd isotopic characteristics[J]. GSA Bulletin, 127(9-10): 1209-1237.

WAI-PAN NG S, WHITEHOUSE M J, SEARLE M P, et al., 2015b. Petro-

genesis of Malaysian granitoids in the Southeast Asian tin belt: part 2. U-Pb zircon geochronology and tectonic model[J]. GSA Bulletin, 127(9-10): 1238-1258.

WANG J C, YU H, JIANG N, et al., 2016. Temporal and spatial relation between the metallotectonic series and metallogenic series in the Dachang orefield, Guangxi[J]. Journal of Guilin University of Technology, 36(4): 633-643. (in Chinese with English abstract)

WANG J X, ZHAO P L, ZHAO H J, et al., 2025. The genesis and exploration of stratiform tin deposits in sandstones: a case study of the San Florencio tin deposit in the Bolivia Tin Belt[J]. Acta Petrologica Sinica, 41(6): 2126-2139. (in Chinese with English abstract)

WANG L Q, WANG Y, FAN Y, et al., 2018. A Miocene tungsten mineralization and its implications in the western Bangong-Nujiang metallogenic belt: constraints from U-Pb, Ar-Ar, and Re-Os geochronology of the Jiaoxi tungsten deposit, Tibet, China[J]. Ore Geology Reviews, 97: 74-87.

WANG R C, WU F Y, XIE L, et al., 2017. A preliminary study of rare-metal mineralization in the Himalayan leucogranite belts, South Tibet[J]. Science China Earth Sciences, 60(9): 1655-1663.

WANG T Y, SHU Q H, XIA X P, et al., 2024. Mantle contributions to granitoids associated with Sn mineralization: geochemical and isotopic evidence from the giant Dachang deposit, South China[J]. Geoscience Frontiers, 15(1): 101718.

WANG Y, ZHANG J J, ZHANG P Z, et al. , 2025. Key scientific challenges and advances in tectonics and structural geology: insights from National Natural Science Foundation of China[J/OL]. Chinese Science Bulletin, 1-15. [2025-10-07]. https:link.cnki.net/urlid/11.1784.N20250702.1157.002. (in Chinese with English abstract)

WU F Y, LIU Z C, LIU X C, et al., 2015. Himalayan leucogranite: petrogenesis and implications to orogenesis and plateau uplift[J]. Acta Petrologica Sinica, 31(1): 1-36. (in Chinese with English abstract)

WU F Y, WANG R C, LIU X C, 2021. New breakthroughs in the studies of Himalayan rare-metal mineralization[J]. Acta Petrologica Sinica, 37(11): 3261-3276. (in Chinese with English abstract)

WU Q, XU H, 2004. Study on 3D geological modeling and visualization methods[J] Scientia Sinica (Terrae), 34(1): 54-60. (in Chinese)

WU Y, ZHANG S, HUANG Z, et al., 2019. Meso-cenozoic tectonic evolution of the Nandan-Libo Area, Northwestern Guangxi, China: evidence from palaeo-tectonic stress fields analyses[J]. Geotectonica et Metallogenia, 43(5): 872-893. (in Chinese with English abstract)

XIAO C H, SHEN Y K, WEI C S, 2019. Petrogenesis of low Sr and high Yb A-type Granitoids in the Xianghualing Sn polymetallic deposit, South China: constrains from geochronology and Sr-Nd-Pb-Hf isotopes[J]. Minerals, 9(3): 182.

XIAO C H, CHEN Z L, LIU X C, et al., 2022. Structural analysis, mineralogy, and cassiterite U–Pb ages of the Wuxu Sb-Zn-polymetallic district, Danchi Fold-and-Thrust belt, South China[J]. Ore Geology Reviews, 150: 105150.

XIAO C H, CHEN Z L, YAO X F, et al., 2023a. The control of deformation partitioning on gold mineralization in the Qingchengzi district, Liaodong Peninsula, northeastern China[J]. Journal of Asian Earth Sciences, 242: 105517.

XIAO C H, YU P P, LIU X H, et al., 2023b. Cassiterite U-Pb dating and Micro-XRF analysis constraint on the formation of Xinlu Sn-Zn deposit, South China[J]. Frontiers in Earth Science, 10: 1031681.

XIAO C H, WEI C S, ZHANG Y, et al., 2024. Calcite U-Pb dating and micro-XRF analysis constraint on formation of Bawang Zn-Fe-Sn deposit in Danchi metallogenic belt, South China[J]. Earth Science, 49(12): 4335-4350. (in Chinese with English abstract)

XIAO C H, CHEN Z L, WEI C S, et al., 2025. Tectonic setting of the Youjiang giant tin belt, South China: new findings from the Pingna W-Sn deposit[J]. Geoscience Frontiers, 16(2): 102006.

XIE L, WANG R C, TIAN E N, et al., 2021. Oligocene Nb-Ta-W-mineralization related to the Xiaruleucogranite in the Himalayan Orogen[J]. Chinese Science Bulletin, 66(35): 4574-4591. (in Chinese with English abstract)

XU R, DENG J, CHENG H Y, et al., 2018. Geochronology, geochemistry and geodynamic setting of Late Cretaceous magmatism and Sn mineralization in the western South China and Tengchong-Baoshan[J]. Acta Petrologica Sinica, 34(5): 1271-1284. (in Chinese with English abstract)

XU R, ROMER R L, KRONER U, et al., 2022. Tectonic control on the spatial distribution of Sn mineralization in the Gejiu Sn district, China[J]. Ore Geology Reviews, 148: 105004.

XU S, UNSWORTH M J, HU X Y, et al., 2019. Magnetotelluric evidence for asymmetric simple shear extension and lithospheric thinning in South China[J]. Journal of Geophysical Research: Solid Earth, 124(1): 104-124.

YANG J H, ZHOU M F, HU R Z, et al., 2020. Granite-related tin metallogenic events and key controlling factors in Peninsular Malaysia, Southeast Asia: new insights from Cassiterite U-Pb dating and zircon geochemistry[J]. Economic Geology, 115(3): 581-601.

YANG L, WANG Q F, ZHAO S Y, et al., 2023. Structural controls on orogenic gold deposits[J]. Acta Petrologica Sinica, 39(2): 277-292. (in Chinese with English abstract)

YANG L Q, YANG W, ZHANG L, et al., 2024. Developing structural control models for hydrothermal metallogenic systems: theoretical and methodological principles and applications[J]. Earth Science Frontiers, 31(1): 239-266. (in Chinese with English abstract)

YANG Y T, 2013. An unrecognized major collision of the Okhotomorsk Block with East Asia during the Late Cretaceous, constraints on the plate reorganization of the Northwest Pacific[J]. Earth-Science Reviews, 126: 96-115.

YEAP E B, 1993. Tin and gold mineralizations in Peninsular Malaysia and their relationships to the tectonic development[J]. Journal of Southeast Asian Earth Sciences, 8(1-4): 329-348.

YIN A, HARRISON T M, 2000. Geologic evolution of the Himalayan-Tibetan orogen[J]. Annual Review of Earth and Planetary Sciences, 28: 211-280.

YUAN S D, PENG J T, HU R Z, et al., 2008. A precise U–Pb age on cassiterite from the Xianghualing tin-polymetallic deposit (Hunan, South China)[J]. Mineralium Deposita, 43(4): 375-382.

ZEH A, OVTCHAROVA M, WILSON A H, et al., 2015. The Bushveld Complex was emplaced and cooled in less than one million years – results of zirconology, and geotectonic implications[J]. Earth and Planetary Science Letters, 418: 103-114.

ZENG Y F, LIU W J, CHEN H D, et al. , 1995. Evolution of sedimentation and tectonics of the Youjiang composite basin, South China[J]. Acta Geologica Sinica(2): 113-124. (in Chinese with English abstract)

ZHANG G L, RANJITH P G, LIANG W G, et al., 2019. Stress-dependent fracture porosity and permeability of fractured coal: an *in-situ* X-ray tomography study[J]. International Journal of Coal Geology, 213: 103279.

ZHANG R Q, LEHMANN B, SELTMANN R, et al., 2017. Cassiterite U-Pb geochronology constrains magmatic-hydrothermal evolution in complex evolved granite systems: the classic Erzgebirge tin province (Saxony and Bohemia)[J]. Geology, 45(12): 1095-1098.

ZHANG Y, XIAO C H, WEI C S, et al., 2023. Fluid evolution and mineralizing process of the Bawang Fe-Zn-Sn deposit, Danchi Fold-and-Thrust belt, South China[J]. Ore Geology Reviews, 163: 105772.

ZHANG Y, XIAO C H, 2025. Fluid pressure contrast control the formation of distal vein-type tin deposit, Dachang district, South China[C]//Goldschmidt 2025 conference. Czech: Goldschmidt.

ZHANG Z, LI G M, ZHANG L K, et al., 2025. The rare metals-tin-tungsten-lead-zinc-gold-antimony metallogenic system associated with cenozoic granites during the post-collision extension period in Himalaya: a case study of Cuonadong ore concentration area[J]. Sedimentary Geology and Tethyan Geology, 45(2): 375-393. (in Chinese with English abstract)

ZHAO P L, CHU X, WILLIAMS-JONES A E, et al., 2022. The role of phyllosilicate partial melting in segregating tungsten and tin deposits in W-Sn metallogenic provinces[J]. Geology, 50(1): 121-125.

ZHAO Y, HUANG L S, TANG Y P, et al., 2020. Prospecting prediction and exploration of the deep concealed rock mass in Wuxu antimony polymetallic ore field, Guangxi[J]. Mineral Resources and Geology, 34(1): 109-114. (in Chinese with English abstract)

ZHENG Y F, CHEN Y X, CHEN R X, et al., 2022. Tectonic evolution of convergent plate margins and its geological effects[J]. Science China Earth Sciences, 65(7): 1247-1276.

ZHOU X M, LI W X, 2000. Origin of Late Mesozoic igneous rocks in Southeastern China: implications for lithosphere subduction and underplating of mafic magmas[J]. Tectonophysics, 326(3-4): 269-287.

ZHU D C, WANG Q, LI S M, et al., 2025. Magma genesis and crustal evolution in continental collision zones[J]. Science China Earth Sciences, 68(5): 1346-1370.

ZHU Y X, NI P, FAN M S, et al., 2025. Malage skarn-type Sn-polymetallic deposit in the vast Gejiu ore field: new data on its age and form[J]. Ore Geology Reviews, 181: 106612.

附中文参考文献

蔡明海，梁婷，吴德成，等，2004. 广西丹池成矿带构造特征及其控矿作用[J]. 地质与勘探，40(6)：5-10.

曹代勇，李青元，朱小弟，等，2001. 地质构造三维可视化模型探讨[J]. 地质与勘探，37(4)：60-62.

陈柏林，2024. 构造序次及其在找矿预测中的应用：以华南热液型铀矿床为例[J]. 地质学报，98(7)：2173-2192.

陈建平，吕鹏，吴文，等，2007. 基于三维可视化技术的隐伏矿体预测[J]. 地学前缘，14(5)：54-62.

陈衍景，2013. 大陆碰撞成矿理论的创建及应用[J]. 岩石学报，29(1)：1-17.

代作文，2020. 西藏错那洞铍锡钨多金属矿床成矿作用研究[D]. 成都：成都理工大学.

付建刚，李光明，王根厚，等，2020. 西藏错那洞穹窿同构造矽卡岩特征及相关铍钨锡稀有金属矿化的成矿时代[J]. 吉林大学学报（地球科学版），50(5)：1304-1322.

郭佳，2019. 华南右江盆地锡成矿事件与花岗岩锡成矿能力：以个旧和大厂锡多金属矿区为例[D]. 广州：中国科学院大学（中国科学院广州地球化学研究所）.

侯增谦，2010. 大陆碰撞成矿论[J]. 地质学报，84(1)：30-58.

侯增谦，杨志明，张洪瑞，等，2025. 大陆碰撞成矿作用：新认识与新进展[J/OL]. 地学前缘，1-36. [2025-10-07]. https://doi.org/10.13745/j.esf.sf.2025.4.49.

华仁民，朱金初，赵一英，等，1997. 右江褶皱带有色金属矿床成矿系列初步研究[J]. 高校地质学报，3(2)：183-191.

李光明，张林奎，焦彦杰，等，2017. 西藏喜马拉雅成矿带错那洞超大型铍锡钨多金属矿床的发现及意义[J]. 矿床地质，36(4)：1003-1008.

李三忠，曹现志，王光增，等，2019. 太平洋板块中—新生代构造演化及板块重建[J]. 地质力学学报，25(5)：642-677.

毛景文，宋世伟，刘鹏，等，2023. 锡矿床研究现状及发展趋势[J]. 岩石学报，39(5)：1233-1240.

汪劲草，余何，江楠，等，2016. 广西大厂矿田成矿构造系列与成矿系列的时—空联系[J]. 桂林理工大学学报，36(4)：633-643.

王嘉旭，赵盼捞，赵海杰，等，2025. 砂岩中似层状锡矿的成因及找矿方向：以玻利维亚锡矿带 San Florencio 锡矿为例[J]. 岩石学报，41(6)：2126-2139.

王汝成，吴福元，谢磊，等，2017. 藏南喜马拉雅淡色花岗岩稀有金属成矿作用初步研究[J]. 中国科学：地球科学，47(8)：871-880.

王洋，张进江，张培震，等，2025. 国家自然科学基金视域下我国大地构造学与构造地质学方向主要科学问题及进展解析[J/OL]. 科学通报，1-15. [2025-10-07]. https:link.cnki.net/urlid/11.1784.N20250702.1157.002.

吴福元，刘志超，刘小驰，等，2015. 喜马拉雅淡色花岗岩[J]. 岩石学报，31(1)：1-36.

吴福元，王汝成，刘小驰，等，2021. 喜马拉雅稀有金属成矿作用研究的新突破[J]. 岩石学报，37(11)：3261-3276.

武强，徐华，2004. 三维地质建模与可视化方法研究[J]. 中国科学D辑 地球科学，34(1)：54-60.

吴玉，张松，黄铮，等，2019. 桂西北南丹—荔波地区中、新生代构造演化：来自古构造应力场的证据[J]. 大地构造与成矿学，43(5)：872-893.

肖昌浩，韦昌山，张宇，等，2024. 广西丹池成矿带拔旺铁锌锡矿床方解石 U-Pb 定年和微区 XRF 面扫描[J]. 地球科学，49(12)：4335-4350.

谢磊，王汝成，田恩农，等，2021. 喜马拉雅夏如渐新世淡色花岗岩铌钽钨成矿作用[J]. 科学通报，66(35)：4574-4591.

徐容，邓军，程韩宇，等，2018. 华南板块西缘和腾冲-保山地块晚白垩世岩浆活动及 Sn 成矿作用对比：年代学、地球化学和动力学背景[J]. 岩石学报，34(5)：1271-1284.

杨立强，杨伟，张良，等，2024. 热液成矿系统构造控矿理论[J]. 地学

前缘，31(1)：239-266.
杨林，王庆飞，赵世宇，等，2023. 造山型金矿构造控矿作用[J]. 岩石学报，39(2)：277-292.
曾允孚，刘文均，陈洪德，等，1995. 华南右江复合盆地的沉积构造演化[J]. 地质学报(2)：113-124.
张志，李光明，张林奎，等，2025. 初论喜马拉雅后碰撞伸展期与新生代花岗岩相关的稀有—锡钨—铅锌—金锑成矿系统：以错那洞矿集区为例[J]. 沉积与特提斯地质，45(2)：375-393.
赵毅，黄理善，唐艳萍，等，2020. 广西五圩锑多金属矿田深部隐伏岩体探索与找矿预测[J]. 矿产与地质，34(1)：109-114.
郑永飞，陈伊翔，陈仁旭，等，2022. 汇聚板块边缘构造演化及其地质效应[J]. 中国科学：地球科学，52(7)：1213-1242.
朱弟成，王青，李世民，等，2025. 大陆碰撞带岩浆成因与地壳演化[J]. 中国科学：地球科学，55(5)：1398-1423.

第一作者简介：

肖昌浩，研究员，博士生导师，现任中国地质科学院地质力学研究所矿田构造研究室副主任，中国地质大学（北京）兼职教授，深地探测与矿产勘查全国重点实验室第四研究部副主任，中国地球物理学会青年工作委员会委员。研究方向为矿田构造与成矿规律研究，先后主持深地国家科技重大专项课题、自然资源部新一轮找矿突破战略行动科技支撑项目等 10 余项，第一作者/通讯作者发表论文 23 篇，其中 SCI/EI 论文 18 篇。曾获广西科学技术进步二等奖 1 项、中国黄金协会科学技术进步二等奖 5 项。以第一完成人获 2024 年度自然资源科技进步奖（找矿奖）二等奖并入选中国地质调查局 2024 年度地质科技十大进展和中国地质科学院 2024 年度十大科技进展。获自然资源部高层次科技创新人才工程青年科技人才称号。

通信作者简介：

邓军，中国地质大学（北京）教授，国家重点基础研究发展计划项目（973 项目）首席科学家。主要从事区域成矿、矿田构造和成矿预测研究。以第一/通讯作者在 *PNAS*、*Science Advances*、*Geology* 等期刊发表 SCI 论文 170 余篇。获李四光地质科学奖，国家科技进步二等奖 4 项，排名第一的省部级特等奖和一等奖 6 项。