

石英脉型黑钨矿成矿研究进展与展望

——以广西珊瑚钨锡矿床为例

张旭, 刘淑君, 肖宗玉

桂林理工大学地球科学学院, 广西 桂林

收稿日期: 2026年3月27日; 录用日期: 2026年5月11日; 发布日期: 2026年5月29日

摘要

石英脉型黑钨矿是岩浆热液成矿作用的经典类型, 构造是其成矿的核心控制因素。本文以南岭成矿带西段广西珊瑚钨锡矿床为典型案例, 系统梳理了石英脉型黑钨矿构造控矿研究的理论演化与技术方法体系。研究认为, 该领域实现了从静态构造格架描述向动态构造-流体耦合机制解析的三次认知变迁。珊瑚矿床的研究完整映射了这一演进历程: 早期厘定了“西、中、东”三大构造体系格架; 近期通过精细解析, 揭示了“早期脆-韧性剪切带+成矿期张性改造”的容矿空间形成机制, 并证实了“构造泵吸”效应对流体运移与沉淀的驱动作用。但当前研究仍面临深部构造刻画不足、构造-流体耦合定量不足等共性局限, 未来应加强深部三维建模与多物理场数值模拟等先进研究方法与珊瑚矿床的结合。

关键词

石英脉型黑钨矿, 构造控矿, 广西珊瑚钨锡矿床, 构造-流体耦合, 南岭成矿带

Research Progress and Prospects of Quartz Vein-Type Wolframite Mineralization

—A Case Study of the Shanhu Tungsten-Tin Deposit in Guangxi

Xu Zhang, Shujun Liu, Zongyu Xiao

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

Received: March 27, 2026; accepted: May 11, 2026; published: May 29, 2026

Abstract

Quartz vein-type wolframite deposits represent a classic type of magmatic-hydrothermal mineralization, with structural controls being the key factor governing ore formation. This paper takes the

Shanhu W-Sn deposit, Guangxi in the western section of the Nanling metallogenic belt as a typical case study to systematically review the theoretical evolution and technical methodological framework of structural controls on quartz vein-type wolframite mineralization. The study suggests that this field has undergone a cognitive shift from static structural framework descriptions to the analysis of dynamic structure-fluid coupling mechanisms. Research on the Shanhu deposit fully mirrors this evolutionary trajectory: early studies established the “western, central, and eastern” three-fold structural system framework; recent detailed analyses have revealed the ore-hosting space formation mechanism characterized by “early brittle-ductile shear zones plus syn-mineralization extensional modification,” and have confirmed the role of structural activity in driving fluid migration and precipitation. However, current research still faces common limitations, including unclear characterization of deep structures and insufficient quantification of structure-fluid coupling. Future efforts should focus on integrating advanced methods such as deep three-dimensional modeling and multi-physical field numerical simulation into the study of the Shanhu deposit.

Keywords

Quartz Vein-Type Wolframite, Structural Controls, Shanhu W-Sn Deposit, Guangxi, Structure-Fluid Coupling, Nanling Metallogenic Belt

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

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

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



Open Access

1. 引言

石英脉型黑钨矿是岩浆热液成矿作用的经典类型，亦是全球钨资源的核心供给来源。构造作为该类矿床成矿的核心控制因素，不仅为成矿流体提供运移通道和容矿空间，更通过其动力学过程调控着成矿系统的演化路径。传统研究多聚焦于构造格架的静态描述，对构造演化与流体活动的动态耦合机制、多期次构造的叠加控矿效应等核心科学问题的理解仍存在缺失。

成矿构造研究技术的革新推动了该领域认知的深化。高精度原位分析、流体地球化学示踪与数值模拟的融合应用，使研究视角从单一构造空间分析转向构造-岩浆-流体的多要素耦合研究，实现了从静态刻画到动态反演的转变。当前研究的核心焦点集中于：成矿期构造应力场演化如何控制容矿裂隙的形成与活化、不同尺度构造样式如何决定矿化空间分布等关键问题。

广西珊瑚钨锡矿床作为南岭成矿带西段石英脉型黑钨矿的典型代表，以其巨量的钨锡资源、多种矿化特征及显著的构造控矿样式成为核心研究对象[1]。其研究历程完整映射了该类矿床构造认知的发展轨迹：早期研究厘定了矿田三大构造体系的空间格架[2]；近期研究则通过精细构造解析与流体地球化学技术，提出了“构造-流体耦合成矿”的新框架[3]，揭示了早期“构造致裂”与晚期“流体致裂”的动态转换机制。但现阶段针对深部隐伏构造形态、构造活动与成矿事件的时空耦合关系等方面仍有待深化。

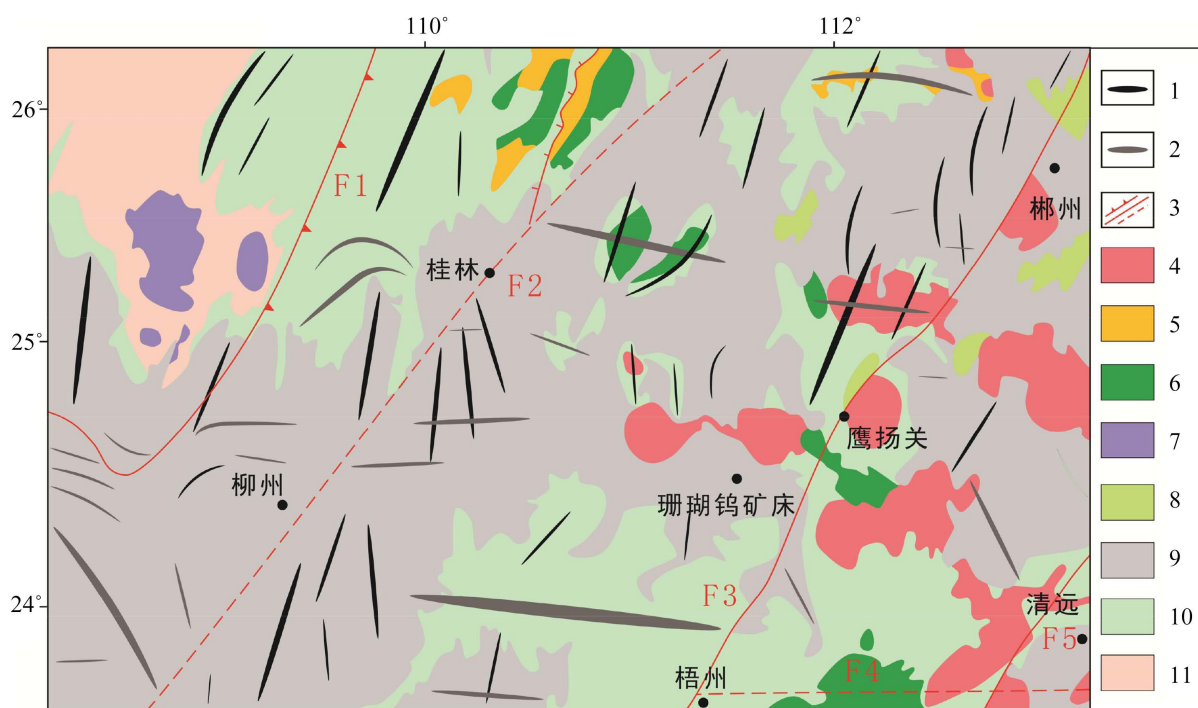
本文以南岭成矿带西段广西珊瑚钨锡矿床为核心载体，系统梳理其成矿构造研究的历史脉络与最新进展。通过评述从构造格架静态分析到构造-流体动态耦合模型的研究演进，揭示构造演化、容矿空间形成与成矿流体活动的耦合机制，以期为该矿床深部研究与同类地区构造控矿研究提供学术参考。

2. 南岭成矿带区域地质构造背景

南岭成矿带横跨扬子地块与华夏地块，是我国石英脉型黑钨矿的核心产出区。区域构造演化具有显著多期性：加里东期(广西期)和印支期造山均为陆内造山作用，是远程应力场产物，完成了东西向构造格

架的基底定型。燕山期为构造活化与钨锡成矿的核心动力期：湘南-桂北地区经历了古太平洋板块断离与软流圈上涌，强烈的壳幔相互作用为钨锡成矿提供了物质来源与伸展背景。沉积、岩浆及构造变形证据表明，华南中生代特提斯向古太平洋构造域转换始于晚三叠世[4]。

区域以东西向构造为主体，叠加 NE、NW、SN 向次级构造，复合交汇部位为岩浆侵位与热液运移提供了有利空间[5]。南岭西段扬子地块构造相对稳定、显生宙岩浆活动较弱，广西珊瑚钨锡矿床位于该段与广西山字型构造复合部位，其复杂的构造控矿样式正是这一区域背景的产物(图 1)。



F1. 安化-罗成断裂, F2. 永州-桂林-柳州断裂, F3. 茶陵-郴州-临武-鹰扬关-梧州断裂, F4. 梧州-四会-隐伏断裂, F5. 鹰潭-安远-韶关-清远断裂。

Figure 1. Geological map of the western segment of the Nanling tectonic belt [5]

图 1. 南岭大地构造带西段地质简图[5]

3. 石英脉型黑钨矿构造控矿理论与研究技术体系

南岭成矿带的找矿实践与技术革新，推动了石英脉型黑钨矿构造控矿认知从静态形态描述到动态动力机理解析的进阶，形成了经典的构造控矿找矿模式与“宏观-微宏观-定量”的完整研究技术体系，二者相互支撑，为解析构造控矿规律、指导找矿实践奠定了理论与方法基础，且在广西珊瑚钨锡矿床的研究中得到梯度化应用。

3.1. 构造控矿经典找矿模式

南岭成矿带孕育了四层经典的构造控矿找矿模式，呈现了构造控矿认知从矿体到矿田、从形态到机理的逐步深化，各模式均成为不同阶段钨矿勘查的重要理论支撑。

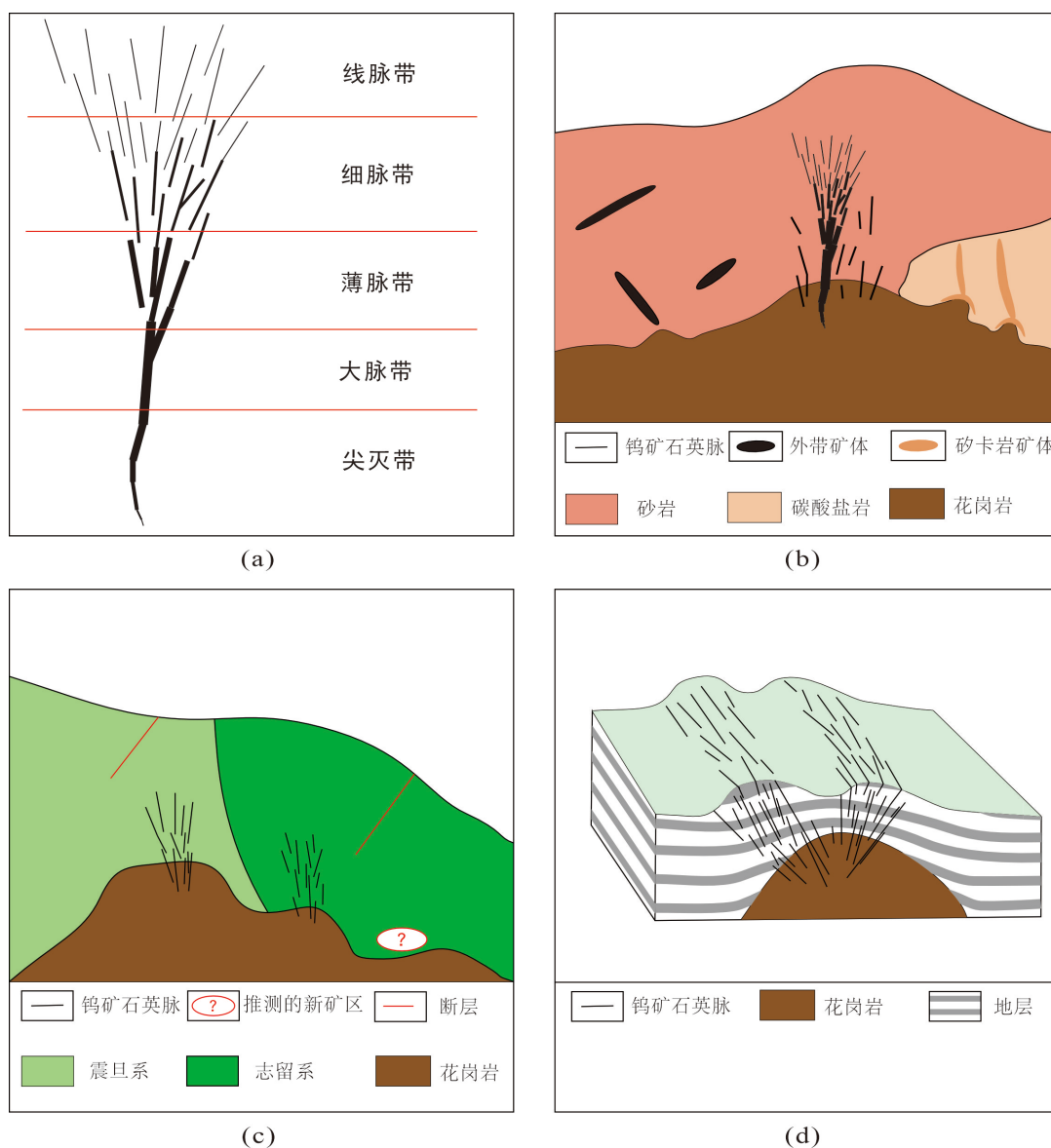
“五层楼”模式是矿体尺度垂向控矿总结，上世纪 60 年代由广东有色九三二队在石人嶂-梅子窝矿区提出[6]，以“细脉带-大脉带”垂向分异为核心，反映了花岗岩体顶部构造裂隙的垂向差异控矿特征，是南岭隐伏钨矿体勘查的基础依据。

九龙脑模式是矿田尺度三维控矿成果，为“五层楼”认知的区域扩展[7]，核心是以隐伏高分异花岗岩体为中心的构造格架控矿，形成环带状矿化分布，实现了构造控矿研究从垂向到三维格架的跨越。

台阶式模型在淘锡坑矿区的勘查工作中提出[8]，聚焦于岩体顶面构造界面控矿，发现花岗岩体顶面阶梯状“构造台阶”形成差异化应力场与成矿中心，进一步推动构造控矿向分块立体分析转变。

扇状模型是近年来动力学控矿研究成果[9] [10]，核心为岩浆侵位应力场控制的共轭裂隙控矿，揭示了岩浆侵位动力对容矿裂隙形成的初始控制作用，将构造控矿研究从空间描述推向动力学机理解析。

四大模式虽实现了认知进阶，但仍存在共性局限：构造-流体动态耦合解析不足，成矿期应力场演化研究薄弱，深部构造刻画精度低，区域与矿区构造叠加重构关注不够，这些问题成为南岭石英脉型黑钨矿构造控矿研究的核心突破方向(图 2)。



(a) “五层楼”模型，(b) 九龙脑模型，(c) 台阶式模型，(d) 扇状模型。

Figure 2. Schematic diagram of four prospecting models
图 2. 四种找矿模型示意图

“五层楼”模式根植于花岗岩顶部垂向裂隙分异机制，形成于岩体上拱与区域伸展的构造背景，核心指示意义在于指导隐伏矿体的垂向预测；“九龙脑”模式则将视野扩展至矿田尺度，以隐伏高分异花岗岩穹隆构造为核心控矿要素，矿化呈环带状围绕岩体分布，适用于外围及深部找矿靶区圈定；“台阶式”模型聚焦于岩体顶面产状变化形成的局部构造台阶，该台阶因应力差异而成为流体汇聚与沉淀的有利部位，对坑道内富矿柱的定位具有直接指导价值；“扇状”模型则强调岩浆侵位瞬时应力场控制的共轭剪裂隙系统，矿脉呈放射状或共轭状展布，交汇部位往往形成富矿囊，对矿区内部盲矿体的发现具有独特预测能力。从形成机制看，前两者侧重于静态构造格架与岩体形态控制，后两者已开始关注动力学过程与局部应力场效应；从勘查尺度看，四者分别覆盖了从矿体、矿床到矿田的完整谱系，共同构成了石英脉型黑钨矿构造控矿的基础理论体系。

尽管上述四大模式极大推动了石英脉型黑钨矿的勘查实践，但其局限性亦不容忽视。以“五层楼”模式为例，该模式完美概括了赣南粤北许多简单石英脉型钨矿床的垂向分带，但在广西珊瑚矿床中，由于成矿期后或多期构造的叠加改造，局部地段矿化分布的极不均匀，单纯的“五层楼”框架难以精准描述其复杂矿化结构。又如“扇状模型”在盘古山矿床得到精妙验证，但其强调的成矿期瞬时应力场控制的共轭裂隙，在面对珊瑚矿床这样经历了“早期脆-韧性剪切 + 晚期张性活化”复杂演化的容矿系统时，其解释力便显不足。这启示我们，经典模式提供了基础框架，但针对具体矿床，必须开展精细的、动态的构造-流体耦合解析，方能揭示其独特的控矿规律。

3.2. 构造研究技术方法体系的发展

除早期宏观构造研究技术以外，其他研究技术的迭代升级也是构造控矿认知深化的重要动力，各类技术均以解析构造格架、演化及构造-流体耦合机制为核心，且在珊瑚钨锡矿床研究中得到不同程度应用。

在构造研究中期，构造-地球化学耦合技术以同位素定年、流体包裹体分析、电子探针微区分析为核心，实现了构造研究从宏观到微宏观的跨越，也是当前珊瑚矿床的主要研究手段，为矿床“构造泵吸”机制提供了流体地球化学证据[11]-[13]，从晶体尺度印证了成矿应力场演化轨迹[14]。

现代构造定量模拟技术以构造应力场数值模拟、三维地质建模、有限元分析为核心，推动构造研究进入定量预测与动态反演阶段[15]-[17]，目前该技术在珊瑚矿床研究中尚处于起步阶段，尚未大规模开展构造-流体-岩浆耦合定量模拟，也未全面构建矿田尺度三维构造-矿化耦合模型，是其未来研究的核心突破方向。

广西珊瑚钨锡矿床发育的复杂构造组合、多期次构造活动及构造-流体耦合特征，恰好为解决经典找矿模式的研究局限、推动研究技术的落地应用提供了理想的天然研究载体。

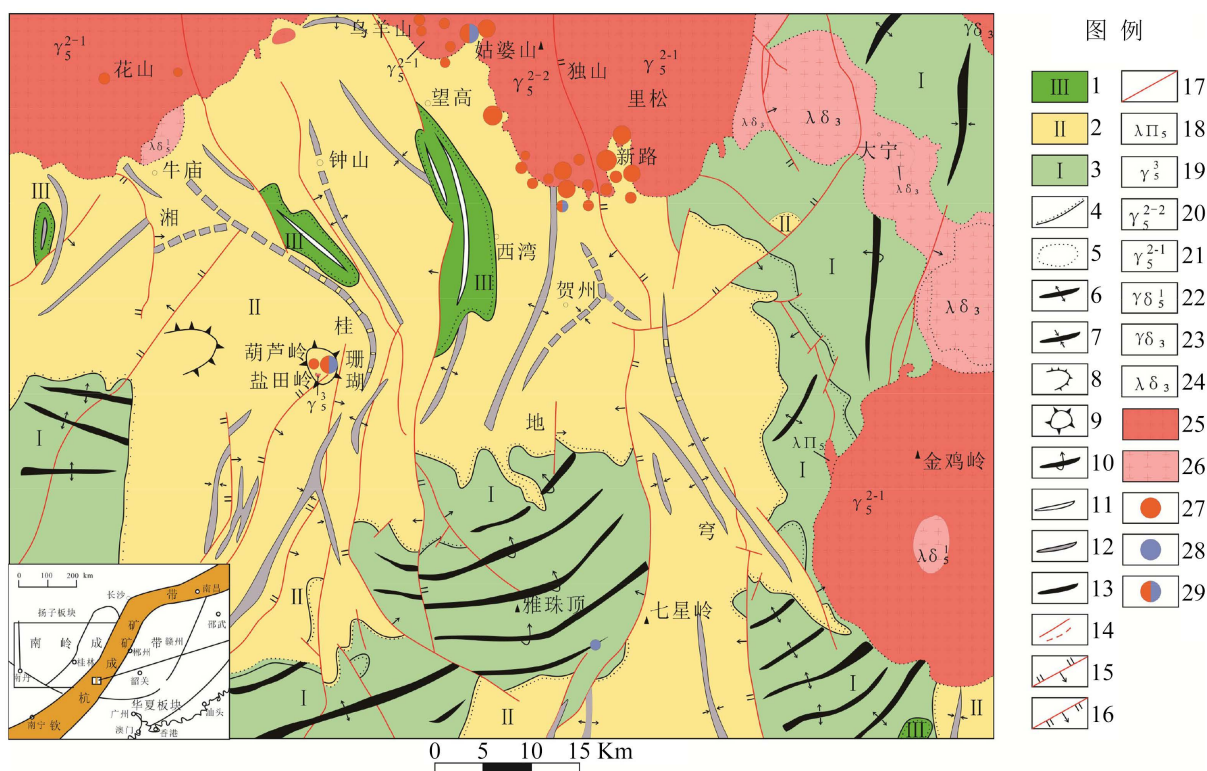
4. 广西珊瑚钨锡矿床构造控矿系统

“五层楼”、九龙脑、“台阶式”、“扇状”等经典构造控矿模式，为理解石英脉型黑钨矿提供了普适性框架。然而，当我们将这些模式应用于构造演化历史复杂、多期叠加特征显著的广西珊瑚钨锡矿床时，其局限性便凸显出来：矿床并非简单的岩体顶部垂向分带(“五层楼”)，亦非标准的岩体穹隆环带(九龙脑)，更难以用单一的共轭裂隙(扇状)或岩体台阶(台阶式)完全解释。经典模式对珊瑚矿床复杂容矿空间的形成机制——特别是早期韧性变形如何为后期成矿流体“预置”通道，以及多期构造应力场转换如何驱动“构造泵吸”高效成矿——缺乏足够的机理解释。为此，本节立足于珊瑚矿床精细的构造解析，以“早期脆-韧性剪切带 + 成矿期张性改造”这一核心新认识为主线，系统阐述其构造控矿系统，以期弥补经典模型之不足。

4.1. 区域构造背景与成矿构造演化序列

珊瑚钨锡矿床位于南岭东西向构造带西段与广西山字型构造前弧构西翼的复合交汇部位,是南岭西段钨锡成矿带具有代表性的矿床,其区域成矿构造位置、构造-岩浆-成矿带的空间分布特征清晰可辨[18]。区域构造演化具有显著的多期性特征:加里东运动形成区域褶皱基底,印支期造山运动完成构造格架定型,燕山期陆内造山引发的强烈构造活化与岩浆侵位,是区域钨锡成矿的核心动力[19]。

区域内东西向基底构造与广西山字型构造的叠加改造,形成了区内三级成矿带分区与复杂的断裂-褶皱构造格架,两大构造体系的交汇部位控制了区域内大多数的钨锡矿床分布;花山-姑婆山等燕山期花岗岩体沿东西向集中分布的构造带,为区域成矿岩浆与热液来源提供了充足的证据。上述区域构造背景既为燕山期高分异花岗岩体上侵提供了深部通道,也为富钨热液的运移与沉淀提供了有利的构造空间,是珊瑚矿床形成的一级控矿构造背景(图3)。



1-地槽构造层, 2-地台构造层, 3-地洼构造层, 4-实测及推测构造层界限, 5-侵入岩地质界限, 6-背斜, 7-向斜, 8-鼻状背斜, 9-穹窿, 10-倒转背斜, 11-燕山期及喜山期构造线, 12-印支期构造线, 13-加里东期构造线, 14-实测及推测断层, 15-逆断层, 16-正断层, 17-区域大断层, 18-燕山期花岗斑岩, 19-燕山期石英斑岩, 20-燕山晚期(第三亚期)花岗岩, 21-燕山中期(第二亚期)花岗岩, 22-燕山早期(第一亚期)花岗岩, 23-印支期石英闪长岩, 24-加里东期花岗闪长岩, 25-加里东期石英闪长岩, 26-花岗岩, 27-花岗闪长岩、石英闪长岩, 28-锡矿床, 29-钨矿床, 30-钨锡矿床, 31-富贺钟地区的大地构造位置。

Figure 3. Regional structural geological map of the Shanhu tungsten-tin deposit [18]

图3. 珊瑚钨锡矿床区域构造地质图[18]

4.2. 矿区构造格架

矿区受多期构造活动叠加影响,可划分为西部、中部、东部三大构造体系,整体构成了“中部聚矿、东西控界”的构造控矿格架,各地层单元、断裂系统、矿脉群的空间展布特征完整呈现[20]。

西部 EW 向褶皱带以葫芦岭短轴背斜为核心，占据矿田西部主体区域，背斜呈近东西向展布，两翼平缓开阔，枢纽具波状起伏特征，带内发育 EW 向、SN 向、NE 向三组断裂[21]。其中 SN 向张性断裂与 EW 向断裂的交汇部位形成局部张性空间，为含矿流体的初始汇聚提供了通道，是区内次要矿化发育部位，带内盐田岭矿点即受该类断裂交汇构造控制。

中部 NE 向挤压破碎带是矿床的核心控矿构造体系，位于笔架山断裂与石灰山断裂之间，由 NNE 向主干逆冲断裂和 NW 向次级正断裂交叉构成菱形网格状构造[22]。该带脆-韧性剪切变形强烈，构造活动具显著多期性，断裂交叉形成的网格状裂隙系统为矿脉群提供了主要容矿空间，带内长营岭矿段发育密集的雁列式石英脉群，控制了矿床主要的工业矿体产出，是矿区最主要的赋矿构造带。

东部 SN 向褶皱带以一系列 SN 向紧闭褶皱和规模较大的 SN 向压性断裂为主体，伴生近 EW 向次级断裂，矿化带的东向延伸不明显，仅在金鹅岭一带断裂局部张性段发育零星弱矿化(图 4)。

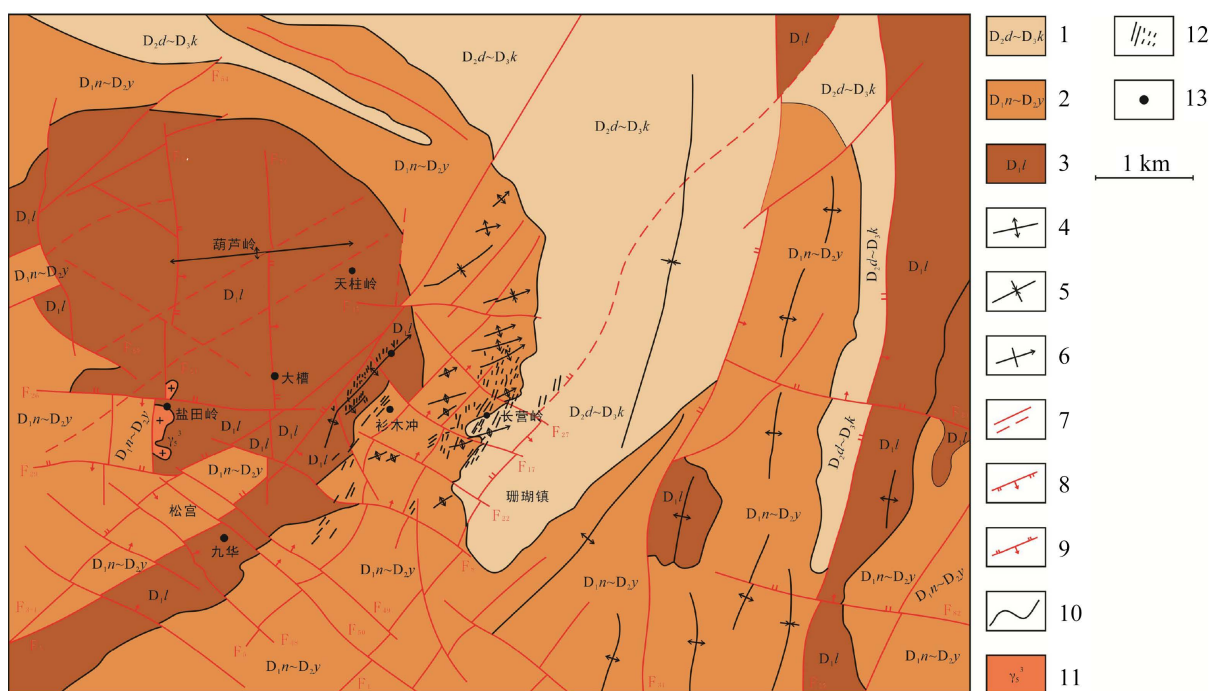


Figure 4. Geological map of the Shanhu tungsten-tin deposit [20]

图 4. 珊瑚钨锡矿田地质简图[20]

4.3. 成矿构造演化、容矿空间机制及其研究演进

在矿区西、中、东三大构造体系格架的基础上，对珊瑚钨锡矿床成矿期构造动态演化过程与容矿空间形成机制的精细解析，进一步揭示了矿床构造控矿的核心规律，而该矿床的研究历程也完整映射了南岭石英脉型黑钨矿构造控矿认知与研究技术的整体演进脉络，同时暴露了当前该领域研究的共性短板。

矿床成矿作用与成矿裂隙的阶段性的开合同步发生，识别出多期裂隙生成与热液充填事件，裂隙的开合形成典型“构造泵吸”效应。“构造泵吸”效应的物理机制可归为“断层阀”行为[23][24]：周期性流体压力积聚触发断裂张开、流体排泄与矿物快速沉淀，压力下降后裂隙闭合，循环往复。珊瑚矿床中，长营岭矿段石英脉流体包裹体均一温度与盐度的周期性震荡，以及矿脉内发育的微晶-粗晶互层、梳状构造与角砾胶结等微观特征，均为该机制提供了直接证据。矿区容矿裂隙初始格架形成于燕山期脆-韧性剪切作用，成矿期区域应力场由挤压向张剪转换，使早期剪切带发生张性活化，形成复杂容矿空间，

这一“早期脆-韧性剪切带+成矿期张性改造”机制,是对经典构造控矿理论的重要补充。成矿期三大构造体系应力场分异显著,中部 NE 向构造带为挤压背景下的局部拉张环境,是矿质沉淀核心区,东部 SN 向构造带强挤压、西部 EW 向褶皱带弱挤压与局部拉张,从动力学层面解释了“中部富矿、东西贫化”的分带规律。同位素、流体包裹体与电子探针分析为上述机制提供了地球化学佐证,厘定主成矿年龄 $103 \pm 3 \text{ Ma}$ [25] [26],与燕山期构造活化、花岗岩侵位时代一致,构建了“构造活动-岩浆侵位-热液成矿”时空耦合格架,流体温盐度的阶段性波动与矿物微区特征,也从微观尺度印证了宏观构造控矿过程。

5. 讨论

珊瑚矿床的研究历程,与南岭石英脉型黑钨矿构造控矿研究方法的三次变化相契合。南岭该领域研究从矿体尺度垂向构造形态的静态描述,到矿田尺度三维构造格架的系统解析,再到构造-流体耦合动力学机制的深度探索,五层楼、九龙脑、台阶式、扇状四大经典模式,构建了从现象总结到机理揭示、从局部矿体到系统成矿的理论体系,而珊瑚矿床早期构造格架的厘定、三维控矿特征的解析、构造-流体耦合机制的揭示,正是这三次认知跃迁在矿床尺度的具象化验证。

构造研究技术的迭代是认知深化的核心驱动力,形成了“宏观定性解析-微宏观构造-地球化学耦合分析-定量构造动力学模拟”的全链条技术体系,且在珊瑚矿床中实现了梯度化应用。早期野外填图、剖面测量等宏观技术,奠定了矿床三大构造体系的格架基础;中期同位素定年、流体包裹体分析等耦合技术,成为解析矿床构造-流体耦合机制的核心手段;现代构造应力场数值模拟、三维地质建模等定量技术,目前在矿床研究中尚处于起步阶段,未实现构造-流体耦合的定量模拟与深部构造的精细刻画。

珊瑚矿床作为南岭西段的典型案例,完整呈现了构造控矿理论与技术方法的融合应用路径,但其研究现状也集中暴露了当前南岭石英脉型黑钨矿构造控矿研究的共性短板:一是深部隐伏岩体顶面形态、隐伏断裂系统的研究精度不足;二是构造-流体-岩浆耦合的动力学过程缺乏定量研究,未实现成矿全过程的动态反演;三是区域与矿区构造的叠加重构机制研究尚未全面铺开,“区域-矿区-矿体”的多级控矿规律尚未深入探究。这些问题既是珊瑚矿床后续研究的核心突破方向,也为南岭石英脉型黑钨矿构造控矿研究的整体发展指明了路径,亦为后续矿床构造控矿研究的结论与展望提供了重要依据。

6. 结论

南岭石英脉型黑钨矿构造控矿研究,实现了从静态构造形态描述到动态构造-流体耦合机制解析的三次认知跃迁,四大经典模式构成了该类矿床构造控矿的基础理论体系;构造研究技术形成了“宏观构造解析-地球化学耦合分析-定量构造动力学模拟”的全链条方法体系,是推动构造控矿认知持续深化的重要驱动力。

基于当前研究进展与暴露的共性短板,未来石英脉型黑钨矿构造控矿研究可在以下方向寻求突破:第一,深化典型矿床的深部构造系统研究。长营岭矿段为示范区,首先系统收集钻孔编录、坑道测量及物探数据,构建矿区 500~1500 m 深度的三维地质结构模型,重点刻画隐伏花岗岩体顶面形态与主控断裂的深部产状变化;其次,利用有限元方法恢复成矿期古应力场,模拟裂隙发育的优势部位;最后,将预测结果与已知矿体空间分布进行对比验证,建立“珊瑚式”深部构造控矿预测模型;第二,推动构造-流体耦合的定量模拟研究。以长营岭矿段为单元,采用多物理场数值模拟软件(如 COMSOL Multiphysics),构建包含断裂几何形态、岩石力学参数与流体场的耦合模型;依据成矿期构造应力场数据,动态模拟断层滑移机制驱动的“裂隙张开-流体排泄-矿物沉淀”循环过程,定量计算黑钨矿的溶解度变化与沉淀速率;将模拟结果与矿脉群的品位、空间分布进行逐点对比,反推最优成矿动力学参数,建立定量动力学模型。第三,强化多级构造体系的叠合控矿研究。建议按“区域-矿区-矿体”三个尺度逐级解剖:区域尺度上,收集南岭西段地质与物探资料,识别东西向基底断裂与山字型构造的复合样式;矿区尺度上,

基于构造填图与坑道编录, 分期恢复古构造应力场, 构建三大构造体系的三维复合构造格架; 矿体尺度上, 针对典型矿脉开展裂隙产状统计与力学性质判别, 最终建立“深大断裂导浆-主干断裂配矿-次级裂隙容矿”的多级控矿模式。

参考文献

- [1] 李红亮, 宋慈安, 邓江. 广西珊瑚钨锡矿田的原生分带及矿化富集规律[J]. 华南地质, 2012, 28(3): 213-219.
- [2] 周娟娟, 黄祥林. 钟山县珊瑚钨锡矿床构造特征与控矿作用[J]. 现代矿业, 2013, 29(11): 61-63+68.
- [3] 韦安伟, 汪劲草, 莫志明, 等. 介于岩浆岩型与剪切带型之间的脉状钨锡矿床——广西珊瑚钨锡矿床新认识[J]. 桂林理工大学学报, 2015, 35(1): 8-14.
- [4] 李三忠, 臧艺博, 王鹏程, 等. 华南中生代构造转换和古太平洋俯冲启动[J]. 地质前缘, 2017(4): 213-225.
- [5] 徐先兵, 梁承华, 陈家驹, 等. 南岭构造带基础地质特征与成矿地质背景[J]. 地球科学, 2021, 46(4): 1133-1150.
- [6] 莫柱荪. 南岭地区花岗岩类成因系列的划分问题[J]. 中国区域地质, 1983(1): 17-21.
- [7] 赵正, 王登红, 陈毓川, 等. “九龙脑成矿模式”及其深部找矿示范: “五层楼+地下室”勘查模型的拓展[J]. 地质前缘, 2017, 24(5): 8-16.
- [8] 郭淑庆, 赵正, 郭聪, 等. 淘锡坑石英脉型钨矿床找矿新突破及“台阶式”勘查模型启示[J]. 矿床地质, 2024, 43(3): 563-577.
- [9] 方贵聪, 王登红, 冯佐海, 等. 赣南盘古山钨铋矿床发现扇状成矿现象[J]. 地质论评, 2021, 67(6): 1780-1784.
- [10] 方贵聪, 王登红, 冯佐海, 等. 华南石英脉型钨矿床扇状成矿的规律及其找矿意义[J]. 大地构造与成矿学, 2021, 45(3): 523-533.
- [11] 杨明, 王浩, 吴石头, 等. 钨矿床地球化学研究进展: 以黑钨矿 U-Pb、Sm-Nd、Lu-Hf 同位素年代学与微量元素为例[J]. 高校地质学报, 2021, 27(3): 249-263.
- [12] 倪纪文. 瑶岗仙钨矿床包体研究及成矿溶液特征的探讨[J]. 浙江大学学报(自然科学版), 1994(1): 73-81.
- [13] 王少秩, 赵正, 方贵聪, 等. 赣南樟(东坑)-九(龙脑)钨多金属矿床矿物学、年代学特征及其地质意义[J]. 地质前缘, 2017, 24(5): 120-130.
- [14] 刘国庆. 珊瑚、水岩坝脉状钨锡矿床的控矿构造特征及容矿构造分析[C]//中国地质科学院宜昌地质矿产研究所文集(17). 北京: 地质出版社, 1991: 128-139.
- [15] Stroh, A., Aellig, P.S. and Moulas, E. (2025) Numerical Modelling of Diffusion-Limited Mineral Growth for Geospeedometry Applications. *Geoscientific Model Development*, **18**, 10203-10220. <https://doi.org/10.5194/gmd-18-10203-2025>
- [16] 魏虹羽, 李世超, 王伟安. 地球动力学数值模拟算法的应用现状与展望[J]. 吉林大学学报(地球科学版), 2025, 55(1): 98-124.
- [17] 仝云霄, 栗旭升, 杨俊泉, 等. 基于资源一号 02D 高光谱数据的蚀变矿物提取与找矿预测[J]. 中国地质, 2026, 53(1): 60-76.
- [18] 宋慈安. 珊瑚钨锡矿床[M]. 北京: 北京工业大学出版社, 2001.
- [19] 罗允义, 林建辉, 蔡明海, 等. 广西富贺钟成矿区钨锡多金属成矿特征及成矿模式[J]. 地质论评, 2016, 62(S1): 253-255.
- [20] 赵义来, Ord, A., 汤静如, 等. 基于地表数据及产状数据的交切断层建模方法研究[J]. 大地构造与成矿学, 2023, 47(6): 1256-1266.
- [21] 李家驹. 广西珊瑚钨锡矿区成矿规律及成矿模式[J]. 桂林冶金地质学院学报, 1985(4): 307-314.
- [22] 邓江, 宋慈安, 李红亮. 广西珊瑚长营岭钨锡矿床成矿规律及深部边部外围找矿预测[J]. 中国钨业, 2012, 27(1): 22-26.
- [23] Sibson, R.H. (1981) Controls on Low-Stress Hydro-Fracture Dilatancy in Thrust, Wrench and Normal Fault Terrains. *Nature*, **289**, 665-667. <https://doi.org/10.1038/289665a0>
- [24] 李德东, 解洪晶, 孙燕, 等. 泵吸成矿作用: 一种流体运移动力学机制[J]. 黄金, 2023, 44(10): 71-78.
- [25] 韦访, 黄光琼, 周荣幸, 等. 广西石英脉型钨锡矿床地质特征与成因类型[J]. 矿产与地质, 2022, 36(2): 213-219.
- [26] 卢友月, 付建明, 程顺波, 等. 广西珊瑚钨锡矿床成矿年代学研究及其地质意义[J]. 大地构造与成矿学, 2016, 40(5): 939-948.