

桂北都庞岭地区猫儿石锡多金属矿床流体特征与成矿机制研究

林丽专, 张 辉, 蒙春岚, 张世昕, 白令安*

桂林理工大学地球科学学院, 广西 桂林

收稿日期: 2024年12月11日; 录用日期: 2025年1月15日; 发布日期: 2025年1月23日

摘 要

桂北都庞岭地区位于北东向钦杭成矿带与东西向南岭成矿带的复合部位, 区域内的锡多金属矿床尚未开展流体包裹体方面的分析测试工作, 成矿机制一直未能准确限定。为精确刻画区域内锡多金属成矿作用过程, 本文对猫儿石锡多金属矿床开展了流体包裹体显微测温 and 氢氧同位素分析。研究显示, 流体包裹体类型较为简单, 主要为富液两相包裹体和少量富气两相包裹体。从早到晚均一温度依次为 281℃~415℃、231℃~280℃和 154℃~230℃, 对应盐度为 4.63%~12.42% NaCleqv (平均 9.69%)、3.21%~13.66% NaCleqv (平均 9.24%) 和 2.06%~16.14% NaCleqv (平均 8.71%)。富液两相包裹体气相和液相成分均为 H₂O, 富气两相包裹体流体成分除 H₂O 外, 还含有少量 CO₂、N₂、CH₄; δD_{V-SMOW} 值为 -55.1‰~-67.1‰; $\delta^{18}O_{V-SMOW}$ 值为 10.2‰~12.9‰, 初步厘定初始成矿流体为贫 CO₂ 的 H₂O-NaCl 体系的岩浆热液, 成矿期逐渐向大气降水靠近。印支期岩浆结晶分异形成的富锡多金属流体沿断裂上升过程中, 与大气降水混合, 导致成矿物质卸载。因此, 流体混合是猫儿石锡多金属矿床锡的主要成矿机制。

关键词

流体包裹体, 成矿机制, 猫儿石锡多金属矿床, 都庞岭, 桂北

Fluid Characteristics and Metallogenic Mechanism of the Maoershi Tin Polymetallic Deposits in the Dupangling Area of Northern Guangxi

Lizhuan Lin, Hui Zhang, Chunlan Meng, Shixin Zhang, Lingan Bai*

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

*通讯作者。

文章引用: 林丽专, 张辉, 蒙春岚, 张世昕, 白令安. 桂北都庞岭地区猫儿石锡多金属矿床流体特征与成矿机制研究[J]. 地球科学前沿, 2025, 15(1): 104-114. DOI: 10.12677/ag.2025.151012

Abstract

The Dupangling area in northern Guangxi is situated within the composite section of the northeast Qinhang metallogenic belt and the east-west Nanling metallogenic belt. The analysis and testing of fluid inclusions in the Sn polymetallic deposits in this area have yet to be conducted, and the metallogenic mechanism remains to be accurately defined. In order to provide an accurate description of the mineralisation process of Sn polymetallic deposits in the region, this paper employed micro thermometry and hydrogen-oxygen isotope analysis of fluid inclusions in the Maoershi Sn polymetallic deposit. The study demonstrates that the types of fluid inclusions are relatively simple, comprising primarily liquid-rich two-phase inclusions and a minor quantity of gas-rich two-phase inclusions. The homogenisation temperatures ranged from 281°C to 415°C, 231°C to 280°C and 154°C to 230°C, with corresponding salinities of 4.63 to 12.42 wt% NaClequiv (average 9.69%), 3.21 to 13.66 wt% NaClequiv (average 9.24%) and 2.06 to 16.14 wt% NaClequiv (average 8.71%). The gas and liquid components of the liquid-rich two-phase inclusions are both constituted by H₂O. In addition to H₂O, the fluid components of the gas-rich two-phase inclusions also contain a small amount of carbon dioxide, nitrogen and methane. The δD value was found to be in the range of -55.1‰ to -67.1‰ VSMOW. The $\delta^{18}O$ water values span a range of 10.2‰ to 12.9‰ VSMOW, indicative of an initial ore-forming fluid comprising CO₂-poor H₂O-NaCl magmatic hydrothermal components, with the ore-forming period gradually approaching meteoric water. The Sn-rich polymetallic fluid, formed by the crystallisation and differentiation of the Indosinian magma, rises along the fault and mixes with atmospheric precipitation, resulting in the unloading of ore-forming materials. It can thus be concluded that fluid mixing represents the primary metallogenic mechanism responsible for the occurrence of Sn in the Maoershi tin polymetallic deposit.

Keywords

Fluid Inclusions, Ore-Forming Mechanism, Maoershi Sn Polymetallic Deposit, Dupangling Area, Northern Guangxi

Copyright © 2025 by author(s) and Hans Publishers Inc.

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

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



Open Access

1. 引言

都庞岭位于广西壮族自治区与湖南省交界处，是南岭地区大型花岗岩山系之一，构造岩浆活动期次多，钨锡等多金属矿化星罗棋布。前人对该区花岗岩成因、侵位时代以及钨锡多金属矿床特征、控矿因素、找矿潜力等方面开展了研究[1]-[6]，但由于缺乏成矿流体方面的数据，限制了对成矿机制的认识，严重制约了区域找矿勘查工作。猫儿石锡多金属矿床位于都庞岭复式岩体西南侧，是该区重要的钨锡多金属矿床，因此本文对其开展流体包裹体和氢氧同位素研究，精细刻画流体演化过程，进而探讨都庞岭地区钨锡成矿作用过程，并为区域钨锡找矿勘查提供科学依据。

2. 成矿地质背景

都庞岭位于北东向钦杭成矿带与东西向南岭成矿带的复合部位(图 1(a))，构造岩浆活动强烈，导致大量金属堆积，形成一系列 W-Sn-Cu-Pb-Zn 多金属矿床。区内出露地层主要为寒武系和奥陶系，其次为泥

盆系和石炭系，局部见白垩系[3]。寒武系为浅变质泥岩、砂岩夹数层灰岩；奥陶系为浅变质细砂岩、板岩等；泥盆系下部为粉砂岩、泥岩，上部为白云岩、灰岩夹细粒碎屑岩；石炭系为灰岩夹泥质、硅质、炭质岩薄层；白垩系为紫红色含砾砂岩粉砂岩、砾岩(图 1(b))。

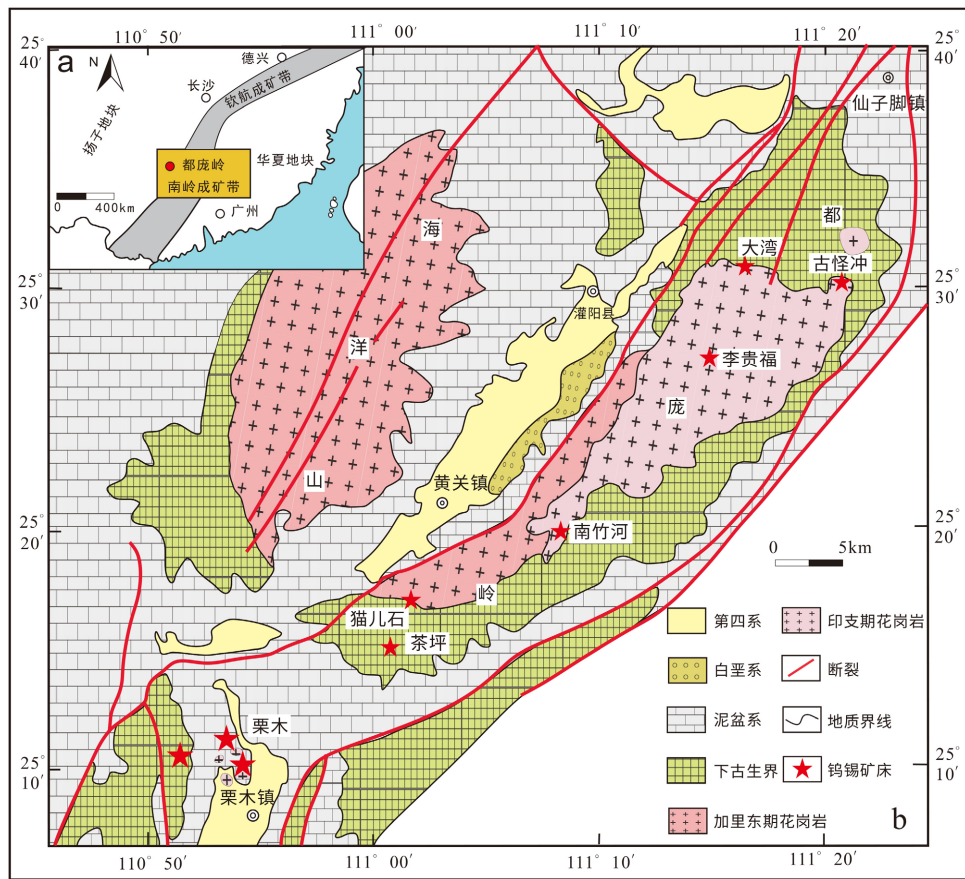


Figure 1. Simplified geological and mineral map of the Duopangling area (modified after [1] [6])
图 1. 都庞岭地区地质矿产简图(据[1] [6]修改)

构造活动强烈，先后经历了加里东期、印支、燕山、喜山等构造运动[4] [5]，多期次应力作用决定了都庞岭复背斜的复杂性和多样性，北东侧以深断裂带为界，北西侧构造较为复杂，以北东向断裂和褶皱为主，并伴随北西向断裂出现；南东侧构造相对简单，主要由北东向的都庞岭复式背斜及与之相伴的北东向断裂组成，往西南至栗木一带亦出现南北向断裂和褶皱[1]。

岩浆作用频繁，多期花岗质岩浆侵入，形成都庞岭复式岩体，按侵入时代分为加里东期(422~407 Ma)和印支期(222~215 Ma)。加里东期岩体受区域断裂构造控制，呈长条状产于复式岩体西部，南段呈北东向，北段呈北北东向展布，岩性主要为黑云母二长花岗岩和花岗闪长岩。印支期岩体呈倒置直角三角形产于复式岩体东部，北北东向展布，主要为粗中粒斑状黑云母二长花岗岩、中粒环斑黑云母二长花岗岩及二云母二长花岗岩。

区域地质调查结果显示，都庞岭地区矿床类型主要为蚀变花岗岩型、蚀变破碎带型、云英岩型和石英脉型，其中栗木岩体含矿最为丰富，发育有大型锡多金属与钨锡矿床，分别为老虎头、金竹源、狮子岭与水溪庙[7] [10]；以及中型锡多金属及钨锡矿床，如三个黄牛、鱼菜等[9] [11]。都庞岭东体发育有李贵福钨锡矿、南竹河锡矿、古怪冲锡矿等[3] [12] [13]。

3. 矿床地质特征

猫儿石锡多金属矿床位于都庞岭复式岩体南西侧，出露地层为晚寒武世边溪组石英砂岩、页岩、细粒砂岩，奥陶纪白洞组的中厚层状细晶灰岩，中泥盆世信都组的中厚层状细砂岩、粉砂岩、泥质粉砂岩 (图 2)。

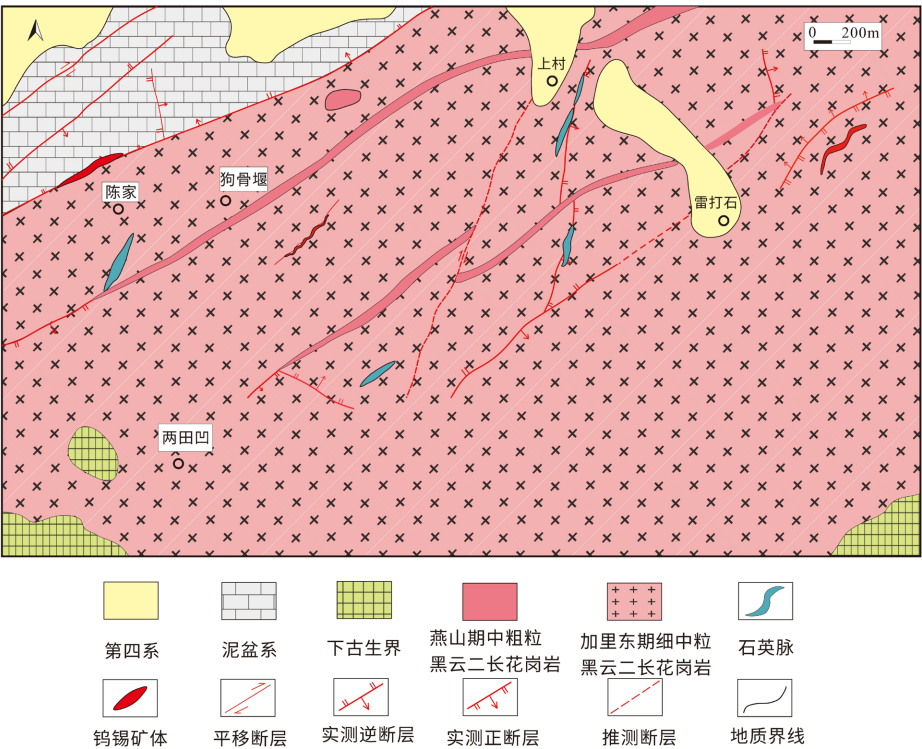


Figure 2. Geological map of the Maoershi Sn polymetallic deposit [6]
图 2. 猫儿石锡多金属矿床地质图[6]

矿区断裂发育，主要为北东向和近南北向断裂，近南北向断裂为后期断裂，切割北东向断裂，造成断裂移动错开，北东向断裂是主要的导矿、容矿、成矿构造。

矿区主要出露加里东期黑云母二长花岗岩，与围岩呈侵入接触关系，倾角约 40°，接触变质带宽 300~500 m，无明显冷凝边，围岩角岩化。此外可见细晶花岗岩脉侵入加里东期花岗岩体中。

矿体赋存于加里东期花岗岩或信都组接触带的石英脉中，明显受断裂控制，波状延伸，共有三条矿带，长 100~300 m，厚 0.3~10 m，倾向北西，倾角 50~80°，锡品位 0.3%~0.5%。其中Ⅰ矿体呈脉状产于泥盆系中统信都组(D_{2x})与花岗岩接触断裂破碎带中，锡钨等金属矿物呈脉状、浸染状、团块状充填于硅化构造角砾岩、硅化碎裂岩中，矿物组合主要为锡石、闪锌矿、方铅矿、黄铁矿、白钨矿、石英、方解石等，多呈它形-半自形-自形晶结构。围岩蚀变有黄(褐)铁矿化、硅化、绢云母化等。

4. 样品采集及分析方法

本次工作共采集猫儿石锡多金属矿床主成矿阶段(锡石-硫化物阶段) 5 件石英样品开展流体包裹体研究和氢氧同位素分析。

流体包裹体显微测温 and 激光拉曼成分分析在广西隐伏金属矿产勘查重点实验室完成。包裹体测温仪器为 Linkam THMS 600 型冷热台(-196℃~600℃)，测试精度为±0.1℃。测试前使用国际标样(人造纯 H₂O

及 $w(\text{NaCl}_{\text{eq}})$ 为 25% 的 $\text{H}_2\text{O}-\text{NaCl}$ 包裹体)校正参数。测试期间,当温度 $<30^\circ\text{C}$ 时,升温速率为 $20^\circ\text{C}/\text{min}$;当温度 $<180^\circ\text{C}$ 时,升温速率为 $5^\circ\text{C}/\text{min}$;当温度接近相变化及冰点时,升温速率小于 $0.2^\circ\text{C}/\text{min}$ 。激光拉曼光谱使用仪器为 Renishaw Syetem 2000 光谱仪,激光波长为 514 nm ,激光功率 20 mW ,激光束斑直径 $1\text{ }\mu\text{m}$,光谱分辨率 $1\sim2\text{ cm}^{-1}$,流体包裹体以 30 s 积分时间、二次扫描次数的条件采集光谱。

氢氧同位素分析在中国科学院地球化学研究所矿床地球化学国家重点实验室完成。测试仪器为 MAT253,以 SMOW 为标准,氧同位素分析精度为 $\pm 0.2\text{‰}$,氢同位素分析精度为 $\pm 2\text{‰}$ 。石英单矿物经提纯后研磨至 200 目左右,氧同位素分析方法为 BrF_5 法[14],在 $500^\circ\text{C}\sim 600^\circ\text{C}$ 与 BrF_5 反应 14 h,将反应生成的 O_2 与石墨反应转化为 CO_2 ,然后使用质谱仪分析;氢同位素分析采用爆裂法,加热石英样品使包裹体爆裂,释放挥发分,提取水蒸气,然后在 400°C 条件下使水与锌反应产生氢气,再用液氮冷冻,收集到有活性炭的样品瓶中[15],然后使用质谱仪分析。

5. 流体包裹体与氢氧同位素分析结果

5.1. 流体包裹体岩相学

猫儿石锡多金属矿床流体包裹体较为发育(图 3),常呈孤立分散状分布,类型较为简单,以无色-灰色富液两相包裹体为主,少量颜色稍深的富气两相包裹体,直径较小,一般在 $3\sim 15\text{ }\mu\text{m}$ 之间,少数可达到 $30\text{ }\mu\text{m}$ 以上。

富液两相包裹体(WL 型):此类包裹体数量最多,呈孤立状、小群或离散分布,大小通常为 $3\sim 15\text{ }\mu\text{m}$,气液比为 $5\%\sim 20\%$,一般呈不规则状、椭圆形、长方形等。

富气两相包裹体(WG 型):此类包裹体数量较少,与 WL 型共生产出,大小一般在 $4\sim 14\text{ }\mu\text{m}$ 之间,气液比为 $30\%\sim 40\%$ 不等,颜色较暗,多为不规则状、椭圆形、长条形等。

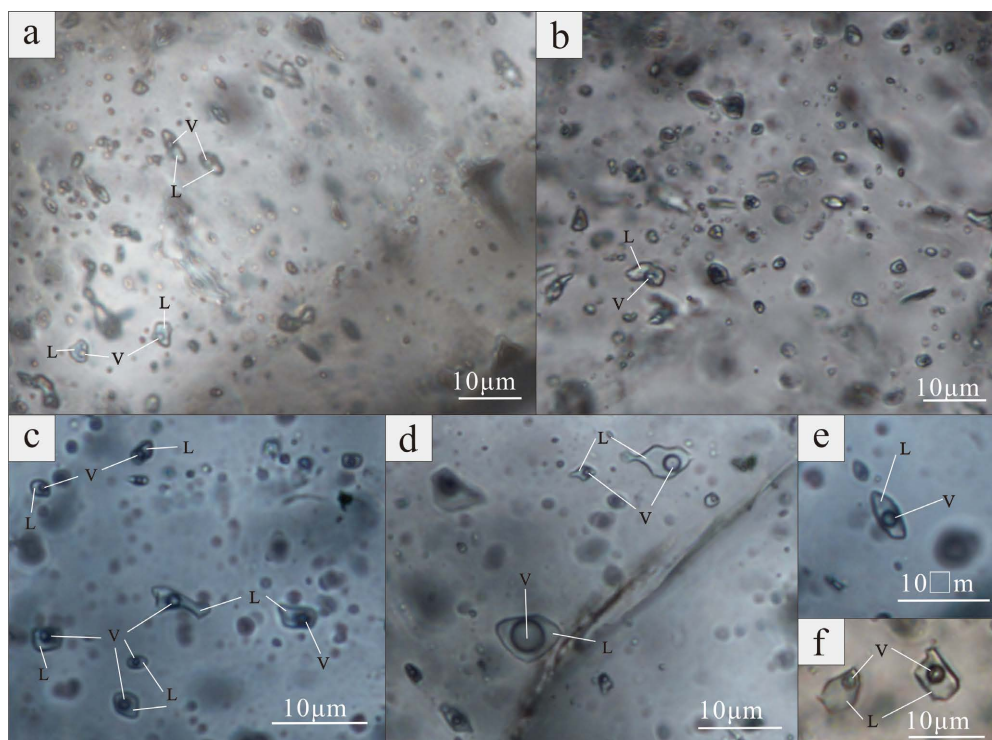


Figure 3. Petrographic characteristics of fluid inclusions in the Maoershi Sn polymetallic deposit

图 3. 猫儿石锡多金属矿床流体包裹体岩相学特征

5.2. 流体包裹体显微测温

猫儿石锡多金属矿床流体包裹体测温结果显示(见表 1)，成矿过程中发生了明显的流体叠加，主成矿阶段石英脉发育高中低温流体包裹体，整体上均一温度介于 155℃~415℃之间，可划分为三个温度区间，分别与三个成矿阶段相对应(图 4)；盐度一般为 2.07%~16.05% NaCleq 之间(图 5)。

Table 1. Fluid inclusion characteristics and micro-thermometry results of the Maoershi Sn polymetallic deposit
表 1. 猫儿石锡多金属矿床流体包裹体特征及测温结果

样品编号	成矿阶段	类型(测试数)	大小/ μm	气液比/%	均一温度/ $^{\circ}\text{C}$		冰点/ $^{\circ}\text{C}$	盐度/% NaCleq		密度/ g/cm^3	
					范围	平均		范围	平均	范围	平均
MES-01	中	WL 型(26)	3~15	10~25	155~310	222	-12.1~-1.2	2.06~16.05	6.00	0.74~1.03	0.88
		WG 型(6)	4~13	15~30	239~270	264	-6.0~-1.9	3.23~9.21	6.49	0.82~0.88	0.85
MES-02	中	WL 型(26)	2~12	10~25	154~314	237	-7.9~-4.1	6.59~11.58	9.36	0.87~0.94	0.90
		WG 型(17)	5~10	15~35	222~389	272	-8.6~-3.1	5.11~12.39	8.86	0.68~0.88	0.84
MES-03	中	WL 型(20)	3~14	10~30	223~284	255	-9.7~-5.2	8.14~13.62	10.35	0.84~0.91	0.87
		WG 型(10)	5~13	20~40	245~345	283	-7.9~-4.5	7.17~11.58	9.94	0.77~0.90	0.84
MES-04	中	WL 型(23)	2~14	10~30	187~270	229	-8.8~-5.8	8.95~12.62	10.70	0.85~0.97	0.91
		WG 型(11)	3~15	20~35	240~305	264	-8.5~-4.2	6.74~12.28	10.35	0.82~0.91	0.87
MES-05	中	WL 型(20)	3~15	10~40	194~385	242	-8.8~-4.0	8.14~12.62	10.21	0.68~0.97	0.88
		WG 型(11)	4~8	20~40	232~415	275	-8.4~-4.3	6.88~12.16	10.04	0.60~0.91	0.85

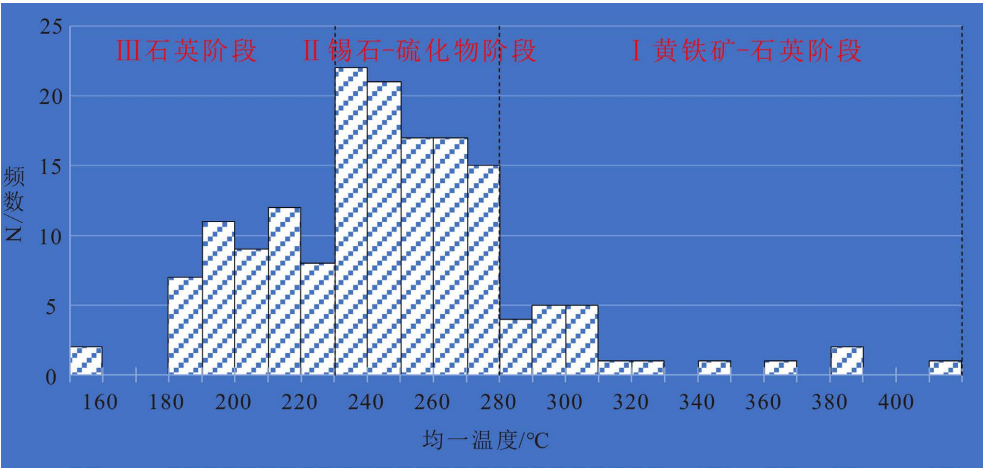


Figure 4. Histogram of homogenization temperatures of fluid inclusions in the Maoershi Sn polymetallic deposit
图 4. 猫儿石锡多金属矿床流体包裹体均一温度直方图

黄铁矿 - 石英阶段(I)流体包裹体均为气液两相型，均一温度为 281℃~415℃，采用[16]的盐度公式，计算盐度为 4.63%~12.42% NaCleq，平均 9.69% NaCleq。基于经验公式[16] [17]对气液两相包裹体的捕获压力进行了估算，捕获压力为 25.3~41.0 MPa。

锡石 - 硫化物阶段(II)主要发育气液两相包裹体，均一温度为 231℃~280℃，盐度介于 3.21%~13.66% NaCleq 之间，平均 9.24% NaCleq，捕获压力为 18.6~32.0 MPa。

石英阶段(III)发育气液两相包裹体，均一温度为 154℃~230℃，盐度为 2.06%~16.14% NaCleq 之间，

平均 8.71% NaCleq, 捕获压力为 13.9~25.0 MPa。

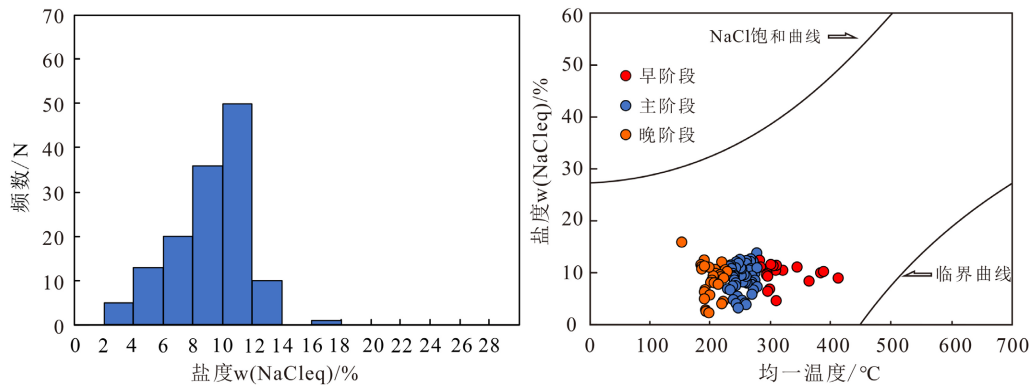


Figure 5. Histogram of fluid inclusion salinities and salinity-homogenization temperature relationship in the Maoershi Sn polymetallic deposit (base map after [18])
图 5. 猫儿石锡多金属矿床流体包裹体盐度直方图与盐度 - 均一温度关系图(底图据[18])

5.3. 流体包裹体激光拉曼分析

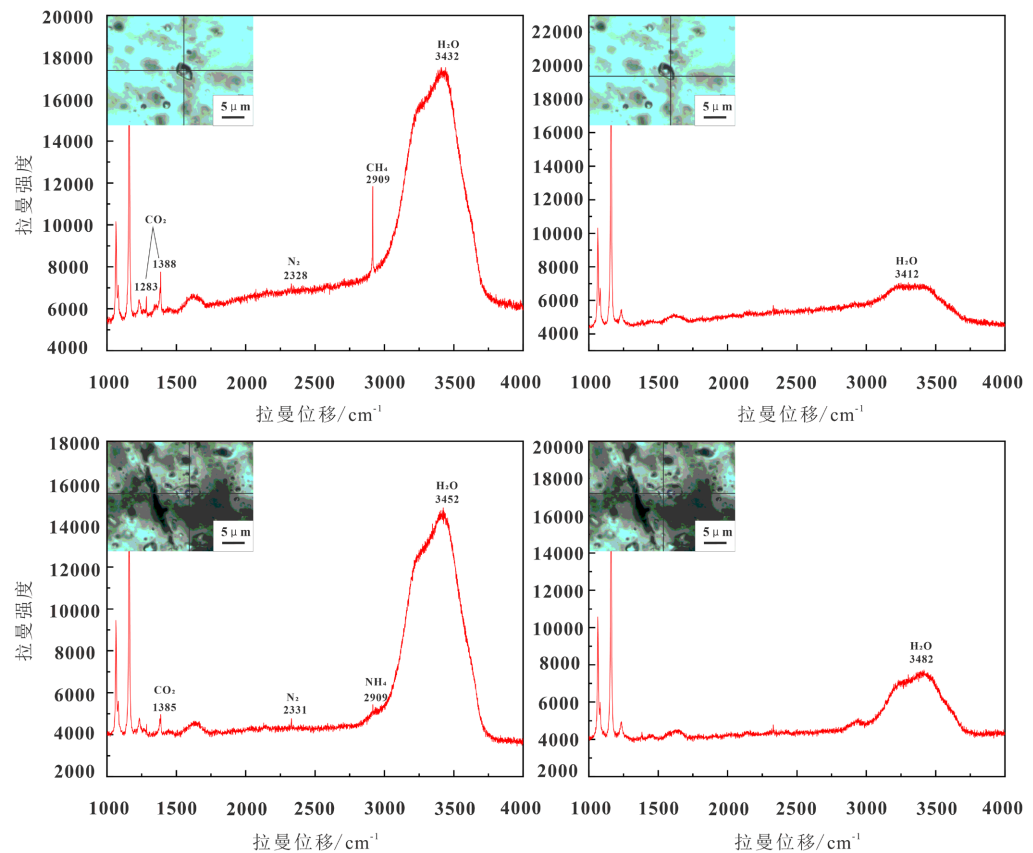


Figure 6. Laser Raman spectra of fluid inclusions in the Maoershi Sn polymetallic deposit
图 6. 猫儿石锡多金属矿床流体包裹体激光拉曼光谱

猫儿石锡多金属矿床的富液相、富气相气液两相型包裹体的激光拉曼成分分析显示(图 6), 富液两相包裹体(WL 型)均仅检测到了宽泛的 H₂O 包络峰, 富气两相包裹体(WG 型)除检测到 H₂O 包络峰外, 还检

测到 CO₂、N₂、CH₄ 谱峰，表明成矿流体为贫 CO₂ 的 NaCl-H₂O 体系。

5.4. 氢氧同位素地球化学

猫儿石锡多金属矿床的 5 件石英脉的氢氧同位素分析数据，根据公式 $1000 \ln \alpha_{\text{石英-水}} = 3.38 \times 10^6/T^2 - 3.40$ [19]，换算平衡成矿流体中的氧同位素，数据结果见表 2。

Table 2. Hydrogen-oxygen isotope analysis results of the Maoershi Sn polymetallic deposit
表 2. 猫儿石锡多金属矿床氢氧同位素实验分析结果

样品编号	矿物	$\delta D_{\text{V-SMOW}}/\text{‰}$	$\delta^{18} \text{O}_{\text{V-SMOW}}/\text{‰}$	Th/°C	$\delta^{18} \text{O}_{\text{H}_2\text{O}}/\text{‰}$
MES-01	石英	-59.4	12.2	222	1.81
MES-02	石英	-59.2	12.9	237	3.30
MES-03	石英	-55.1	11.8	255	3.08
MES-04	石英	-65.2	10.2	242	0.86
MES-05	石英	-67.1	12.4	229	2.39

据表 2 可知，猫儿石锡多金属矿床石英脉 $\delta D_{\text{V-SMOW}}$ 值变化范围为-55.1‰~-67.1‰； $\delta^{18} \text{O}_{\text{V-SMOW}}$ 值的变化范围为 10.2‰~12.9‰；结合对应样品的流体包裹体测温数据，利用矿物-水同位素分馏方程 $1000 \ln \alpha_{\text{石英-水}} = 3.38 \times 10^6/T^2 - 3.40$ ，计算出主成矿阶段的 $\delta^{18} \text{O}_{\text{H}_2\text{O}}$ 为 3.08‰~3.30‰ (MES-04 样品有所不同，为 0.86‰，可能有其他流体混入)，表明主成矿流体主要为岩浆水，晚成矿阶段 $\delta^{18} \text{O}_{\text{H}_2\text{O}}$ 为 1.81‰~2.39‰，成矿晚期流体逐渐向大气降水漂移(图 7)。

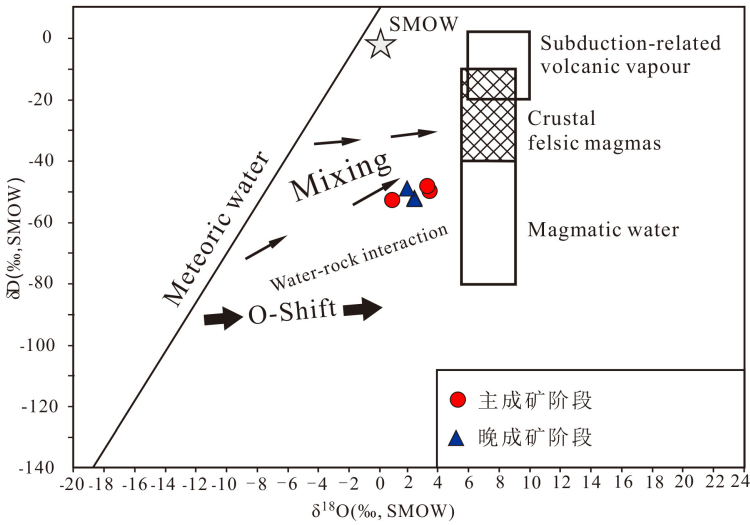


Figure 7. δD - $\delta^{18} \text{O}$ diagram of the ore-forming fluids in the Maoershi Sn polymetallic deposit (base map after [20])

图 7. 猫儿石锡多金属矿床成矿流体 δD - $\delta^{18} \text{O}$ 图解(底图据[20])

6. 讨论

6.1. 成矿流体性质

流体包裹体岩相学显示，猫儿石锡多金属矿床中流体包裹体主要为气液两相型和少量纯液相型包裹

体, 未观察到 CO_2 三相包裹体和含子晶三相包裹体。激光拉曼光谱分析结果显示, 富液两相包裹体(WL型)气相和液相成分均为 H_2O , 富气两相包裹体(WG型)流体成分除 H_2O 外, 还含有少量 CO_2 、 N_2 、 CH_4 , 说明成矿流体为贫 CO_2 的 $\text{NaCl-H}_2\text{O}$ 体系。石英脉 $\delta\text{D}_{\text{v-SMOW}}$ 值为 $-55.1\text{‰} \sim -67.1\text{‰}$; $\delta^{18}\text{O}_{\text{v-SMOW}}$ 值为 $10.2\text{‰} \sim 12.9\text{‰}$; 表明主成矿流体为岩浆水, 晚成矿阶段 $\delta^{18}\text{O}_{\text{H}_2\text{O}}$ 为 $1.81\text{‰} \sim 2.39\text{‰}$, 成矿晚期流体逐渐向大气降水漂移(图 7)。因此, 猫儿石锡多金属矿床初始成矿流体贫 CO_2 的 $\text{H}_2\text{O-NaCl}$ 体系的岩浆热液。

6.2. 成矿流体演化与成矿机制

流体中 Sn 主要有 Sn^{2+} 、 Sn^{4+} 两种价态, 通常以较低的价态在流体内迁移。热力学计算和实验室模拟显示, 锡主要以复杂络合物形态在流体中搬运, 相同的物理化学条件下, 锡络合物迁移能力顺序为氯化物络合物 $\text{SnCl}_{1-3} > \text{SnCl}_2 > \text{SnCl}^{1+}$, 硫化物络合物 $\text{Sn}(\text{HS})_2 > \text{Sn}(\text{H}_2\text{S})^{2+}$, 羟基络合物 $\text{Sn}(\text{OH})_{1-3} > \text{Sn}(\text{OH})_2 > \text{Sn}(\text{OH})^{1+}$ [21]-[23]。流体中锡石沉淀主要受温度、氧逸度、压力及 pH 值控制, 温度降低、氧逸度升高、压力降低及 pH 值增大, 对锡石沉淀有利。前人研究认为, 锡的沉淀机制有冷却、流体减压“沸腾”或不混溶、水岩反应、不同组分或不同性质的流体混合或上述机制的综合作用[24]-[28]。

显微测温结果显示, 猫儿石锡多金属矿床的成矿流体系统从早到晚发生了一系列变化(图 8)。早成矿阶段流体具有中高温($281^\circ\text{C} \sim 415^\circ\text{C}$)、中等盐度($4.63\% \sim 12.42\%$, 平均 9.69% NaCleg)的含 CO_2 、 CH_4 的 $\text{H}_2\text{O-NaCl}$ 岩浆流体特征; 主成矿阶段成矿流体为中低温($231^\circ\text{C} \sim 280^\circ\text{C}$)、中低盐度($3.21\% \sim 13.66\%$, 平均 9.24% NaCleg)的 $\text{H}_2\text{O-NaCl}$ 体系, 晚成矿阶段成矿流体为低温($154^\circ\text{C} \sim 230^\circ\text{C}$)、中低盐度($2.06\% \sim 16.14\%$, 平均 8.71% NaCleg), 流体逐渐向大气降水漂移。从早到晚, 温度具有显著下降的趋势, 但盐度变化相对较小。

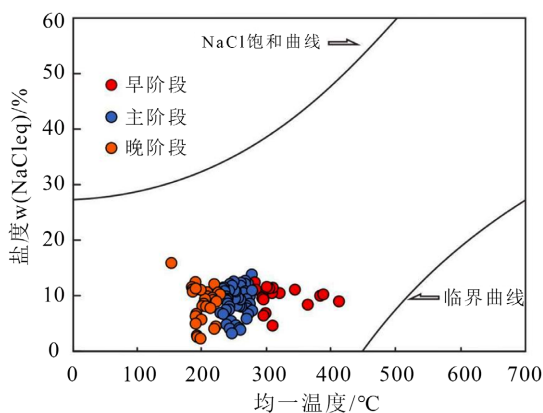


Figure 8. Salinity-homogenization temperature relationship diagram of fluid inclusions in the Maoershi Sn polymetallic deposit (base map after [18])

图 8. 猫儿石钨锡多金属矿床流体包裹体盐度 - 均一温度关系图(底图据[18])

猫儿石钨锡多金属矿床矿体赋存于加里东期花岗岩或与信都组接触带的石英脉中, 明显受断裂控制, 围岩蚀变较弱。流体包裹体岩相学、显微测温结果均未见流体“沸腾”、不混溶和水岩反应的证据, 氢氧同位素组成则显示大气降水逐渐混入, 并导致锡等成矿物质卸载。

综上所述, 猫儿石锡多金属矿床的岩浆热液流体, 在沿着断裂向上运移过程中, 温度持续下降, 并与大气降水混合, 最终导致成矿物质卸载。因此, 流体混合是导致矿质沉淀的主要机制。

6.3. 成矿模式

都庞岭印支期花岗岩侵位时限 $239 \sim 209$ Ma, 滞后于印支板块向华南板块俯冲碰撞的主碰撞期(即 $258 \sim 231$ Ma 同碰撞造山阶段[29]), 与后造山阶段时限吻合。结合前人岩相学、地球化学及 Sr-Nd-Hf 同位

素研究成果,都庞岭印支期岩体具有 A 型花岗岩特征、较高的 $\varepsilon_{\text{Nd}}(t)$ 值($-8.74 \sim -8.13$)和 $\varepsilon_{\text{Hf}}(t)$ 值($-12.0 \sim -1.4$)以及较年轻的 Nd 模式年龄。研究显示,壳源型花岗岩 Nd 同位素组成偏高的原因,可能是新生幔源物质的加入,亦或来源于年轻地壳物质的部分熔融。中国东南部基底岩石的 Nd 模式年龄介于 2.2~1.8 Ga 之间[30],都庞岭印支期花岗岩的 Nd 模式年龄(1.71~1.66 Ga)低于中国东南部基底岩石的 Nd 模式年龄,因而都庞岭花岗岩的成因不倾向于年轻基底地壳,伸展背景下软流圈地幔上涌诱发的幔源岩浆沿区域性构造-岩浆带底侵,导致地壳物质重熔的产物[1][2]。都庞岭印支期锡多金属矿床形成于碰撞和后碰撞环境向板内伸展环境转换的构造背景,伸展构造为岩浆的上涌和钨锡成矿提供有利通道。

印支期都庞岭花岗质岩浆沿背斜侵入,由于岩浆流动分异、结晶分异作用,大量钨锡等成矿物质及挥发分聚集在都庞岭复式背斜顶部,形成类似栗木矿田的蚀变花岗岩型钨锡多金属矿床,但由于后期剥蚀深度巨大,花岗岩大面积出露,导致都庞岭顶部的蚀变花岗岩型钨锡多金属矿床未能得以有效保存而消失。岩浆上升侵位时,岩体边部局部聚集富含钨锡的成矿流体,沿破碎带向上运移,并交代破碎带两侧岩石,同时与沿破碎带向下渗流的大气降水混合,形成构造蚀变岩型锡多金属矿床,如南竹河。当破碎带不发育,成矿流体沿断裂上升,并与下渗的大气降水混合,则形成石英脉型锡多金属矿床,如猫儿石、八板桥等。

7. 结论

1) 猫儿石锡多金属矿床石英脉中流体包裹体类型较为简单,主要为富液两相包裹体,少量为富气两相包裹体。

2) 猫儿石锡多金属矿床初始成矿流体贫 CO_2 的 $\text{H}_2\text{O}-\text{NaCl}$ 体系的岩浆热液。均一温度相对较高,从早到晚依次为 $281^\circ\text{C} \sim 415^\circ\text{C}$ 、 $231^\circ\text{C} \sim 280^\circ\text{C}$ 和 $154^\circ\text{C} \sim 230^\circ\text{C}$, 对应盐度为 4.63%~12.42% NaCleqv (平均 9.69%)、3.21%~13.66% NaCleqv (平均 9.24%)和 2.06%~16.14% NaCleqv (平均 8.71%)。

3) 印支期都庞岭花岗质岩浆结晶分异形成的富锡成矿流体,沿断裂上升,并与下渗的大气降水混合,导致成矿物质卸载,因此流体混合是锡的主要成矿机制。

基金项目

本研究受广西地质矿产开发局 2022 年局部门预算前期地质科研和海洋地质项目“桂东北都庞岭地区钨锡成矿规律与找矿预测”(项目编号:桂地矿综研[2022]17 号)资助。

参考文献

- [1] 徐德明,付建明,陈希清,等.都庞岭环斑花岗岩的形成时代、成因及其地质意义[J].大地构造与成矿学,2017,41(3): 561-576.
- [2] 陈迪,罗鹏,曾志方,等.湘南都庞岭复式花岗岩成因及地质意义:矿物化学、锆石 U-Pb 年代学、地球化学与 Nd-Hf 同位素制约[J].地质力学学报,2022,28(4): 617-641.
- [3] 龚名文,陆小平,路启福,等.都庞岭地区锡多金属矿床地质特征及矿床成因[J].华南地质与矿产,2005(2): 80-86.
- [4] 李晓峰,冯佐海,肖荣,等.桂东北钨锡稀有金属矿床的成矿类型、成矿时代及其地质背景[J].地质学报,2012,86(11): 1713-1725.
- [5] 陆小平.桂东北地区钨锡找矿潜力与成矿预测初步探讨[J].矿产与地质,2009,23(4): 316-321,334.
- [6] Hui, Z., Lingan, B., Chongjin, P., Yu, D., Zuohai, F., Xijun, L., et al. (2023) Indosinian W-Sn Mineralization in the Dupangling Area, Western Nanling: Cassiterite U-Pb Dating and Trace Element Data for the Maoershi Sn Polymetallic Deposit. *Ore Geology Reviews*, 163, Article ID: 105807. <https://doi.org/10.1016/j.oregeorev.2023.105807>
- [7] 曹瑞欣.广西栗木水溪庙矿化花岗岩特征及岩体成因研究[D]:[硕士学位论文].北京:中国地质大学,2009.
- [8] 马丽艳,付建明,程顺波,等.广西栗木锡铌钽矿田矿化花岗岩锆石 SHRIMP U-Pb 定年及其意义[J].华南地质

- 与矿产, 2013, 29(4): 292-298.
- [9] Feng, M., Feng, Z., Kang, Z., Fu, W., Qing, Y., Hu, R., *et al.* (2019) Establishing an Indosinian Geochronological Framework for Episodic Granitic Emplacement and W-Sn-Nb-Ta Mineralization in Limu Mining District, South China. *Ore Geology Reviews*, **107**, 1-13. <https://doi.org/10.1016/j.oregeorev.2019.02.012>
- [10] Huang, W., Wu, J., Liang, H., Zhang, J., Ren, L. and Chen, X. (2020) Ages and Genesis of W-Sn and Ta-Nb-Sn-W Mineralization Associated with the Limu Granite Complex, Guangxi, China. *Lithos*, **352**, Article ID: 105321. <https://doi.org/10.1016/j.lithos.2019.105321>
- [11] 邓贵安, 吴继伟, 汪恕生, 等. 栗木矿田三个黄牛花岗岩型钨锡矿床地质特征[J]. 矿产与地质, 2012, 26(1): 1-6.
- [12] 解惠, 田景春, 张桂林, 等. 广西南竹河锡多金属矿床地质特征与构造控矿规律[J]. 成都理工大学学报(自然科学版), 2010, 37(3): 273-278.
- [13] 邹先武, 崔森, 屈文俊, 等. 广西都庞岭李贵福钨锡多金属矿 Re-Os 同位素定年研究[J]. 中国地质, 2009, 36(4): 837-844.
- [14] Clayton, R.N. and Mayeda, T.K. (1963) The Use of Bromine Pentafluoride in the Extraction of Oxygen from Oxides and Silicates for Isotopic Analysis. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, **27**, 43-52. [https://doi.org/10.1016/0016-7037\(63\)90071-1](https://doi.org/10.1016/0016-7037(63)90071-1)
- [15] Coleman, M.L., Shepherd, T.J., Durham, J.J., Rouse, J.E. and Moore, G.R. (1982) Reduction of Water with Zinc for Hydrogen Isotope Analysis. *Analytical Chemistry*, **54**, 993-995. <https://doi.org/10.1021/ac00243a035>
- [16] Hall, D.L., Sterner, S.M. and Bodnar, R.J. (1988) Freezing Point Depression of NaCl-KCl-H₂O Solutions. *Economic Geology*, **83**, 197-202. <https://doi.org/10.2113/gsecongeo.83.1.197>
- [17] Potter, R.W. (1978) The Volumetric Properties of Aqueous Sodium Chloride Solutions from 0°C to 500°C at Pressures up to 2000 Based on a Regression of Available Data in the Literature. Geological Survey Bulletin 1421-C.
- [18] Bodnar, R.J. (1983) A Method of Calculating Fluid Inclusion Volumes Based on Vapor Bubble Diameters and P-V-T-X Properties of Inclusion Fluids. *Economic Geology*, **78**, 535-542. <https://doi.org/10.2113/gsecongeo.78.3.535>
- [19] Clayton, R.N., O'Neil, J.R. and Mayeda, T.K. (1972) Oxygen Isotope Exchange between Quartz and Water. *Journal of Geophysical Research*, **77**, 3057-3067. <https://doi.org/10.1029/jb077i017p03057>
- [20] Hedenquist, J.W. and Lowenstern, J.B. (1994) The Role of Magmas in the Formation of Hydrothermal Ore Deposits. *Nature*, **370**, 519-527. <https://doi.org/10.1038/370519a0>
- [21] Wu, J., Li, H., Mathur, R., Bouvier, A., Powell, W., Yonezu, K., *et al.* (2023) Compositional Variation and Sn Isotope Fractionation of Cassiterite during Magmatic-Hydrothermal Processes. *Earth and Planetary Science Letters*, **613**, Article ID: 118186. <https://doi.org/10.1016/j.epsl.2023.118186>
- [22] Liu, X., Yu, P. and Xiao, C. (2023) Tin Transport and Cassiterite Precipitation from Hydrothermal Fluids. *Geoscience Frontiers*, **14**, Article ID: 101624. <https://doi.org/10.1016/j.gsf.2023.101624>
- [23] 任涛, 李欢. 与花岗岩有关的锡成矿研究进展[J]. 中南大学学报(自然科学版), 2022, 53(2): 514-534.
- [24] Ni, P., Wang, X., Wang, G., Huang, J., Pan, J. and Wang, T. (2015) An Infrared Microthermometric Study of Fluid Inclusions in Coexisting Quartz and Wolframite from Late Mesozoic Tungsten Deposits in the Gannan Metallogenic Belt, South China. *Ore Geology Reviews*, **65**, 1062-1077. <https://doi.org/10.1016/j.oregeorev.2014.08.007>
- [25] Xiong, Y., Shao, Y., Zhou, H., Wu, Q., Liu, J., Wei, H., *et al.* (2017) Ore-Forming Mechanism of Quartz-Vein-Type W-Sn Deposits of the Xitian District in SE China: Implications from the Trace Element Analysis of Wolframite and Investigation of Fluid Inclusions. *Ore Geology Reviews*, **83**, 152-173. <https://doi.org/10.1016/j.oregeorev.2016.12.007>
- [26] Peng, N., Jiang, S., Xiong, S. and Pi, D. (2018) Fluid Evolution and Ore Genesis of the Dalingshang Deposit, Dahutang W-Cu Ore Field, Northern Jiangxi Province, South China. *Mineralium Deposita*, **53**, 1079-1094. <https://doi.org/10.1007/s00126-018-0796-2>
- [27] 王旭东, 倪培, 袁顺达, 等. 赣南木梓园钨矿流体包裹体特征及其地质意义[J]. 中国地质, 2012, 39(6): 1790-1797.
- [28] 陈剑锋, 杜云, 熊伊曲, 等. 南岭加里东期钨锡矿床成矿机制研究: 以湘西南落家冲矿床为例[J]. 岩石学报, 2023, 39(6): 1693-1716.
- [29] 李响, 王令占, 涂兵, 等. 粤西北印支期太保岩体的锆石 U-Pb 年代学、地球化学及岩石成因[J]. 地球科学, 2021, 46(4): 1199-1216.
- [30] 陈江峰, 郭新生, 汤加富, 等. 中国东南地壳增长与 Nd 同位素模式年龄[J]. 南京大学学报(自然科学版), 1999, 35(6): 649-658.