

doi: 10.12097/gbc.2022.11.035

滇东南南温河钨矿床成因和成矿时代：来自矿床地质特征和 Sm-Nd 同位素年龄的证据

李顺庭^{1,2}, 祝新友^{1,2}, 路增龙¹, 张定才³, 韩胜康³, 蒲兴明³, 李孝光³

LI Shunting^{1,2}, ZHU Xinyou^{1,2}, LU Zenglong¹, ZHANG Dingcai³, HAN Shengkang³, PU Xingming³, LI Xiaoguang³

1. 中色紫金地质勘查(北京)有限责任公司, 北京 100012;

2. 北京矿产地质研究院有限责任公司, 北京 100012;

3. 文山麻栗坡紫金钨业集团有限公司, 云南 文山 663600

1. Sino-Zijin Resources Ltd., Beijing 100012, China;

2. Beijing Institute of Geology and Mineral Resources Co., Ltd., Beijing 100012, China;

3. Wenshan Malipo Zijin Tungsten Industry Group Co., Ltd., Wenshan 663600, Yunnan, China

摘要: 南温河钨矿是滇东南地区规模最大的白钨矿床。从加里东期开始, 区内遭受了多期构造-变质作用, 地质作用复杂, 导致以往对矿床成因、成矿时代等关键问题一直存在不同认识。在详实的野外地质工作基础上, 结合前人研究成果, 认为其为岩浆-热液控制的矽卡岩型白钨矿床; 成矿热液是岩浆-热液过渡态流体, 具体表现形式为“穿层”和“顺层”石英脉-长石石英脉, 其控制了矽卡岩化和白钨矿化; 目前勘探工作揭露的层状、似层状矽卡岩矿体为“浆-液过渡成矿流体”顺层交代的产物。获得南温河钨矿 Sm-Nd 同位素年龄为 126 ± 6.7 Ma ($n=7$, MSWD=0.33), 与区内构造研究成果和其他年代学成果获得良好的印证, 成矿作用与燕山晚期岩浆活动有关。结合矿床地质特征和 Sm-Nd 同位素年龄等证据, 认为南温河钨矿是由燕山晚期岩浆-热液系统控制的矽卡岩型白钨矿床。

关键词: 滇东南地区; 南温河钨矿; 矿床成因; 成矿年代学

中图分类号: P597.1; P58; P611 **文献标志码:** A **文章编号:** 1671-2552(2024)06-0914-12

Li S T, Zhu X Y, Lu Z L, Zhang D C, Han S K, Pu X M, Li X G. Genesis and geochronology of the Nanwenhe tungsten deposit, southeast Yunnan: Evidence from geological features and Sm-Nd isotopic age. *Geological Bulletin of China*, 2024, 43(6): 914-925

Abstract: The Nanwenhe tungsten deposit is the largest scheelite deposit in southeast Yunnan. Since the Caledonian period, the area has been subjected to multi-stage tectonic-metamorphism. This has led to different understanding of key issues such as deposit genesis and metallogenic age. On the basis of detailed field geological work, combined with the results of previous work, it is considered to be a skarn scheelite deposit controlled by magmatic-hydrothermal fluid, and the ore-forming fluid is a magmatic-hydrothermal transitional fluid, which is characterized by "cross-bedding" and "bedding" quartz veins-feldspar quartz veins, and controls the skarnization and scheelite mineralisation of the Nanwenhe tungsten deposit. The laminated and stratiform skarn ore bodies revealed by the current exploration work are the products of bedding metasomatism of "mag-hydrothermal transition ore-forming fluid". The Sm-Nd isotopic dating of the scheelite in the Nanwenhe tungsten deposit yield a metallogenic age of 126 ± 6.7 Ma ($n=7$, MSWD=0.33), which corroborates well with the tectonic research results and other chronological results in the area, indicating that the mineralization

收稿日期: 2022-11-26; 修订日期: 2023-04-18

资助项目: 文山麻栗坡紫金钨业集团有限公司委托项目《云南麻栗坡县南温河钨矿成矿规律总结与找矿潜力评价研究》(编号: KCDZKCY-2021-005)

作者简介: 李顺庭(1982-), 男, 博士, 高级工程师, 从事矿产勘查和矿床学研究。E-mail: li_shunting@zijinmining.com

is related to the late Yanshan magmatic activity. The geological characteristics and Sm-Nd isotopic age of the deposit indicate that the Nanwenhe tungsten deposit is a skarn scheelite deposit controlled by the late Yanshanian magmatic-hydrothermal system.

Key words: southeast Yunnan; Nanwenhe tungsten deposit; genesis of ore deposit; metallogenic chronology

滇东南地区沿南东—北西向依次分布 3 个晚燕山期复式花岗岩体(周瑞辉等, 2023), 即老君山复式岩体(蓝江波等, 2016; 刘艳宾, 2017; 薛伟, 2019)、薄竹山复式岩体(解洪晶等, 2009; 程彦博等, 2010; 李建德, 2018)和个旧复式岩体(程彦博, 2012; 张颖等, 2013; 黄文龙等, 2016; 尚志, 2017)。围绕这 3 个复式岩体分别发育由都龙锡钨多金属矿—南温河钨矿、白牛厂银多金属矿—官房钨矿及个旧锡多金属矿组成的矿集区, 它们共同组成了南岭锡钨成矿带西段(涂光炽, 2002; 张乾等, 2011)。南温河钨矿位于老君山复式岩体西侧, 最早于 1958 年由西南冶金地质勘探公司 308 队发现, 截至 2013 年累计查明资源量(WO_3)超过 $12 \times 10^4 \text{ t}$ (张定才等, 2013), 是滇东南地区唯一的大型钨矿。

南温河钨矿有其独特的矿床地质特征。与一般的岩浆—热液矽卡岩型白钨矿床不同, 该矿床矿体整体呈层状、似层状产出, 倾向南东, 并有部分陡倾长英质矿体“切割”似层状矿体, 且尚未发现作为钨成矿地质体的高演化花岗岩。矿区遭受过多期次、强烈的构造活动和变质作用, 伴随有多期次的热事件和改造作用。前人针对南温河钨矿开展了大量地质工作, 但在一些关键问题如矿床成因和成矿时代的认识上, 仍存在较大争议。

南温河钨矿矿床成因长期以来存在喷流沉积、变质改造、岩浆热液成矿等多种观点, 部分认识将其作为多成因叠加复合成矿(曾志刚等, 1998, 1999; 石洪召等, 2011, 2013, 2015; 王冠等, 2012; 蔡倩茹等, 2017), 并强调喷流沉积在成矿过程中的重要作用, 以此解释该矿床目前大量存在的似层状矽卡岩和白钨矿体。随着地质工作的深入, 尤其是对于锡钨多金属矿床认识的加深, 以岩浆—热液成矿作用为主导的认识逐渐获得认可(谭筱虹等, 2010; 冯佳睿等, 2011a, c; 刘玉平等, 2011; 李莹, 2013; 阙朝阳等, 2014; 范正哲, 2015; 刘二情, 2015; 蔡倩茹等, 2018; 张林奎等, 2018; 杨光树等, 2019; 王彩艳等, 2020; 余振东等, 2023)。但是, 目前大多数此类观点也存在如何认识“似层状白钨矿体”及与之高角度相交的云英岩型和长石石英脉型白钨矿体之间关系的问题。

多数研究认为, 成矿作用是多期次的, 即“似层状”矽卡岩是早期形成的, 后期岩浆—热液形成的“穿层长石石英脉型矿体”发生了叠加成矿(曾志刚等, 1998; 石洪召等, 2015; 蔡倩茹等, 2018; 欧阳永棚等, 2018)。因此, 如何正确认识似层状矽卡岩和白钨矿体及其与高角度长石石英脉型白钨矿体之间的相互关系, 是理解矿床成因的关键。

成矿年代学方面, 前人针对南温河钨矿采用不同方法, 如锆石 U-Pb 法、云母 Ar-Ar 法、辉钼矿 Re-Os 法、全岩 Rb-Sr 等时线法、白钨矿 Sm-Nd 法开展了大量研究, 获得了一批年龄数据, 但相互之间差异较大, 219~97 Ma 之间不等, 尚无定论(冯佳睿等, 2011b; 刘玉平等, 2011; 谭洪旗等, 2011a; 狄永军等, 2013; 李建康等, 2013; 阙朝阳等, 2014; 毕珉烽等, 2015; 刘二情, 2015; 刘艳宾, 2017; 王彩艳, 2019; 薛伟, 2019; 王忠强等, 2020)。这些不一致的年龄数据暗示, 南温河钨矿区存在多期复杂地质作用。

南温河钨矿矿床成因和成矿年代学认识上的争议, 一方面影响了其作为区域内典型钨矿床的总结研究, 另一方面也困扰矿区和外围的进一步找矿勘查工作。本文通过对南温河钨矿详细的矿床地质调查, 结合室内综合研究, 重点探讨“切层”石英脉—长石石英脉矿体与似层状矽卡岩矿体之间的相互关系, 并对其中白钨矿进行 Sm-Nd 同位素定年, 结合矿床地质特征和前人研究成果分析其成矿规律, 探讨矿床成因和成矿时代, 以期更好地理解滇东南地区钨成矿地质事件, 并为该区域钨矿床的找矿工作提供指导。

1 区域地质背景

南温河钨矿是老君山锡钨多金属成矿带的重要组成部分, 大地构造位置位于越北陆块靠近右江断陷盆地一侧(图 1)。右江断陷盆地的周缘分布有个旧、白牛厂、南温河、南丹大厂、大明山等一系列锡钨多金属矿床。区内地层发育较完整, 除侏罗系—白垩系缺失外, 其余各时代地层均有出露。区域岩浆岩分布广泛, 自西向东依次分布个旧岩体、薄竹山岩体和老君山岩体, 均为燕山期花岗岩。区域深大

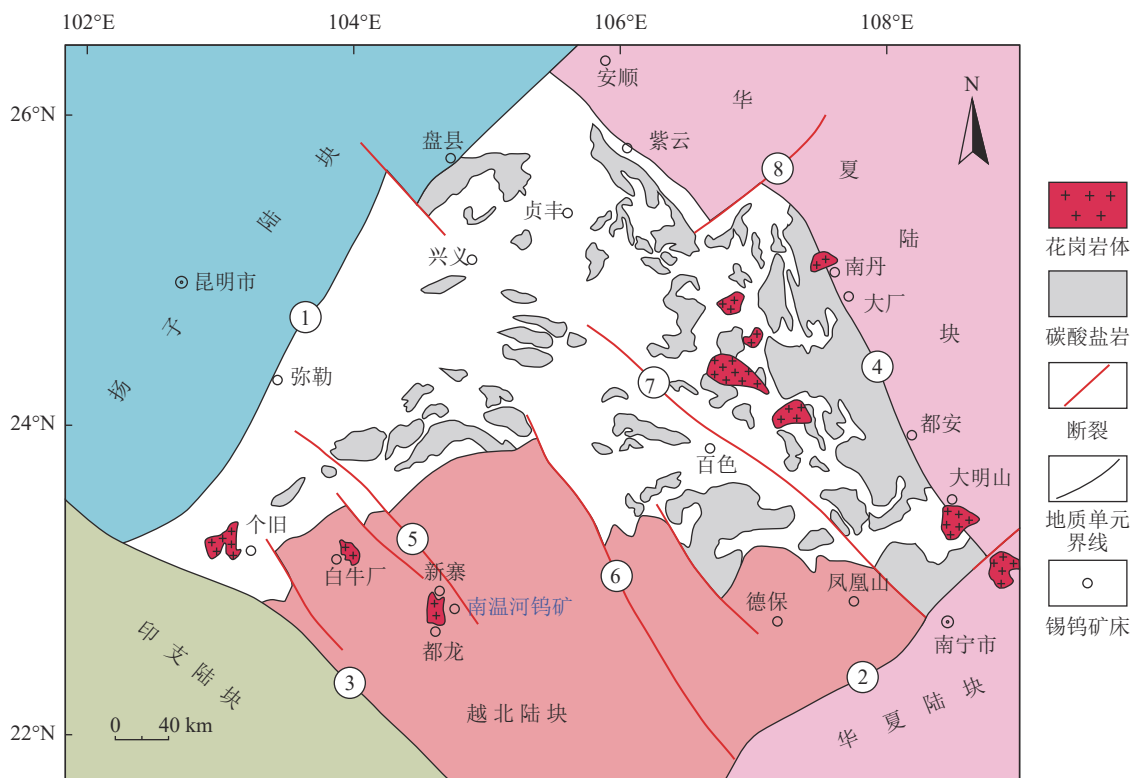


图1 滇东南区域地质构造略图(据杨光树等,2019 修编)

Fig. 1 Geological and tectonic sketch map of southeast Yunnan Province

①—弥勒—师宗断裂;②—茶陵—凭祥断裂;③—红河断裂;④—南丹—昆仑关断裂;⑤—文山—麻栗坡断裂;
⑥—那坡断裂;⑦—右江断裂;⑧—开远—平塘断裂

断裂发育,主要为北东向和北西向,其中北东向断裂主要有弥勒—师宗断裂、茶陵—凭祥断裂和开远—平塘断裂,北西向断裂主要包括红河断裂、南丹—昆仑关断裂那坡断裂、右江断裂和文山—麻栗坡断裂。这些断裂将右江断陷盆地分割为菱形断块,显示了区域构造的多期性和复杂性。

2 矿床地质特征

南温河钨矿位于老君山复式岩体东侧。矿区内出露古元古界猛硐群南秧田组变质岩,岩浆岩包括加里东期南捞片麻状花岗岩、老城坡、团田等单元和燕山晚期老君山复式岩体。矿区受多期构造作用叠加改造,除燕山期花岗岩外,岩石普遍发生了强烈的变质和变形(图2)。

古元古界猛硐岩群南秧田岩组(Pt_1n)主要岩性为云母片岩、云母石英片岩和片麻岩,原岩主要为碎屑岩夹粘土岩及泥质岩(徐建珍,2012;刘二情,2015;谭洪旗等,2017b)。南秧田岩组遭受了多期次变质作用,原有的沉积层理已经消失,现有的面理皆

为动力变质成因。根据岩石组合特征、矽卡岩矿化蚀变特征,将南秧田岩组划分为3个岩性段。第一段(Pt_1n^1)以绢云片岩为主,夹石英变粒岩、片麻岩和矽卡岩,局部见少量脉状白钨矿,平均厚度约为144 m;第二段(Pt_1n^2)是矿区主要的赋矿层位,以底部和顶部矽卡岩带分别作为其与一段和三段的划分界线,上部主要为黑云斜长片麻岩、电气石长石石英岩,中部主要为含电气石黑云斜长片麻岩、云母石英片岩夹多层条带、透镜状矽卡岩,下部为云母石英片岩、云母石英片岩夹绿帘石透闪石矽卡岩、阳起石透辉石矽卡岩,平均厚度约为114 m;第三段(Pt_1n^3)主要为二云斜长片麻岩、二云片岩和电气石石英片岩夹矽卡岩扁豆体,平均厚度约为155 m。南秧田岩组整体呈现出中间厚、向南北两端变薄的趋势。

矿区构造主要为南温河滑覆构造和后期的脆性断裂(阙朝阳等,2014;毕珉烽等,2015)。断裂构造走向为北西向和北东向,倾向北东和南东。

南捞片麻状花岗岩主要呈北东向出露在沟央河和白沙河一带的南秧田岩组之下,二者呈断层接

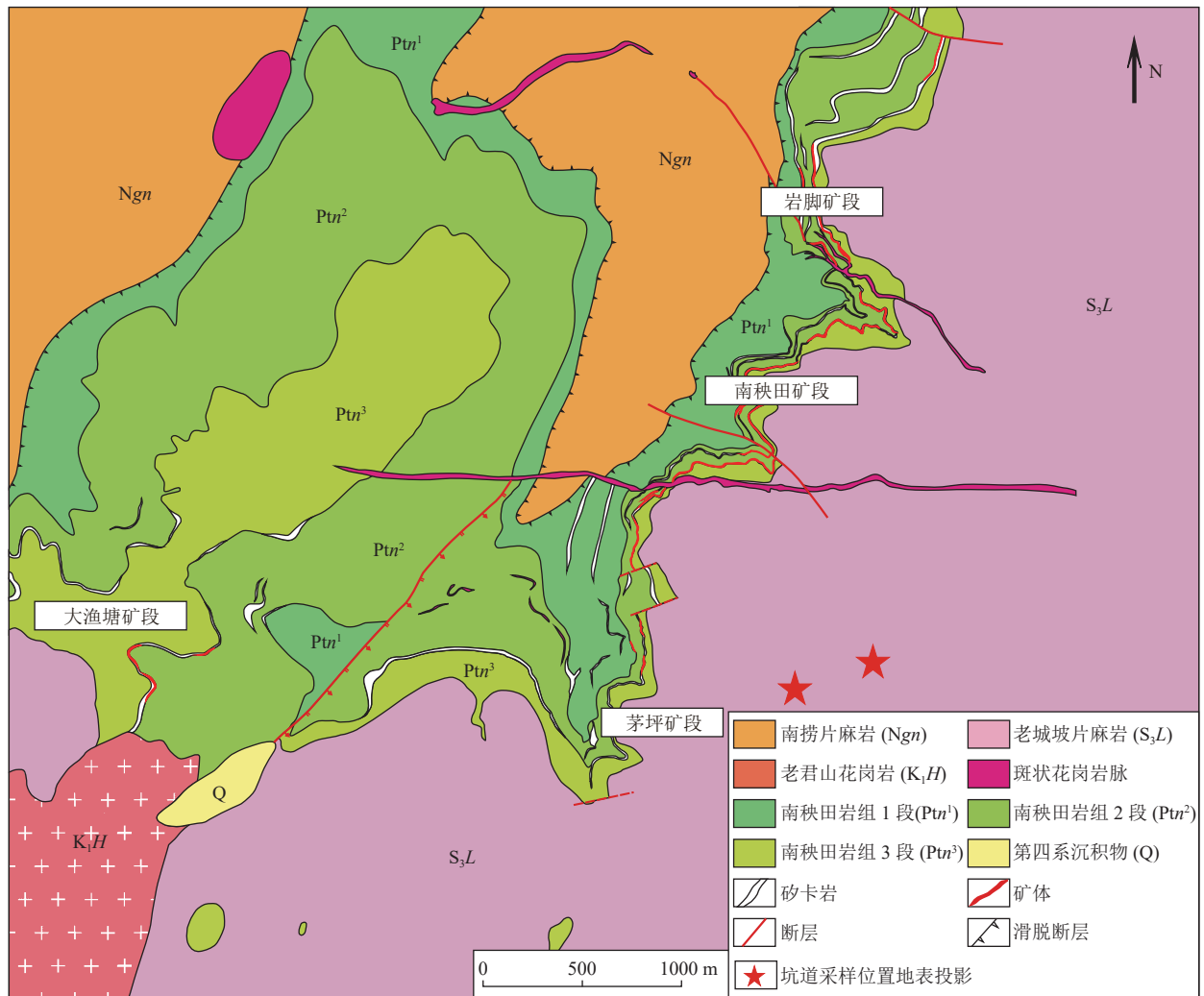


图 2 南温河钨矿矿区地质图(据张定才等, 2013 修改)

Fig. 2 Geological map of the Nanwenhe tungsten deposit

触。老城坡、团田片麻状花岗岩出露在矿区东部和南部, 呈断层接触上覆于南秧田岩组之上。矿区以西 5 km 处出露老君山复式花岗岩体。矿区内出露 2 条规模较小的花岗斑岩, 分别呈近东西向和北西—南东向脉状产出, 长 1.2~1.5 km。其中, 南捞片麻状花岗岩的成岩时代为 436~406 Ma(郭利果, 2006; 黄孔文, 2013; 王大鹏等, 2015), 与老城坡、团田片麻状花岗岩时代(郭利果, 2006; 谭洪旗等, 2011b; 潘锦波等, 2015; 赵震宇, 2017; 薛伟, 2019)基本一致, 三者具备相似的岩石学、矿物学和地球化学特征, 都是同碰撞背景下的“S”形花岗岩(郭利果, 2006); 老君山复式岩体主要为一套过铝质、高钾钙碱性系列的“S”形花岗岩, 是地壳重熔的产物, 成岩时代持续时间较长, 为 118~80 Ma, 不同阶段的岩体呈现出同源岩浆持续演化的特点(郭利果, 2006; 李

进文等, 2013; 马慧慧, 2013; 蓝江波等, 2016; 刘艳宾, 2017; 赵震宇, 2017; 薛伟, 2019); 花岗斑岩的成岩时代为 89.88 Ma(王彩艳, 2019), 与瑶岗仙复式岩体的花岗斑岩相似(李顺庭等, 2011), 是钨成矿期后岩浆持续活动的产物。

南温河钨矿由南秧田、岩脚、茅坪、大渔塘 4 个矿段组成, 矿区面积超过 30 km²。矿体主要呈似层状或透镜体状赋存于似层状矽卡岩中, 部分赋存于陡倾和似层状的长石—石英脉中。矿体与南秧田岩组面理产状一致或呈缓倾斜相交, 走向北北东—北东向, 倾向南东, 倾角平缓, 一般为 5°~15°; 矿体在水平延伸上表现为不均匀分布, 局部不连续。矿体呈面状展布, 延伸较大, 局部斜深达 1500 m 尚未尖灭。矽卡岩内局部地段夹有薄层片岩或电气石石英岩、片麻岩夹层及小扁豆体, 一般不稳定, 沿走

向及倾向呈迅速尖灭;2层矽卡岩之间的间距一般为24~44 m,其间为石英电气石岩、片麻岩和片岩(图3)。

目前的勘探工作揭露,南温河钨矿白钨矿体主要赋存在南秧田组第二段。根据实际生产需要,将南秧田岩组二段顶部、中部和底部出现的矿化蚀变带分别划分为Ⅰ、Ⅱ、Ⅲ层矿。其中Ⅰ层矿矿化好,品位高,稳定且连续性最好,厚2~4 m,最厚可达18.8 m,是矿山生产的主要矿体。Ⅱ层矿呈条带状产出,连续性相对较差,品位变化较大,厚1~3 m,最厚6.6 m。Ⅲ层矿矿化较好,但连续性相对Ⅰ层矿较差,平均厚度5.9 m,在其下部分布有多层透镜状和扁豆状矽卡岩矿体。矿石以石英脉型和矽卡岩型为主,次为片岩型和变粒岩型。

矿体组分含量分布不均匀,其中顺层、切层石英脉或长石石英脉及粗粒条带状矽卡岩含斑点状白钨矿,一般位于矿体顶底部,构成透镜状富矿,白钨矿呈密集斑点沿层分布,其上下有贫富不均、浸染状的白钨矿矿体。块状矽卡岩、细粒条带状矽卡岩、细层纹状矽卡岩含矿较贫,白钨矿大致沿层纹、层理呈浸染状及规则小斑点分布。在靠近矽卡岩矿层顶部和底部的石英电气石岩、片麻岩中,局部亦具钨矿化。此外,在南秧田组上下岩石的老城坡、团田和南捞片麻状花岗岩中,亦可见小规模含白钨矿电气石-石英脉。

矽卡岩包括石榴子石矽卡岩、透辉石矽卡岩、透闪石矽卡岩和绿帘石矽卡岩,在平面上存在一定的分带性。其中南秧田矿段以透辉石-透闪石矽卡岩为主,并有部分石榴子石矽卡岩;大渔塘矿段和茅坪矿段以透辉石-透闪石矽卡岩为主,并发育少量石榴子石矽卡岩,矽卡岩化较南秧田矿段稍弱;岩脚矿段以绿帘石矽卡岩为主。

南温河钨矿似层状矽卡岩型矿体中同时广泛发育石英脉-长石石英脉。根据坑道观察,部分脉体为长石石英脉。以往被认为相互穿插的“穿层”和“顺层”的产状各异的石英脉-长石石英脉,并未见明显的早晚穿插关系,二者之间相互贯通,构成同一系统。与似层状矿体平行的石英脉是从切层的石英脉中生长出来的,沿着薄弱的层间构造面贯入形成。绝大部分斑点状、细小颗粒状的白钨矿分布在这两类石英脉中,这也是二者构成同一系统的佐证(图4)。

南温河钨矿中南秧田岩组的云母片岩和云母石英片岩,其矽卡岩化与石英脉-长石石英脉密切相关。当顺层和切层石英脉-长石石英脉系统伸入到片岩中时,就会引发周围的片岩发生矽卡岩化;而石英脉-长石石英脉不发育的区域,围岩仍为片岩,未发生矽卡岩化。同时在南秧田矿段Ⅰ层矿中经常见到穿插和顺层的石英脉相互贯通,且石英脉中及其两侧发育石榴子石和白钨矿化。部分石榴子石和大量白钨矿直接生成在石英脉中,说明石英脉、石榴子石和白钨矿为近同期形成,石榴子石和白钨矿稍晚于石英脉,三者的相互关系非常密切。

3 Sm-Nd 同位素定年

3.1 测年方法

对南温河钨矿不同位置产出的白钨矿进行了单矿物 Sm-Nd 同位素定年。用于 Sm-Nd 定年的白钨矿样品分别采自茅坪矿段 1232 中段和 1158 中段,具体采样位置见表1。

将样品进行破碎解离和筛分,在摇床重选初步富集的基础上,再在双目镜下借助紫外灯分选提纯,使白钨矿的纯度达到99%以上,准备测试。白钨矿的 Sm-Nd 同位素组成在核工业北京地质研究院分析测试研究所完成。同位素分析采用 ISOPROBE-T 热电离质谱计、可调多法拉第接收器接收。质量分馏用 $^{146}\text{Nd}/^{144}\text{Nd}=0.7219$ 校正,标准测量结果:JMC 为 $^{143}\text{Nd}/^{144}\text{Nd}=0.512109\pm3$ 。全流程本底 Sm、Nd 小于 50 pg。

3.2 测年结果

南温河钨矿白钨矿的 Sm-Nd 同位素组成如表1所示。其中,除样品 YNC20-1 和 YNC20-2 外,都展示出良好的线性关系。而由样品 YNC20 分离出来的2个数据点略偏离等时线,位于等时线的上方,代表其所处的封闭环境可能遭受了破坏,故未参与计算。参与拟合等时线的7个数据中,Sm 含量为 $1.66\times10^{-6}\sim33.1\times10^{-6}$,Nd 含量为 $7.4\times10^{-6}\sim97.5\times10^{-6}$, $^{147}\text{Sm}/^{144}\text{Nd}$ 值为 0.0921~0.2884, $^{143}\text{Nd}/^{144}\text{Nd}$ 值为 0.511741~0.511903,数据变化范围较大,同位素分馏明显,且表现出良好的线性关系,说明这些白钨矿在形成后保持着同位素体系的封闭性。利用 Isoplot 软件进行拟合,获得白钨矿 Sm-Nd 等值线年龄为 $126\pm6.7\text{ Ma}$ (MSWD=0.33),并获得 $^{143}\text{Nd}/^{144}\text{Nd}$ 初始值为 0.511664 ± 0.000010 (图5)。

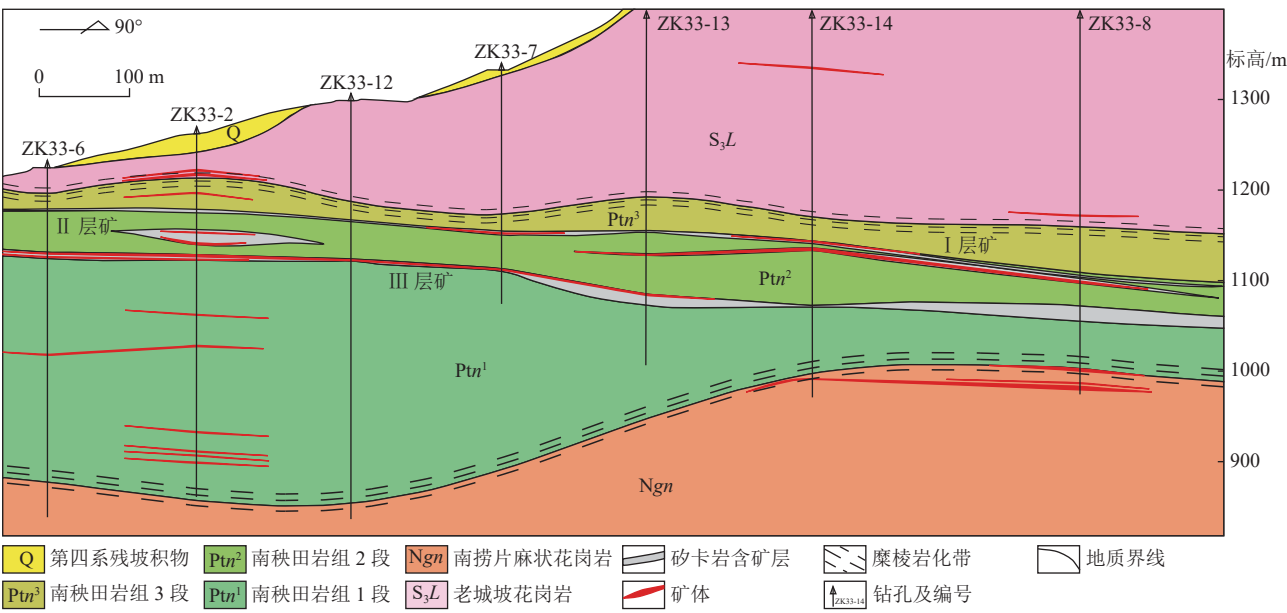


图 3 南温河钨矿典型剖面图(据张定才等, 2013 修编)

Fig. 3 Typical cross section of the Nanwenhe tungsten deposit

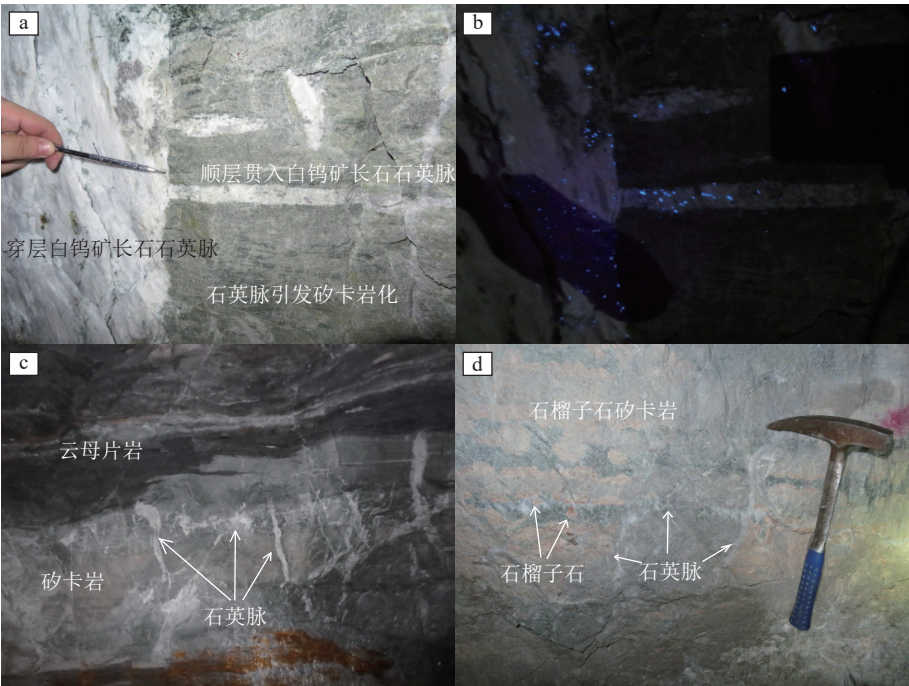


图 4 南温河钨矿南秧田矿段长石石英脉和矽卡岩白钨矿化的关系

Fig. 4 Relationship between feldspar quartz veins and skarn scheelite wolframite mineralization in the Nanyangtian ore block of the Nanwenhe tungsten deposit

a—正常光照下, 南秧田矿段 I 层矿中顺层和穿层白钨矿石英脉的相互关系, 二者相互贯通, 且无早晚穿插关系, 构成同一系统, 石英脉引发了周边云母片岩透辉透闪石矽卡岩化; b—图 a 相同处紫外灯下照片, 显示白钨矿被严格限制在石英脉中, 或石英脉与矽卡岩的边界; c—由穿层和顺层的石英脉系统控制的矽卡岩化, 石英脉不及之处作为围岩的云母片岩未发生矽卡岩化; d—由穿层和顺层的石英脉引发的以石榴子石为主的矽卡岩化, 其中部分石榴子石被包裹在石英脉中, 说明二者的生成时间很接近, 石榴子石在代表热液的石英尚未固结时已经形成

表 1 南温河钨矿床白钨矿 Sm-Nd 同位素测试结果
Table 1 Sm-Nd isotope test results of scheelite in the Nanwenhe tungsten deposit

序号	样品号	采集位置	样品名称	测试结果				
				Sm/10 ⁻⁶	Nd/10 ⁻⁶	¹⁴⁷ Sm/ ¹⁴⁴ Nd	¹⁴³ Nd/ ¹⁴⁴ Nd	误差
1	YNC11	茅坪矿段1232中段2线1号北采场	白钨矿	1.66	10.9	0.0921	0.511741	0.000007
2	YNC12	茅坪矿段1158中段7延2线-4线之间	白钨矿	6.47	13.6	0.2884	0.511903	0.000008
3	YNC14	茅坪矿段1158中段0线5号点西侧50m	白钨矿	3.65	10.8	0.204	0.511833	0.000006
4	YNC15	茅坪矿段1158中段9线22号南	白钨矿	2.57	7.4	0.2099	0.511834	0.000006
5	YNC20-1	茅坪矿段1158中段7延	淡黄色白钨矿	13.5	39.4	0.2073	0.511883	0.000009
6	YNC20-2	茅坪矿段1158中段7延	乳白色白钨矿	7.64	19.7	0.2338	0.511891	0.000007
7	YNC21-1	茅坪矿段1158中段9延	淡黄色白钨矿	5.34	12.2	0.2643	0.511883	0.000007
8	YNC21-2	茅坪矿段1158中段9延	乳白色白钨矿	5.14	11.4	0.2723	0.511890	0.000019
9	YNB47	茅坪矿段1232中段2线4号南采场	白钨矿	33.1	97.5	0.2054	0.511835	0.000008

注: 测试单位为核工业北京地质研究院分析测试研究所

4 讨 论

4.1 浆液过渡态成矿热液控制了矽卡岩和白钨矿的形成

自 20 世纪 80 年代以来, 有学者提出钨多金属矿床的成矿热液是一种上部偏液、下部偏浆的熔浆-热液过渡性流体(林新多等, 1986, 1987)。这种由浆-液过渡态流体形成的矿体多表现为贯入式, 矿种也并不局限于钨多金属矿(林新多, 1998)。近 10 年来, 针对钨多金属矿床的研究又将这些认识推到一个新的高度。如钨多金属矿床的成矿地质体多为碱长花岗岩(祝新友等, 2012a); 成矿流体体现出岩浆-热液过渡态特征, 并存在从碱长花岗岩→浆液过渡态岩浆→岩浆热液→热液的持续演化过程(王艳丽, 2014; 巩小栋, 2015; 于志峰等, 2015; 祝新友等, 2015, 2016, 2017; 孙雅琳等, 2017; 吴剑, 2017; 周建厚, 2017; 崔中良等, 2019); 碱长花岗岩中的液态不混溶是这类浆液过渡态流体形成的主要原因(祝新友等, 2012b; 王艳丽等, 2016)。例如, 湖南柿竹园锡钨多金属矿床中, 发育大量由碱长花岗岩演化分异产生的代表岩浆-热液过渡态的碱交代脉, 控制了矽卡岩化过程和白钨矿的成矿作用。这类碱交代脉早阶段由长石、石英、萤石等组成, 多体现岩浆特征, 与干矽卡岩阶段相关; 晚阶段由钾长石、石英、萤石等组成, 多体现岩浆-热液过渡特征, 与湿矽卡岩阶段和氧化物阶段相关(程细音等, 2012)。

以往大量工作, 尤其是近 10 年来的研究成果显示, 钨多金属矿的成矿地质体是碱长花岗岩, 成矿热

液是岩浆-热液过渡态的流体。

4.2 南温河钨矿“穿层”和“顺层”两类脉体构成岩浆-热液成矿系统

通过坑道观察可知, 南温河钨矿以往被划分为“穿层”和“顺层”两类石英脉-长石石英脉, 二者是相互贯通的, 并无明显的相互穿插和早晚关系, 更接近于同期形成。矽卡岩化和白钨矿化大都局限在石英脉-长石石英脉及其围岩接触处, 表明由石英脉-长石石英脉直接控制了南温河钨矿中的矽卡岩化和白钨矿化。从石英脉与石榴子石的相互关系可知, 二者存在密切的相互关系, 且二者的形成时间非常接近, 以石榴子石为代表的矽卡岩化在石英脉/长石石英脉的形成过程中已经产生。

以往针对南温河钨矿成矿流体的研究提供了大量成矿作用信息。南温河钨矿和洒西钨矿的石英和石榴子石中发现了大量的熔融包裹体及熔体-流体包裹体(冯佳睿等, 2010; 李莹, 2013; 盛夏, 2016), 显示出岩浆-热液过渡态流体特征。这些发现一方面表明这些石英不属于石英-硫化物阶段, 成矿流体体现出岩浆-热液过渡性质; 另一方面, 暗示南温河钨矿的岩浆-热液矽卡岩成因。

南温河钨矿的成矿流体研究还提供了一些其他成矿作用信息。如“穿层”石英脉型白钨矿成矿流体较“似层状”矿体而言, 体现出更高的温度和盐度(石洪召等, 2013); 石英脉中流体包裹体较石榴子石而言, 体现出更高的温度和盐度(冯佳睿等, 2010); 石英脉中流体包裹体均一温度均高于矽卡岩矿物中的流体包裹体(王彩艳, 2019)。这些现象暗示, 高角度

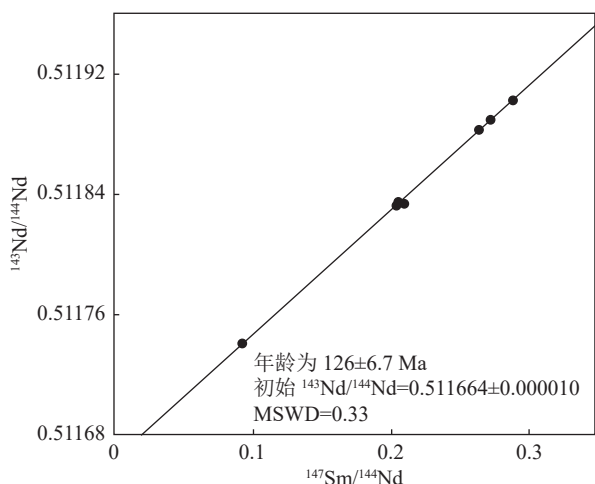


图 5 南温河钨矿白钨矿 Sm-Nd 同位素等时线

Fig. 5 The Sm-Nd disochron of scheelite in the Nanwenhe tungsten deposit

的所谓“穿层”石英脉/长石石英脉代表的浆液过渡态成矿流体,遇到由一系列缓倾斜裂隙组成的构造面时,会沿着构造面顺层贯入,形成“顺层”石英脉-长石石英脉,并与两侧的围岩发生顺层交代蚀变,引发矽卡岩化和白钨矿化。代表岩浆-热液的石英脉/长石石英脉,在成矿作用过程中形成时间应较石榴子石稍早。

南温河钨矿及其周边地区的其他认识也为“穿层”和“顺层”石英脉-长石石英脉构成岩浆-热液系统提供了证据。如南温河钨矿中顺层分布的电气石云英石英岩、穿切矿层和围岩的石英电气石脉、围岩中的电气石具有相同的矿物学、地球化学和同位素特征,显示其皆来自岩浆-热液(张林奎等,2018);洒西白钨矿中“穿层”石英脉型钨矿和似层状矿体的成矿流体显示出基本相同的性质(张彬等,2016),可能是同一流体系统。

与此同时,已经有部分地质工作者认识到,南温河钨矿的形成与长石-石英脉/石英脉有关,成矿流体主要为岩浆-热液(冯佳睿等,2010;李莹,2013;盛夏,2016;王彩艳,2019);“层状”矽卡岩是成矿热液沿层间滑脱面发生顺层交代的产物(杨光树等,2019)。

将野外地质认识、钨多金属矿床近期研究成果,以及南温河钨矿以往地质工作成果结合起来,可以得到以下认识:与国内大部分钨多金属矿床相似,其成矿热液是一种岩浆-热液过渡状态的流体,具体表现形式为“穿层”和“顺层”石英脉-长石石英脉;由

“穿层”和“顺层”石英脉/长石石英脉构成的岩浆-热液系统,控制了矽卡岩化和白钨矿化,目前勘探工作揭露的层状矽卡岩矿体为“浆-液过渡成矿流体”顺层交代的产物。

4.3 南温河钨矿成矿时代

前人针对南温河钨矿及周边地区的主要钨矿开展了大量年代学研究,如锆石 U-Pb、云母 Ar-Ar、辉钼矿 Re-Os、白钨矿 Sm-Nd、全岩 Rb-Sr 等时线等(表 2)。因南温河钨矿和洒西钨矿具有相似的矿床地质特征,空间上距离相近,被认为属同一岩浆-热液成矿系统(刘玉平等,2011;阙朝阳等,2014;阙朝阳,2016;薛伟,2019),故本文将两者统一起来进行讨论。从以往的年代学成果看,南温河钨矿的成矿时代较混乱且跨度较大,219~97 Ma 均有分布,但在 125~117 Ma 和 209~219 Ma 两个范围内出现峰值,尤以 125~117 Ma 之间的峰值为盛(图 6)。其余,如 165~140 Ma 之间也零散地分布一些年龄值。

大量区域构造和年代学研究成果显示,老君山矿集区从中三叠世(237~220 Ma)开始,发生了多期构造运动,以发育北东向和北西向的逆冲推覆构造为主要特征。老君山矿集区以往获得的印支期年代学数据应该是构造运动显示,且构造变质高峰期在 220 Ma 左右(吕伟等,2001;林伟等,2011;陈泽超等,2013;毕珉烽等,2015;韦海波,2015;谭洪旗等,2017a, b)。因此,220 Ma 左右的年代学结果是区内构造变质的显示,并非代表区内的成矿事件。

不同研究成果虽然对 237~220 Ma 的变质作用取得了共识,但对构造活动延续的时限认识各有不同,如存在 237~228 Ma 和 86~78 Ma 两期伸展构造(颜丹平等,2005),259~165 Ma(郭利果,2006);170~150 Ma(阙朝阳等,2014),220~159 Ma(毕珉烽等,2015),220~160 Ma(贾福聚等,2016);237~190 Ma(谭洪旗等,2017b),200~165 Ma(薛伟,2019)。由此看来,老君山矿集区在印支期之后,以挤压为主要性质,逆冲推覆构造和后续伸展为主要表现形式的构造运动仍然持续了一段较长的地质时期。由此推断,165~140 Ma 之间零散分布的一些年龄值可能也是区域构造活动的表现。

与之相对应的是,南温河钨矿中的白钨矿、石榴子石、透辉石、黝帘石、石英、电气石等与成矿密切相关的矿物,都未发生形变。这也证明南温河钨矿形成于大规模变形构造结束之后,且在其形成之后,

表 2 南温河-洒西钨矿床成矿时代
Table 2 Age of mineralization of the Nanwenhe and Shashi tungsten deposits

序号	岩体/矿床	岩/矿石	测试方法	年龄/Ma	资料来源
1	南温河钨矿	符山石矽卡岩	锆石U-Pb	155.2±0.96	毕珉烽, 2015
2	南温河钨矿	含白钨矿绿帘石符山石矽卡岩	锆石U-Pb	155.2±0.96	狄永军等, 2013
3	南温河钨矿	云英岩型白钨矿	黑云母Ar-Ar	102±0.9	刘二情, 2015
4	南温河钨矿	南秧田组似层状矽卡岩矿石	锆石U-Pb	162.5±3.0	阙朝阳, 2016
5	南温河钨矿	含黑云母白钨矿-石英脉型矿石	黑云母Ar-Ar	97.5±0.97	王彩艳, 2019
6	南温河钨矿	含黑云母白钨矿-石英脉型矿石	黑云母Ar-Ar	99.5±0.97	王彩艳, 2019
7	南温河钨矿	长石石英脉型白钨矿体	辉钼矿Re-Os	151.0±1.3	王忠强等, 2020
8	南温河钨矿	似层状钨矿体	白云母Ar-Ar	141.2±0.2	薛伟, 2019
9	南温河钨矿	似层状钨矿体	白云母Ar-Ar	141.8±0.4	薛伟, 2019
10	南温河钨矿	矽卡岩型矿石	Rb-Sr等时线	214.3±15.6	曾志刚等, 1999
11	南温河钨矿	矽卡岩型白钨矿矿石	辉钼矿Re-Os	209.1±3.3	冯佳睿, 2011b
12	南温河钨矿	矽卡岩型白钨矿矿石	辉钼矿Re-Os	213.0±4.3	冯佳睿, 2011b
13	南温河钨矿	矽卡岩型白钨矿矿石	辉钼矿Re-Os	214.1±3.1	冯佳睿, 2011b
14	南温河钨矿	含矿金云透闪夕卡岩	金云母Ar-Ar	118.1±0.69	谭洪旗等, 2011a
15	南温河钨矿	白钨矿金云母	金云母Ar-Ar	117±3	刘玉平等, 2011
16	南温河钨矿	长石石英脉型矿体	白钨矿Sm-Nd	159±14	李建康等, 2013
17	南温河钨矿	云英岩脉型矿化(黑云母)	黑云母Ar-Ar	111.5±0.7	阙朝阳, 2016
18	南温河钨矿	含辉钼矿矽卡岩白钨矿	辉钼矿Re-Os	219.4±2.9	刘艳宾, 2017
19	洒西钨矿	钨矿黑云母	黑云母Ar-Ar	119±2	刘玉平等, 2011
20	洒西钨矿	伟晶岩脉黑云母	黑云母Ar-Ar	123.8±0.67	Xue et.al., 2010
21	洒西钨矿	含矿石英英脉	白云母Ar-Ar	124.3±0.70	Xue et.al., 2010
22	洒西钨矿	伟晶岩脉	黑云母Ar-Ar	124.8±0.8	薛伟, 2019
23	洒西钨矿	含白云母白钨矿长英质脉体	白云母Ar-Ar	112.4±0.77	阙朝阳, 2016
24	洒西钨矿	黑云斜长片麻岩(围岩)	黑云母Ar-Ar	121.3±1.0	李建康等, 2013
25	洒西钨矿	伟晶岩脉中白云母钠长石带	白云母Ar-Ar	143.8±1.2	李建康等, 2013

注: 11、12、13皆为单点模式年龄

区内再无强烈的变形作用。

老君山矿集区目前出露的主要岩浆岩包括南捞片麻状花岗岩, 老城坡、团田片麻状花岗岩和老君山复式岩体。前文已述, 南捞片麻状花岗岩和老城坡、团田片麻状花岗岩的成岩时代在 436~406 Ma 之间,

为志留纪岩浆活动的产物, 与老君山矿集区钨成矿事件无直接关系。而老君山复式岩体早阶段中已经发现大量约 120 Ma 的锆石(蓝江波等, 2016), 与目前获得的 120 Ma 左右的成矿时代具有良好的对应性。近年来, 老君山复式岩体南侧的都龙锡多金属

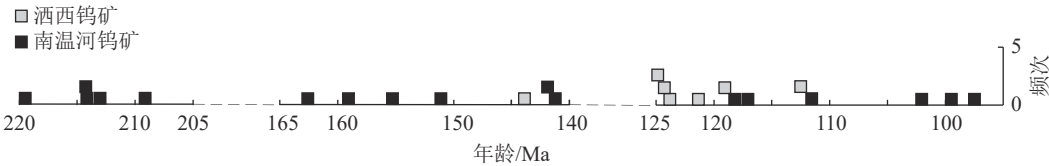


图 6 南温河钨矿及洒西钨矿成矿时代分布

Fig. 6 Metallogenic age distribution of the Nanwenhe tungsten deposit and Saxi tungsten deposit

矿床深部揭露出成矿地质体—隐伏花岗岩, 以及与之相关的铜钨矿体, 而隐伏花岗岩的成岩时代为 117.1 Ma(苏航等, 2016; 叶霖等, 2016, 2018)。上述成果暗示, 老君山矿集区内存在 120 Ma 左右的岩浆活动, 即老君山岩浆活动的早阶段, 引发了区域内的钨多金属成矿事件。南温河钨矿为本次燕山晚期岩浆活动的产物。

老君山矿集区内晚期的伸展构造, 前人已有论述。如区内 D2 期即中生代末期的北北西—南南东向伸展构造, 可能始于 176~146 Ma(颜丹平等, 2005); 伸展减薄作用起始时间可能为 130~80 Ma(阙朝阳等, 2014); 岩石圈松弛、拉张及燕山期大规模岩浆侵入和成矿事件的起始时间为 145~75 Ma(Xue et al., 2010); 研究区在 160~120 Ma(谭洪旗等, 2017b)进入地壳收缩调整阶段, 之后进入下一轮的伸展和地壳减薄阶段; 华南地区在 130~80 Ma(薛伟, 2019)由大规模挤压作用向伸展作用转换, 并诱发相应的岩浆岩化和矿化。虽然以往的研究已经认识到, 老君山矿集区在中生代末期存在伸展构造及由此引发的岩浆岩上侵和锡—钨成矿作用, 但起始时间尚无法确定。而本次结合都龙隐伏成矿地质体的研究成果, 认为构造—岩浆—成矿作用至少开始于 120 Ma。

5 结 论

(1) 滇东南南温河钨矿为岩浆—热液控制的矽卡岩型白钨矿床, 其成矿热液是岩浆—热液过渡态流体, 具体表现形式为“穿层”和“顺层”石英脉—长石石英脉构成的岩浆—热液系统, 控制了南温河钨矿的矽卡岩化和白钨矿化; 目前勘探工作揭露的层状、似层状矽卡岩矿体为“浆—液过渡成矿流体”顺层交代的产物。

(2) 南温河钨矿的成矿年龄为 120 Ma 左右, 是燕山晚期老君山岩浆活动的产物。

致谢: 样品测试和实验得到了核工业北京地质研究院测试中心崔建勇教授的支持, 成文过程中得到中国科学院地球化学研究所刘玉平和叶霖研究员, 北京矿产地质研究院有限责任公司王玉往教授和中国地质大学(北京)曹毅教授的指导, 论文审稿过程中得到审稿老师的宝贵意见, 在此一并致谢。

参考文献

Xue G, Marshall D, Zhang S, et al. 2010. Conditions for Early Cretaceous

- emerald formation at Dyakou, China: fluid inclusion, Ar—Ar, and stable isotope studies[J]. *Economic Geology*, 105(2): 339–349.
- 毕珉峰, 张达, 吴淦国, 等. 2015. 滇东南麻栗坡一带中生代构造变形及其对钨多金属矿床的控制作用[J]. *地学前缘*, 22(4): 223–238.
- 蔡倩茹, 燕永锋, 杨光树, 等. 2017. 滇东南南秧田钨矿床含矿矽卡岩地球化学特征及成因初探[J]. *中国稀土学报*, 35(5): 642–656.
- 蔡倩茹, 燕永锋, 杨光树, 等. 2018. 滇东南南秧田矽卡岩型钨矿床成矿演化[J]. *矿床地质*, 37(1): 116–136.
- 程细音, 祝新友, 王艳丽, 等. 2012. 柿竹园钨锡多金属矿床矽卡岩中碱交代脉研究[J]. *中国地质*, 39(4): 1023–1033.
- 程彦博, 毛景文, 陈小林, 等. 2010. 滇东南薄竹山花岗岩的 LA-ICP-MS 锆石 U—Pb 定年及地质意义[J]. *吉林大学学报(地球科学版)*, 40(4): 869–878.
- 程彦博. 2012. 个旧超大型锡多金属矿区成岩成矿时空演化及一些关键问题探讨[D]. 中国地质大学(北京)博士学位论文: 30–135.
- 陈泽超, 林伟, Faure M, 等. 2013. 越南北部早中生代构造事件的年代学约束[J]. *岩石学报*, 29(5): 1825–1840.
- 崔中良, 郭钢阳, 赵剑星, 等. 2019. 中国钨矿床研究现状及进展[J]. *河北地质大学学报*, 42(1): 27–36.
- 狄永军, 阙朝阳, 张达, 等. 2013. 云南麻栗坡南温河钨矿床成因: 来自矽卡岩年代学的约束[J]. *矿物学报*, 33(S2): 581–582.
- 范正哲. 2015. 云南省麻栗坡南温河钨矿床构造叠加及其与成矿关系[D]. 中国地质大学(北京)硕士学位论文: 47–50.
- 冯佳睿, 周振华, 程彦博. 2010. 云南南秧田钨矿床流体包裹体特征及其意义[J]. *岩石矿物学杂志*, 29(1): 50–58.
- 冯佳睿. 2011a. 云南麻栗坡南秧田钨矿床成矿流体特征与成矿作用[D]. 中国地质科学院博士学位论文: 86–94.
- 冯佳睿, 毛景文, 裴荣富, 等. 2011b. 滇东南老君山地区印支期成矿事件初探——以新寨锡矿床和南秧田钨矿床为例[J]. *矿床地质*, 30(1): 57–73.
- 冯佳睿, 毛景文, 裴荣富, 等. 2011c. 滇东南老君山南秧田钨矿床的成矿流体和成矿作用[J]. *矿床地质*, 30(3): 403–419.
- 巩小栋. 江西大湖塘钨多金属矿田成矿流体演化及成因机制研究[D]. 2015. 中国地质大学(北京)博士学位论文: 115–118.
- 郭利果. 2006. 滇东南老君山变质核杂岩地球化学和年代学初步研究[D]. 中国科学院研究生院(地球化学研究所)硕士学位论文: 35–103.
- 黄孔文. 2013. 滇东南老君山地区南捞片麻岩地球化学和年代学及其构造意义[D]. 中国地质大学(北京)硕士学位论文: 38–54.
- 黄文龙, 许继峰, 陈建林, 等. 2016. 云南个旧杂岩体年代学与地球化学: 岩石成因和幔源岩浆对锡成矿贡献[J]. *岩石学报*, 32(8): 2330–2346.
- 贾福聚, 燕永锋, 伍伟, 等. 2016. 云南老君山锡多金属成矿区硫、铅、氢、氧同位素地球化学[J]. *吉林大学学报(地球科学版)*, 46(1): 105–118.
- 蓝江波, 刘玉平, 叶霖, 等. 2016. 滇东南燕山晚期老君山花岗岩的地球化学特征与年龄谱系[J]. *矿物学报*, 36(4): 441–454.
- 李建康, 王登红, 李华芹, 等. 2013. 云南老君山矿集区的晚侏罗世—早白垩世成矿事件[J]. *地球科学(中国地质大学学报)*, 38(5): 1023–1036.
- 李建德. 2018. 滇东南薄竹山矿集区花岗岩地球化学特征、锆石

- U-Pb 定年及其构造意义[D]. 中国地质大学(北京)硕士学位论文: 7-48.
- 李进文, 裴荣富, 王永磊, 等. 2013. 云南都龙锡矿矿区同位素年代学研究[J]. *矿床地质*, 32(4): 768-783.
- 李顺庭, 王京彬, 祝新友, 等. 2011. 湖南瑶岗仙复式岩体的年代学特征[J]. *地质与勘探*, 47(2): 143-150.
- 李莹. 2013. 云南省麻栗坡县沟秧河矿区矽卡岩钨矿床流体成矿作用研究[D]. 中国地质大学(北京)硕士学位论文: 27-47.
- 林伟, Michel Faure, Claude Lepvrier, 等. 2011. 华南板块南缘早中生代的逆冲推覆构造及其相关的动力学背景[J]. *地质科学*, 46(1): 134-145.
- 林新多, 章传玲, 张德会. 1987. 初论湖南瑶岗仙含钨矿脉及矿化的垂直分带[J]. *地质论评*, (6): 539-546.
- 林新多, 张德会, 章传玲. 1986. 湖南宜章瑶岗仙黑钨矿石英脉成矿流体性质的探讨[J]. *地球科学*, (2): 153-160.
- 林新多. 1998. 岩浆-热液过渡型矿床的若干特征[J]. *现代地质*, (4): 30-37.
- 刘二情. 2015. 云南省麻栗坡县南温河钨矿床地质特征及成因探讨[D]. 中国地质大学(北京)硕士学位论文: 12-36.
- 刘玉平, 李正祥, 叶霖, 等. 2011. 滇东南老君山矿集区钨成矿作用 Ar-Ar 年代学[J]. *矿物学报*, 31(S1): 617-618.
- 刘艳宾. 2017. 滇东南老君山地区燕山期花岗岩成因机制及钨锡成矿规律[D]. 中国地质大学(北京)博士学位论文: 1-83.
- 吕伟, 冯明刚, 胡长寿. 2001. 滇东南南温河地区猛洞岩群变质作用特征[J]. *云南地质*, (1): 25-33.
- 马慧慧. 2013. 滇东南老君山花岗岩岩石学与地球化学特征及其构造意义[D]. 中国地质大学(北京)硕士学位论文: 37-44.
- 欧阳永棚, 张诚, 贺玲, 等. 2018. 滇东南官房钨矿床与南秧田钨矿床地质特征对比研究[J]. *地球科学前沿*, 8(2): 197-214.
- 潘锦波, 张达, 阙朝阳, 等. 2015. 滇东南老城坡片麻状花岗岩地球化学特征、锆石 U-Pb 年龄及其意义[J]. *矿物岩石地球化学通报*, 34(4): 795-803.
- 阙朝阳, 张达, 狄永军, 等. 2014. 滇东南麻栗坡南温河—洒西一带钨矿控矿要素及深部找矿突破[J]. *地学前缘*, 21(2): 286-300.
- 阙朝阳. 2016. 云南麻栗坡南温河—洒西一带钨成矿系统及找矿方向研究[D]. 中国地质大学(北京)博士学位论文: 124-155.
- 尚志. 2017. 个旧贾沙杂岩体 U-Pb 同位素定年、地球化学特征及其构造意义[D]. 中国地质大学(北京)硕士学位论文: 11-51.
- 盛夏. 2016. 滇东南老君山山西钨矿床地质特征及成矿流体研究[D]. 中国地质大学(北京)硕士学位论文: 42-54.
- 石洪召, 张林奎, 任光明, 等. 2011. 云南麻栗坡南秧田白钨矿床层控似矽卡岩成因探讨[J]. *中国地质*, 38(3): 673-680.
- 石洪召, 张林奎, 林方成, 等. 2013. 云南麻栗坡南秧田白钨矿床流体包裹体、稳定同位素特征及其成矿意义[J]. *沉积与特提斯地质*, 33(2): 95-102.
- 石洪召, 张林奎, 范文玉, 等. 2015. 滇东南老君山地区南秧田白钨矿床成矿模式[J]. *中国钨业*, 30(2): 1-6.
- 苏航, 韦文彪, 陶志华, 等. 2016. 云南都龙矿区隐伏花岗岩地质地球化学特征与锡锌成矿作用[J]. *矿物学报*, 36(4): 488-496.
- 孙雅琳, 许虹, 祝新友, 等. 2017. 内蒙古维拉斯托锡多金属矿床流体包裹体特征及其地质意义[J]. *矿产勘查*, 8(6): 1044-1053.
- 谭洪旗, 刘玉平, 叶霖, 等. 2011a. 滇东南南秧田钨锡矿床金云母⁴⁰Ar-³⁹Ar 定年及意义[J]. *矿物学报*, 31(S1): 639-640.
- 谭洪旗, 刘玉平, 徐伟, 等. 2011b. 中—浅正变质岩锆石 SHRIMP 法与 TIMS 法测年结果不一致处理——以滇东南南温河花岗岩为例[J]. *矿物学报*, 31(1): 62-69.
- 谭洪旗, 刘玉平. 2017a. 滇东南猛洞岩群斜长角闪岩成因及其构造意义[J]. *吉林大学学报(地球科学版)*, 47(6): 1763-1783.
- 谭洪旗, 刘玉平. 2017b. 滇东南猛洞岩群变质-变形研究及构造意义[J]. *地质学报*, 91(1): 15-42.
- 谭筱虹, 李志均, 杜再飞. 2010. 滇东南南温河地区深变质岩中似层状白钨矿[J]. *云南地质*, 29(4): 382-387.
- 涂光炽. 2002. 我国西南地区两个别具一格的成矿带(域)[J]. *矿物岩石地球化学通报*, (1): 1-2.
- 王彩艳. 2019. 滇东南南秧田钨矿床年代学及流体地球化学研究[D]. 昆明理工大学硕士学位论文: 26-57.
- 王彩艳, 任涛, 王蝶, 等. 2020. 滇东南南秧田超大型钨矿床流体包裹体及 H、O 同位素研究[J]. *大地构造与成矿学*, 44(1): 103-118.
- 王大鹏, 张乾, 刘玉平, 等. 2015. 滇东南马关县南捞地区成岩、成矿时代约束[J]. *矿物学报*, 35(S1): 720.
- 王冠, 杜谷, 刘书生, 等. 2012. 电感耦合等离子体质谱法对白钨矿中稀土元素的准确测定——以云南麻栗坡南秧田白钨矿床的成因探讨为例[J]. *岩矿测试*, 31(6): 1050-1057.
- 王艳丽. 2014. 湘东南地区燕山早期花岗岩浆—热液演化及钨成矿作用研究[D]. 中国地质大学(北京)博士学位论文: 63-64.
- 王艳丽, 祝新友, 杨毅, 等. 2016. 湖南茶陵邓阜仙花岗岩中“眼球”状析出物地球化学特征及成因[J]. *矿床地质*, 35(3): 618-632.
- 王忠强, 李超, 张定才, 等. 2020. 滇东南南秧田钨矿床白钨矿原位 Sr 同位素对成矿的指示[J]. *岩矿测试*, 39(2): 285-299.
- 韦海波. 2015. 云南麻栗坡印支期斜长角闪岩的发现及其地质意义[D]. 中国地质大学(北京)硕士学位论文: 33-44.
- 吴剑. 2017. 广东省红岭钨矿成矿地质模型与找矿预测[D]. 中国地质大学博士学位论文: 112-119.
- 解洪晶, 张乾, 祝朝辉, 等. 2009. 滇东南薄竹山花岗岩岩石学及其稀土-微量元素地球化学[J]. *矿物学报*, 29(4): 481-490.
- 徐建珍. 2012. 云南省麻栗坡县沟秧河矿区似层状钨矿床成因探讨[D]. 中国地质大学(北京)硕士学位论文: 41-45.
- 薛伟. 2019. 滇东南老君山钨锡多金属矿集区控矿构造及成矿规律[D]. 中国地质大学(北京)博士学位论文: 31-116.
- 颜丹平, 周美夫, 王焰, 等. 2005. 都龙-Song Chay 变质穹窿体变形与构造年代——南海盆地北缘早期扩张作用始于华南地块张裂的证据[J]. *地球科学*, (4): 402-412.
- 杨光树, 王凯, 燕永锋, 等. 2019. 滇东南老君山锡-钨-铋多金属矿集区含矽卡岩成因研究[J]. *岩石学报*, 35(11): 3333-3354.
- 叶霖, 鲍谈, 刘玉平, 等. 2016. 云南都龙锡铋多金属矿床成矿阶段与成矿流体[J]. *矿物学报*, 36(4): 503-509.
- 叶霖, 鲍谈, 刘玉平, 等. 2018. 云南都龙锡铋矿床中白钨矿微量元素及稀土元素地球化学[J]. *南京大学学报(自然科学)*, 54(2): 245-258.
- 于志峰, 许虹, 祝新友, 等. 2015. 湖南瑶岗仙钨矿床成矿流体演化特征研究[J]. *矿床地质*, 34(2): 309-320.
- 余振东, 谭荣, 曹慧青, 等. 2023. 赣北莲花山钨锡矿集中细粒白云母花岗岩成因——来自锆石 U-Pb 同位素和元素地球化学的约束[J].

- 地质通报, 42(12): 2084–2095.
- 曾志刚, 李朝阳, 刘玉平, 等. 1998. 滇东南南秧田两种不同成因类型白钨矿的稀土元素地球化学特征[J]. 地质地球化学, (2): 34–38.
- 曾志刚, 李朝阳, 刘玉平, 等. 1999. 老君山成矿区变质成因夕卡岩的地质地球化学特征[J]. 矿物学报, (1): 48–55.
- 张定才, 康旭, 朱爱中, 等. 2013. 云南省麻栗坡县南温河钨矿储量报告[R]. 文山麻栗坡紫金钨业集团有限公司.
- 张彬, 张斌辉, 张林奎, 等. 2016. 滇东南老君山矿集区酒西钨矿床流体包裹体特征及其地质意义[J]. 华南地质与矿产, 32(4): 333–342.
- 张林奎, 张彬, 张斌辉, 等. 2018. 云南南秧田钨矿床电气石的成分和硼同位素特征及成矿意义[J]. 矿床地质, 37(3): 481–501.
- 张乾, 王大鹏, 李开文, 等. 2011. 南岭西段超大型锡石硫化物矿床成因——是热水沉积还是岩浆热液[J]. 矿物学报, 31(S1): 132–133.
- 张颖, 黄智龙, 罗泰义, 等. 2013. 云南个旧西区贾沙辉长-二长岩体 SIMS 锆石 U-Pb 定年及地球化学研究[J]. 地球化学, 42(6): 523–543.
- 赵震宇. 2017. 云南省马关县都龙锌锡多金属矿床岩浆作用及矿床成因研究[D]. 中国地质大学(北京) 博士学位论文: 30–52.
- 周建厚. 2017. 新疆东昆仑造山带白干湖钨锡矿田成矿机制研究[D]. 中国地质科学院博士学位论文: 114–116.
- 周瑞辉, 林木森, 吴久芳, 等. 2023. 滇东南荒田钨矿床成矿流体来源及演化: 来自白钨矿地球化学特征的约束[J]. 地质通报, 42(10): 1728–1744.
- 祝新友, 王京彬, 王艳丽, 等. 2012a. 南岭锡钨多金属矿区碱长花岗岩的厘定及其意义[J]. 中国地质, 39(2): 359–381.
- 祝新友, 王艳丽, 程细音, 等. 2012b. 碱长花岗岩与液态分异及钨多金属矿成矿作用[J]. 矿床地质, 31(S1): 415–416.
- 祝新友, 王京彬, 王艳丽, 等. 2015. 浆液过渡态流体在矽卡岩型钨矿成矿过程中的作用——以湖南柿竹园钨锡多金属矿为例[J]. 岩石学报, 31(3): 891–905.
- 祝新友, 王艳丽, 程细音, 等. 2016. 湖南瑶岗仙花岗岩体中包体的地质地球化学特征与岩浆演化[J]. 岩石矿物学杂志, 35(1): 16–32.
- 祝新友, 傅迷, 程细音, 等. 2017. “带外脉式”钨矿床成矿模型——以湖南白云仙钨矿田头天门矿床为例[J]. 矿床地质, 36(1): 107–125.