

DOI: 10.16788/j.hddz.32-1865/P.2024.09.023

引文格式:周济元,肖凡. 2025. 从钨矿“五层楼”到“成矿结构体系”及其形成机制看地质力学理论的应用和发展——纪念《地质力学概论》发表62周年[J]. 华东地质, 46(1): 1-15. (ZHOU J Y, XIAO F. 2025. The application and development of geomechanical theory viewed from “Five-storey model” to “Metallogenic structure system” and its formation mechanism——commemorating the 62<sup>nd</sup> anniversary of the publication of *Introduction to Geomechanics* [J]. East China Geology, 46(1): 1-15.)

# 从钨矿“五层楼”到“成矿结构体系”及其形成 机制看地质力学理论的应用和发展—— 纪念《地质力学概论》发表62周年

周济元,肖凡

(中国地质调查局南京地质调查中心,江苏南京210016)

**摘要:**赣南是我国钨矿资源蕴藏最丰富的地区,至20世纪50年代,该区已评价了一批钨矿床,被誉为“世界钨都”。由于找矿理论和方法的局限,地表矿基本已经找完。国家急需钨矿资源,地质工作者用地质力学理论-构造体系分析方法指导区域研究和漂塘等钨矿勘探,探索脉钨矿床的分布规律:平面具有方向性、等距性;剖面具有树枝状、层带性,五个层带称“五层带”。依此预测木梓园地区还存在矿床,验证为大型钨钼矿床后,又经广东梅子窝钨矿等勘探检验,“五层带”改称“五层楼”,曾誉为“开创中国乃至世界模式找矿先河”。随着钨矿勘探工作的推进,在黄沙等“五层楼”模式下,花岗岩顶部发现了平行接触面的层状云英岩型钨矿体以及其他矿床类型,“五层楼”模式局限性显现。新一轮钨矿资源调查,经南岭东段矿山研究后提出了以花岗岩体为中心,以岩体与围岩接触面为标志,以控矿裂隙力学性质和空间分布为基础,突出不同类型矿床位置,具有成生联系的“五层楼”、“裙楼”、“地下室”和“地基”组成的成矿结构体系,全方位指导广东南山—良源钨矿基地优选及不同类型矿床的精准勘查,取得了重大突破。进一步研究发现:其控矿构造为岩浆动力成因,并呈不同的组合形式;对其成矿因素和形成机制进行分析,认为其受区域构造控制岩基、岩株,岩株岩浆动力致裂和成矿因素影响,是围岩-构造-岩浆-构造-成矿有序融合形成的。

**关键词:**钨矿;“五层楼”;成矿结构体系;岩浆动力成因构造;控矿组合形式;地质力学

**中图分类号:** P618.44; P618.65; P618.67

**文献标识码:** A

**文章编号:** 2096-1871(2025)01-001-15

李四光著《地质力学概论》(简称《概论》)于1962年出版,至今已62年。该著作的出版,促进了我国地质事业的发展,特别是在矿产资源普查和勘探、工程地质稳定性及重大工程选址、构造活动性及地震预测预报、防灾减灾和环境治理等领域的应用,取得了卓越成就,对国民经济建设作出了重大贡献。现以钨、锡和钼等矿产的找矿工作为例,对地质力学理论的应用和发展,简述于下。

## 1 从“一筹莫展”到“五层带”的发现

赣南钨矿资源蕴藏十分丰富,素有“世界钨都”的美誉,是我国最早应用地质力学理论揭示含钨石英脉带分布规律并进行成矿预测进而获得一系列钨矿找矿突破的地区。

该区1907年发现西华山钨矿,1915年开采黑钨矿。至20世纪50年代,用“就矿找矿”、“数大脉”,以民采为线索,择地表大脉型钨矿进行找

\* 收稿日期:2024-09-23 修订日期:2024-12-13 责任编辑:谭桂丽

第一作者简介:周济元,1936年生,男,教授,博士生导师,主要从事构造地质学、地质力学、矿田构造学、构造动力成矿、成矿预测、地震地质学、工程地质学和非金属矿开发等研究工作。Email: zjy\_3610@qq.com.

矿普查和矿产勘探,评价了一批大-中型钨矿床,以“世界钨都”载入史册。同时,地表矿也基本找完,当国家急需钨矿资源时,到何处找钨矿?如何拓展找矿领域?能用的方法都已试过,能到的地区也已查遍,进展甚微,陷入一筹莫展之际。为此,地质工作者学习《概论》,按照其在矿产资源普查勘探的目标任务:它企图根据上述方法所建立的原则(指地质力学理论,笔者注),在地壳的各部分找出有用矿产分布的规律,提出线索,以便寻找普查找矿和矿产勘探的路线(李四光,1973)。用构造体系成生联系的分析方法,指导西华山—棕树坑地区普查找矿和漂塘等钨矿勘探,探索、揭示含钨石英脉带的分布规律,发现了钨矿脉带的展布规律:在平面上,呈方向性、成带性和等距性;在剖面上,自上而下由细到粗至尖灭,呈树枝状或扇形;用含脉密度(条/m)、含脉率(%)和含钨品位等划分层带,即:①地表线脉带→②细脉带→③薄脉带→④大脉带→⑤根脉(尖灭)带,称“五层带”;具成生联系,受构造体系控制。因此,线脉带虽为无工业价值的矿化带,却可作为隐伏矿床的找矿标志(杨明桂,2015)。运用上述分布规律和找矿标志,预测木梓园地区有一矿床存在。江西省综合地质大队便到木梓园一带普查。首先,将窄、直、密、长等控制线脉的裂隙鉴定为扭(剪)性,走向75°。其次,统计线脉的含脉率和含脉密度(均较高),脉带中心含脉密度尤其高;带长600 m,带宽30 m,呈韵律性。再次,查明线脉矿化较强,矿化主要为含锂云母和微小锡石,脉侧硅化较强,预测深部可能存在工业矿体。依据上述特征,江西地质局909地质大队到矿区打钻,第一孔发现细、薄脉带,有黑钨矿;第二孔在300 m深见3条大脉,厚30~70 cm,验证了深部有石英大脉钨矿体。江西地质局908地质大队在地表由线脉-脉组-脉组群进行追索,圈定4个左行侧列线脉组;依据热变质角岩带和斑点板岩带分布趋势,认为成矿花岗岩为西华山—漂塘复式花岗岩基,中部受NNE向、EW向和NEE向断裂复合控制,预测隐伏NEE向凸起岩脊状岩株与矿床主体方向吻合。经详细勘探,探明了世界首例大型石英脉型隐伏钨钼矿床。这一重大找矿成果上报地质部后,李四光部长对此高度赞扬,并对江西地质局908地质大队等通报表扬。从此,以线脉带为标志寻

找隐伏钨矿床的宝贵经验传遍南岭乃至全国。后续又在该地区发现了大余九龙脑、石雷,于都上坪淘,崇义高盆、新安子等半隐伏、隐伏石英脉型钨矿床(杨明桂,2015)。

## 2 由“五层带”到“五层楼”,开创了模式找矿先河

为了推广赣南钨矿找矿经验,1966年3月国家科学技术委员会会同地质部在江西大余召开了“赣南钨矿地质工作现场会议”(简称“会议”,下同),由时任地质部副部长许杰主持。江西地质局909地质大队朱焱龄、卢先荣以江西大余漂塘钨锡矿勘探实践为主要依据,撰写了《运用构造体系分析的方法揭示矿产分布规律的体会》论文,阐述了该矿区钨矿脉自上而下由细到粗再尖灭的特征,划分了5个层带,称为“五层带”;江西地质局908地质大队、909地质大队、综合地质大队和地质部中南地质科学研究所等提交了《木梓园隐伏矿床地质特征及研究方法》、《木梓园隐伏花岗岩预测》和《西华山花岗岩体形成的多阶段性与多次成矿作用》等论文(袁赣湘,2018),并分别作了报告(吴永乐等,1987;朱焱龄等,1981);广东冶金勘探局932队介绍了学习江西地质局909地质大队的经验,指导广东始兴梅子窝钨矿勘查,作了《我们是怎样利用‘五层楼’规律寻找、评价与勘探黑钨石英脉矿床的》的报告(广东有色金属地质勘探公司九三二队,1966)。与会专家热议,“五层楼”获得认同(杨明桂,2015)。会后,连同许杰副部长的《重要讲话》和上述4篇论文,以《木梓园隐伏钨矿床的发现》为题上报国务院,被列为中华人民共和国1965年重大科技成果之一(杨明桂,2015)。1966年,上述论文在《中国地质》增刊发表(袁赣湘,2018)。1978年,“赣南钨矿成矿规律与预测”项目进一步总结了钨矿“五层楼”成矿模式,相关成果受到业界高度评价,被认为“开创了我国乃至世界模式找矿先河”,获得了全国科技大会奖(杨明桂,2015)。

由此看出,钨矿“五层楼”模式最早源于“五层带”,运用地质力学理论-构造体系成生联系分析方法,揭示了含钨锡石英脉带等距性和“五层带”的空间分布规律,成功指导了木梓园

地区普查找矿和深部勘探,获得了大型钨钼矿床找矿突破。此后,这一模式被推广应用至梅子窝等其他钨矿床的勘探实践,经反复证明是正确的,充分显示了地质力学理论在“开创中国乃至世界模式找矿先河”中的重要作用。

### 3 成矿结构体系

#### 3.1 由来与概念

2004年,南岭成矿带东段新一轮钨矿资源调查开始,笔者等实地调查了赣、粤、湘、闽等地区典型的钨、锡和钼矿床,发现花岗岩体与围岩接触带可以形成具有成生联系的一系列钨矿床类型,除了“五层楼”(石英脉型)外,还有矽卡岩型、层间裂隙充填交代型或硅质岩型、断裂破碎蚀变岩型、云英岩型和(或)伟晶岩型及花岗岩型等。为了优选矿产基地和引领矿区深部与边部的成矿预测,笔者在控矿、成矿构造体系和成矿体系(周济元和徐旃章,1982;周济元和余祖成,1983;周济元等,1988,2000;周济元,1989,2019)的基础上,突出不同类型矿床(体)及其空间分布规律,提出了钨矿的成矿结构体系新认识(周济元和肖惠良,2006),并于2005年在“赣州钨矿学术讨论会”上作报告。该认识沿用前人“五层楼”这一建筑学概念,将各种钨矿类型和空间结构进行了系统命名,即以花岗岩体为中心,以岩体与围岩接触面为标志,以控矿裂隙力学性质及其分布特征为基础,在侵入接触面以上,若为含钨石英脉带,则称为“五层楼”,当岩体与碳酸盐岩层或钙质碎屑岩层接触时,经“双交代”作用,常有矽卡岩型;与碎屑岩或砂泥质岩层接触时,往往有层控型或层间裂隙充填交代型或硅质岩型;受断裂破碎带控制时,常有断裂破碎蚀变岩型,称为“裙楼”。在侵入接触面以下,岩体顶部呈层状、似层状或透镜状云英岩型和(或)伟晶岩型,称为地下室,与苟月明提出的“岩壳带”和裴荣富认为的“地下室”(杨明桂,2015)不谋而合;再往下,为细脉浸染状、浸染状、层状、似层状、透镜状花岗岩型,称为“地基”。若成矿岩浆同位同方式二次或多次连续侵入,形成二层或多层矿层(体),或岩浆同位同方式二次或多次不连续侵入,形成平行穿插

的石英脉型钨矿脉(少数穿过早期接触面),称为“层覆层”或“楼嵌楼”;若成矿岩浆是异位同方式不连续侵入形成的,称为“楼下楼”;后者尚可以楼下楼1或2...表示(周济元等,2024)。从成矿结构体系的角度,将花岗岩体及其周围有成生联系的不同类型、不同部位的矿床(体)作了清晰有序的具体说明,称之为岩浆型成矿结构体系。运用这一成矿结构体系模式,依据区域成矿地质异常的优劣,可圈定矿产资源基地。依据矿床(体)的不同类型、不同部位的空间分布规律,可预测深部或边部新的矿床类型及其所处的部位。

#### 3.2 应用与验证

钨矿成矿结构体系是为满足新一轮钨矿资源基地优选和矿区深部、边部精准成矿预测需求而提出来的。实践表明,该体系在以上两方面具有明显的作用(周济元等,2009,2013;周济元和崔炳芳,2018)。

##### 3.2.1 矿产基地优选

在论证广东始兴南山—良源矿产基地找矿远景时,除了当时掌握的地、物、化、遥等资料外,成矿结构体系模式突显了其可操作性、精准性和高命中率的指导优势,大大增强了该区具有良好的找矿前景的信心。

具体依据是,其位于南岭成矿带东段广东始兴石人嶂—梅子窝—师姑山钨锡成矿带,出露晚古生代浅变质碎屑岩、碳酸盐岩地层和燕山期花岗质侵入杂岩体,EW向、NE向和NNE向构造复合部位,地表有石英细脉型钨矿点,呈EW向分布的1:20万化探W、Sn、Mo、Bi、Pb综合异常和重砂W、Sn异常等。成矿结构体系模式从整体上阐明了可能存在的矿床类型及其产出部位,地表发育的含钨石英细脉(五层楼),不仅是薄脉、大脉型矿体的可能找矿标志,对于寻找其他矿床类型也具有重要的指示意义,表明南山—良源矿产基地的找矿前景较好。

##### 3.2.2 矿区勘查部署

在南山矿区矿产地质调查中,肖惠良等(2008)依据区域化探异常和含钨石英脉分布特征,圈定了矿区范围,并进行了土壤地球化学测量、矿产地质填图和地质剖面测制。在岩体与围岩接触带和隐伏岩体可能的最高部位实施了槽探和钻探,

特别是开始的两个钻孔位置的部署,明确要打穿岩体接触面以下一段距离,搞清有无“地下室”、“地基”及其层次后方可停钻。然后,视见矿情况再向外拓展。按照成矿结构体系模式,自上而下有不同的矿床类型,特别是花岗岩型,还可能有二层以上(依据二次以上侵入的复式岩体)都在考虑之列。经勘查,南山 W、Sn、Mo、Bi、Cu 综合异常区在地表为花岗岩型钨钼多金属矿化层(体)、断裂破碎蚀变岩型钨矿体、含钨锡云英岩型矿层、钨钼矿化细粒二云母花岗岩和细粒黑云母花岗岩体。在深部,ZK301 和 ZK401 钻孔均见多层厚度较大的矿层,其中 ZK301 钻孔深 84~88 m 处见云英岩型钨钼多金属矿层,Bi、Sn、Pb、Zn、Ag 也达工业品位。ZK303、ZK403 和 ZK505 钻孔均见多层云英岩型和花岗岩型钨钼多金属矿层。在松岗梗—牛骨顶一带,矽卡岩型钨锡多金属矿层广泛分布,23 个矿层总厚度达 294.7 m。以上表明,矿区有石英脉型钨钼多金属矿体(五层楼)、矽卡岩型钨锡(铋)多金属矿层、断裂破碎蚀变岩型钨钼多金属矿体(裙楼),云英岩型、伟晶岩型锡钨多金属矿层(地下室)和蚀变花岗岩型钨锡钼多金属矿层及蚀变斑岩型钨钼矿层(地基)。

在良源矿区勘查中(肖惠良等,2012),杉木地—上岗一带含矿石英脉密布(五层楼),其中 V4 脉全长 1 075 m,连续长约 812 m,厚 0.88~1.74 m,矿化强烈,为石英脉型-破碎蚀变岩型钨锡银多金属矿体。在 ZK302 钻孔花岗岩与晚泥盆世天子岭组砂泥质灰岩接触带,有 10 余米厚的石榴子石透辉石矽卡岩型钨矿层(裙楼)。在上营民窿,伟晶岩沿花岗岩体顶部呈层状分布,在花岗细晶岩脉上部或其两侧接触带呈脉状分布,厚度 < 4 m,可见辉钨矿、黄铜矿。在 1 号勘探线探槽中,见含钨钼铌钽多金属矿细粒花岗岩脉,W、Mo、Ta<sub>2</sub>O<sub>5</sub>、Nb<sub>2</sub>O<sub>5</sub>、Pb、Zn 均达工业品位。在上营—河渡综合异常区,ZK101、ZK102 钻孔燕山早期细粒黑云母花岗岩体顶部可见规模较大的云英岩型(地下室)和白云母钠长石花岗岩型铌钽钨多金属矿层,Mo、Bi 和 REE 局部达工业品位(地基)。

经过中国地质调查局南京地质调查中心组织专家评审,认为南山为超大型钨锡多金属矿床,良源为大型铌钽钨多金属矿床,广东始兴南山—良源矿产基地取得重大的找矿突破。这不仅验证

了成矿结构体系组成矿床类型齐全、分布位置准确,“地基”型矿层有二层以上,达到了预期的地质调查和勘查目标,还表明其理论的正确性,凸显了成矿结构体系模式指导找矿的可操作性好、精准性强和命中率高的优势。

## 4 岩浆动力成因构造及其控矿组合形式

理论指导实践,实践上升理论,又发现新问题,从而推动创新发展,永无止境。在“五层楼”和成矿结构体系模式实践中,均发现一些问题需要进一步研究。

### 4.1 发现的问题

“五层楼”模式是运用构造体系成生联系分析方法,对漂塘等矿区含钨石英脉产出规律的经典概括,脉带的基本特征是直立或近直立分布,自上而下由细到粗至尖灭,整体呈树状或扇形。根据脉体相对粗细等,划分层带或楼层,具有五层的,称为“五层带”或“五层楼”。“五层楼”模式在指导勘查实践中取得了很大的成果,但也有局限性。比如,从楼层数量来说,除了五层外,还有七层楼、四层楼、三层楼和二层楼(杨明桂,2015),甚至一层平房(俗称“脉芒”)(梅勇文,1985;王志强等,2024),说明“五层楼”仅为石英脉型钨矿床(体)的一部分。从含钨石英脉产状来看,除了直立和近直立外,还有中等倾斜、X 交叉脉(体)和水平或近水平层状脉(体),表明直立者或近直立者也只是一部分。从控脉裂隙力学性质来看,除张性、张扭(剪)性外,还有压性、压扭(剪)性、扭(剪)性、扭(剪)压性、扭(剪)张性和压性叠加张性等(周济元,1989),表明张性或张扭(剪)性只是一部分。与花岗岩株有成生联系的矿床类型较多,除了石英脉型外,还有其他矿床类型,石英脉型钨矿床(体)仍然只是一部分。从成矿结构体系来看,其形成机制尚需进一步研究。

### 4.2 岩浆动力成因构造

笔者针对上述问题进行了长期研究,发现控矿构造大多为岩浆动力形成的,主要为裂隙,断裂和褶皱较少(为便于行文,以裂隙表述为主,下同),具有以下特征。

(1)不同力学性质和方向的控矿裂隙仅在成矿岩体与围岩主要接触面(简称接触面,下同)的

一定形态部位和范围的两侧分布,并呈一定的变化趋势。

(2)分布在接触面两侧的不同力学性质和方位的控矿裂隙,与接触面呈一定的空间关系,或直交或斜交或平行,但不穿切同期形成的接触面。

(3)控矿裂隙分布的一定形态部位和范围的接触面,往往成为其物源、热源和力源的重要物理、化学界面或约束边界。

(4)分布在接触面两侧的不同力学性质和方位的控矿裂隙具有成生联系,构成一定的组合形式——构造体系或构造型式,结合岩石、岩层组合的物理化学性质和边界条件,可反演构造应力场,恢复动力方式,追索动力来源,主要表现为由下向上、由下向斜上方或由下向四周产生的作用,分别称为上冲力、斜冲力和膨胀力,它们统称为岩浆动力,而非构造动力。由岩浆动力作用产生的构造、构造体系或构造型式,简称岩浆动力成因构造,与构造动力成因构造有明显的区别(周济元等,2024)。例如,在福建赤路钨矿床(肖俊明等,1976),龙岬石穹隆平台状岩株与晚侏罗世火山岩层之间的缓倾斜接触面,将垂直接触面的陡倾斜石英脉型钨矿脉(体)与平行接触面的云英岩型钨矿层截然分开,并分别向上尖灭、向下消失。前者为张性、张扭(剪)性-压性,后者为压性、压剪性-张性(周济元等,2024),分布于穹隆平台状岩株范围内。两种类型的辉钨矿 Re-Os 同位素年龄仅相差约 1 Ma(张克尧等,2009),表明其既具有同时性,又略显上早、下晚的差异性,两者具有成生联系。控矿组合形式呈陡倾斜平行-缓倾斜平行,结合岩石、岩层物理化学性质和边界条件,反演构造应力场、恢复动力方式,推测岩浆动力为沿陡倾斜裂隙、垂直接触面的上冲力。矿区 NWW 向、SN 向裂隙则为新华夏系构造成分,是构造动力(反时针扭动)形成的。因此,该矿床主要的控矿裂隙为岩浆动力成因,次要控矿裂隙为构造动力成因,这是识别岩浆动力与构造动力成因构造的典型实例(周济元等,2024)。

### 4.3 岩浆动力成因构造力学性质鉴定

岩浆动力成因构造力学性质鉴定是反演构造应力场、恢复动力方式和追索动力来源的前提,也是区分构造动力成因构造的重要基础,必须通

过野外实地和显微镜下认真观察、仔细对比、分析研究方能准确鉴定,鉴定标志和方法可参考有关文献(周济元,1976,1989;周济元等,2024)。

区别岩浆动力与构造动力成因构造主要有以下方法和步骤:①从岩体与围岩之间的接触面形状、产状入手。由于接触面是一个重要的物理化学标志面,其形态、产状是控制两侧变形、裂隙及其组合形式的边界条件,也是矿液(物源、热源和力源)聚集、分散的控制界面或约束界面,应首先加以研究。②准确鉴定岩体及其围岩中构造的力学性质,即压、张、扭(剪)、压扭(剪)、张扭(剪)、扭(剪)压、扭(剪)张、压-张和张-压等力学性质(周济元,1976,1989),测定其产状,分析其与接触面的空间分布关系,即二者是呈直交、斜交或平行。这是指示岩浆动力方式的直接标志,也是区分构造动力成因构造的关键之一。③准确查明构造分布范围。岩浆动力成因构造及其组合形式,与岩浆动力方式、接触面及其两侧一定部位和范围的岩体及围岩的物理化学性质有关,构造的分布范围与接触面的一定形态部位和范围基本一致,这是检验岩浆动力与构造动力成因构造的又一关键标志。④在一定分布范围内的构造及其组合形式,往往与一定形态特征的岩体(岩株、岩钟和岩瘤等)相对应,可基本肯定该构造及其组合形式由岩浆动力作用形成。⑤准确确定构造及其组合形式的成生联系。所谓成生联系,是依据构造及其组合形式的规律性、重现性、同时性和同源性来确定。一定构造及其组合形式在不同地区具有类似条件的部位多次出现,整体反映了同一岩浆动力方式,它们之间具有成生联系,与构造动力成因构造及其组合形式整体反映的构造动力方式不同。

### 4.4 岩浆动力成因构造控矿组合形式

由于不同地区成矿地质条件的差异性,成矿结构体系的控矿组合形式呈现多样化。研究表明,由一次或一次以上岩浆连续侵入形成的构造控矿组合形式,称为单一控矿组合形式类型;由二次或多次岩浆连续或不连续侵入形成的构造控矿组合形式,称为复合控矿组合形式类型。

#### 4.4.1 单一控矿组合形式类型

单一控矿组合形式类型,依据接触面两侧裂隙控制矿脉、层(体)的组合形式,经分析研究,择主要者(表1)分述于下。

表1 岩浆动力成因构造单一控矿组合形式类型及其特征

Table 1 Types and characteristics of single ore-controlling association of magmatic dynamic genetic structure

由上而下组成	1	2	3	4	5	6
	直立树枝状-对称弧形	倾斜平行-不对称弧形	陡倾斜平行-缓倾斜平行	水平或缓倾斜平行	倾向相向平行夹“X”形-弧形平行	陡立或陡立-圆弧-陡立双平行
1	直立树枝状石英脉型钨矿	倾斜平行石英脉型钨矿	陡倾斜石英脉型钨矿平行分布	水平石英脉型、硅化脉带型钨矿层(体)叠层平行分布	两侧倾向相向平行中间夹“X”形石英脉型钨矿	陡立石英脉型钨金矿平行接触面分布
2	平行或近平行接触面砂卡岩型、砂岩细脉型钨矿层(体)	砂卡岩型钨矿平行或近平行接触面分布				
3	接触面	接触面	接触面	接触面(隐形)	接触面	接触面
4	伟晶岩型、云英岩型矿层(体)平行接触面叠层分布	云英岩型矿层(体)平行接触面分布	缓倾斜云英岩层(体)平行接触面及以下叠层分布	上房与接触面平行分布的云英岩型钨矿层	与接触面平行云英岩型、细脉浸染型、浸染型钨矿层(体)叠层平行分布	陡立云英岩型钨金矿平行接触面分布
5	湖南瑶岗仙钨(钼)矿床(李顺庭, 2011)	江西徐山钨矿床(王显华和龙细友, 2010)	福建赤路钨矿床(肖俊明等, 1976)	福建建瓯上房钨矿床(陈润生等, 2013); 福建古田西朝钨矿床(石礼炎, 2009)	江西茅坪钨锡矿床(王定生等, 2011)	广东莲花山钨金矿床(李兆麟和杨忠芳, 1992), 江西阳储岭钨矿床(范楚涵等, 2022)

(1)直立树枝状-对称弧形,指矿脉(体)呈直立或近直立树枝状或扇形与对称弧形接触面平行或近于平行分布矿层(体)的组合形式。如,湖南瑶岗仙钨(钼)矿床(李顺庭, 2011)由一次或一次以上岩浆连续侵入,在接触面以上有直立树枝状或扇形,称为“五层楼”(广东有色金属地质勘探公司九三二队, 1966;梅勇文, 1985;杨明桂, 2015;袁赣湘, 2018;周济元和肖惠良, 2006;周济元等, 2009, 2013;周济元和崔炳芳, 2018);平行或近平行接触面的砂卡岩型、砂岩层间细脉型和破碎蚀变岩型钨矿,称为“裙楼”(周济元和肖惠良, 2006;周济元和崔炳芳, 2018);在弧形接触面及以下,有平行或近平行弧形伟晶岩型、云英岩型钨矿层,称为“地下室”(杨明桂, 2015;周济元和肖惠良, 2006;周济元和崔炳芳, 2018)。往下,呈细脉浸染、浸染状,层状、似层状花岗岩型,称为“地基”(周济元和肖惠良, 2006;周济元和崔炳芳, 2018)。为了按建筑学概念进行统一,曾建议以接触面为地面,以上仅一层的,称“平房”;二层及以上的,称“楼”或“多层楼”;其两侧的砂卡岩型、层间细脉型和断裂破碎蚀变岩型等,称“裙楼”;以下的云英岩型和/或伟晶岩型,称

“地下室”;再往下,呈细脉浸染、浸染状,层状、似层状和透镜状花岗岩型矿层(体),原称的“地基”改称“室下室”;一层的,称室下室1,二层的,称室下室2,……,以此类推。这样,由上而下、自中心向两侧,依次为:“多层楼”(二层以上)、“裙楼”(含一层“平房”及上述矿床类型)、“地下室”和“室下室”等,组成成矿结构体系的矿床类型及分布位置所呈现结构的名称即可统一了(周济元等, 2024)。

(2)陡倾斜平行-缓倾斜平行,指矿脉(体)在平面状缓倾斜接触面以上呈陡倾斜平行分布和接触面及以下呈缓倾斜平行分布的组合形式。如,福建赤路钨矿床(肖俊明等, 1976),缓倾斜平面状接触面以上,为陡倾斜近平行分布的石英脉型钨矿脉(体);缓倾斜平面状接触面以下,为缓倾斜平行分布的云英岩型钨矿层(体)。

(3)水平或缓倾斜平行,指矿层(体)在接触面上、下为平行叠置分布的控矿组合形式。如,福建建瓯上房钨钼矿(陈润生等, 2013),岩体与围岩接触面呈 $15^{\circ}\sim 35^{\circ}$ 倾斜,其上形成与缓倾斜接触面平行的钨矿层(体),其下隐伏浅肉红色含斑中细粒钾长花岗岩体内接触带形成细脉状、条带状

平行接触面分布的云英岩型钨矿层(体),呈“上钨下钨”。福建古田西朝钨矿床(石礼炎,2009)具有类似的特征。水平平行分布的辉钨矿石英脉、辉钨矿硅化脉带穿插在似斑状中细粒黑云母二长花岗岩体和晚侏罗世火山碎屑岩层中,暗示这些矿层(体)与隐伏穹隆平台状细粒花岗岩株上侵有关,先形成与接触面平行的压性或压剪性裂面(面理);随温度下降、冷凝收缩,张性叠加,呈压性或压剪性-张性(周济元,1989);之后,岩浆分异气热液流体向水平平行裂面(面理)渗透、运移、充填、扩容、交代、蚀变、沉淀、成矿。可预测平台状细粒花岗岩岩株顶部可能形成与接触面平行分布的云英岩型,其下为细脉浸染、浸染状花岗岩型钨矿层(体)。

(4)倾向相向平行夹X形—弧形平行,指对称箱状背形接触面以上,两侧为相向倾斜平行分布的石英脉型钨矿脉(体),夹两组X交叉扭(剪)性裂隙控制的石英脉型钨矿脉(体),以及与对称弧形接触面及其下呈似层状、透镜状伟晶岩型、云英岩型和细脉浸染、浸染状花岗岩型钨矿层(体)平行叠置分布的组合形式。如,江西茅坪钨锡矿床(王定生等,2011),高桥下、下茅坪矿段,接触面以上分布相向倾斜平行的石英脉型钨矿脉(体),中间上茅坪矿段两组X形交叉扭(剪)性裂隙控制石英脉型钨矿脉(体),正对着隐伏花岗岩体平台位置;接触面及以下有似层状、透镜状伟晶岩型、云英岩型和细脉浸染、浸染状花岗岩型钨锡矿层(体)平行叠置分布。

(5)倾斜平行-不对称弧形,指倾斜平行分布石英脉型钨矿脉(体)和与不对称弧形接触面平行分布钨矿层(体)的组合形式。如,江西徐山钨矿床(王显华和龙细友,2010),接触面以上,倾斜平行分布石英脉型钨矿脉(体),矽卡岩型钨矿层(体)在接触面以上平行其分布和与不对称弧形接触面及以下云英岩型钨矿层平行分布的组合形式。郴州芙蓉矿田锡矿(陈民苏和刘星辉,2000)控矿组合形式具有类似的特点。

(6)陡立或陡立-圆弧-陡立双平行,指矿层(体)在陡立或陡立-圆弧-陡立接触面两侧或一侧平行分布的组合形式。前者如广东莲花山钨金矿床,其北矿带和南矿带的矿层(体)分别沿围岩与

石英斑岩接触面两侧或一侧平行分布(李兆麟和杨忠芳,1992);后者如江西阳储岭钨钼矿床,矿层(体)呈圆弧状在二长花岗斑岩(主要)或花岗闪长岩(次要)与新元古界变质岩或隐爆角砾岩围岩接触面一侧或两侧平行分布(范楚涵等,2022)。前人认为二者均是斑岩型矿床,现据矿体的产状变化规律(如层状、似层状、透镜状)分布,上部以网脉状、细脉状、细脉浸染、浸染状、角砾状构造为主,下部以浸染状、柔皱状和肠状韧性变形为主,平行接触面分布,笔者认为均是与斑岩有关的中高温热液充填交代型,先由岩浆侵入膨胀力或上冲-膨胀力形成裂隙(面)或隐爆角砾岩等,之后岩浆气热液聚集、渗透、运移、充填、扩容、交代或蚀变、沉淀或胶结、成矿。

#### 4.4.2 复合控矿组合形式类型

研究认为,岩浆动力和构造动力成因构造的复合控矿组合形式,可分为同性同位、同性异位和异性同位等复合控矿组合形式类型。

(1)同性同位或原位复合控矿组合形式,指岩浆动力成因构造或构造动力成因构造在同一矿区(田)复合控矿的组合形式。前者如赣南西华山—棕树坑地区的“内接触带大脉型钨矿床”(梅勇文,1985),直立矿脉相互平行,笔者依其是否穿切接触面的含矿石英脉分析认为:第一次岩浆( $\gamma_5^{2-1}$ )动力-上冲力作用仅产生围岩中的细小裂隙及其控制的矿化脉(俗称脉芒或矿芒);当其冷凝固结晶固结成脆性岩石后,第二次岩浆( $\gamma_5^{2-2}$ )动力-上冲力作用使第一次侵入岩体产生小裂隙及其控制的小矿脉(除个别穿切第一接触面外,其余均局限于第二接触面以上);第二次侵入岩体中大脉带和根脉带(除个别穿切第二接触面外,其余均局限在第二次侵入体中),可能是隐伏的、规模更大的第三次侵入岩浆( $\gamma_5^{2-3}$ )动力-上冲力作用产生的。可见,所谓“内接触带大脉型钨矿床”,实际是由三次岩浆原位不连续侵入上冲力作用,分别形成由大、中、小裂隙控制的含钨石英脉复合叠加或上下叠覆,也称为“房嵌楼”或“楼嵌楼”。后者因不属于此讨论,拟从略。

(2)同性异位复合控矿组合形式,指岩浆动力成因构造或构造动力成因构造在相同矿区(田)复合控矿的组合形式。前者如广东梅子窝钨矿床

(韦龙明等, 2008), 不同部位岩浆先后侵入上冲力产生一高一低二个含钨石英脉型“五层楼”。后者因不属于此讨论, 拟从略。

(3)异性同位复合控矿组合形式, 指不同性质动力成因构造在同一矿区(田)复合控矿的组合形式。如, 福建赤路钼矿床, 有岩浆动力和构造动力形成的构造及其所控矿脉(周济元等, 2024), 称为异性同位复合控矿组合形式。前者为NNW向、NEE向裂隙, 系岩浆动力成因构造; 后者为NWW向、SN向裂隙, 为新华夏系构造成因。它们均不同程度地控制矿脉, 但以前者为主, 后者为辅。

需要指出的是, 对“断裂破碎蚀变岩型”钨矿脉(体)(张庆林等, 2007)类型的鉴别, 首先要依据断裂特点, 查明控矿构造是岩浆动力还是构造动力成因, 然后再确定其所属的控矿组合形式或复合类型。

## 5 成矿因素

岩浆型成矿结构体系控矿组合形式类型的多样性, 受多种成矿因素影响。研究认为, 主要的成矿因素如下。

### 5.1 岩浆岩体与围岩主要接触面

岩体顶面形态的变化, 决定接触面的形态和产状, 并控制其两侧构造的分布范围。如福建赤路钼矿床(肖俊明等, 1976), 龙岬石穹隆平台状岩株顶面呈缓倾斜平台, 决定其与围岩接触面呈缓倾斜平面, 与围岩物理化学性质和岩浆动力方式一起, 共同决定两侧不同力学性质、方位、规模和分布范围的构造; 随后矿液循其充填形成陡倾斜平行-缓倾斜平行控矿组合形式。可见, 在一定条件下, 接触面是岩浆动力成因构造及其控矿组合形式的重要地球物理化学约束界面, 是重要成矿因素之一。

### 5.2 岩石、岩层组合物理化学性质

在一定接触面控制的岩浆动力作用下, 岩石、岩层组合物理化学性质影响其力学性质和空间分布不同的构造及其组合形式和矿床类型。过去, 对前者的关注度不够, 这其实是一个重要的成矿因素。一般来说, 在一定的动力作用下, 脆性、脆塑性岩石和岩层组合, 抗压强度 $\geq$ 抗剪强度 $\geq$ 抗张强度(Griggs 和 Handin, 1960), 易产生张性、张

剪性裂隙(断裂); 塑脆性、塑性岩石和岩层组合, 易产生剪张性、剪性裂隙(断裂); 塑性-粘性、粘性岩石和岩层组合, 易产生压剪性、压性韧性流变或裂面(面理)。第一种情况如福建赤路钼矿床(肖俊明等, 1976), 流纹质晶屑凝灰熔岩和流纹质角砾熔岩为脆性围岩, 形成张性或张剪性裂隙; 第二种情况如江西徐山钨矿床(王显华和龙细友, 2010), 板溪群千枚岩、变砂岩和变长石砂岩为塑脆性围岩, 形成中等倾斜的平行剪张性、剪性裂隙; 再如江西茅坪钨锡矿床(王定生等, 2011), 下寒武统牛角河组和中寒武统高滩组, 由石英细砂岩、粉砂岩和绢云板岩组成, 以石英细砂岩为主, 互为夹层, 构成塑脆性、塑性岩层, 在高桥下、下茅坪矿段发育倾斜相向平行裂隙控制的矿脉(体), 中间上茅坪矿段位于岩体平台上方, 形成两组X交叉扭(剪)性控矿裂隙, 与四川攀枝花辉长岩岩浆动力成因构造(周济元, 1976)类似, 均显示上下挤压形成; 第三种情况如福建赤路钼矿床龙岬石穹隆平台状岩株顶部岩石显示塑性-粘性、粘性流变, 形成压性或压剪性叠加冷缩张性裂面(面理)控制的矿层(体)(周济元等, 2024); 福建建瓯上房钨矿(陈润生等, 2013), 岩体与围岩呈 $15^{\circ}\sim 35^{\circ}$ 缓倾斜接触面, 其上形成平行的钨矿层(体), 其下形成与隐伏浅肉红色含斑中细粒钾长花岗岩接触面平行的细脉状、条带状云英岩型钼矿层(体), 呈“上钨下钼”; 福建古田西朝钼矿床(石礼炎, 2009), 岩体接触面上方呈塑粘性流变, 产生压性、压剪性叠加冷缩张性近水平叠覆裂隙控制的矿层(体)。此外, 岩石、岩层组合的化学性质, 在一定条件下还影响矿床类型。如, 湖南瑶岗仙钨(钼)矿床(李顺庭, 2011), 花岗岩体与碳酸盐岩层接触形成矽卡岩型, 与砂岩层接触形成层间细脉型钨矿层(体)。可见, 在同一岩浆动力作用下, 岩石、岩层组合物理性质的差异, 影响控矿构造的形态、产状、力学性质、规模和空间分布; 化学性质的差异, 则导致矿床类型的不同。

### 5.3 岩浆动力的作用方式、方向和强度

岩浆动力作用产生裂隙(断裂), 可用液压致裂进行解释, 即液体压力(Pf) $\geq$ 岩石的最小主应力( $\sigma$ )+岩石内聚力(Rt)(Hubbert 和 Rubey, 1959)。在大岩基上的一个个岩株的岩浆动力作用过程中, 与围岩产生不同力学性质和方位裂隙(断裂)及其

组合形式,且限于岩株一定形态部位和范围。反过来,可由控制矿脉(体)的不同方位和力学性质裂隙(断裂)及其组合形式、接触面形态、产状和岩石、岩层组合物理化学性质等,反演构造应力场,恢复岩浆动力方式和追索动力来源。如,湖南瑶岗仙钨矿床(李顺庭,2011),由直立或近直立张性或张剪性裂隙控制的树枝状矿脉(体)-对称弧形压性或压剪性裂面(面理)控制的矿层(体),指示岩浆动力由下而上的上冲力作用形成;徐山钨矿床(王显华和龙细友,2010),由倾斜平行剪张性或剪性裂隙控制倾斜平行矿脉(体)-不对称弧形压剪性或压性裂面(面理)控制的不对称弧形矿层(体),指示岩浆动力沿倾斜平行剪张性或剪性裂隙,由下向斜上方的斜冲力作用形成;广东莲花山钨金矿床(李兆麟和杨忠芳,1992),矿层沿接触面两侧或一侧分布;江西阳储岭钨钼矿床(范楚涵等,2022)具有类似的特征,显示岩浆动力为上冲-膨胀力或膨胀力形成。岩浆动力大小对裂隙(断裂)的规模大小具有明显影响,一般来说,两者呈正相关。岩浆规模或动力大,产生裂隙(断裂)的规模也大,反之则小。如,赣南西华山—棕树坑地区被称为“内接触带大脉型钨矿床”(梅勇文,1985),相互平行的脉体,被接触面限制在围岩中显示张性的“微小脉群”,由下覆 $\gamma_5^{2-1}$ 岩浆动力上冲力形成,无围岩“屏蔽”迹象;在 $\gamma_5^{2-1}$ 中的小脉群也显示同样的特点,由 $\gamma_5^{2-2}$ 岩浆动力上冲力产生;而在 $\gamma_5^{2-2}$ 中的,与个别脉体延伸入 $\gamma_5^{2-1}$ 中的大脉带和根脉带,可能由隐伏更深、规模更大的另一期 $\gamma_5^{2-3}$ (?)岩浆动力上冲力作用形成。可见,规模一次比一次更大的岩浆动力作用形成一次比一次更大的裂隙及其控矿作用,呈正相关;由三次岩浆动力作用形成的裂隙及其控制矿脉大小不同、产状一致,表明岩浆动力作用方式和方向具有一致性。每一岩浆侵入期次的成矿作用,一般被局限于该期岩体与围岩接触面以上,而围岩为岩体时,岩浆均已冷凝、结晶、固结而呈脆性状态。这样,被局限在围岩中的那些小脉群仅可预测深部产生小脉群的隐伏小岩体,产生大脉群的大岩体便不可能成为预测深部隐伏矿床或矿脉的“标志”。同理,在没有搞清楚脉群的层带数之前,便不宜称为“房”(一层)或“楼”(二层及以上),也不能笼

统称为“五层楼”,更不能简单地称为“楼下楼”,倒可能是“房嵌楼”或“楼嵌楼”。

#### 5.4 岩浆侵入期次

许多与岩浆作用有关的大型、超大型矿床,岩体往往都是多期次侵入形成的复式岩体。如,福建赤路钨矿床,龙岬石穹窿平台状岩株是一个复式岩体,自上而下由中细粒似斑状花岗岩、二长花岗岩和钾长花岗岩组成(肖俊明等,1976)。从该矿床控矿组合形式来看,是二次或多次同一方式、方向,由上而下叠覆连续侵入,先由中细粒似斑状花岗岩浆垂直接触面产生上冲力作用,在围岩中产生陡倾斜张性或张剪性裂隙;在其冷凝固结晶呈塑粘性状态时,二长花岗岩和钾长花岗岩浆相继侵入的上冲力作用,使其塑粘性流变形成平行接触面的缓倾斜压性或压剪性-叠加冷凝收缩张性,之后控制矿层(体)。又如,赣南西华山—棕树坑地区的“内接触带大脉型钨矿床”,由上已及,有三次成矿作用,岩浆由上而下不连续侵入叠覆形成复式岩体,三次成矿既局限又个别穿切接触面而镶嵌叠覆。广东南山钨锡多金属矿床(肖惠良等,2008),接触面以上由“多层楼”石英脉型,两侧有矽卡岩型、层控型、伟晶岩脉型、破碎蚀变岩型组成“裙楼”,接触面以下由云英岩型组成“地下室”,二层或以上网脉浸染、浸染型以及层状、似层状岩体组成“室下室”,二层分别为“室下室1”和“室下室2”,由白云母花岗岩、二长花岗岩或黑云母花岗岩、碱长花岗岩和花岗闪长岩自上而下连续侵入叠覆形成。所以,一些岩浆多期次侵入组成的复式岩体,是多期次岩浆由上而下叠覆,特别是引起内接触带构造的复杂性,也是形成大型、超大型矿床的必要条件。

## 6 成矿机制、成矿岩体和侵入接触

随着对岩浆动力成因构造及其控矿组合形式的揭示,改变了对成矿机制、成矿岩体、侵入接触和岩石、岩层组合物理、化学性质等的认识。以福建赤路钨矿床为例,对前三者讨论如下。

### 6.1 成矿机制

该矿床区域构造位于SN向寿宁—连江断裂、NW向宁德三都澳—崇安下岚头断裂和新华夏系

次级 NEE 向碧岩—罗洋断裂的复合部位(黄昌旗, 2009; 李观富, 1995; 张克尧等, 2009; 周鸿年和何耀基, 1983; 周济元等, 2024)。矿区出露的地层为上侏罗统南园组第三段( $J_3n^c$ ), 主要由流纹质晶屑凝灰熔岩和流纹质角砾熔岩组成(肖俊明等, 1976)。构造主要为 NEE 向、NNW 向、SN 向和 NWW 向裂隙。岩浆岩由表及里依次为中细粒似斑状花岗岩、二长花岗岩和钾长花岗岩组成复式岩体, 赤路岩基、龙岬石穹隆平台状岩株受新华夏系次级 NEE 向碧岩—罗洋断裂控制, 赤路岩基和龙岬石穹隆平台状岩株顶面倾向 SSE, 倾角约  $20^\circ$ 。流纹质晶屑凝灰熔岩和流纹质角砾熔岩呈脆性。接触面以上, 控矿裂隙呈 NNW 向, 倾向 SWW, 倾角  $50^\circ\sim 70^\circ$ 。裂面粗糙不平, 近平行排列, 下起接触面, 向上变小或减弱至尖灭, 为张性或张剪性; 接触面以下, 控矿裂隙呈 NEE 向, 倾向 SSE, 倾角  $20^\circ\sim 30^\circ$ , 自接触面往下平行排列, 裂面光滑, 微波状弯曲, 为压性或压剪性。两者近垂直相交, 局限于龙岬石岩株范围内。以上表明, 其为走向  $340^\circ$ 、倾向 SWW、倾角约  $70^\circ$  的龙岬石穹隆平台状岩株岩浆动力-上冲力垂直接触面的挤压力或压剪力, 导致上覆脆性岩层产生陡倾斜张性或张剪性裂隙。接触面以下, 因中细粒似斑状花岗岩浆处于流体状态, 未留痕迹。当凝固结呈塑-粘性时, 二长花岗岩、钾长花岗岩浆侵入上冲力作用, 使围岩的张性、张剪性裂隙增强, 塑粘性中细粒似斑状花岗岩体顶部产生流变, 形成平行缓倾斜接触面的压性或压剪性裂面(面理)。随着冷凝的持续, 一方面影响裂隙力学性质: 接触面以上的张性或张剪性裂隙因冷凝收缩叠加压性, 呈张性或张剪性-压性; 接触面以下, 压性或压剪性裂隙因冷凝收缩叠加张性, 呈压性或压剪性-张性; 另一方面, 岩浆分异气热液流体向接触面附近汇聚, 向两侧裂隙分散、运移、充填、扩容、交代、蚀变和矿化。由于温度“上低下高”和由上向下降温变慢, 致使成矿作用接触面以上早、接触面以下晚, 形成逆向分带。同位素年龄测定发现, 中细粒似斑状花岗岩 Rb-Sr 同位素成岩年龄为  $115\pm 4$  Ma(周鸿年和何耀基, 1983); 辉钼矿 Re-Os 同位素成矿年龄(张克尧等, 2009): I 号矿体为  $106.0\pm 1.4\sim 106.3\pm 1.6$  Ma, 与岩体相差约 9 Ma; 101 号矿体为  $105.0\pm 1.5\sim 105.4\pm 1.5$  Ma, 与岩体相差约

10 Ma, I 号与 101 号矿体相差约 1 Ma, 表明陡倾斜 I 号矿体形成在先, 缓倾斜 101 号矿体形成在后。这不仅为上述分析提供了同位素年龄依据, 也表明了不同类型的花岗岩先后侵入、依次成矿的可能性。

## 6.2 成矿岩体

过去一直认为, 该矿床成矿岩体为中细粒似斑状花岗岩体(肖俊明等, 1976)。但通过其顶部平行接触面的压性或压剪性裂面(面理)控制 101 号矿层(体)群来看, 应是在其冷凝、结晶、固结呈塑粘性状态后, 由隐伏其下的二长花岗岩、钾长花岗岩浆上冲力引起其塑粘性流变形成裂面(面理), 并由其分异气热液流体(也可能有前者分异气热液残余加入)沿其运移、充填、扩容、交代、成矿-高温-高中温热液成矿作用过程, 形成 101 号矿层(体)群。中细粒似斑状花岗岩浆上冲力仅产生围岩中垂直接触面的陡倾斜张性、张剪性裂隙, 随后其分异气热液流体沿裂隙运移、充填、扩容、交代、成矿, 形成 I 号矿体群。表明不同类型花岗岩浆先后侵入、依次形成裂隙和成矿, 两者均为成矿母岩(周济元等, 2024)。

## 6.3 侵入接触

过去还一直认为, 中细粒似斑状花岗岩与下伏二长花岗岩、钾长花岗岩为过渡关系(肖俊明等, 1976)。但据上述分析发现, 两者均为成矿岩体, 之间为侵入接触。江西红山铜矿区钻孔所见可为佐证: 每期岩浆侵入, 均由上而下, 依次为花岗斑岩、花岗闪长斑岩和隐爆(隐爆角砾岩); 三期( $109.88\pm 1$  Ma,  $106.1\pm 1.1\sim 101\pm 1$  Ma,  $91.8\pm 1.1$  Ma, K-Ar 法)侵入, 二次隐爆, 大体相似(周济元等, 2000), 佐证了由上而下、不同类型岩浆依次侵入叠覆。国内外越来越多的研究(Coleman et al., 2004; Michel et al., 2008; Miller, 2008; Schaltegger et al., 2008; 冯佐海等, 2009; 翁望飞等, 2023; 陆凡等, 2023)也表明, 在花岗杂岩体内, 过去认为的“相变界面”或“岩浆分异作用导致的不连续界面”等, 实际都可能是岩浆侵入接触面。用高精度同位素测年技术(锆石 ID-TIMS U-Pb 定年)对智利北部 Paine 花岗岩体的不同部位进行测年, 常有多个年龄组, 表明该花岗岩是多期次、间隙式侵位而成。相邻两个侵位时间间隔可以很短, 一般为  $0.10\sim 1$  Ma(Schaltegger et al., 2008)甚至小

至 0.02 Ma (Michel et al., 2008; Miller, 2008)。与赤路钨矿床 2 个矿体辉钨矿 Re-Os 年龄差一致,更证明该杂岩体“相变界面”是二次或两次以上的侵位界面。中细粒似斑状花岗岩顶部压性或压剪性裂面(面理)是由二长花岗岩、钾长花岗岩浆后来侵位上冲力形成的。从其含 Mo 丰度来看,二长花岗岩和钾长花岗岩的 Mo 丰度分别为  $21 \times 10^{-6}$  和  $13 \times 10^{-6}$ , 分别为福建省 Mo 丰度 ( $2.4 \times 10^{-6}$ ) (福建省地质矿产局, 1985; 石礼炎, 2009) 的 8 倍以上和 5.4 倍以上, 也说明该矿床除了中细粒似斑状花岗岩浆既为上冲力形成围岩中的张性、张剪性裂隙控制其分异含矿气热液流体成矿, 又为后期成矿的赋矿围岩。隐伏其下的二长花岗岩、钾长花岗岩浆不仅提供对中细粒似斑状花岗岩顶部压性、压剪性裂面(面理)的动力, 还可能为其分异含矿气热液流体, 从而沿裂面运移、充填、扩充、交代、成矿, 进一步证明两者均为成矿母岩。

## 7 结论

(1) 用地质力学理论-构造体系成生联系分析方法研究含钨石英脉带的分布规律, 发现了其具有等距性和“五层带”, 预测木梓园有矿床存在并指导勘查, 证实其为大型钨钼矿床。又经梅子窝钨矿勘查检验, 改称“五层楼”, 推广应用, 使钨矿找矿工作蓬勃发展。地质力学理论对钨矿找矿具有重要的指导和推动作用, 在“开创中国乃至世界模式找矿先河”中发挥了重要作用。

(2) 随着钨矿勘查的拓展、深延以及矿床新类型的发现, “五层楼”模式的局限性逐渐显现。通过南岭东段矿山调查, 为矿产基地优选和矿区精准勘查, 在控矿、成矿构造体系和成矿体系的基础上, 突出了矿床类型及其分布位置, 从岩体及其围岩整体上建立了钨矿成矿结构体系模式, 用于广东南山—良源矿产基地优选和矿区勘查, 取得了 1 个超大型矿床和 1 个大型矿床的重大突破, 表明基地优选的准确性和指导勘查的精准性, 证明了其理论模式的正确性和普查找矿的实用性。

(3) 经过成矿结构体系模式形成机制的长期深入研究, 首次发现了岩浆动力成因构造及其控矿组合形式。成矿因素的深入研究, 改变了成矿

机制、成矿岩体、侵入接触和岩石、岩层物理化学性质等认识, 提出了矿区(田)是在区域构造控制岩基、岩株, 岩株岩浆动力致裂及其组合形式, 岩浆分异含矿气热液流体沿其运移、成矿的认识, 表明其是由围岩-构造-岩浆-构造-成矿有序融合形成的, 是将地质力学理论由岩石固体引向岩浆流体动力学研究的深化、提高、拓展和创新。

**致谢:** 感谢两位审稿专家对文章仔细审查后提出的宝贵意见和责任编辑认真的编辑校对工作。

## References

- BUREAU OF GEOLOGICAL AND MINERAL OF FUJIAN PROVINCE. 1985. Regional geology of Fujian Province[M]. Beijing: Geological Publishing House (in Chinese with English abstract).
- CHEN R S, LI J W, CAO K, QU C Y, LI Y J. 2013. Zircon U-Pb and molybdenite Re-Os dating of the Shangfang tungsten deposit in northern Fujian Province: implications for regional mineralization[J]. *Earth Science—Journal of China University of Geosciences*, 38(2): 289-304 (in Chinese with English abstract).
- CHEN M S, LIU X H. 2000. Metallogenic model and resource general capacity forecast of Furong Sn field in Chenzhou[J]. *Hunan Geology*, 19(1): 43-47 (in Chinese with English abstract).
- COLEMAN D S, GRAY W, GLAZNER A F. 2004. Rethinking the emplacement and evolution of zoned plutons: geochronologic evidence for incremental assembly of the Tuolumne Intrusive Suite, California[J]. *Geology*, 32(5): 433-436.
- FAN C H, NI P, WANG G G, ZHANG K H, WANG G L, LI W S, CUI J M, HE J F. 2022. Accessory minerals U-Pb geochronology of monzogranitic porphyry in Yangchuling porphyry W-Mo deposit in northern of Jiangxi Province, South China[J]. *Mineral Deposits*, 41(1): 35-52 (in Chinese with English abstract).
- FENG Z H, WANG C Z, WANG B H. 2009. Granite magma ascent and emplacement mechanisms and their relation to mineralization process[J]. *Journal of Guilin University of Technology*, 29(2): 183-194 (in Chinese with English abstract).
- GRIGGS D, HANDIN J. 1960. Rock deformation[M]. New York: Geological Society of America, 193-226.

- GUANGDONG NONFERROUS METAL GEOLOGICAL EXPLORATION COMPANY 932 TEAM. 1966. How do we use the “five story building” law to search, evaluate, and explore wolframite quartz vein deposits[J]. *Geology and Exploration*, (5): 15-19 (in Chinese with English abstract).
- HUANG C Q. 2009. The study of Mo-Cu polymetallic deposits prospecting perspective in Fuan Chilu-Ningde Jiuqingling district, Fujian Province[J]. *Geology of Fujian*, 28(4): 289-295 (in Chinese with English abstract).
- HUBBERT M K, RUBEY W W. 1959. Role of fluid pressure in mechanics of overthrust faulting: I. mechanics of fluid-filled porous solids and its application to overthrust faulting[J]. *GSA Bulletin*, 70(2): 115-166.
- LI S G. 1973. Introduction to geomechanics[M]. Beijing: Science Press (in Chinese with English abstract).
- LI G F. 1995. Basic characteristic of Mo metallogenic belt in east Fujian[J]. *Journal of East China Geological Institute*, 18(4): 330-334 (in Chinese with English abstract).
- LI S T. 2011. Characteristics and genesis of the Yaogangxian tungsten polymetallic deposits in Hunan Province[D]. Beijing: China University of Geosciences (Beijing) (in Chinese with English abstract).
- LI Z L, YANG Z F. 1992. A study on genesis of Lianhuashan tungsten deposit, Guangdong Province[J]. *Contributions to Geology and Mineral Resources Research*, 7(1): 63-70 (in Chinese with English abstract).
- LU F, ZHANG Y, ZHANG X H, MO Z F, LÜ J S, WU B. 2023. Zircon U-Pb geochronology, geochemical characteristics and geological significance of the Chakeng granite porphyry, northeast Jiangxi Province[J]. *East China Geology*, 44(1): 39-50 (in Chinese with English abstract).
- MEI Y W. 1985. Distribution pattern of tungsten deposits in the Xihuashan-Zongshukeng area[J]. *Geology and Exploration*, (4): 11-16 (in Chinese with English abstract).
- MICHEL J, BAUMGARTNER L, PUTLITZ B, SCHALTEGGER U, OVTCHAROVA M. 2008. Incremental growth of the Patagonian Torres del Paine laccolith over 90 k. y. [J]. *Geology*, 36(6): 459-462.
- MILLER J S. 2008. Assembling a pluton...one increment at a time[J]. *Geology*, 36(6): 511-512.
- SCHALTEGGER U, SCHOENE B, PEYTCHEVA L. 2008. Tracking the growth of plutons: the contribution of high-precision U-Pb zircon dating[C]//Proceedings of the 10th Geophysical Research Abstracts. EGU.
- SHI L Y. 2009. The metallotectonic characteristics and the ore-finding target of the Xichao molybdenum deposit in Gutian county, Fujian Province[J]. *Geology of Fujian*, 28(3): 167-174 (in Chinese with English abstract).
- WANG X H, LONG X Y. 2010. Structural superposition and metallogenic structural evolution model of the Xushan tungsten deposit in Fengcheng city, Jiangxi Province[J]. *West-China Exploration Engineering*, 22(12): 147-151 (in Chinese with English abstract).
- WANG D S, LU S M, HU B Y, ZHANG S B, RUAN Y Y, CHENG D S. 2011. The geological characteristics and mineralization model of a tungsten-tin deposit[J]. *China Tungsten Industry*, 26(2): 6-11 (in Chinese with English abstract).
- WANG Z Q, ZHOU M J, LI X F, DA H X. 2024. Identification and significance of fluid exsolution in high silica granite[J]. *East China Geology*, 45(1): 26-48 (in Chinese with English abstract).
- WEI L M, LIN J F, LI W Q, WANG J C, ZHU W F. 2008. Discussion on “five stored” superposed model of Meiziwo tungsten deposit, Guangdong[J]. *Acta Geologica Sinica*, 82(7): 889-893 (in Chinese with English abstract).
- WENG W F, LUO J Y, XU Z Y. 2023. Geological and geochemical characteristics and prospecting model of the Waitongkeng gold deposit in southern Anhui Province[J]. *East China Geology*, 44(1): 13-27 (in Chinese with English abstract).
- WU Y L, MEI Y W, LIU P C, CAI C L, LU T Y. 1987. *Geology of Xihuashan tungsten deposit*[M]. Beijing: Geological Publishing House (in Chinese with English abstract).
- XIAO H L, CHEN L Z, BAO X M, FAN F P, ZHOU Y, WU H Y, YAO Z H, WU L, TENG L. 2012. Discovery of Liangyuan Nb-Ta-Rb-W-polymetallic deposit in Shixing county, Guangdong Province and its significance[J]. *Resources Survey & Environment*, 33(4): 229-237 (in Chinese with English abstract).
- XIAO H L, CHEN L Z, WU H Y, BAO X M, ZHOU Y, WU L, FAN F P, YAO Z H. 2008. Discovery of Nanshan W-Mo-polymetallic deposit in northern Guangdong Province and its significance[J]. *Geological Journal of China Universities*, 14(4): 558-564 (in Chinese with English abstract).
- XIAO J M, NI Y S, XIANG C R. 1976. Geological detailed survey and evaluation report of Chilu molybdenum deposit in Fu'an, Fujian Province[R]. Ningde: Fourth Geological Brigade of Fujian Province (in Chinese with English abstract).
- YANG M G. 2015-02-03. On the origin of the “Five levels” deposit model[N]. *China Mining Daily* (in Chinese with English abstract).

- YUAN G X. 2018. The great story hidden in this supplement[R]. Nanchang: Jiangxi Provincial Bureau of Geology and Mineral Exploration (in Chinese with English abstract).
- ZHANG Q L, HE G H, XIE G. 2007. The geological characteristics of tungsten-tin ore deposit in Baxiannao, Chongyi Jiangxi[J]. Resources Survey & Environment, 28(1): 40-45 (in Chinese with English abstract).
- ZHANG K Y, WANG J P, DU A D, LIN Q T, HUANG J M, HU R H, HUANG Q M. 2009. Re-Os isotopic dating of molybdenite from the Chiluo molybdenum deposit in Fu'an, Fujian Province[J]. Geology in China, 36(1): 147-155 (in Chinese with English abstract).
- ZHOU J Y. 1976. Method for identification of mechanical properties of structural planes[M]. Chengdu: Chengdu University of Technology (in Chinese with English abstract).
- ZHOU J Y. 1989. Introduction to geomechanics[M]. Chengdu: Chengdu University of Science and Technology Press (in Chinese with English abstract).
- ZHOU J Y. 2019. New progress in the study of geological characteristics and genesis of Jiande copper deposit, Zhejiang Province[J]. Journal of Geomechanics, 25(S1): 90-102 (in Chinese with English abstract).
- ZHOU J Y, CHEN S Z, XIAO F. 2024. Research on mineral deposits using magmatic dynamics genetic structures: a case study of the Chiluo Mo deposit in Fu'an, Fujian Province[J]. Journal of Geomechanics, 30(1): 168-180 (in Chinese with English abstract).
- ZHOU J Y, CUI B F. 2018. New progress in research and application of metallogenic system[J]. East China Geology, 39(4): 271-278 (in Chinese with English abstract).
- ZHOU J Y, CUI B F, CHEN S Z. 2009. Mineralization system and mineralization prediction[C]//Proceedings of the Academic Seminar Commemorating the 120th Anniversary of Li Siguang's Birth and the 20th Anniversary of the Establishment of the Li Siguang Geological Science Award (in Chinese with English abstract).
- ZHOU J Y, CUI B F, CHEN H M, MAO J R, FANG W B, CHEN S Z, WANG W G, ZHANG S L. 2000. Metallogenic regularities and prognosis of copper and tin deposits in the area of Hongshan-Xikengjing, south of Jiangxi Province[M]. Beijing: Geological Publishing House, 31-61 (in Chinese with English abstract).
- ZHOU H N, HE Y J. 1983. Discussion on the characteristics of isotope geology of porphyry molybdenum at Chiluo and its source of ore material[J]. Geology of Fujian, (2): 1-12 (in Chinese with English abstract).
- ZHOU J Y, HUANG J J, YU Z C. 1988. Research on the ore control characteristics, ore solution migration and metallogenic prognosis at the Jiande copper ore deposit, Zhejiang Province[J]. Minerals and Rocks, 8(3): 1-1-1-76 (in Chinese with English abstract).
- ZHOU J Y, XIAO H L. 2006. Metallostructural system and its significance of search for tungsten deposit[J]. Resources Survey & Environment, 27(2): 110-119 (in Chinese with English abstract).
- ZHOU J Y, XIAO H L, CHEN S Z, CUI B F. 2013. Mineralization system, mineralization prediction, engineering verification and breakthrough[C]//Proceedings of the 2nd Symposium on Mineralization Theory of Metal Mines and New Technologies for Deep Mineral Exploration. Kunming: The Nonferrous Metals Society of China (in Chinese with English abstract).
- ZHOU J Y, XU Z Z. 1982. Preliminary study on the distribution pattern of vanadium titanium magnetite in the north south Sichuan-Yunnan structural belt[C]//Collection of the 2nd National Conference on Structural Geology, Volume 2, Geomechanics. Beijing: Geological Publishing House (in Chinese with English abstract).
- ZHOU J Y, YU Z C. 1983. Characteristics of the Jiande copper deposit in Zhejiang Province and ore forming fluid migration[J]. Journal of Chengdu College of Geology, (4): 1-22 (in Chinese with English abstract).
- ZHU Y L, LI C Y, LIN Y H. 1981. Geology of tungsten mine in southern Jiangxi[M]. Nanchang: Jiangxi People's Publishing House (in Chinese with English abstract).

## 附中文参考文献

- 陈润生, 李建威, 曹康, 瞿承焱, 李玉娟. 2013. 闽北上房钨矿床锆石 U-Pb 和辉钼矿 Re-Os 定年及其地质意义[J]. 地球科学—中国地质大学学报, 38(2): 289-304.
- 陈民苏, 刘星辉. 2000. 郴州芙蓉锡矿田成矿模式及资源总量预测[J]. 湖南地质, 19(1): 43-47.
- 范楚涵, 倪培, 王国光, 张凯涵, 王广琳, 李文生, 崔健铭, 贺佳峰. 2022. 赣北阳储岭斑岩型钨钼矿床成矿岩体副矿物 U-Pb 年龄精确厘定[J]. 矿床地质, 41(1): 35-52.
- 冯佐海, 王春增, 王葆华. 2009. 花岗岩侵位机制与成矿作用[J]. 桂林工学院学报, 29(2): 183-194.
- 福建省地质矿产局. 1985. 福建省区域地质志[M]. 北京: 地质出版社.
- 广东有色金属地质勘探公司九三二队. 1966. 我们是怎样用

- “五层楼”规律寻找、评价和勘探黑钨石英脉矿床的[J]. 地质与勘探, (5): 15-19.
- 黄昌旗. 2009. 福建福安赤路—宁德九曲岭地区钨铜多金属矿找矿前景分析[J]. 福建地质, 28(4): 289-295.
- 李四光. 1973. 地质力学概论[M]. 北京: 科学出版社.
- 李观富. 1995. 闽东地区钨成矿带的基本特征[J]. 华东地质学院学报, 18(4): 330-334.
- 李顺庭. 2011. 湖南瑶岗仙钨多金属矿床特征与成因[D]. 北京: 中国地质大学(北京).
- 李兆麟, 杨忠芳. 1992. 广东莲花山钨矿成矿机制探讨[J]. 地质找矿论丛, 7(1): 63-70.
- 陆凡, 张勇, 张雪辉, 莫子奋, 吕劲松, 武彬. 2023. 赣东北茶坑花岗斑岩锆石 U-Pb 年代学、地球化学特征及地质意义[J]. 华东地质, 44(1): 39-50.
- 梅勇文. 1985. 西华山—棕树坑地区钨矿分布规律[J]. 地质与勘探, (4): 11-16.
- 石礼炎. 2009. 福建古田西朝钨矿床成矿构造特征及找矿方向[J]. 福建地质, 28(3): 167-174.
- 王显华, 龙细友. 2010. 江西省丰城市徐山钨矿床构造叠加及成矿构造演化模式[J]. 西部探矿工程, 22(12): 147-151.
- 王定生, 陆思明, 胡本语, 张声波, 阮瑜瑜, 陈冬生. 2011. 江西茅坪钨锡矿床地质特征及成矿模式[J]. 中国钨业, 26(2): 6-11.
- 王志强, 周美娟, 黎训飞, 笄昊翔. 2024. 高硅花岗岩流体出溶作用的识别和意义[J]. 华东地质, 45(1): 26-48.
- 韦龙明, 林锦富, 李文铅, 汪劲草, 朱文凤. 2008. 广东梅子窝钨矿“五层楼”叠加现象探讨[J]. 地质学报, 82(7): 889-893.
- 翁望飞, 罗家元, 许振宇. 2023. 皖南外桐坑金矿床地质、地球化学特征及找矿模型[J]. 华东地质, 44(1): 13-27.
- 吴永乐, 梅勇文, 刘鹏程, 蔡常良, 卢同衍. 1987. 西华山钨矿地质[M]. 北京: 地质出版社.
- 肖惠良, 陈乐柱, 鲍晓明, 范飞鹏, 周延, 吴涵宇, 姚正红, 武玲, 滕龙. 2012. 广东始兴良源铌钽铍钨多金属矿床的发现及其意义[J]. 资源调查与环境, 33(4): 229-237.
- 肖惠良, 陈乐柱, 吴涵宇, 鲍晓明, 周延, 武玲, 范飞鹏, 姚政红. 2008. 广东始兴南山钨钼多金属矿床的发现及其意义[J]. 高校地质学报, 14(4): 558-564.
- 肖俊明, 倪云生, 项成锐. 1976. 福建福安赤路钨矿区地质详查评价报告[R]. 宁德: 福建省第四地质大队.
- 杨明桂. 2015-02-03. 关于“五层楼”矿床模式的由来[N]. 中国矿业报.
- 袁赣湘. 2018. 这本《增刊》蕴藏的大故事[R]. 南昌: 江西省地质矿产勘查局.
- 张庆林, 何桂红, 谢刚. 2007. 崇义县八仙脑钨锡矿床特征[J]. 资源调查与环境, 28(1): 40-45.
- 张克尧, 王建平, 杜安道, 林仟同, 黄金明, 胡荣华, 黄庆敏. 2009. 福建福安赤路钨矿床辉钨矿 Re-Os 同位素年龄及其地质意义[J]. 中国地质, 36(1): 147-155.
- 周济元. 1976. 结构面力学性质鉴定方法[M]. 成都: 成都地质学院.
- 周济元. 1989. 地质力学引论[M]. 成都: 成都科技大学出版社.
- 周济元. 2019. 浙江建德铜矿床地质特征及其成因研究的新进展[J]. 地质力学学报, 25(S1): 90-102.
- 周济元, 陈世忠, 肖凡. 2024. 从岩浆动力成因构造研究矿床——以福建福安赤路钨矿为例[J]. 地质力学学报, 30(1): 168-180.
- 周济元, 崔炳芳. 2018. 成矿体系研究和应用新进展[J]. 华东地质, 39(4): 271-278.
- 周济元, 崔炳芳, 陈世忠. 2009. 成矿体系与成矿预测[C]//纪念李四光诞辰 120 周年暨李四光地质科学奖成立 20 周年学术研讨会论文集.
- 周济元, 崔炳芳, 陈宏明, 毛建仁, 方文碧, 陈世忠, 王文冈, 张松林. 2000. 赣南红山—锡坑迳地区铜锡矿地质及预测[M]. 北京: 地质出版社, 31-61.
- 周鸿年, 何耀基. 1983. 赤路斑岩钨矿床同位素地质特征及其物质来源探讨[J]. 福建地质, (2): 1-12.
- 周济元, 黄继钧, 余祖成. 1988. 浙江省建德铜矿控矿特征、矿液运移及找矿远景的研究[J]. 矿物岩石, 8(3): 1-1-1-76.
- 周济元, 肖惠良. 2006. 成矿结构体系及其钨矿找矿意义[J]. 资源调查与环境, 27(2): 110-119.
- 周济元, 肖惠良, 陈世忠, 崔炳芳. 2013. 成矿体系、成矿预测、工程验证与突破[C]//第二届金属矿山成矿理论与深部找矿新技术研讨会论文集. 昆明: 中国有色金属学会.
- 周济元, 徐旃章. 1982. 川滇南北构造带及钒钛磁铁矿分布规律的初步探讨[C]//第二届全国构造地质学术会议论文集, 第二集, 地质力学. 北京: 地质出版社.
- 周济元, 余祖成. 1983. 浙江建德铜矿床特征及矿液运移理论的研究[J]. 成都地质学院学报, (4): 1-22.
- 朱炎龄, 李崇佑, 林运淮. 1981. 赣南钨矿地质[M]. 南昌: 江西人民出版社.

**The application and development of geomechanical theory viewed from  
“Five-storey model” to “Metallogenic structure system” and its  
formation mechanism—— commemorating the 62<sup>nd</sup> anniversary  
of the publication of *Introduction to Geomechanics***

ZHOU Jiyuan, XIAO Fan

(*Nanjing Center, China Geological Survey, Nanjing 210016, Jiangsu, China*)

**Abstract:** The southern Jiangxi province has abundant tungsten mineral resources, known as the “World Tungsten Capital”, where a number of tungsten deposits had been evaluated since 1950s. Because of that exposed mineral deposits have been mostly found and mined, it is urgent to explore concealed tungsten resources in China and improve mineral exploration theories and methods. The geologists use geomechanical theory and structural system analysis to guide regional research and exploration of tungsten deposits such as Piaotang, and study the distribution regularity of tungsten-bearing veins, which shows characters of directional and equidistant on the horizontal plane, and branched or layered shape in the vertical direction, called “Five layer belt” with five layers orebody. Based on the above model, it was predicted that there would be mineral deposits in the Muziyuan area, which were verified to be a large W-Mo deposit, besides that, Meiziwo tungsten deposit in Guangdong province and others were also found, the “Five layer belt” was renamed as the “Five-storey”, which was hailed as the “pioneer of mineral exploration in China and even the world”. With the advancement of tungsten exploration, layered quartzite type tungsten deposits and other types parallel to the contacting surfaces of granite have been discovered under the “Five-storey model” such as Huangsha deposit, which represents the loophole of “Five-storey model”. In the new round of tungsten resource survey, the author proposed a metallogenic structural system consisting of “Five-storey”, “Podium”, “Basement” and “Foundation” based on the research in the eastern Nanling metallogenic belt, highlighting the location of different types of deposits, which revolves around the granite pluton and the contacting surface between intrusion and wallrock as the symbol, and the mechanical properties and spatial distribution of ore-controlling fractures as the basis, to comprehensively guide the optimization of Nanshan-Liangyuan tungsten ore base in the Guangdong Province, and the successfully exploration of different types of deposits, making a sensational breakthrough. Further research demonstrated that the ore-controlling structures are the genesis of magmatic dynamics and exhibit different assemblages. Through the analysis of ore-forming factors and formation mechanisms, it is believed that it is formed by the orderly fusion of surrounding rocks, structures, magmas, and mineralization factors, which are influenced by regional structures-related batholith and stock, magmatic dynamics-related fractures, as well as ore-forming factors.

**Key words:** tungsten ore; “Five-storey model”; metallogenic structural system; magmatic dynamic genetic structure; ore-controlling assemblage; geomechanics