

论华夏成矿省

——贺陈毓川院士九十华诞



杨明桂¹⁾, 陈祥云¹⁾, 吴俊华¹⁾, 衷存堤²⁾, 王岩³⁾

- 1) 江西省地质局, 南昌, 330036; 2) 江西省地质调查勘查院基础地质调查所, 南昌, 330030;
3) 中国地质科学院矿产资源研究所, 自然资源部成矿作用与资源评价重点实验室, 北京, 100037

内容提要:笔者等对《中国矿产地质志·华南洋—滨太平洋构造演化与成矿》一书(2020)厘定的战略矿产资源居于重要地位的华夏成矿省作些简要论述:①该成矿省处于古华南洋成矿域与滨太平洋成矿域强烈复合地带, 历经早前寒武世克拉通—华南洋—华南裂谷系—陆表海—大陆的发展演化, 又受到多期造山特别是空前强烈的燕山期陆内活化造山, 并且是一个世界级钨地球化学块体, 构成了优越的成矿基因;②主要成矿特征:包括华南洋及其陆缘弧盆残体成矿, 南华间冰期与冰后期大规模沉积成矿, 多期大规模S型岩浆以钨为首的有色、铀、贵金属、非金属成矿, I型岩浆以铜为首的铁、有色、贵金属成矿以及钦杭成矿带超大矿床集群与“深地”找矿之眼等;③燕山运动岩浆与成矿“核幔式”时空演化规律以及多体系复合构造格局与陆洋左行扭动与洋壳俯冲为主导并有板内挤压、地壳蠕散相复合的动力学机制。

关键词:华夏成矿省;成矿基因;成矿特征;燕山运动;成岩成矿动力机制

陈毓川院士从20世纪60年代以来, 带领团队在江西从事了大量铜钨等矿产的调研工作, 长江中下游、南岭成矿带研究成果获国家科技进步特等奖, 以他为首于20世纪60年代建立的我国首个矿床模式—玢岩铁矿模式(宁芜项目研究编写小组, 1989), 有力地带动了江西矿床建模工作。他与程裕淇院士等创立的“成矿系列”学说(陈毓川, 1994), 推动了江西I、S型两大岩浆成矿系列研究的不断深化, 对揭示江西有色、贵、稀金属成矿规律、指导找矿突破起到了重要作用。他于新世纪初在赣南建立了科学工作站, 成了产学研结合培养科技人才的示范基地。2011年在他主持下在赣南银坑、盘古山实施的南岭1、2号科学深钻, 开启了南岭成矿带向“深地”进军的先锋。

在他80岁高龄刚完成“全国矿产资源潜力评价”就委托江西省地质矿产勘查开发局(现江西省地质局)进行省级矿产地质志研编试点。由于陈毓川院士的有力推动与指导, 2015年在全国率先出版

了《中国矿产地质志·江西卷》, 开启了全国矿产地质志大规模研编。陈毓川院士对华南洋地质成矿问题十分关注, 在他的统一部署下, 由江西省地质局承担《中国矿产地质志·华南洋—滨太平洋构造演化与成矿》研著于2020年出版。该项研究在前人研究的基础上找到了0.82 Ga前后消失的华南大洋, 建立了古华南洋成矿域, 在该域与滨太平洋构造域强烈复合地带形成了华夏成矿省, 由此, 将长期沿用扬子(北)、华夏(南)北南成矿分省调整为西扬子、东华夏成矿分省。通过综合研究, 揭示了华夏成矿省一系列具有重要科学意义的成矿特征与成矿规律, 突显了该成矿省在滨太平洋成矿域乃至全球有色、贵、稀矿产资源的重要战略地位。现作一简介, 提出来研讨, 并以此文祝贺陈毓川院士九十华诞。

1 概述

华夏成矿省位于中国东南大陆, 处于北纬35°~20°, 东经108°~122°之间。以江西省为中心, 涉及

注:本文为中国地质调查局“中国矿产地质志”项目(编号:DD20221695、DD20190379), 委托“华南洋—滨太平洋构造演化与成矿”研究专题项目(编号:矿调合同[2017]第83号)的成果。

收稿日期:2024-01-28; 改回日期:2024-04-16; 网络首发:2024-04-20; 责任编辑:刘志强。Doi: 10.16509/j.georeview.2024.04.061

作者简介:杨明桂,男,1933年生,教授级高级工程师,主要从事区域地质调查、矿产勘查、环境地质调查、地质科学研究工作;Email: yangmei@cug.edu.cn。通讯作者:王岩,女,1983年生,研究员,博士,主要从事战略性矿产成矿规律研究及编图研究;Email: wangyan@mail.cgs.gov.cn。

八省一市两区,包括浙江省、广东省、福建省、上海市、香港与澳门特别行政区,以及鄂东南、皖中南、苏中南、湘中南和桂西等地区,面积约 $100 \times 10^4 \text{ km}^2$ 。地处江南、东南沿海,为我国矿产资源丰富、生态环境优越、经济发达繁荣之地。

该区处于欧亚板块东南部,东临太平洋板块,以凭祥—宜丰—歙县板块结合带为界,北部为扬子板块下扬子地块,南部为华南—东南亚板块遭到裂解的华夏陆块,大部为加里东期造山带,为滨太平洋成矿域与古华南洋成矿域强烈的复合地带(江西省地质矿产勘查开发局,2015,2020)。北邻秦祁昆成矿域(徐志刚等,2008;陈毓川等,1999、2007、2015),西面为扬子成矿省,西南侧为受特提斯成矿域影响的右江成矿带,东南面为东南海域成矿省(江西省地质矿产勘查开发局,2020)(图1)。

该区是一个典型的多旋回构造—成矿区,自元古宙以来,历经早前寒武纪克拉通—华南洋—华南

裂谷系—陆表海—大陆的发展演化阶段,与吕梁、晋宁、加里东、印支等重要造山活动以及空前强烈的燕山期陆内活动造山,形成了一个多期高密度分布的花岗岩区(图2)。成为我国乃至世界重要的钨铜有色、铀、贵、稀、非金属成矿省。

2 重要成矿特征

2.1 华南洋及其陆缘弧盆残体的成矿特征

从江西省中部及其邻侧地区调查研究发现,中元古代—青白口纪晚世早期(约 $1200 \sim 820 \text{ Ma}$) 华南洋及其陆缘弧盆残体虽支离破碎,但显示出较强的成矿作用,是华夏成矿省重要的成矿基因(杨明桂等,2023),是我国研究古洋盆成矿作用的一个珍稀窗口。

2.1.1 华南洋残体的成矿特征

该区相继发现德兴—弋阳、歙县伏川、浏阳—宜丰3条从深层推挤至浅表的准原地蛇绿混杂岩带



图1 中国构造成矿域区划与华夏成矿省区位略图(据程裕淇,1994;徐志刚等,2008修改)

Fig. 1 Sketch of tectonic metallogenetic domain zoning in China and the location of Cathaysian Metallogenetic Province (modified from Cheng Yuqi, 1994#; Xu Zhigang, 2008#)

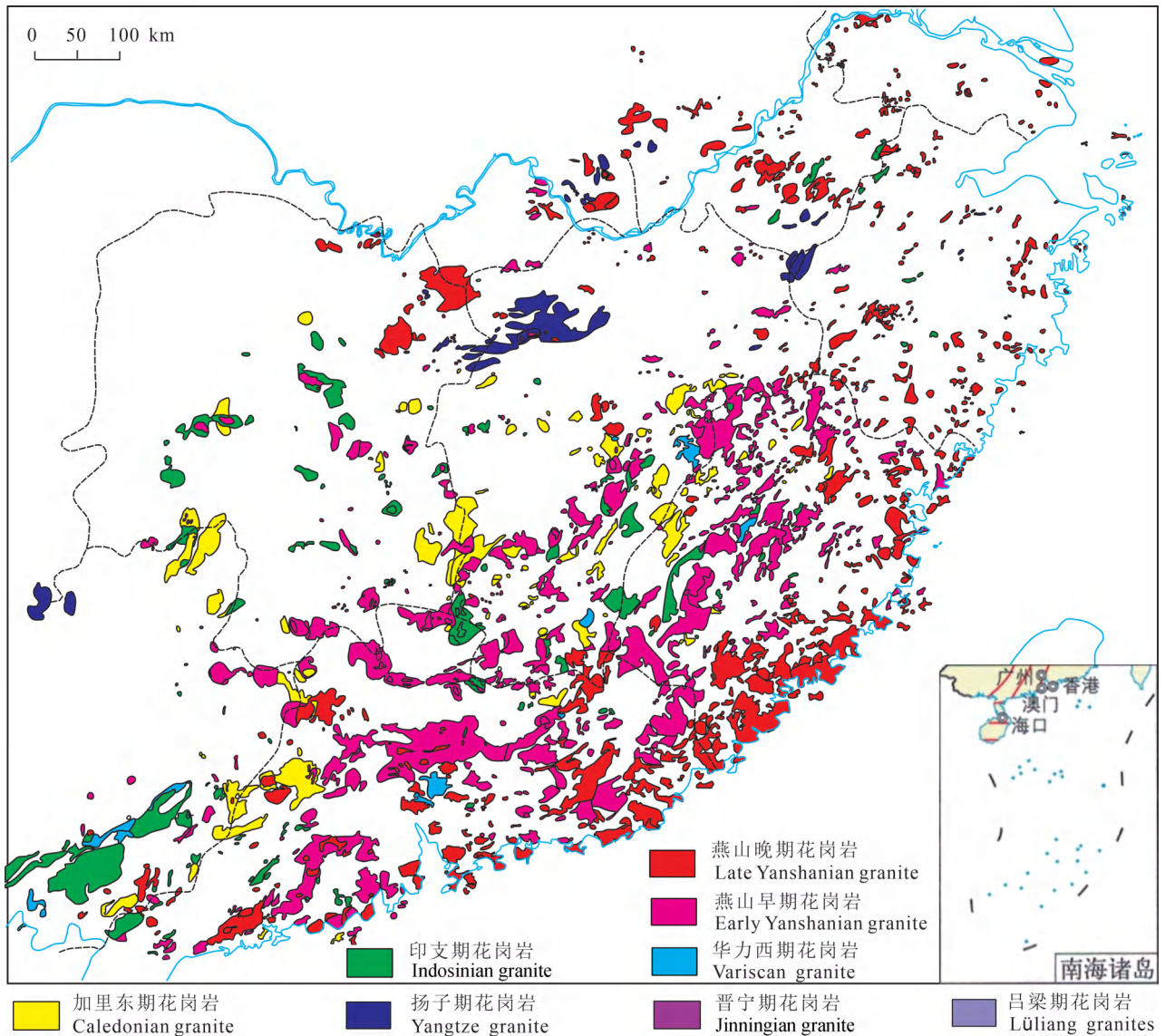


图 2 华夏成矿省花岗岩分布图(据孙涛,2006 修改)

Fig. 2 Distribution map of granites in Cathaysian Metallogenic Province (modified from Sun Tao, 2006&)

(图 3)。

德兴—弋阳蛇绿混杂岩带有弋阳樟树墩等多处含铬镍的大中型蛇纹石矿床,并是一个富金岩片,形成了著名的德兴金山绿岩韧性剪切动力变质叠改型金矿。该矿床初步形成于晋宁期洋壳中,在加里东期造山时大规模逆冲推覆韧性剪切成矿,燕山期受到叠改,成为超大型金矿床(江西省地质矿产勘查开发局,2015,2017)。加里东期还沿走滑断裂带形成了 7 处蛤蟆石式千糜岩带石英脉蚀变岩小型金矿床。

浏阳—宜丰蛇绿混杂岩带是一个富铜岩片,从宜丰到万载已发现兴源冲、三十把、罗城等洋底热水喷流沉积叠改型小型铜(锌)矿床(江西省地质矿产勘查开发局,2015)。

2.1.2 华夏陆缘弧盆残片的成矿特征

该陆缘的怀玉岛弧在富阳地区残留有青白口纪晚世早期的双溪坞群,为一套浅变质的海陆交互沉积碎屑岩、火山岩,其中有岩山式陆相火山岩型明矾石、黄铁矿超大规模矿床。

弋阳—绍兴弧后盆地残体为一套含细碧岩角斑岩的富铜深海沉积,在浙江境内形成西裘式海相火山热水喷流沉积叠改型铜锌硫(金)中型矿床,在赣东北铁沙街残留小岩片中有该型的铜(金银)中型矿床(朱安庆等,2009;江西省地质矿产勘查开发局,2020)。

2.1.3 扬子陆缘弧盆残体的成矿特征

与华夏陆缘不同,扬子陆缘中元古代至青白口

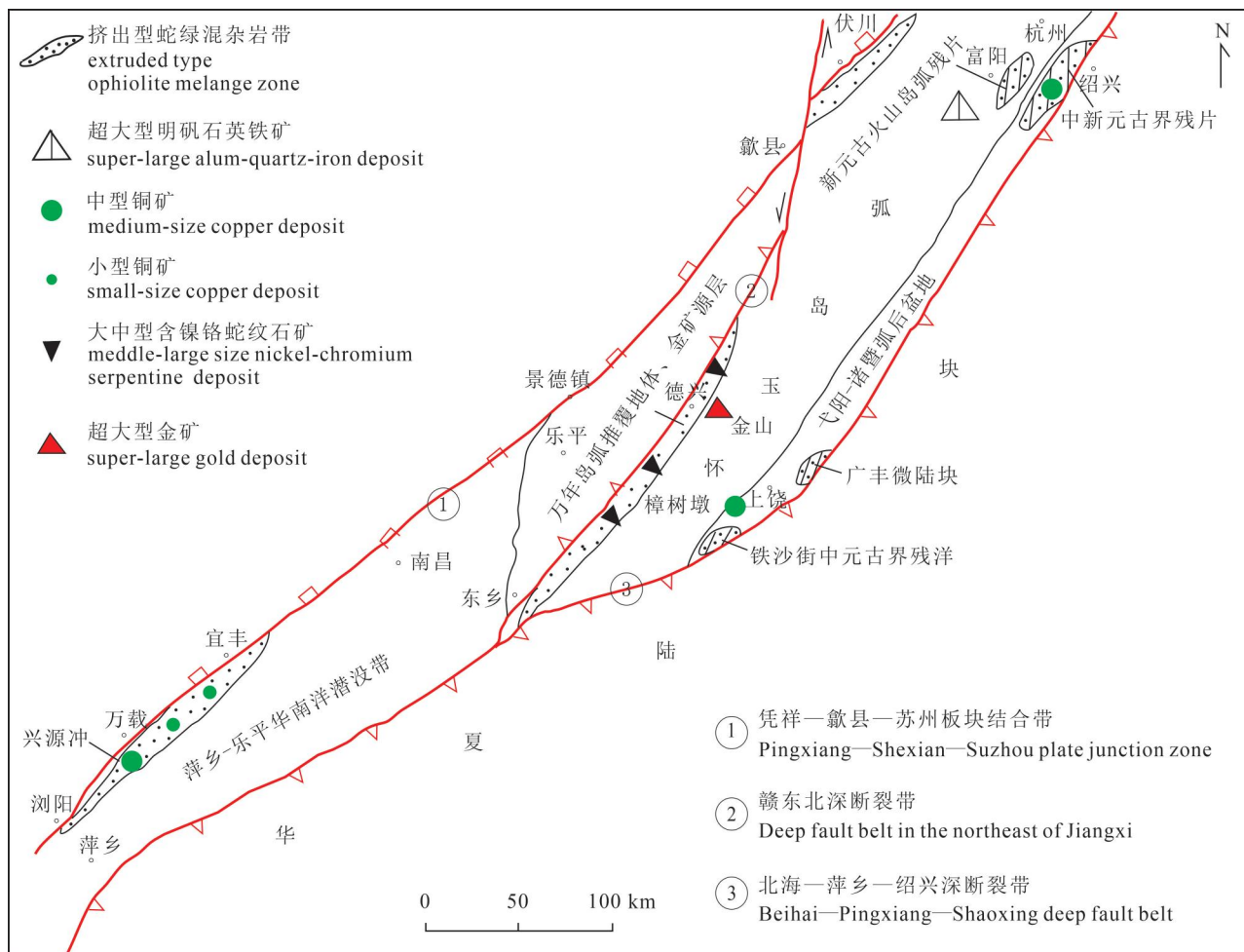


图3 钦杭带北东段中—新元古代华南洋及其陆缘弧盆矿产分布略图

Fig. 3 Distribution sketch of the Meso—Neoproterozoic South China Ocean and its continental margin arc-basin minerals in the north-eastern section of the Qinzhou—Hangzhou Belt

纪早世地层已遭到叠覆消减,但残留有较完整的青白口纪晚世早期浅变质弧盆沉积。其中万年非原地推覆体与九岭准原地逆冲推覆隆起主要为含火山质泥沙浊流沉积组成的浅变质岩,为重要的金矿源层。于燕山期形成大量破碎带蚀变岩石英脉金矿床。万年推覆体万年岩群中有金山岭—里源金矿化带,已发现7处小型金矿床和金矿点。九岭隆起湘东北冷家溪群中形成了著名的黄金洞、大洞—万古两大超大型金矿床。在江西境内双桥山群中形成了大背坞中小型金矿田,在修水、铜鼓等地有多处金矿点分布。

2.2 南华间冰期—冰后期大规模沉积成矿作用

南华裂谷期中南华世至始早寒武世从南华间冰期到冰后期是锰、铁、磷、铀、钒、重晶石、滑石、页岩气、石墨等沉积(变质)矿产大规模成矿时期。该区扬子、华夏两个成矿省大地构造与古地理环境有所

差异。扬子成矿省以规模较大的扬子板块上扬子地块为主体,中晚南华世时期东南部地壳强烈伸展形成坳垒带(刘宝珺等,1993);震旦纪时全境进入陆表海时期。华夏成矿省北部为扬子板块规模较小的下扬子地块,南部的华夏陆块这时大部分沦为南华裂谷海盆,仅北缘地带残留有规模较小的信江—钱塘小地块和广丰微地块,与下扬子地块均于南华纪时转为陆表海。由此这一时期扬子成矿省与华夏成矿省成矿作用虽有相同之处,也存在较大不同。

2.2.1 中南华世间冰期铁锰硫铁矿成矿作用

该期铁矿与硫铁矿在南华裂谷海盆中分布较广。具工业价值的铁矿床主要分布于南华裂谷海盆北缘。以新余式磁铁矿石岩矿床为主,新余铁矿区具超大型规模,其次为江口式赤铁矿、磁—赤铁矿床,源自早期海底火山喷发,于间冰期氧化环境形成

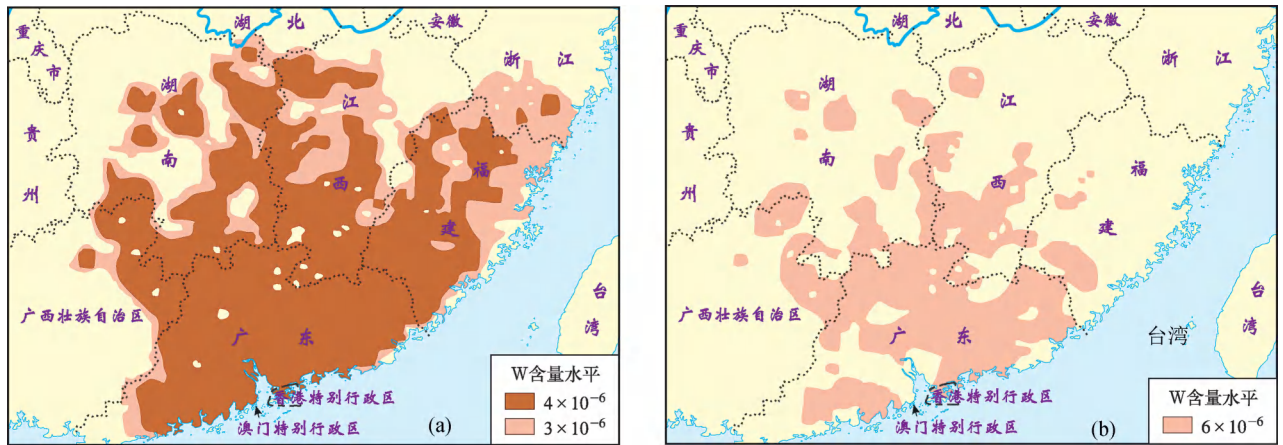


图4 华南钨地球化学块体示意图(据谢学锦等,2002)

Fig. 4 Sketch of tungsten geochemical blocks in south China (modified from Xie Xuejin, 2002&)

沉积变质铁矿床。在裂谷海盆内侧还原环境中形成多处黄铁矿或磁黄铁矿床,著名的有粤西大降坪超大型硫铁矿床。

南华间冰期含锰碳酸盐岩地层遍及华南,主要矿床形成于湘桂黔地区松桃—古丈、小茶园、万山—芷江等地堇中(覃英等,2005)。有桃源道沦、花垣民乐等一批大型、超大型矿床。其他地区为碳酸盐岩含锰层,层薄、品位低,风化后的氧化锰矿石局部可采。

2.2.2 南华冰期后沉积(变质)成矿作用

南华冰期后震旦纪至早寒武世气候转暖,为又一个重要的沉积(变质)成矿时期。

2.2.2.1 震旦纪磷、锰、滑石成矿作用

上扬子地块在震旦纪早世陡山沱期成为我国最重要的成磷地区。该期又是重要成锰时期,主要形成于上扬子地块东南、西北边缘。华夏成矿省该期含磷、锰地层分布很广,但层薄品位低,工业价值不大。唯在浏阳永和的构造岩片中残留有一个大型磷矿床。更引人注目的是华夏陆缘的广丰微陆块,震旦系陡山沱组底部为含锰碳酸盐岩层,中上部为磷矿层,形成朝阳大型磷矿床,在上统的灯影组中形成了规模居世界之首的广丰滑石矿床。

2.2.2.2 始早寒武世碳硅泥岩、磷、钒、铀、重晶石、石墨、页岩气(钼镍硒)成矿作用

这是生物大爆发时期,也是华南广泛分布的黑色碳硅泥页建造成矿时期,磷矿主要形成于上扬子地块滇黔地区。这套黑色高碳质地层普遍含铀、钒较高,钼、镍、硒局部富集。也有多处重晶石矿床形成。在上扬子地区为页岩气目的层,已获找矿突破。

华夏成矿省由于岩浆活动强烈,使存气受到影响。南华造山带中高碳质泥岩遭受变质,形成多处重要晶质石墨矿床。

2.3 多期大规模S型岩浆以钨为首的成矿系列组合

华夏成矿省是全球多期S型花岗质岩浆成矿系列发育最完美的地区(陈毓川等,2018;江西省地质矿产勘查开发局,2020),并与世界级地壳型地球化学块体(谢学锦等,2002;江西省地质矿产勘查开发局,2015)(图4)恰相契合。大量同位素年代表明(王登红等,2010)自晋宁期以来历经多期构造—岩浆—成矿发展演化,于燕山期发生了大规模岩浆成矿大爆发,形成了钨资源储量居世界之首的有色、贵、稀、非金属成矿省(图5)。

2.3.1 晋宁—加里东—印支期S型花岗岩类成矿作用

这是华夏成矿省S型花岗岩类成矿作用由弱到较强的发展演化时期。

2.3.1.1 晋宁造山期成矿作用

该期形成的由S型英云闪长岩(导体)—花岗闪长岩(主体)—二长花岗岩(补体)组成的江南岩带规模巨大,但成矿作用局限于江南隆起带西段,有黔东南梵净山岩体黑水湾、标水岩小型钨矿床,桂北四堡岩体的乌东小型钨矿床,及宝坛钨矿床。江西修水花山洞由隐伏花岗闪长岩—二云母二长花岗岩株形成的蚀变花岗岩型、石英脉型、隐爆岩筒型中型钨(白)钼铜矿床(刘进先等,2015)。

2.3.1.2 加里东造山期成矿作用

该期花岗岩类分布很广,其中近源地变形花岗岩类尚未发现矿床,远源地分异较好由英云闪长岩

(导体)—花岗闪长岩+黑云母二长岩(主体)—黑云母正长花岗岩+二云母花岗岩(补体)组成,显示较强的W、Sn、U、稀土矿化富集作用。赣南上犹陡水岩体风化壳形成锡砂矿点,南岭地区有淋积型铀矿床(点)和风化壳离子型稀土矿床发现。值得关注的是在钦杭南段南岭西段,相继有桂北越城岭地区南部牛塘界矽卡岩型中型钨矿床,越城岭北部独石岭大型蚀变岩型+矽卡岩型钨(铜)矿床以及多处钨矿点发现。

2.3.1.3 印支造山期成矿作用

该期S型花岗岩以黑云母二长花岗岩+二(白)云母花岗岩为主体,分布甚广。花岗质岩体分异程度与矿化作用进一步增强,除后期可形成淋积型铀矿与风化壳离子型稀土矿床外,矿床类型增多,由西向东有所扩展。越城岭、苗儿山、都庞岭等岩体有云

头界、李贵福等钨矿床和多处钨矿点的发现,栗木老虎头、金竹源钽、铌、钨、锡、稀土矿床也形成于这一时期,湘南荷花坪锡多金属矿床时代也为印支期。在赣中蒙山印支期花岗岩形成了巨大的硅灰石矿田,其中金竹山矿床规模居世界之首。

2.3.2 燕山期S型岩浆成矿大爆发

燕山期陆内活化造山形成了大规模S型花岗岩类,经强烈同源分异演化,构成了由中酸性、酸性到超酸性的岩浆与多矿种成岩成矿序列。以花岗闪长岩为导体,出露稀少,未发现矿床;主体为大规模的黑云母二长花岗岩,形成了以W为主的Sn、Mo、Bi、Be等矿床,也是热水淋积型铀矿床的重要母岩;次主体为正长或碱长二(白)云母花岗岩,形成大量以Sn为主的W、Pb、Zn、Be、Ta、Nb、Li、Cs、Rb、Sc、Ga等矿床,近期Li、Cs、Rb、Ga找矿取得一系列新突

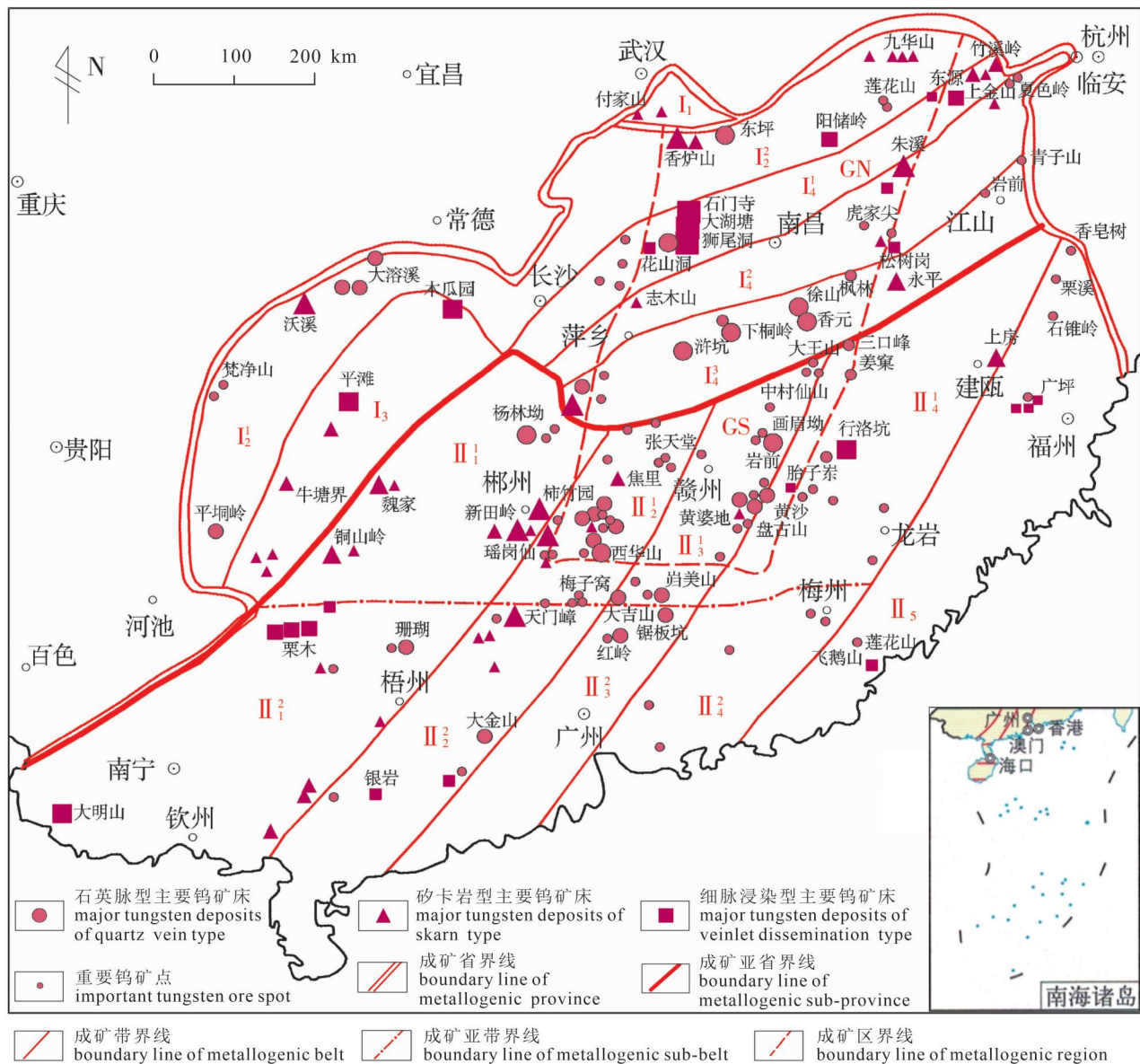


图5 华夏成铜省钨矿床分布略图(江西省地质局,2022)

Fig. 5 Distribution sketch map of tungsten deposits in Cathaysian Tungsten Province (Jiangxi Bureau of Geology, 2022)

I—下扬子成铜亚省: I₁—长江中游成铜钨带; I₂—江南成钨带, I₂¹—江西南西段亚带, I₂²—江南东段亚带; I₃—湘桂成钨带; I₄—钦杭北段成钨带, I₄¹—九岭—黄山亚带, I₄²—萍乡—临安亚带, I₄³—武功山—仙霞岭亚带。II—南华成钨亚省: II₁—钦杭南段成钨带, II₁¹—湘中南亚带, II₁²—桂东亚带; II₂—诸广—云开成钨带, II₂¹—诸广亚带, II₂²—云开亚带; II₃—于山—九连山成钨带, II₃¹—于山亚带, II₃²—九连山亚带; II₄—武夷成钨带, II₄¹—武夷隆起亚带, II₄²—永(安)梅州拗陷亚带; II₅—东南沿海成钨带。GN—赣北成钨区。GS—赣南成钨区

I—lower Yangtze metallogenic sub-province: I₁—copper—tungsten belt in middle reaches of the Yangtze River; I₂—tungsten belt in south of the Yangtze River, I₂¹—sub-belt in western section of the Yangtze River, I₂²—sub-belt in eastern section of the Yangtze River; I₃—tungsten belt in Hunan—Guangxi; I₄—tungsten belt in north section of the Qinzhou—Hangzhou belt, I₄¹—Jiuling—Huangshan sub-belt, I₄²—Pingxiang—Lin'an sub-belt, I₄³—Wugong Mountains—Xianxia Mountains sub-belt. II—Tungsten sub-province in the Nanhua: II₁—tungsten belt in southern section of the Qinzhou—Hangzhou belt, II₁¹—sub-belt in southern—central of Hunan, II₁²—sub-belt in eastern of Guangxi; II₂—tungsten belt in Zhuguang—Yunkai, II₂¹—Zhuguang sub-belt, II₂²—Yunkai sub-belt; II₃—tungsten belt in Yushan—Jiulianshan, II₃¹—Yushan sub-belt, II₃²—Jiulianshan sub-belt; II₄—tungsten belt in Wuyi Mountains, II₄¹—uplift sub-belt in Wuyi Mountains; II₄²—depression sub-belt in Yong'an—Meizhou area; II₅—tungsten belt in the southeastern coast China. GN—tungsten region in Northern Jiangxi. GS—tungsten region in southern Jiangxi

破,其中蚀变花岗岩型锂矿在钦杭带和诸广山南段的赣西南茅坪、湘东南小坑等地有新的发现。在花岗岩体外围有大量中低温热液矿床形成,如锡矿、钨矿、黄金洞式金矿、虎家尖式银矿、长坑、肖湾式金银矿、桃林式铅锌矿、沃溪式铅锡金矿以及大量萤石矿床。该期花岗岩又是风化壳离子型稀土矿床的重要母岩,白(二)云母为优质高岭土母岩。

东南沿海火山岩带,开始形成于晚侏罗世晚期,主要形成于早白垩世,局部延至古近纪。形成了大量火山—潜火山式矿床,如冷水坑式银铅锌矿床,锡坑迳式锡矿床、相山式铀矿床,冶岭头式金银矿床、五部式铅锌矿床、石平川式钨矿床,以及多处钨矿床。该带又是我国重要的非金属成矿带,形成了大量萤石、叶蜡石、明矾石、膨润土及沸石、珍珠岩、伊利石等矿产。

2.4 燕山期大规模I型岩浆以铜为首的成矿系列组合

华夏成铜省晋宁期造山形成的I型岩浆成矿作用,仅残留有2处残体,一是浙中诸暨的石英闪长岩形成的石英脉型金矿床(朱安庆等,2009),另一处是赣东北浮梁县朱溪矿区边缘“断根”含铜花岗闪长斑岩。大规模的I型中酸性岩浆成矿作用发生于燕山期陆内活化造山时期,超强的造山导致壳幔同熔,形成的中酸性岩浆主要沿板块结合带、隆拗交接带、深断裂带入侵,形成以中小型岩株为主的串珠状岩带与以铜为主的铁、有色、贵、稀金属成矿系列组合,主要分布于长江中下游(常印佛等,1991)、钦

杭成矿带以及吴川—四会、会昌—上杭—云霄矿集带等地。构成了东亚重要的华夏成铜省(图6)。该成矿系列组合主要包括3个成矿系列。

2.4.1 扬子壳幔同熔型中酸性岩浆铜、铁及贵金属成矿系列

为区内最重要成铜成矿系列:包括铁山式中浅成中酸性岩浆,以铁为主铜、铅、锌、金、硫铁矿成矿组合;铜陵中浅中酸性岩浆以铜为主的金、铁、铅、锌、银、硫铁矿成矿组合;铜厂—城门山式浅成花岗闪长斑岩为主的成铜为主的钨、金、银、镓、硒、碲等成矿组合;水口山以铅锌为主的铜、铁、金、银成矿组合,龙头山式金、铜、铅、锌、银成矿组合等;银山—紫金山火山—潜火山中酸性岩浆成铜、金、铅、锌、银等金属成矿组合。

2.4.2 宁芜以幔源为主的壳幔同熔型中基性、中碱性以铁为主的成矿系列

成岩成矿于燕山晚期,由造山向伸展转变环境,形成著名的宁芜庐枞玢岩铁矿床。

2.4.3 钦杭以壳源为主的壳幔同熔型(I—S)中酸性以钨、钼、铜为主的成矿系列

该系列包括钦杭成矿带北带的阳储岭—东源花岗闪长斑岩为主的斑岩型钨、钼成矿组合;皖南绩溪—黄山—宁国一带的中浅成花岗闪长岩以矽卡岩型为主的钨多金属成矿组合;永平富斜花岗岩—花岗闪长斑岩以铜为主的铜、钨、钼、铅、锌、银、金成矿组合等。

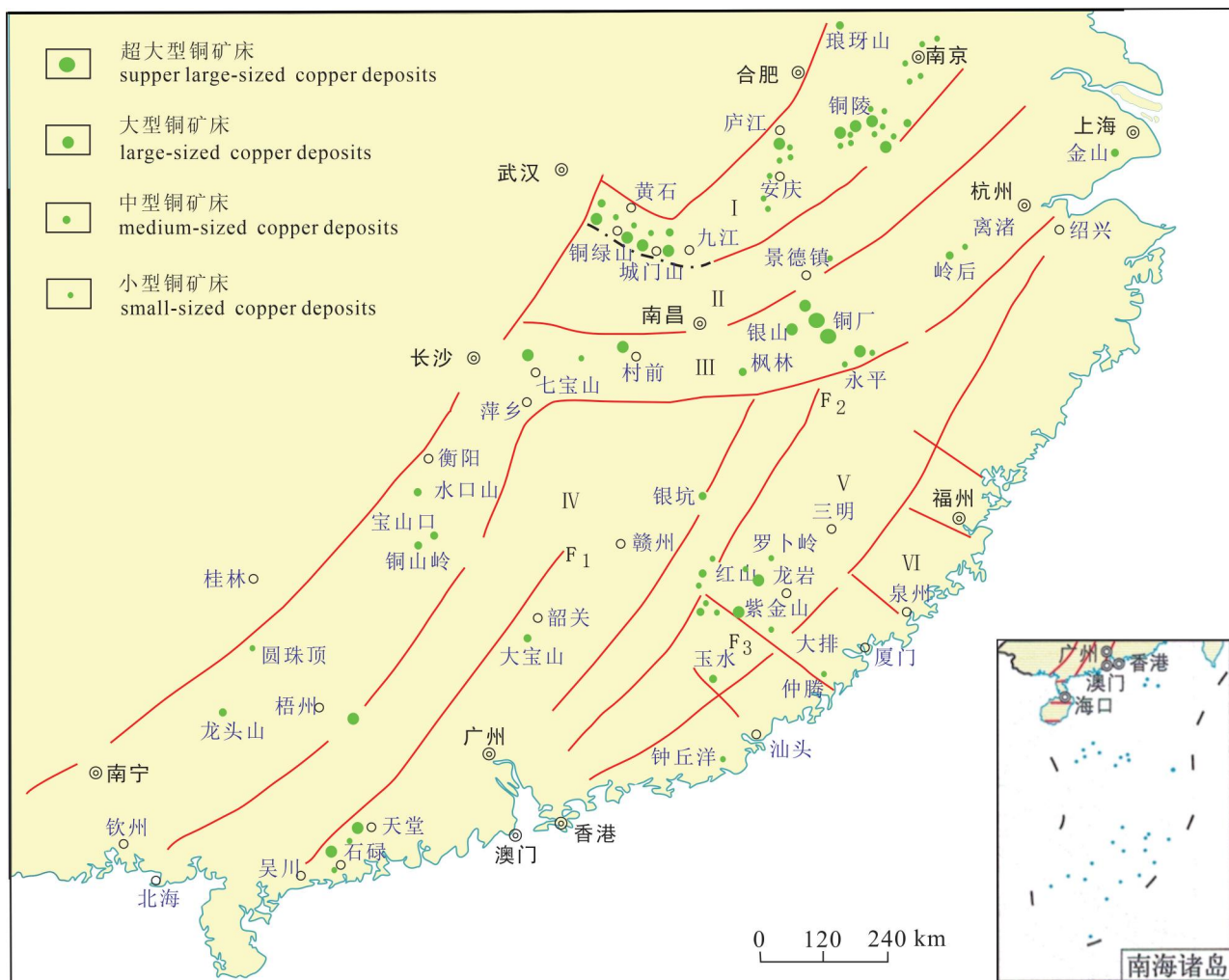


图6 华夏成铜省与燕山期I型花岗岩有关的铜矿床分布略图(江西省地质矿产勘查开发局,2020;王岩等,2020)

Fig.6 Distribution sketch map of copper deposits related to the Yanshanian I-type granites in the Cathaysian Copper Province China (after Bureau of Geology and Mineral Resources Exploration and Development of Jiangxi Provincial, 2020#; Wang Yan et al., 2020&)

I—长江中下游成矿带; II—江南东段成矿带; III—钦杭成矿带; IV—罗霄—云开成矿带; V—武夷成矿带; VI—沿海成矿带;
F₁—吴川—四会断裂带; F₂—永平—河源断裂带; F₃—会昌—上杭断裂带

I—metallogenic belt in the middle and lower reaches of the Yangtze River; II—metallogenic belt of the eastern section on south of the Yangtze River; III—the Qinzhou—Hangzhou metallogenic belt; IV—Luoxiao—Yunkai metallogenic belt; V—Wuyi metallogenic belt; VI—metallogenic belt in the southeastern coast China. F₁—Wuchuan—Sihui fault belt; F₂—Yongping—Heyuan fault belt; F₃—Huichang—Shanghang fault belt

2.5 钦杭成矿带巨矿集群与“深地”找矿之眼

该带厘定以来(杨明桂等,1997)研究表明为华南洋潜没带、构造堆叠消减混杂带、岩石圈不连续带(江西省地质矿产勘查开发局,2017,2020)构成了独特而极为有利的成矿基因,既是一条世界罕见的有色、贵、稀有、非金属成矿带(图7),又打开了一只“深地”找矿之眼。

2.5.1 多期多源多系列多大矿组成的成矿带

2.5.1.1 世界重要的S型岩浆钨及贵、稀、非金属成矿带

该带S型花岗质岩浆成矿作用一是多期成矿以

燕山期为主;二是部分陆壳中混入有华南洋壳物质,往往形成钨、铜共生矿床,如朱溪、石门寺、黄沙坪等矿床;三是形成了一条世界罕见的有色、贵、稀、非金属超大矿床集群。钨资源储量居世界成矿带之首,Sn、Ta、U、Pb、Zn、Au、Ag等资源在我国占重要地位。有朱溪(W)、石门寺(W)、柿竹园(W)、松树岗(Ta)、甘坊(Li)、石竹山(硅灰石)等世界级矿床,狮尾洞(W)、大湖塘(W)、新田(W)、杨林坳(W)、锡田(Sn、W)、白腊水(Sn)、雅山(Ta、Nb、Li)、阳山(Ta、Nb)、善安滨(Ta、Nb)、大洞—万古(Au)、黄金洞(Au)、冷水坑(Ag、Pb、Zn)、相山(U)等超大型矿

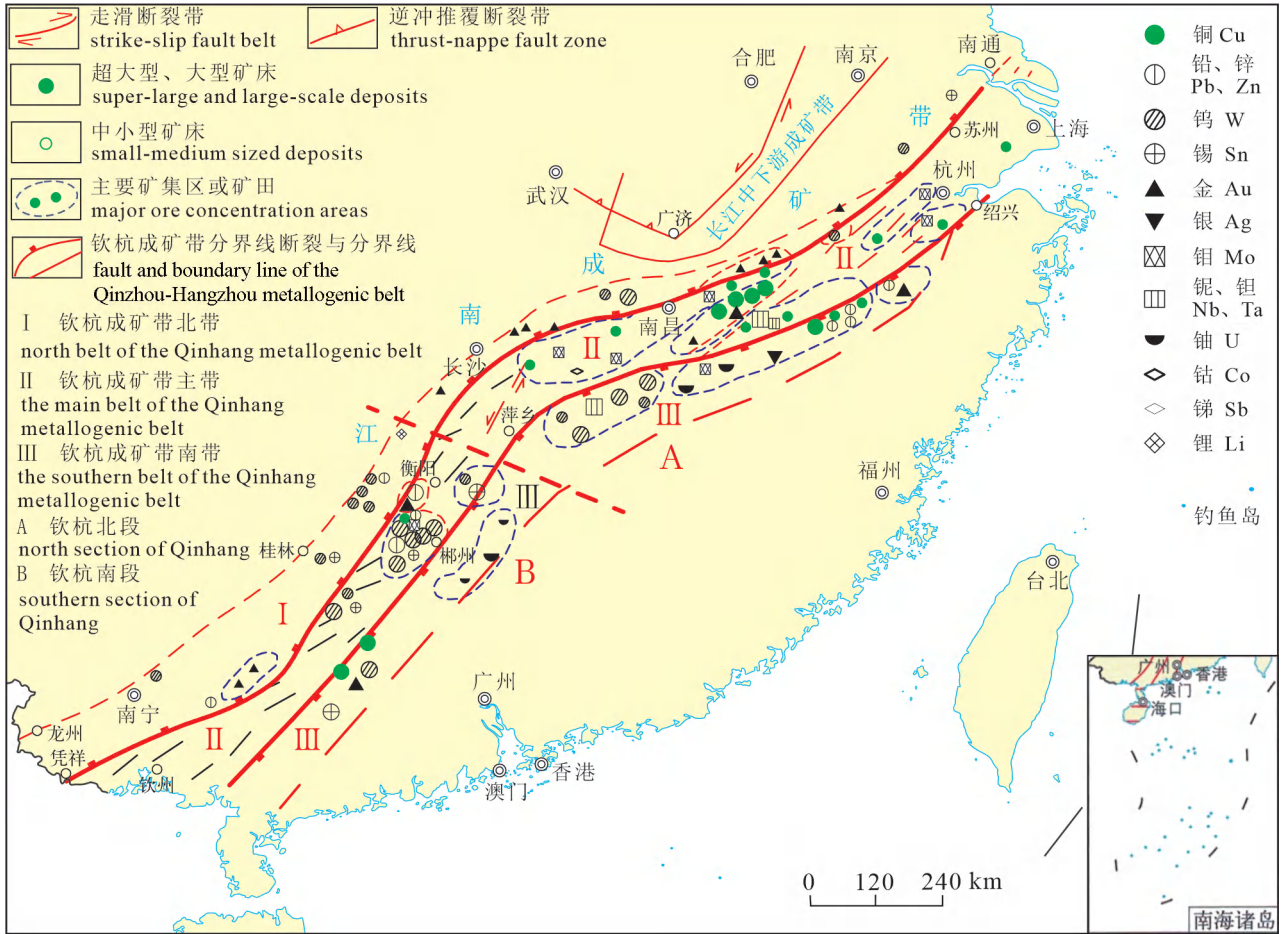


图 7 钦杭成矿带及邻侧地质矿产简图 (据杨明桂等,1997 修改)
 Fig. 7 Geological and mineral resources map of the Qinzhong—Hangzhou metallogenic belt and its adjacent areas(modified from Yang Minggui, 1997&)

床及一批大中型金属矿床和众多萤石、膨润土、叶蜡石、明矾石、硅灰石等非金属矿床。

2.5.1.2 我国重要的 I 型岩浆铜多、贵金属成矿带

该带以 I 型成矿花岗闪长斑岩小岩株为主,形成我国重要的铜、钼、铅、锌、金、银成矿带,有铜厂(Cu、Au、Mo)、富家坞(Cu、Mo)、银山(Au、Cu、Pb、Zn、Ag)、水口山(Pb、Zn、Cu、Au、Ag)等超大型矿床和朱砂红(Cu)、溪口(黄铁矿)、宝山(Pb、Zn、Ag、Cu、Mo)、铜山岭(Cu、Pb、Zn、W)、佛子冲(Pb、Zn、Cu)、园珠顶(Cu、Mo)、龙头山(Au、Cu)等大型矿床及一批中小型矿床。并伴有丰富的 Se、Te、Ga 等元素,除此有 I—S 过渡型岩株形成的永平(Cu、W、Mo)、阳储岭(W、Mo)、东源(W、Mo)、大明山(W、Au)等大型矿床。东乡枫林为 I 型岩浆成铜、S 型岩浆成钨共生矿床。

2.5.1.3 华南重要的铁、锰、石膏、煤成矿带

该带由南华纪、泥盆纪以来沉积组成一条反 S

型拗陷带,为宁乡式铁矿、湘潭式、乐华式锰矿、清江盆地岩盐、衡阳盆地石膏、乐平、安源煤系组成华南重要的铁、锰、石膏、煤以及海泡石、油页岩等沉积型成矿带。

2.5.2 “深地”找矿之眼

钦杭成矿带江西段研究表明,该区既是华南成矿省“深地”之窗(杨明桂,2015),又揭示了其成矿时空结构特征,取得深部丰富的成矿信息,成了华夏成矿省一只“深地”找矿之眼。

2.5.2.1 “多位一体”成矿特征

区内通过“以脉找体”,发现了银山潜火山斑岩型超大型 Au、Cu、Pb、Zn、Ag 矿床和隐伏于 1500 m 深处的成矿花岗闪长斑岩;相继发现了徐山“地下室”式大型矽卡岩型+蚀变岩型钨矿体,松树岗“地下室”式世界级蚀变岩型钽铌锂矿床。“以层找体”发现了朱溪成矿花岗岩岩株埋深于 1600 m 处的以矽卡岩型为主的“五位一体”钨铜(银)矿床(图 8),除

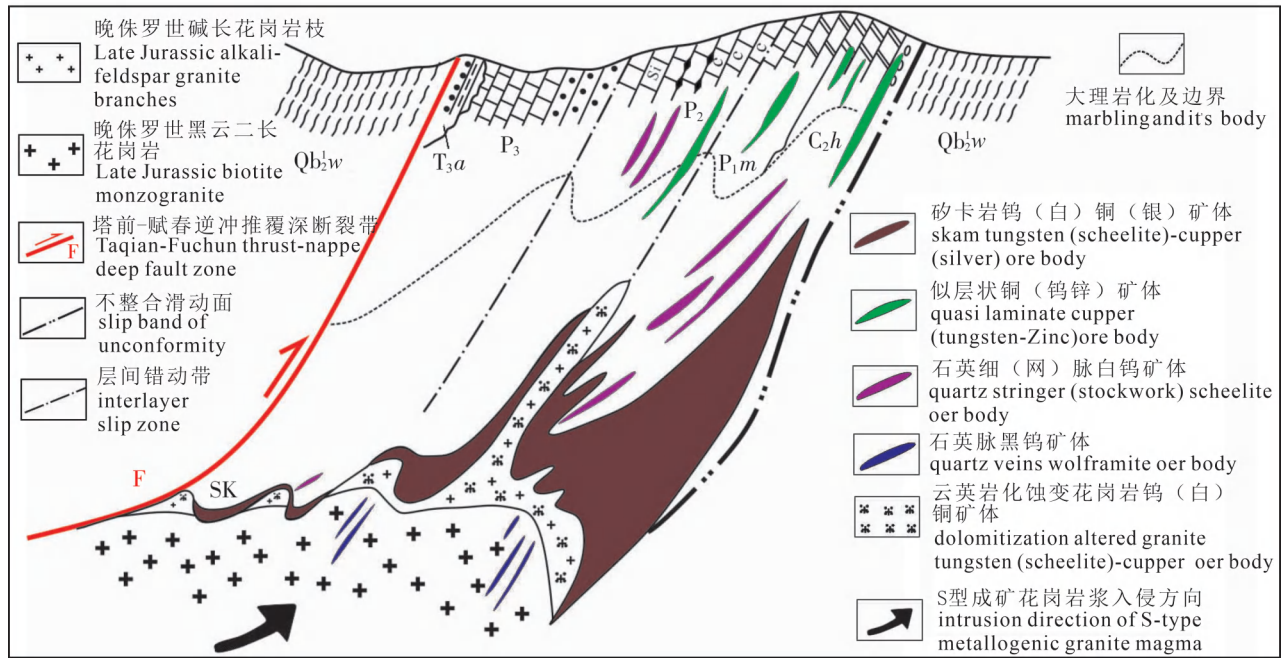


图8 “朱溪式”钨铜(银)矿床成矿模式图(江西省地质矿产勘查开发局,2023)

Fig. 8 Metallogenic model of “Zhuxi type” tungsten—copper (silver) deposit (Jiangxi Bureau of Geology and Mineral Exploration and Development of Jiangxi Province, 2023#)

T_{3a} —上三叠统安源组; P_3 —上二叠统; P_2 —中二叠统石灰岩; P_{1m} —下二叠统马平组石灰岩; C_2 —上石炭统黄龙组白云质碳酸盐岩; Qb_2w —上青白口统下部万年群变质岩系

T_{3a} —the Anyuan Formation of Upper Triassic; P_3 —Upper Permian; P_2 —Middle Permian limestone; P_{1m} —the limestone of the Lower Permian Mapping Formation; C_2 —Upper Carboniferous Huanglong Formation dolomitic carbonate rocks; Qb_2w —metamorphic rock series of the Wannian Group in lower part of Upper Qingbaikou Series

此,月形东似层状矽卡岩型铜矿床已控至中型规模,正在勘探中,预测成矿岩体在 1300 m 以下深处。“地下室”式矿床成了该区找矿重大突破的“攻深”方向。

2.5.2.2 “多台阶”成矿特征

通过上述一系列“深地”找矿成果进一步认识到区内各矿集区、矿田成矿岩体及其矿床具有台阶特征,如德兴矿集区上台阶的铜厂—富家坞矿田与下台阶的银山矿田成矿岩体侵位高差约 1800 m;朱溪矿集带塔前—张家坞上台阶成矿较弱,朱溪—月形东下台阶成矿强,两台阶成矿岩体侵位高差约在 1800 m 上下。显示出第二空间的下台阶是“攻深”又一重要方向。

2.5.2.3 “多位态”矿床分布特征

该带推滑覆构造极为强烈,导致一批矿床从深处推挤至浅表,形成了矿床“多位态”分布特征。即除原位矿床外,一种是来自深部的华南洋壳中的矿床,如德兴—弋阳岩片中的超大型金山金矿及多处

含 Cr、Ni 蛇纹石矿床,宜丰岩片中的兴源冲式铜(锌)矿床;二是来自中深部的七宝山(Pb、Zn、Co)、五宝山(Pb、Zn、Co)、志木山(Cu、Pb、Zn、Mo、W)(图9),桥东(Pb、Zn)等燕山期“断根”矿床以及朱溪晋宁期斑岩铜矿碎块。显示了深部的资源潜力。

3 燕山期大规模岩浆成矿构造过程与动力学特征

华夏成矿省是滨太平洋构造成矿域燕山期陆内活化造山与岩浆成矿大爆发最强烈的地区,经长期调查研究基本查明了其独特的造山岩浆成矿过程与动力学机制(江西省地质矿产勘查开发局,2015,2017;杨明桂等,2020)。

3.1 燕山期造山与岩浆成矿发展过程

超强的燕山运动经历了漫长的核幔式扩展过程(江西省地质矿产勘查开发局,2015)。运动于中侏罗世启动于钦杭带中段,晚侏罗世激化于南岭的赣南、湘东南、粤北地区,晚侏罗世晚期至早白垩世以

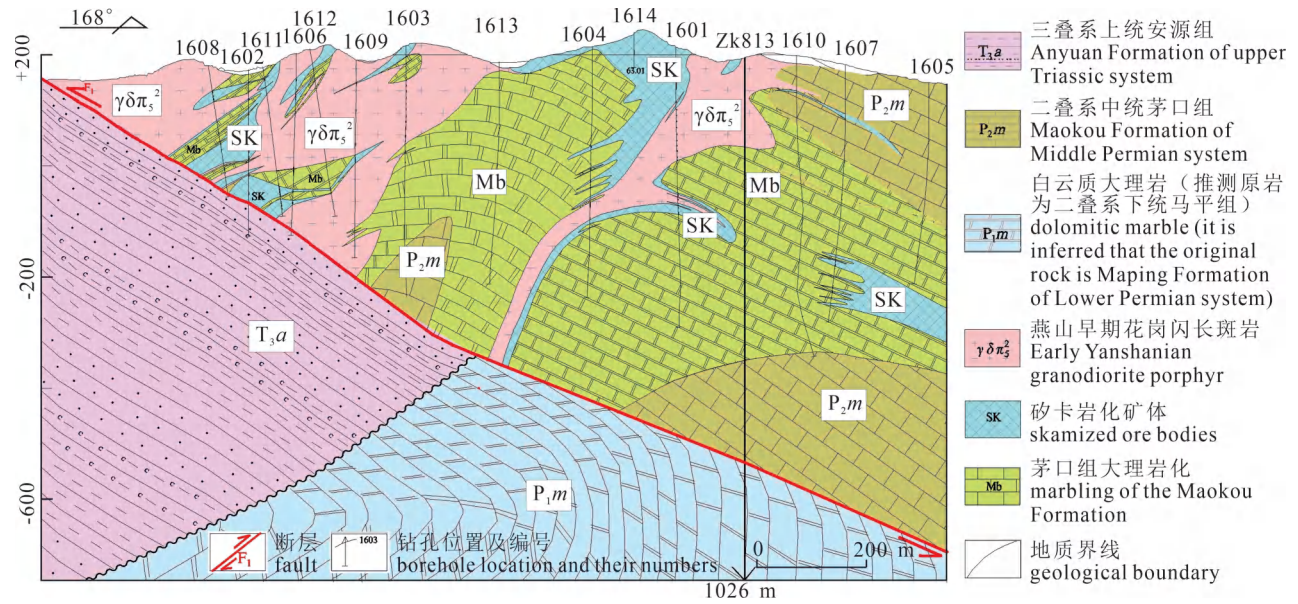


图 9 上栗志木山矿区 16 线地质剖面简图

Fig. 9 Geological profile of the Line-16 in the Zhimushan mining area, Shangli

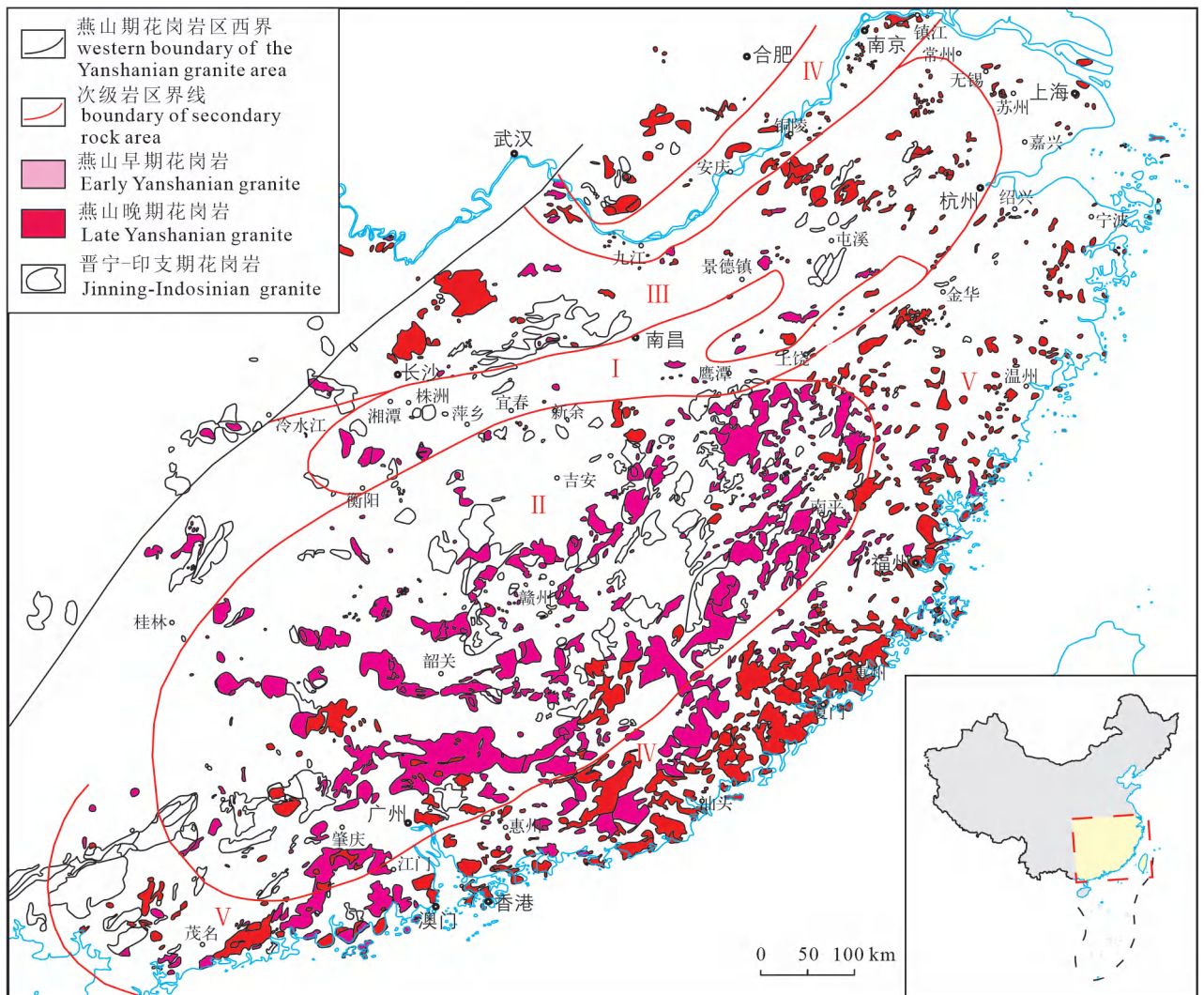


图 10 华夏成矿省燕山期花岗岩核幔式分布扩展简图(据杨明桂等,2015 修改)

Fig. 10 Core—mantle type distribution and expansion diagram of Yanshanian granite in Cathaysian Metallogenic Province (modified from Yang Minggui et al., 2015&)

I—燕山早期钦杭中段中—晚侏罗世 I 型斑岩、S 型花岗岩带; II—燕山早期晚侏罗世 S 型花岗岩核心成岩区; III—江南燕山晚期 S 型花岗岩为主岩带; IV—长江中—下游燕山晚期早白垩世 I(A) 型侵入岩带; V—燕山晚期早白垩世 S(A) 型花岗岩扩展分布岩区

I—I-type porphyry and S-type granite belts of the early Yanshanian Middle to Late Jurassic in middle of Qinzhou—Hangzhou belt; II—S-type granite of the early Yanshanian Late Jurassic in core diagenetic zone; III—Jiangnan rock belt dominated by late Yanshanian S-type granite; IV—I- or A-type intrusive rock zone of the late Yanshanian Early Cretaceous in the Middle—Lower Yangtze River; V—extensive distribution rock area of S- or A-type granite of the late Yanshanian Early Cretaceous

此为核幔向外侧扩展。总体呈北东向展布,随着大规模花岗质岩浆上侵于上地壳浅部,导致壳体热胀,产生蠕散作用,使地壳发生伸展,岩浆成矿活动向沿海偏移,北部达长江中下游,东南面到东南沿海地带(图 10),造山活动结束于早白垩世末,历时约 70Ma。大规模的 S 型岩浆活动从中晚侏罗世到早白垩世依次由深成侵入成岩成矿—中深成至中浅成成岩成矿—火山潜火山成岩成矿,形成了大面积的 S 型花岗岩与东南沿海造山—蠕散型火山岩带(江西省地质矿产勘查开发局,2020)(图 11)。

3.2 燕山期陆内活化造山的动力学特征

华夏成矿省强烈的燕山运动形成了以扬子“反 S”型构造体系为基础,以华夏系、新华夏系为主导,与东西向、南北向等构造带相复合的多体系构造格局(李四光,1973;杨明桂,2019)(图 12)。扬子“反 S”型构造体系是在晋宁期华南洋闭合陆陆碰撞形成的反 S 型构造基础上经长期发展于燕山期增生定型。华夏成矿省境内有武陵—沿江、江南、钦杭、会稽山—武功山—云开大山等“反 S”型隆、拗构造带,控制了一系列重要成矿带,并显示北海—萍乡—绍兴深断裂带南侧的南华加里东造山带这时有向北拼贴向西推挤的趋势,形成了钦杭燕山期反 S 型褶皱带。形成于燕山运动的华夏、新华夏构造体系,分别以北东、北北东向隆拗带,挤压走滑断裂带为主体,华夏系有北西向张(扭)性断裂和北东、北西向一对“X”断裂相配套。新华夏系配套构造为北西西向张(扭)性断裂和北东东向压扭性断层、剪张性裂隙带与北北西向扭张性断裂带。构成了滨太平洋构造成矿域的主导性控矿构造体系。这三项重要构造体系正如李四光所研究模拟得出的是东亚大陆向南、古太平洋向北相对左行扭动的结果(李四光,1973),同时北东、北北东向强烈的挤压特征当与古太平洋板块的俯冲作用有关。这种扭动与俯冲联合作用是构成燕山运动的主导性动力。同时区内存在南岭、白马山—武功山等近东西向构造—花岗岩带,以及

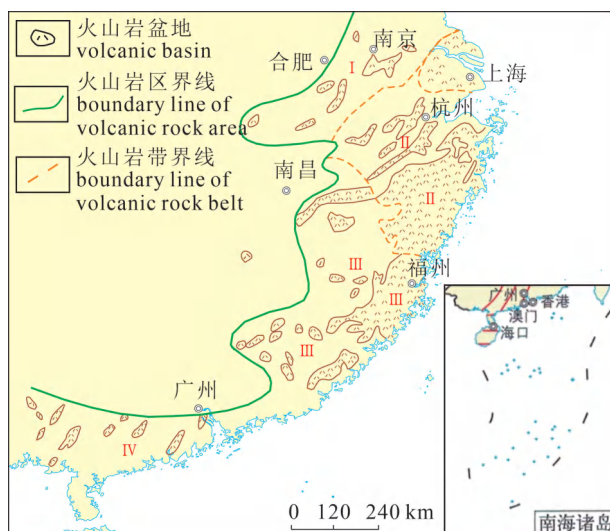


图 11 华南东部陆区白垩纪火山岩分布略图

(据都洵,张永康,1998 资料修改)

Fig. 11 Distribution map of Cretaceous volcanic rocks in the east of South China (modified from Du Xun, Zhang Yongkang, 1998#)

I—长江中下游早白垩世中—晚期(130~95 Ma)火山岩带; II—苏浙闽(北)早白垩世中—晚期(135~95 Ma)火山岩区; III—赣闽粤晚侏罗世晚期—早白垩世(155~95 Ma)火山岩区; IV—桂东粤西沿海早白垩世晚期—晚白垩世(130~70 Ma)火山岩带

I—volcanic rock belt of the middle—late stage of Early Cretaceous (130~95 Ma) in the middle and lower reaches of Yangtze River; II—volcanic rock area of the middle—late stage of Early Cretaceous (135~95 Ma) in the Jiangsu—Zhejiang—Fujian (northern part); III—volcanic rock area of the Late Jurassic to Early Cretaceous (155~95 Ma) in the Jiangxi—Fujian—Guangdong; IV—volcanic rock belt of the late stage of Early Cretaceous—Late Cretaceous (130~70 Ma) along the coast of the eastern Guangxi—western Guangdong

饶南—闽北等近南北向构造带(图 13)应分别与近南北、近东西向板内挤压活动有关。除此,前已述及,大规模岩浆侵入活动,引发的蠕散伸展效应,是一项不容忽视的动力因素(图 12),近期出现的燕山运动伸展说,可能为由此产生的误判。

综上所述,华夏成矿省的厘定与研究,更新了华



图 13 华南成矿省燕山期核幔扩展模式与动力作用略图(江西省地质矿产勘查开发局,2022)

Fig. 13 The Yanshanian core—mantle-style expansion model and dynamic effect sketch in the Cathaysian Metallogenic Province (Bureau of Geology and Mineral Exploration and Development of Jiangxi Province, 2022)

I—钦杭中段中晚侏罗世构造岩浆成矿作用启动地带; II—诸广—南岭晚侏罗世构造岩浆成矿作用核心区; III¹—长江中下游早白垩世早中期构造岩浆成矿作用早扩展区, III²—江南早白垩世早中期构造岩浆成矿作用早扩展区, III³—武夷早白垩世早中期构造岩浆成矿作用早扩展区; IV¹—桂东早白垩世中晚期构造岩浆成矿作用中晚扩展区, IV²—沿海早白垩世中晚期构造火山侵入杂岩成矿作用中晚扩展区

I—tectonic and magmatic mineralization initiation zone of the Middle to Late Jurassic in the middle of Qinzhong—Hanzhou belt; II—tectonic and magmatic mineralization core area of the Late Jurassic in Zhuguang—Nanling; III¹—tectonic and magmatic mineralization early extended area during the early—middle stage of the Early Cretaceous in the middle and lower reaches of Yangtze River; III²—tectonic and magmatic mineralization early extended area during the early—middle stage of the Early Cretaceous in south of the Yangtze River; III³—tectonic and magmatic mineralization early extended area during the early—middle stage of the Early Cretaceous in Wuyi Mountains; IV¹—tectonic and magmatic mineralization middle—late extended area during the middle—late stage of the Early Cretaceous in east Guangxi, IV²—tectonic—volcanic intrusive complex mineralization middle—late extended area during the middle—late stage of the Early Cretaceous along the coast

参 考 文 献 / References

(The literature whose publishing year followed by a “&” is in Chinese with English abstract; The literature whose publishing year followed by a “#” is in Chinese without English abstract)

- 常印佛,刘湘培,吴言昌. 1991. 长江中下游铁铜成矿带. 北京:地质出版社.
- 陈毓川,王登红,徐志刚,等. 2015. 中国重要矿产和区域成矿规律. 北京:地质出版社.
- 陈毓川,王登红,朱裕生,等. 2007. 中国成矿体系与区域成矿评价. 北京:地质出版社.
- 陈毓川. 1994. 矿床的成矿系列. 地学前缘, 1(3): 90~99.
- 陈毓川. 1999. 中国主要成矿区带矿产资源远景评价. 北京:地质出版社; 1~536.
- 都洵,张永康. 1998. 东南地区区域地层. 武汉:中国地质大学出版社.
- 江西省地质局. 2022. 江西省钨矿地质志. 北京:地质出版社.
- 江西省地质矿产勘查开发局. 2015. 中国矿产地质志·江西卷. 北京:地质出版社.
- 江西省地质矿产勘查开发局. 2017. 中国区域地质志·江西志. 北京:地质出版社.
- 江西省地质矿产勘查开发局. 2020. 中国矿产地质志:华南洋—滨太平洋构造演化与成矿. 北京:地质出版社.
- 李四光. 1973. 地质力学概论. 北京:科学出版社.
- 刘宝珺,许效松. 1994. 南方岩相古地理图集. 北京:科学出版社.
- 刘进先,陈浩文,刘兴畅,等. 2015. 江西修水花山洞钨矿床年代学研究及其意义. 资源调查与环境, 36(1): 1~9.
- 宁芜项目研究编写小组. 1989. 宁芜玢岩铁矿. 北京:地质出版社.
- 孙涛. 2006. 新编华南花岗岩分布图说明. 地质通报, 25(3): 332~335.
- 覃英,周琦,张遂. 2005. 黔东南地区南华纪锰矿基本特征. 贵州地质, 22(4): 246~251.
- 王登红,李华芹,屈文俊,等. 2014. 全国成岩成矿年代谱系. 北京:地质出版社.
- 王岩,王登红,黄凡,等. 2020. 中国矿产地质志·中国矿产分省图集. 北京:地质出版社.
- 谢学锦,刘大文,向运川,严光生. 2002. 地球化学块体—概念和方法学的发展. 中国地质, 29(3): 225~233.
- 徐志刚,陈毓川,王登红,陈郑辉. 2008. 中国成矿区带划分方案. 北京:地质出版社.
- 杨明桂,梅勇文. 1997. 钦—杭古板块结合带与成矿带的主要特征. 华南地质与矿产, 3: 52~59.
- 杨明桂,王光辉. 2019. 华南陆区板块活动与构造体系的形成演化. 地质学报, 93(3): 528~544.
- 杨明桂,王光辉. 2020. 论华夏成矿省岩浆成矿大爆发的核幔式扩展模式与动力机制. 地质力学学报, 26(1): 1~12.
- 杨明桂,吴富江,宋志瑞,吕少俊. 2015. 赣北:华南地质之窗. 地质学报, 89(2): 222~233.
- 杨明桂,姚悦,熊燃,胡青华,徐梅桂. 2023. 元古代华南洋的轮廓. 地质力学学报, 29(1): 1~20.
- 朱安庆,张永山,陆祖达,等. 2009. 浙江省金属非金属矿床成矿系列和成矿区带研究. 北京:地质出版社.
- Chang Yinbo, Liu Xiangpei, Wu Changyan. 1991#. The Copper—Iron Belt of the Lower and Middle Reaches of the Changjiang River. Beijing: Geological Publishing House.
- Chen Yuchuan, Wang Denghong, Xu Zhigang et al. 2015#. Important mineral and regional metallogenic regularity in China. Beijing: Geological Publishing House.
- Chen Yuchuan, Wang Denghong, Zhu Yusheng et al. 2007 #.

- Metallogenic system and regional metallogenic evaluation in China. Beijing: Geological Publishing House.
- Chen Yuchuan. 1994&. Metallogenic series of ore deposits. Earth Science Frontiers (China University of Geosciences, Beijing), 1(3~4): 90~94
- Chen Yuchuan. 1999#. Prospective evaluation of mineral resources in main metallogenic belts of China. Beijing: Geological Publishing House.
- Du Xun, Zhang Yongkang. 1998#. Regional Stratigraphy in Southeast China. Wuhan: China University of Geosciences Publishing House.
- Jiangxi Bureau of Geology and Mineral Resources. 2015#. Geology of mineral resources in China volume of Jiangxi. Beijing: Geological Publishing House.
- Jiangxi Bureau of Geology and Mineral Resources. 2017#. China regional Geology · Jiangxi chronicle. Beijing: Geological Publishing House.
- Jiangxi Bureau of Geology and Mineral Resources. 2020#. South China Ocean—Coastal Pacific Tectonic Evolution and Mineralization. Beijing: Geological Publishing House.
- Jiangxi Bureau of Geology and Mineral Resources. 2022#. Geology of Tungsten Deposit in Jiangxi Province. Beijing: Geological Publishing House.
- Lee J S (Li Siguang). 1973#. Introduction to Geomechanics. Beijing: Geological Publishing House.
- Liu Baojun, Xu Xiaosong. 1994 #. Paleogeographic atlas of Simian Triassic in South China. Beijing: Science Publishing House.
- Liu Jinxian, Chen Haowen, Liu Xingchang, Wang Gao, Li Chao, Zhang Jigao. 2015&. Isotopic age dating of Huashandong tungsten deposit in Xiushui County, Jiangxi Province and its geological significance. Resources Survey and Environment, 36(1): 1~9.
- Ningwu Research Group. 1978#. Magnetite Porphyry Deposits in Ningwu Area. Beijing: Geological Publishing House.
- Qin Ying, Zhou Qi, Zhang Sui. 2005&. Elementary properties of manganese of Nh in the northeastern Guizhou. Guizhou Geology, 4(22): 246~251.
- Sun Tao. 2006&. A new map showing the distribution of granites in South China and its explanatory notes. Geological Bulletin of China, 25(3): 332~335.
- Wang Denghong, Li Huaqin, Qu Wenjun. 2014 #. Chronological pedigree of diagenesis and mineralization in China. Beijing: Geological Publishing House.
- Wang Yan, Wang Denghong, Huang Fan et al. 2020#. Geology of Mineral Resources in China atlas of China's Mineral Resources by Province. Beijing: Geological Publishing House.
- Xie Xuejin, Liu Dawen, Xiang Yunchuan, Yan Guangsheng. 2002&. Geochemical blocks—Development of concept and methodology. Chinese Geology, 29(3): 225~233.
- Xu Zhigang, Chen Yuchuan, Wang Denghong, Chen Zhenghui. 2008#. Division scheme of metallogenic belt in China. Beijing: Geological Publishing House.
- Yang Minggui, Mei Yongwen. 1997&. Characteristics of geology and metallization in the Qinzhou—Hangzhou paleoplate juncture. South China Geology, 13(3): 52~59.
- Yang Minggui, Wang Guanghui. 2019&. Formation and evolution of the plate activity and structural system in South China continental region. Acta Geologica Sinica, 93(3): 528~544.
- Yang Minggui, Wang Guanghui. 2020&. Core—mantle-type extensional mode and dynamic mechanism of the magmatic metallogenic explosion of the Yanshanian in the Cathasian metallogenic province. Journal of Geomechanics, 26(1): 1~12.
- Yang Minggui, Wu Fujiang, Song Zhirui, Lü Shaojun. 2015&. North

Jiangxi: a geological window of south China. *Acta Geologica Sinica*, 89(2): 222~233.

Yang Minggui, Yao Yue, Xiong Ran, Wang Guanghui, Hu Qinghua, Xu Meigui. 2023. The outline of the Proterozoic South China Ocean. *Journal of Geomechanics*, 29(1): 1~20.

Zhu Anqing, Zhang Yongshan, Lu Zuda et al. 2009. Study on metallogenic series and metallogenic belt of metal-nonmetal deposits in Zhejiang Province. Beijing: Geological Publishing House.

Discussion on Cathaysian Metallogenic Province

—To celebrate academician CHEN Yuchuan's 90th birthday

YANG Minggui¹⁾, CHEN Xiangyun¹⁾, WU Junhua¹⁾, ZHONG Cundi²⁾, WANG Yan³⁾

1) *Jiangxi Bureau of Geology, Nanchang, 330036;*

2) *Basic Geological Survey Institute of Jiangxi Geological Survey and Exploration Institute, Nanchang, 330030;*

3) *MNR Key Laboratory of Metallogeny and Mineral Assessment, Institute of Mineral Resources, Chinese Academy of Geological Sciences, Beijing, 100037*

Abstract: This paper gives a brief discussion on the Cathaysian Metallogenic Province with strategic mineral resources holding an important position, which was defined in the monograph of the “Mineral Geology of China: Tectonic Evolution and Mineralization in South China Ocean—Marginal Pacific Ocean” (2020): ① The Cathaysian Metallogenic Province is located in an extensive composite zone between the Paleo-South China Ocean Metallogenic Domain and the Marginal Pacific Metallogenic Domain, which underwent the development and evolution of the Early-Craton → South China Ocean rift system → epicontinental sea → continent since the Early Precambrian. Furthermore, it was subjected to multiphase orogeny, especially the extremely extensive Yanshanian intracontinental activation orogeny, being the world-class tungsten geochemical block, which forms the superior metallogenic genetics. ② Major metallogenic characteristics: including South China Ocean and its metallogenic of marginal arc depression remnant, and the large-scale sedimentary metallogenetic during the Nanhua interglacial period and post-glacial period; multiphase and large-scale S-type magmatic metallogenetic was predominated by the tungsten, secondly, nonferrous metal, uranium, precious metals and non-metallic; I-types magmatic mineralization is dominated by copper, with iron, nonferrous metals and precious metals, as well as the super-large ore concentrated group along the Qinzhou—Hangzhou metallogenic belt, which has become an “eye” for prospecting in the “depth”, etc. ③ During the Yanshanian Movement, the magmatic and metallogenetic “core—mantle” type spacial—temporal evolution regularity, as well as multi-system composite tectonic framework present the dynamic system, mainly due to the left-lateral shear between the continent and ocean with combination of ocean subduction, intracontinental multidirection convergence and crustal creep effect.

Keywords: Cathaysian Metallogenic Province; metallogenic genetics; metallogenic characteristics; Yanshanian Movement; diagenetic and metallogenetic dynamic mechanism

Acknowledgements: This paper is supported by the Geological Survey Project of “Annals of Geology of Mineral Resources of China” (Nos. DD20221695, DD20190379), the Tectonic Evolution and Mineralization in South China Ocean—Marginal Pacific Ocean (Mining Regulation Contract [2017] No. 83) which is commissioned by Institute of Mineral Resources, Chinese Academy of Geological Sciences. This English abstract is reviewed by Longmei Librarian. We would like to express our deep gratitude

First author: YANG Minggui, male, born in 1933, professor-level senior engineer, is mainly engaged in regional geological survey, mineral exploration, environmental geological survey and geological scientific research; Email: yangmei@cug.edu.cn

Corresponding author: WANG Yan, female, born in 1983, professor, doctor, is mainly engaged in metallogenetic regularity of strategic minerals and mapping research; Email: wangyan@mail.cgs.gov.cn

Manuscript received on: 2024-01-28; Accepted on: 2024-04-16; Published online on: 2024-04-20

Doi: 10.16509/j.georeview.2024.04.061

Edited by: LIU Zhiqiang