

doi: 10.19388/j.zgdzdc.2024.256

引用格式: 刘兴忠,秦锦华,王登红,等. 衡阳盆地及其周缘成矿特征与成矿规律[J]. 中国地质调查,2024,11(5): 78-91.
(Liu X Z, Qin J H, Wang D H, et al. Metallogenic characteristics and regularities of Hengyang Basin and its surrounding areas[J]. Geological Survey of China, 2024, 11(5): 78-91.)

衡阳盆地及其周缘成矿特征与成矿规律

刘兴忠¹, 秦锦华^{2*}, 王登红², 樊自春³, 杨晓飞³

(1. 新疆维吾尔自治区地质局巴音郭楞地质大队, 新疆 库尔勒 841000; 2. 自然资源部成矿作用与资源评价重点实验室, 中国地质科学院矿产资源研究所, 北京 100037; 3. 志存锂业集团有限公司, 江西 宜春 336000)

摘要: 衡阳盆地位于华南褶皱系赣湘桂粤褶皱带与江南台隆的交接部位, 发育多期、多类型的金属、非金属矿产。当前研究工作还缺乏对区域成矿规律的系统性总结, 阻碍了成矿理论的构建和找矿预测。总结分析了衡阳盆地及其周缘的成岩成矿作用、时空展布等特征, 结果表明: 衡阳盆地自古生代以来发育有多期次岩浆活动及成矿作用, 其中以印支期和燕山期为主; 盆地内的矿产大多与岩浆作用关系密切, 且矿化类型从高温到低温均存在; 岩体和矿床的空间分布与深大断裂紧密相关, 各矿床均发育不同类型的垂向分带; 盆地自北西向东南方向发育有3个不同类型的矿化组合带, 表现出成矿温度逐渐升高的趋势; “衡阳式”盆岭构造格架可能受制于华南地区多期次岩石圈伸展背景下的地幔柱活动; 成岩成矿作用经历了岩石圈不同位置的部分熔融、分离结晶、深部富矿流体上涌及围岩萃取等多种作用的叠加。研究成果可为华南地区中生代—新生代盆地成矿规律研究和找矿预测工作提供思路。

关键词: 衡阳盆地; 岩浆作用; 成矿作用; 岩石圈伸展

中图分类号: P618.42

文献标志码: A

文章编号: 2095-8706(2024)05-0078-14

0 引言

衡阳盆地是华南地区钦—杭钨—锡—铜—铅—锌—金—银—铌—钽—铀成矿带西南侧的重要组成部分^[1-5], 是白垩纪—新近纪发展起来的陆相沉积红盆。盆地内部及其周缘分布的矿产类型丰富多样, 产出重要矿产地数十个, 除少数矿床达到中—大型外, 其余矿床均为中—小型^[6-8]。衡阳盆地主要金属矿产大多与岩浆作用有关, 沉积—沉积改造型矿床虽有分布, 但规模一般较小。矿床产出矿种多以组合形式存在, 共伴生类型较多。衡阳盆地的矿床类型也十分丰富, 包括中—高温岩浆热液型钨、锡、长石矿床, 中—低温热液型铅、锌、银、金(萤石、重晶石)矿床, 风化壳型铁、金矿床、高岭土矿床(瓷土矿床), 沉积—沉积改造型铜(铀)矿床, 蒸发沉积

型盐矿床^[7-9]。盆地成矿具有成矿时代跨度大、“多峰期”成矿叠加、以印支期成矿为主的显著特征, 可作为华南地区印支期成矿作用研究的补充^[9]。

尽管前人针对研究区的成岩成矿作用开展了较多研究, 但对大多数矿床的成矿特征和成矿规律还缺乏系统性总结。本文重点对衡阳盆地的成矿特征、岩浆作用与成矿作用的时空分布规律、成矿动力学背景进行研究和探讨, 可为阐明区域成矿规律提供理论依据。

1 区域地质概况

衡阳盆地位于海西、印支凹陷区内华南褶皱系赣湘桂粤褶皱带与江南台隆的交接部位(图1(a))^[10-12]。盆地横跨湘中—桂中北(凹陷)锡—铅—锌—钨—铁—铜—铋—汞—锰成矿带(Ⅲ—

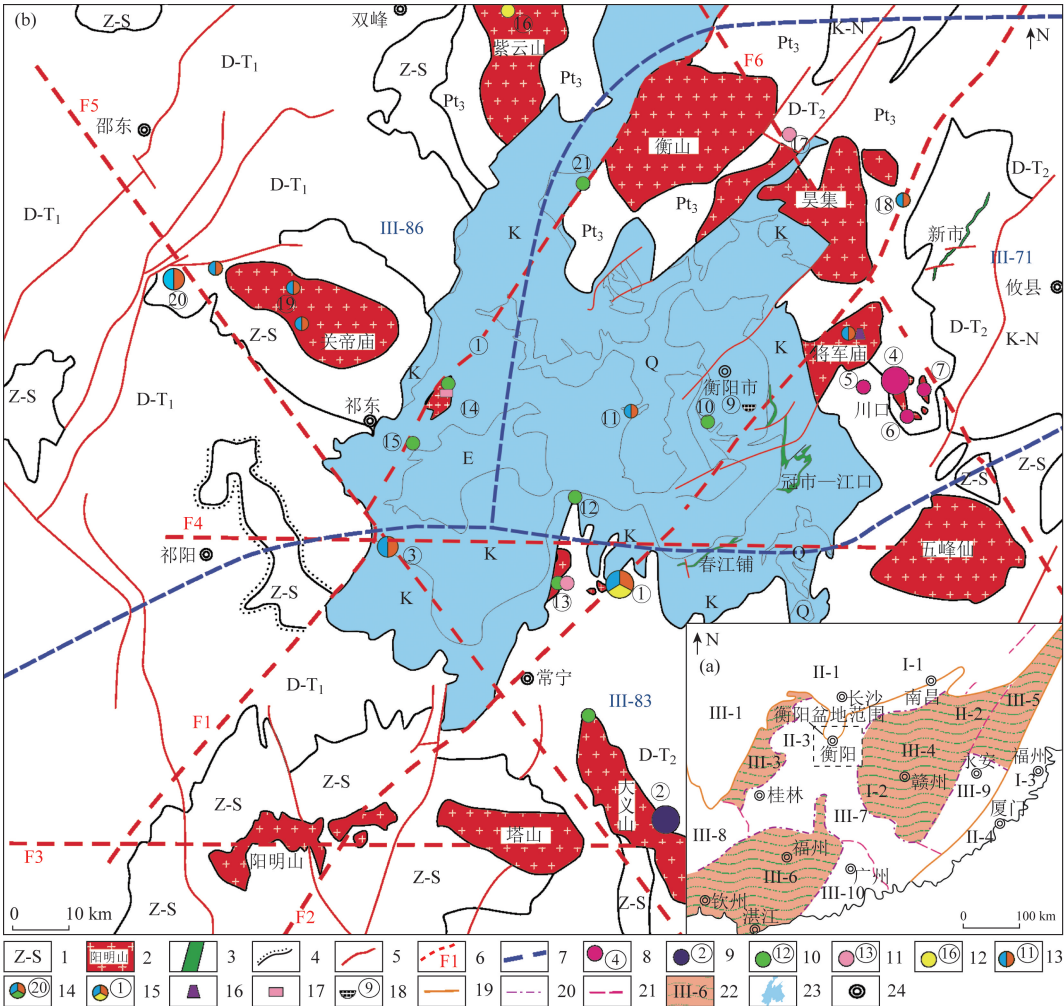
收稿日期: 2024-07-12; 修订日期: 2024-09-09。

基金项目: 中国地质调查局“中国矿产地质志项目(编号: DD20221695、DD20190379)”资助。

第一作者简介: 刘兴忠(1983—), 男, 高级工程师, 主要从事矿产勘查和开发方面的研究工作。Email: 290688457@qq.com。

通信作者简介: 秦锦华(1992—), 男, 副研究员, 主要从事多金属矿产和区域成矿规律的研究工作。Email: qjh1992@qq.com。

86)、南岭地区钨-锡-铋-钼-铅-锌-金-稀土成矿带(Ⅲ-83)和武功山-杭州湾铜-铅-锌-银-金-钨-锡-铋-钼-锰-海泡石-萤石-硅灰石成矿带(Ⅲ-71)^[10-12](图1(b))。



1. 地层; 2. 花岗岩体及名称; 3. 玄武岩; 4. 不整合界线; 5. 断裂; 6. 深大断裂及编号; 7. 成矿带界线; 8. 钨矿及编号; 9. 锡矿及编号; 10. 铜矿及编号; 11. 轴矿及编号; 12. 金矿及编号; 13. 铅锌矿及编号; 14. 铜铅锌矿及编号; 15. 铅锌金矿及编号; 16. 萤石矿; 17. 重晶石矿; 18. 芒硝矿及编号; 19. 一级构造单元界线; 20. 二级构造单元界线; 21. 三级构造单元界线; 22. 隆起区及编号; 23. 衡阳盆地; 24. 地名; I-1. 扬子准地台; I-2. 南华准地台; I-3. 东南沿海褶皱系; II-1. 江南台隆; II-2. 加里东后隆起区; II-3. 海西-印支拗陷区; II-4. 闽粤火山断陷区; III-1. 桂北基地; III-3. 湘西-桂东北隆起; III-4. 赣南隆起区; III-5. 闽西北隆起区; III-6. 云开隆起区; III-7. 云开拗陷区; III-8. 丹-池拗陷区; III-9. 闽西南拗陷区; III-10. 粤东南拗陷区; III-86. 湘中-桂中北(凹陷)锡-铅-锌-钨-铁-铜-铋-汞-锰成矿带; III-83. 南岭地区钨-锡-铋-钼-铅-锌-金-稀土成矿带; III-71. 武功山-杭州湾铜-铅-锌-银-金-钨-锡-铋-钼-锰-海泡石-萤石-硅灰石成矿带; Q. 第四系; E. 古近系及新近系; K. 白垩系; D-T₂. 泥盆系—上三叠统; Z-S. 震旦系—志留系; Pt₁. 新元古界; F1. 株洲—双牌深大断裂; F2. 醴陵—宁远基底断裂; F3. 阳明山—大义山断裂; F4. 祁阳—水口山断裂; F5. 邵阳—郴州基底断裂; F6. 常德—安仁转换断裂; ①水口山; ②大义山; ③留书塘; ④杨林坳; ⑤毛湾; ⑥三角潭; ⑦塘江沅; ⑧将军庙; ⑨茶山坳; ⑩车江; ⑪洪山庙; ⑫金鸡岭; ⑬柏坊; ⑭谭子山; ⑮白鹤铺; ⑯包金山—金坑冲; ⑰汪冲; ⑱东岗山; ⑲石桥铺; ⑳清水塘; ㉑盐田桥

图1 华南地区大地构造简图(a)与衡阳盆地及其周缘地质简图(b)(据文献[12]修改)

Fig.1 Geotectonic sketch of South China(a) and geological sketch of Hengyang Basin and its surrounding areas (b)(modified after reference[12])

衡阳盆地及其周缘从元古界到新生界均有出露, 缺失中元古界冷家溪群、板溪群及志留系。盆地内部出露的地层为白垩纪—新生代沉积的红色碎屑岩。衡阳盆地各时代地层的成矿元素含量差异较大,但仍表现出一定的分布规律。其中,新元古界(板溪群五强溪组)和寒武系具有较高的W、Sn含量,可能为初始

含钨建造。古生界从早到晚可以识别出 3 期成矿元素富集: ①志留纪—泥盆纪的 Cu、Pb、Zn 富集; ②早石炭世的 Pb、Zn 富集; ③晚石炭世的 Cu、Zn 富集。此外,二叠纪晚期有轻微的 Pb、Zn 富集趋势。因此,元古界和寒武系可以作为成矿元素 W、Sn 的来源,志留系—泥盆系可以提供一定的成矿元素 Cu、Pb、Zn,下石炭统可以提供一定的成矿元素 Pb、Zn,上石炭统可以提供一定的成矿元素 Cu、Zn^[12-13]。

衡阳盆地存在多期次的构造作用,印支运动和燕山运动的作用在研究区表现的最为强烈。研究区断裂以 NE 向、NW 向和 EW 向为主,其中 NW 向断裂包括常德—安仁转换断裂、邵阳—郴州基底断裂; NE 向断裂包括株洲—双牌深大断裂和醴陵—宁远基底断裂; EW 向断裂包括阳明山—大义山断裂和祁阳—水口山断裂(图 1(b))。NE 向与 NW 向断裂互相交切,形成典型的棋盘状构造格局^[14]。在衡阳盆地西侧,以祁阳为中心,各时代地层形成的褶皱向西尖凸,并与周围断裂和推覆体在西侧呈“山”字形(半圆形)分布,与盆地东侧、东南侧发育的冠市—江口及春江铺玄武岩构成典型的环形构造“衡阳环”^[15]。

衡阳盆地内为一个圈闭良好的重力高异常,沿盆地中心向周缘过渡,重力负异常值逐渐升高,重力值逐渐减小,并有多重力负异常圈闭,指示周缘存在广泛分布的酸性岩浆岩^[16]。根据区域地质

资料,岩浆侵入时代由早至晚主要有海西期、印支期和燕山期。印支期岩浆岩广泛分布于衡阳盆地内部及其周缘,形成规模不一的中基性—中酸性花岗质复式岩基。燕山期是另一个重要的岩浆活动期,岩浆侵位特征与印支期花岗岩具有相似性,大部分为印支期复式岩基的中央相,少量则以岩脉、岩枝或独立岩体产出,燕山中晚期则出现基性岩脉及喷出岩。

本文收集整理了衡阳盆地自印支期以来的 120 余件岩浆岩样品中的 W、Sn、Bi、Cu、Pb、Zn、U 的地球化学测试数据^[12,17-29],不同年龄岩体的致矿元素丰度见图 2。其中,W 的浓集期分别为 230~227 Ma、218.2~215 Ma 及 163~135 Ma,较地壳平均值富集 10~60 倍,较华南地区燕山期花岗岩平均值富集 2~6 倍。Cu 有两个浓集期: 230~227 Ma 和 163 Ma,较华南地区燕山期花岗岩平均值富集 30~50 倍,燕山晚期的冠市—江口及春江铺玄武岩中也存在 Cu 元素的轻微富集^[12]。Sn 的主要浓集期为 230~227 Ma、221~217 Ma 和 200~143 Ma,与华南地区燕山期花岗岩平均值相比富集程度不高。Mo 和 Bi 的浓集期主要为 230~227 Ma(川口岩体)和 163 Ma(大义山岩体)。Pb 在衡阳盆地各时代的岩石中均有富集,在 218~215 Ma 和 149~135 Ma 富集程度稍强,较华南地区燕山期花岗岩平均值富集 2~4 倍。Zn 的主要浓集期为 163~149 Ma,富集超过地壳平均值约 4 倍。U 富集的主要浓集期为 230~227 Ma。

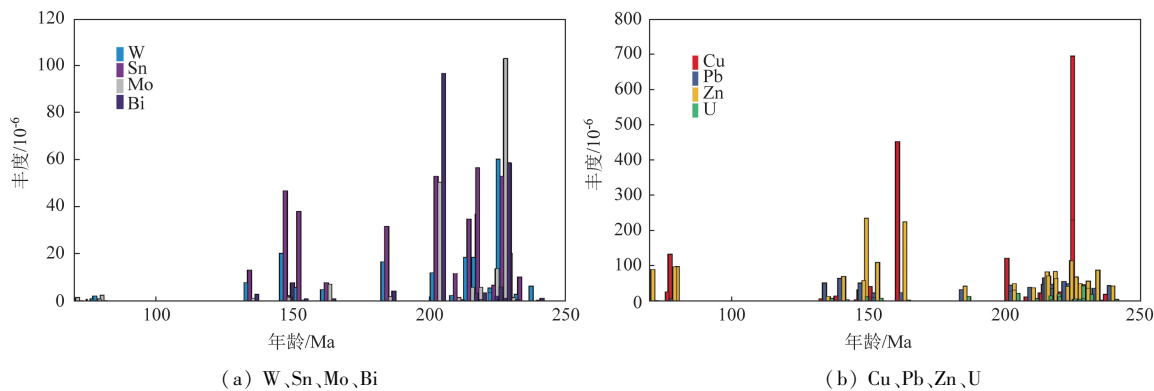


图 2 衡阳盆地不同年龄岩体致矿元素丰度

Fig. 2 Mineralizing element abundance of the rock bodies in different ages of Hengyang Basin

2 成岩成矿时空分布规律

2.1 成岩成矿时间

衡阳盆地及其周缘自海西期以来均有岩浆作用发育。海西期岩浆作用的产物零星发育于盆地的南端和西侧,包括大义山岩体(278 Ma)和吴集岩

体^[19]。印支期和燕山中晚期是衡阳盆地两个主要的岩浆活动峰期^[19-32];印支期岩浆活动时间范围为 239~203 Ma,其峰期为 230~210 Ma;燕山期岩浆活动时间范围为 173~71 Ma,其峰期为 160~130 Ma。200~180 Ma 期间岩浆作用几乎不发育(表 1,图 3)。与岩浆作用有关的成岩时代与成矿时代相对应,印支期矿化持续时间范围为

表 1 衡阳盆地及其周缘岩浆岩信息

Tab.1 Information of the magmatic rocks in Hengyang Basin and its surrounding areas

岩体名称	岩性	成岩时代/Ma	相关主要矿床
白莲寺岩体	花岗岩、花岗斑岩	190	东岗山铅锌(钨)矿、杨梅岭钨矿
将军庙岩体 ^[18]	黑云母花岗岩	260 ~ 210	双江口萤石矿
紫云山岩体 ^[22,30]	斑状石英二长岩	225.2 ± 1.7; 225.6 ± 1.4	包金山—金坑冲金矿
	花岗闪长岩	222.5 ± 1	
	二云母花岗岩	227.0 ± 2.2; 222.3 ± 1.8	
阳明山复式岩体 ^[23-24,31]	黑云母二长花岗岩	228.6 ± 1.4; 205 ± 1.8; 213.7 ± 1.0	—
	二云母二长花岗岩	229.0 ± 2.0; 221.8 ± 1.3; 218.0 ± 10.0	—
	电气石白云母二长花岗岩	218.2 ± 2.0; 218.9 ± 3.4	—
	黑云母正长花岗岩	217.8 ± 1.6	—
塔山岩体 ^[24-25,32]	粗粒斑状电气石二长花岗岩	218 ± 3	—
	中细粒电气石黑云母二长花岗岩	215 ± 3; 247 ± 5.9	—
水口山岩体 ^[26-27,33-34]	花岗闪长岩	158 ± 1 ~ 153.0 ± 0.9; 163 ± 2	水口山铅锌金多金属矿、康家湾铅锌矿、柏坊铜铀矿
	隐爆角砾岩	150.3 ± 2.2	
关帝庙岩体 ^[35-38]	黑云母花岗岩	240 ~ 220	石桥铺铅锌矿、潭子山重晶石(铜)矿
	二云母花岗岩	约 200	
	花岗斑岩、煌斑岩、细粒花岗岩	153	
五峰仙岩体 ^[39]	黑云母二长花岗岩	233.5 ± 2.5	—
	二云母花岗岩	221.6 ± 1.5	—
川口岩体 ^[40-41]	二云母二长花岗岩	230 ~ 210	川口钨矿(包括三角潭、杨林坳、毛湾及塘江沅钨矿)
南岳岩体 ^[29]	细中粒状角闪石黑云母二长花岗岩	215.5 ± 1.5	盐田桥铜(钨)矿、马迹长石矿
	二云母二长花岗岩(白石峰岩体)	140.6 ± 0.8	
丫江桥岩体 ^[42]	黑云母二长花岗岩	225.0 ~ 17.7	—
	二云母二长花岗岩	210.5 ~ 207.3	—
歇马岩体 ^[42]	花岗岩	214 ± 5.9	—
大义山岩体 ^[19,32,43,44]	黑云母正长花岗岩	278 ~ 210	大义山锡矿、拖碧塘铀矿
	二云母二长花岗岩、二云母正长花岗岩	185 ~ 156	
	斑状二云母二长花岗岩、(电气石)正长花岗岩	148 ~ 128	
周家岭 ^[21]	黑云母花岗岩	203 ± 1.4	清水塘铅锌矿
冠市街 ^[12,45]	玄武岩	81 ~ 76	—
新市 ^[29]	玄武岩	132.7	—
春江铺 ^[46]	玄武岩	92	—
关帝庙 ^[37]	煌斑岩	153	—
锡矿山 ^[47]	煌斑岩	120	锡矿山锑矿

注：“—”为无资料。

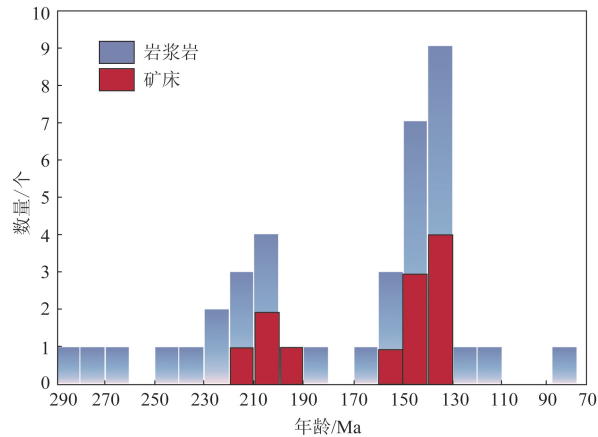


图 3 衡阳盆地成岩成矿年龄

Fig.3 Diagenesis and metallogenic ages in Hengyang Basin

230 ~ 203 Ma,其中铅、锌、金、萤石矿的成矿时间为 227 ~ 203 Ma^[18,21-22],钨矿化时间为 230 ~ 224 Ma,略早于铅、锌、金的矿化时间^[40]。燕山期铅、锌、金、银矿化时间为 160 ~ 150 Ma^[26-27,33],而燕山期锡矿化时间约为 156 Ma^[32,42],与铅、锌、金、银近于同时形成。岩浆作用的峰期与成矿作用的峰期基本一致,两者之间具有紧密的时间相关性(表 1,图 3)。

2.2 控矿构造和矿床空间

衡阳盆地以发育多组性质复杂的构造作用为特征,区域 NE 向、NNE 向、NW 向、NNW 向断裂互相交切,形成典型的棋盘格式构造。在盆地东侧和北侧,大量古生界形成的弧形褶皱与东侧

裂隙构成了典型的环形构造。控矿构造具有以下特征:①不同方向的构造及构造交汇部位是成岩成矿的有利空间,同时也控制了矿体的形成和展布,特别是对于一些岩体型矿床来说,岩体展布控制了矿床的形态,如石桥铺铅锌矿的矿体展布主要受控于 NNE 向的一系列新华夏系次级断裂^[48];②环形构造、皱褶的转折端和不同褶皱之间的复合部位也是良好的储矿空间,水口山大型铅锌金多金属矿中的铅锌矿体便产于老鸦巢倒转背斜和康家湾倒转背斜之间的复合部位^[33-34];③部分矿床受制于接触面类型,特别是不整合面对热液交代-充填型矿床的形态有明显的制约作用^[34,49],如川口岩体内部的杨林坳钨矿在成矿过程中,成矿热液沿着 NNE 向的构造带和不整合面消弱带运移,使得矿化富集在杨林坳组底部不整合面上下数十米的范围内^[50-51];④沉积型矿床和部分岩体型矿床的展布受控于致矿地质体的产状,如砂岩型矿床受控于特定层位,有显著的层控特征。岩体型矿床以蚀变花岗岩型钨、锡矿床为代表,往往分布于岩体的顶部,受到云英岩化带范围的控制,较小的含矿体往往存在于岩体内部^[43]。

2.2.1 矿床空间分带

根据衡阳盆地各类矿产的空间分布,可大致划分出 3 个矿化组合带。

第一矿化组合带为铅-锌-银-金-萤石-重晶石成矿带。按顺时针方向,发育的主要矿床包括水口山铅锌金多金属矿、留书塘铅锌矿、清水塘铅锌矿及石桥铺铅锌矿、包金山-金坑冲金矿、黑石坨铅锌矿、东岗山铅锌(钨)矿、双江口萤石(铅锌)矿。此外,还包括一些小的铅锌矿点。

第二矿化组合带位于衡阳盆地的内部,为铜-铅-锌-铀-重晶石-盐类-长石(高岭土)成矿带。按照矿产的成因类型可分为两种:与岩浆作用有关的矿床,包括谭子山重晶石(铜)矿、盐田桥铜(钨)矿、马迹长石矿(高岭土矿)、太山庙铅锌矿、冠市-江口及春江铺玄武岩石材矿等;沉积-沉积改造型的矿床,包括柏坊铜(铀)矿、车江铜矿、麻阳铜矿、茶山坳盐矿(石盐、钙芒硝矿等)。

第三矿化组合带位于衡阳盆地的东部和东南部地区,为钨-锡-铌-钽成矿带。分布的矿床包括川口钨矿、大义山锡矿以及外带的耒阳上堡铌钽矿床。

2.2.2 矿床与岩浆岩的空间分布关系

除沉积型和部分风化矿床与岩体无关外,衡阳盆地内部及其周缘发育的矿床分布均与岩浆作用的关系十分密切。根据矿体产出特征,可将衡阳盆地岩体与矿体的空间关系总结为 4 种:①矿体直接产于岩体的内部,包括蚀变岩体型的钨锡矿,如川口岩体和大义山岩体中发育的岩体型锡矿;②矿体产于岩体内部破碎带或围岩内的脉体中,如川口钨矿、大义山锡矿、石桥铺铅锌矿、将军庙萤石(铅锌)矿^[18,48-51];③矿体产于岩浆岩与灰岩、泥灰岩等地层的接触带上,主要的矿化为矽卡岩型矿化,如水口山铅锌金多金属矿^[36];④矿体的产出不与岩体直接接触,而是分布于中高温矿床的外带,有的甚至远离致矿岩体,赋矿空间主要为各时代地层形成的硅钙界面,这类矿床在盆地内的分布最为广泛,如康家湾铅锌银金矿、留书塘铅锌矿、盐田桥铜(钨)矿、谭子山重晶石(铜)矿等^[49,52-54]。

2.2.3 岩体、矿床分布与深大断裂的关系

衡阳盆地发育多条基底断裂,断裂走向沿着 NE 向、NW 向和 EW 向展布,在盆地南部耒阳至临武一线分布着近 SN 向的断裂。沿着断裂以及不同断裂的交汇点,岩浆作用和矿化作用均频繁活动^[9](图 1)。沿着 NW 向断裂发育关帝庙岩体和大义山岩体,岩体走向均为 NW-SE 向。沿着 NE 向的株洲-双牌深大断裂分布着衡山岩体和关帝庙岩体,沿着 NW 向的常德-安仁深大断裂分布着五峰仙岩体、将军庙岩体和川口岩体,沿着 EW 向的羊角塘-五峰仙基底断裂分布着水口山岩体,沿着阳明山-大义山基底断裂带分布着阳明山岩体和塔山岩体,在 NW 向断裂和 EW 向断裂的交汇处分布着羊角塘隐伏岩体。同时,深大断裂也是矿化集中发育地区。沿着 NE 向断裂分布着一系列铜、铅锌、重晶石矿床(点)。沿着 NW 向断裂分布的矿床包括石桥铺铅锌矿、留书塘铅锌矿、清水塘铅锌矿和大义山锡矿。深大断裂的交汇位置往往能形成规模较大的矿床,如水口山铅锌金多金属矿、留书塘铅锌矿和杨林坳钨矿等^[9]。

2.2.4 盆地矿床矿化的垂向分带

在衡阳盆地中西部的谭子山重晶石(铜)矿中,NE 向断裂的上盘发育纯度较高的厚层重晶石矿体,重晶石间隙和内部裂隙中常可见铜矿物的次生氧化物(孔雀石),断层的下盘发育铜矿化。盆地东

北部的盐田桥铜(钨)矿同样沿着 NE 向的株洲—双牌深大断裂展布,断层上盘发育重晶石矿带,伴生有少量的铅锌矿,沿着断裂带向下分布着铜矿化带,铜矿化带的下部出现钨矿化。该矿化分带并不是传统意义上的垂向分带,而是沿着断裂的斜向分带(图4)。盆地南部水口山铅锌金多金属矿内的多金属矿化类型自西向东以及由深到浅呈现出矽卡岩型→中低温热液交代充填型→风化壳型的水平和垂向分带特征,成矿元素组合则相应呈现出 Fe、Cu、Pb、Zn—Pb、Zn、Au、Ag、U—Pb、Zn、Au (Ag)—Au 的递变趋势。盆地西南部的留书塘铅锌矿的矿体自上而下分为重晶石带、重晶石(铅锌)带及铅锌矿带,矿物组合类型变化为重晶石—重晶石+方铅矿+闪锌矿—方铅矿+闪锌矿—黝铜矿—黄铜矿。吴志华等^[49]认为沿着长平深断裂,矿床铅锌矿化带的下部应该存在钨、锡、铜的矿化带。盆地东部川口钨矿的赋矿岩体内部为 W—Mo—Bi 的高温组合,下部为 Zn—Cu—Pb—S 的低温组合^[55]。

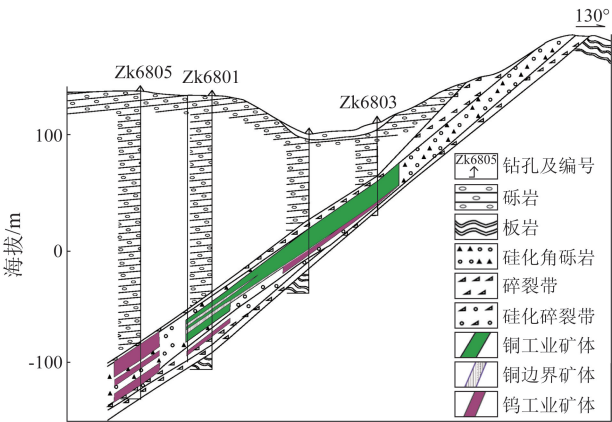


图4 盐田桥矿区矿体剖面(据文献[53]修改)
Fig.4 Section of Yantianqiao ore deposit (modified after reference [53])

3 成矿物质来源

3.1 铅锌矿

S 同位素证据显示:除水口山铅锌金多金属矿外,留书塘、清水塘和谭子山矿床均发育重晶石矿体,且重晶石的 $\delta^{34}\text{S}$ 值均为正值(11.49‰~24.4‰),与全球蒸发岩的 $\delta^{34}\text{S}$ 值(15‰~35‰)以及盆地内地层的 $\delta^{34}\text{S}$ 值相似。由于这些矿床的赋矿围岩均与盆地内地层关系密切,指示地层的硫酸盐对成矿有显著的贡献(图5)。盆地内部的清水

塘铅锌矿、留书塘铅锌矿和水口山铅锌金多金属矿均存在负的 $\delta^{34}\text{S}$ 值,且具有较大的极差值,说明在成矿过程中的成矿体系相对开放,且同时存在多个来源的 S 同位素的混合。轻 S 源区特征负值有可能指示了生物成因,代表存在地层中有机质的混入(由细菌还原作用所致)。各矿床的重硫 $\delta^{34}\text{S}$ 值分布于 0‰附近,并呈现出塔式分布效应,与华南地区其他岩浆来源矿床的 S 同位素一致,表明其为岩浆来源。

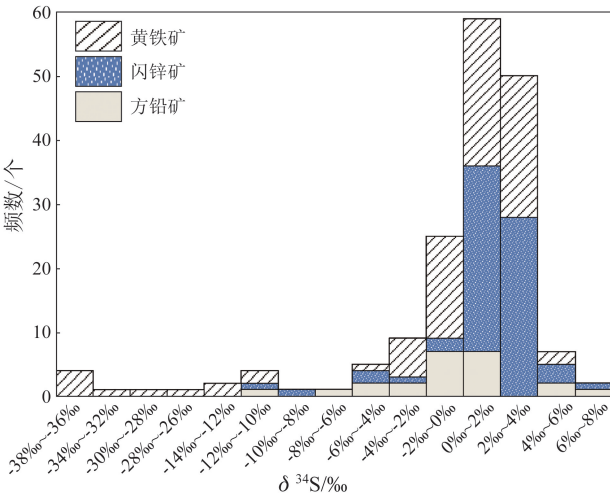


图5 衡阳盆地铅锌矿床 S 同位素分布
(S 同位素资料来源于文献[36,52,56-58])
Fig.5 Histogram of S isotope for Pb-Zn deposit in Hengyang Basin (S isotope data from references [36, 52, 56-58])

3.2 铅锌银金矿

$^{206}\text{Pb}/^{204}\text{Pb} - ^{207}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$ 图解(图6(a))显示:衡阳盆地铅锌矿的 Pb 同位素组分较为复杂,水口山铅锌金多金属矿的 Pb 同位素分布范围跨度较大,说明 Pb 具有多种来源;印支期清水塘铅锌矿的 Pb 同位素数据分布于地幔趋势线和上地壳趋势线之间,指示 Pb 来源于地幔与上地壳的混合;石桥铺铅锌矿的 Pb 同位素分布于上地壳趋势线附近,代表了上地壳源区;燕山期留书塘铅锌矿的 Pb 同位素分布于上地壳趋势线附近,同样也指示 Pb 为上地壳来源。在 $^{206}\text{Pb}/^{204}\text{Pb} - ^{208}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$ 图解(图6(b))上,除留书塘铅锌矿分布于造山带趋势线和上地壳趋势线之间外,其余铅锌矿床均分布于造山带趋势线与下地壳趋势线之间,表明留书塘铅锌矿的 Pb 来源于造山带和上地壳,而其他铅锌矿的 Pb 则来自于下地壳和造山带^[59]。

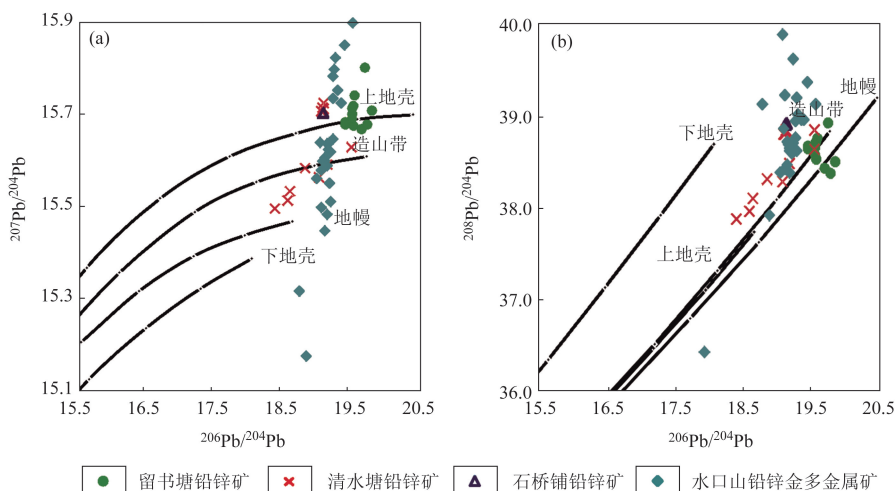


图6 衡阳盆地铅锌矿床 $^{206}\text{Pb}/^{204}\text{Pb} - ^{207}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$ 图解^[60] (a) 和 $^{206}\text{Pb}/^{204}\text{Pb} - ^{208}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$ 图解 (b) (Pb 同位素数据来自文献[52,56-58])

Fig.6 $^{206}\text{Pb}/^{204}\text{Pb} - ^{207}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$ diagram^[60] (a) and $^{206}\text{Pb}/^{204}\text{Pb} - ^{208}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$ diagram (b) of Pb-Zn deposit in Hengyang Basin (Pb isotope data from reference [52, 56-58])

3.3 钨锡矿

衡阳盆地的钨锡矿主要为川口钨矿和大义山锡矿。与成矿作用密切相关的二云母二长花岗岩为典型的S型花岗岩,来源于壳源物质的重熔^[42,60]。大义山锡矿的成矿岩石为二云母二长花岗岩,来源于壳幔混合。含锡石英脉流体包裹体的Rb-Sr同位素示踪结果显示:Rb-Sr等时线的截距为 0.70679 ± 0.00366 ,蚀变花岗岩型锡矿石 δD 值为 -79‰ , $\delta^{18}\text{O}_{\text{H}_2\text{O}}$ 值为 6.64‰ ;云英岩脉型锡矿石 δD 值为 $-58\text{‰} \sim -54\text{‰}$, $\delta^{18}\text{O}_{\text{H}_2\text{O}}$ 值为 $4.14\text{‰} \sim 7.64\text{‰}$ ^[61]。成矿流体中水的H、O同位素组成远离大气降水线而位于岩浆水范围内,证实了大义山锡矿的成矿来源为岩浆来源,流体来源于壳幔混合。曾志方^[61]获得的大义山锡矿的 $\delta^{34}\text{S}$ 值为可分为蚀变花岗岩型($0.3\text{‰} \sim 2.8\text{‰}$,平均值为 1.7‰)和云英岩型($-2.8\text{‰} \sim 0.7\text{‰}$),指示该矿区的成矿物质为岩浆来源。衡阳盆地印支期钨矿的成矿物质来源为地壳重熔产生的岩浆,而燕山期锡矿的成矿物质来源(矿源+流体来源)为壳幔混合成因的岩浆。

4 成岩成矿动力学背景

4.1 区域构造演化与成矿

4.1.1 成盆前矿化预富集和含矿(钨)建造的形成
自新元古代晚期以来,四堡运动使得扬子克拉通与华南褶皱造山带自西南端以“剪式”完成闭

合^[62-63]。随后华南褶皱造山带及扬子克拉通周缘地区发生多期板内裂解,区域内发生广泛的地幔柱活动,形成了华夏块体东南缘的镁铁-超镁铁岩、双峰式岩墙群和裂谷盆地^[63-66]。受早古生代构造应力和板块间的碰撞-拼贴作用的影响,华夏区发生了强烈的褶皱隆升与变质作用^[60]。衡阳盆地出露的最古老地层为新元古界,显著富集W、Sn和Cu,贫化Pb、Zn。古生代的含矿建造具有Pb、Zn、Cu的显著富集,为衡阳盆地中生代以来的复杂成矿类型提供了物质基础。

4.1.2 成盆期构造演化与成矿关系

中生代早期,东亚境内古特提斯洋的关闭导致华南地区发生强烈的构造-岩浆作用^[60,67]。中生代晚期,受制于古特提斯构造域与滨太平洋构造域的构造体制转换,构造线方向由EW向转为NE向^[67]。构造环境以多期次的挤压和伸展造山为特征,形成了广泛的火山-侵入杂岩群及华南盆岭构造^[68-69],并开始在华南褶皱造山带内陆区大面积发育大中型断陷盆地。衡阳盆地在印支期开始发育中生代坳陷盆地。从早到晚,盆地发育的沉积相变化为:河漫滩相的砂砾岩(东井组)→河流相—滨湖、半深湖相粉砂岩、砂岩、泥岩(神皇山组)→洪积(冲积扇)相厚层状砾岩夹粉砂岩和盐层→河流—滨湖相石英砂岩、粉砂岩、泥岩层^[11]。

衡阳盆地印支期的成矿时限为230~200 Ma,大

地构造背景处于华南板块与北侧华北地块及西南侧印支地块的后碰撞环境,由于构造体制开始发生转换,该区域发生的矿化作用相对局限。陆壳相对较低的熔融程度以及深部物质的加入在一定程度上制约了衡阳盆地该时期的多金属矿化强度。然而,该时期大量发育的黑云母二长花岗岩和二云母二长花岗岩普遍具有较高的U含量,并且体现出显著的铀成矿专属性,同时虽然该时期铀矿化并不发育(关帝庙岩体的铀矿化时代不确定),但花岗岩是主要的U来源^[70]。

燕山期,华南地区处于东亚大陆边缘。中—晚侏罗世期间,华南地区受制于俯冲板片发生了裂解和拆沉,从而诱发了软流圈物质的上涌,并发生广泛的陆壳重熔和壳幔混合。沿着NE向和NW向的深大断裂,区域上发育了大规模的陆壳重熔型岩浆活动。燕山晚期,地壳沿北西—南东方向发生进一步的拉张,该时期为第二阶段的盆地凹陷时期,NE—NNE向的正断层十分发育。晚白垩世,区域又发生SN向拉张,并控制了大量晚白垩世盆地的凹陷^[71]。伴随着华南地区燕山期多阶段的伸展活动,衡阳盆地发育了多期次的岩浆活动,并伴随锡、铅、锌、金、(硼)成矿以及少量的铋钼矿化。

燕山晚期—喜山期,衡阳盆地主要作为陆相盆地接受沉积。燕山晚期,衡阳盆地内部的冠市—江口、春江铺以及邻区的攸县—新市一带出现了层状玄武岩的侵位。一方面,幔源岩浆的侵位为成矿提供了足够的热量,诱发深部流体的循环,不断萃取早期形成的含矿建造中的成矿元素Cu、U、Au等,使元素活化迁移并在有利地段成矿,同时基性岩浆活动还能对环境进行改造,导致气温升高,加强蒸发作用,使大量盐类矿产发生沉淀;另一方面,幔源物质往往也能提供适量的成矿元素,这些成矿元素在镁铁质岩浆侵位的过程中不断受到流体的交代、萃取,在成矿有利地段卸载成矿。

4.2 “衡阳式”盆岭构造格局

Wernicke等^[72]最早对盆岭构造进行了系统研究和论述,并解析出与之对应的低角度正断层和变质核杂岩,Gilder等^[68]进一步提出了“华南盆岭构造”的概念,之后另外一些学者对华南盆岭构造进行了总结、描述和研究^[73-74]。衡阳盆地周缘和底部发育明显的晚古生代造山作用的构造形迹,盆地

的拉张作用晚于造山作用,并叠加于这些构造之上。盆地四周分布着大量的伸展山岭,包括大义山、紫云山、阳明山、塔山和衡山等。山岭与盆地呈低角度的正断层耦合(如界牌断裂)。在盆地东北部的衡山附近还分布有与伸展—拆离作用有关的变质核杂岩^[75],整体构成典型的“衡阳式”盆岭构造格架。

衡阳盆岭构造格架属于华南中生代—新生代盆岭构造的一部分,与北美西部科迪勒拉造山带内发育的盆岭构造具有相似的特征,其形成可能与地幔柱的上涌活动有关^[76-77]。王五力等^[78]根据对东北地区盆岭构造的研究,认为盆岭构造的形成与板块构造或冷板片俯冲引起的地幔柱或超级地幔柱活动有关。晚白垩世时期,衡阳盆地的区域伸展作用进一步加强,扩张裂谷的发育很可能诱发了深源软流圈岩浆(地幔柱)的底侵作用。同时,衡阳盆地的地球物理资料表现为幔隆和地壳减薄特征,盆地内部及其周缘发育大量幔源岩石(部分具有碱性玄武岩特征)以及地幔包体,环形构造发育,大量矿床显示出幔源流体的存在,且同一岩体发生多期次长期演化和持续侵位。这些证据与盆岭构造格局均指示了衡阳盆地的形成、演化与成矿可能与华南中生代地幔柱活动之间具有密切的成因联系^[79]。

4.3 成岩成矿背景

印支期—燕山期,华南地区整体构造格架以多期次的岩石圈伸展为特征。衡阳盆地印支期岩浆岩形成年龄为270~200 Ma,最主要的形成时间段为240~200 Ma,与整个华南地区花岗岩的时代分布一致,为后碰撞动力学背景下产出的岩石组合类型^[80]。该时期,地壳周期性的复杂运动致使地幔柱发生周期性活动,多期次的地幔柱活动诱发了地壳广泛的重熔,并发生深源岩浆的上涌,形成了大量复式岩体^[79-80]。地壳部分熔融程度随着多期次的地幔柱活动有明显的增强趋势。由早期的深部未风化成岩重熔形成准铝质—弱过铝质岩浆,随着熔融程度的加深,地壳浅部古老的沉积岩—变质沉积岩层也发生广泛的重熔,形成强过铝质岩浆。

伴随着伸展作用的继续发生,印支期熔融形成的岩浆沿着断裂上侵,形成多期次的岩浆房,并发生不同程度的分离结晶,形成早期岩体的内部相和中央相(补体),进而在同一复式岩体内和整个区域

上形成了成分上的分离结晶演化趋势。印支晚期—燕山早期,区域经历了短暂的岩浆活动沉寂期,燕山中—晚期再次发生强烈的伸展作用,地幔作用更加强烈。此外,区域伸展作用的进一步加强导致广泛的板内裂解作用,大量多向延伸的岩石圈深大断裂为深源的基性和超基性岩浆的快速上侵就位提供了足够空间,并在区域上出现典型地幔标志煌斑岩与玄武岩。

在多次地幔作用的背景下,来自深部的富矿流体(含 Pb、Zn、U、Ag、Au、W、Sn、Nb 和 Ta 等)向上运移。在地幔物质向上侵位的过程中不断加热地壳,重熔形成偏基性花岗闪长质岩浆。岩浆侵位过程中,富含 Pb、Zn、Cu、Au 等金属元素的成矿热液流体在充足的热量下引起部分元素(特别是矿源层中的 Pb、Zn)的活化、迁移,并在与 Cl、F、B 等元素形成络合物的同时继续沿着深大断裂向上运移。在成矿流体不断上升的过程中,还伴有大气降水的注入。随着成矿流体的温度和压力进一步降低,流体中的成矿物质在岩体顶部和围岩裂隙中沉淀成矿。元古代富含 W、Sn、U 等元素的变质基底发生部分熔融,使得矿质进入到熔体中。其次,在岩浆分离结晶作用的制约下,成矿元素发生进一步富集(图 7)。此外,在岩浆运移和侵位过程中,经过含矿围岩(元古宙—古生代含矿建造),萃取其中的含矿元素,并发生进一步富集。在岩体形成的晚期,一部分富矿流体聚集于岩体顶部,交代岩体并发

生蚀变(云英岩化),使其矿质发生卸载形成岩体型钨锡矿床,另一部分富矿流体沿着岩体和围岩裂隙形成石英脉型钨锡矿床。当富矿流体与富钙质岩石(灰岩和中基性岩)发生双交代作用,便会形成矽卡岩型矿床。

5 结 论

(1)衡阳盆地发育的矿床类型、矿化类型均十分丰富。时间上,盆地及其周缘发育多期次岩浆活动及成矿作用,时代跨度大,以印支期和燕山期为主,成矿类型发育较全,从高温到低温均存在;空间上,岩体和矿床的空间分布与深大断裂紧密相关,各矿床均发育不同类型的垂向分带现象。盆地自北西向东南方向发育 3 个不同类型的矿化组合带,表现出成矿温度逐渐升高的趋势。衡阳盆地多金属、非金属矿床中的 S 主要为岩浆来源,并有地层中有机质的贡献,而锌银金矿中 Pb 的来源主要为下地壳和造山带。

(2)衡阳盆地及其周缘的断裂及岩浆岩组合分布表现为典型的“衡阳式”盆岭构造格架。区域的成矿特征、岩浆岩组合、成岩演化和复杂的构造体系指示了该区域可能受制于华南地区多期次岩石圈伸展背景下的地幔柱活动。随着地幔柱的持续活动,岩石圈不同位置发生广泛的部分熔融和分离结晶作用,并在岩浆作用和演化的过程中,发生了深部富矿流体的上涌、富矿岩层的熔融、后期分离结晶过程中成矿元素的富集,以及围岩萃取等多种作用的叠加。

参考文献(References):

[1] Gilder S A, Gill J, Coe R S, et al. Isotopic and paleomagnetic constraints on the mesozoic tectonic evolution of South China[J]. Journal of Geophysical Research: Solid Earth, 1996, 101 (B7): 16137 - 16154.

[2] 毛景文,谢桂青,郭春丽,等. 南岭地区大规模钨锡多金属成矿作用:成矿时限及地球动力学背景[J]. 岩石学报, 2007, 23 (10): 2329 - 2338.

Mao J W, Xie G Q, Guo C L, et al. Large - scale tungsten - tin mineralization in the Nanling region, South China: metallogenetic ages and corresponding geodynamic processes[J]. Acta Petrologica Sinica, 2007, 23 (10): 2329 - 2338.

[3] 毛景文,陈懋弘,袁顺达,等. 华南地区钦杭成矿带地质特征和矿床时空分布规律[J]. 地质学报, 2011, 85 (5): 636 - 658.

Mao J W, Chen M H, Yuan S D, et al. Geological characteristics of

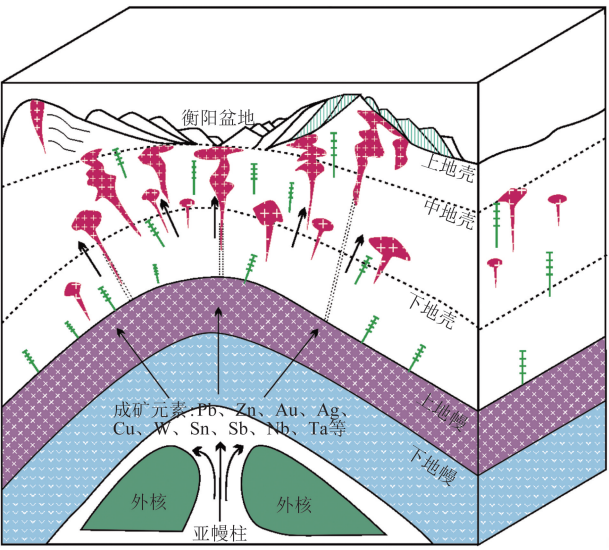


图 7 衡阳盆地成岩成矿动力学模式(据文献 [78, 81] 修改)
Fig.7 Dynamic model of diagenesis and mineralization of Hengyang Basin (modified after references [78, 81])

- the Qinhang (or Shihang) metallogenic belt in South China and spatial-temporal distribution regularity of mineral deposits[J]. *Acta Geologica Sinica*, 2011, 85(5): 636–658.
- [4] 杨明桂, 梅勇文. 钦—杭古板块结合带与成矿带的主要特征[J]. *华南地质与矿产*, 1997, 14(3): 52–59.
- Yang M G, Mei Y W. Characteristics of geology and Metatlization in the Qinzhou – Hangzhou Paleoplate juncture[J]. *Geology and Mineral Resources of South China*, 1997, 14(3): 52–59.
- [5] 杨明桂, 黄水保, 楼法生, 等. 中国东南陆区岩石圈结构与大规模成矿作用[J]. *中国地质*, 2009, 36(3): 528–543.
- Yang M G, Huang S B, Lou F S, et al. Lithospheric structure and large-scale metallogenic process in southeast China continental area[J]. *Geology in China*, 2009, 36(3): 528–543.
- [6] 龙国中, 王积廉. 衡阳盆地盐类矿床地质特征与矿床成因[J]. *湖南地质*, 1994, 13(1): 22–24.
- Long G Z, Wang J L. Geologic properties and origin of salt deposits in Hengyang basin[J]. *Hunan Geology*, 1994, 13(1): 22–24.
- [7] 李福顺. 钦杭成矿带衡阳盆地找矿方向及前景分析[J]. *华南地质与矿产*, 2012, 28(4): 360–368.
- Li F S. Analysis on prospecting direction and potential of Hengyang basin in Qinzhou – Hangcheng Metallogenic belt[J]. *Geology and Mineral Resources of South China*, 2012, 28(4): 360–368.
- [8] 李竹溢. 衡阳盆地 Cu – Pb – Zn 矿床成矿系列探讨[J]. *世界有色金属*, 2017, 42(9): 132, 134.
- Li Z Y. Discussion on Metallogenic series of Cu – Pb – Zn deposit in Hengyang basin[J]. *World Nonferrous Metals*, 2017, 42(9): 132, 134.
- [9] 秦锦华, 王登红, 陈毓川, 等. 试论湖南衡阳盆地与地幔柱的关系及其对关键矿产深部探测的意义[J]. *地质学报*, 2019, 93(6): 1501–1513.
- Qin J H, Wang D H, Chen Y C, et al. Discussion on the relationship between Hengyang basin and mantle plume and its implication for the deep prospecting of key minerals[J]. *Acta Geologica Sinica*, 2019, 93(6): 1501–1513.
- [10] 潘桂棠, 肖庆辉, 陆松年, 等. 中国大地构造单元划分[J]. *中国地质*, 2009, 36(1): 1–28.
- Pan G T, Xiao Q H, Lu S N, et al. Subdivision of tectonic units in China[J]. *Geology in China*, 2009, 36(1): 1–28.
- [11] 徐志刚, 陈毓川, 王登红, 等. 中国成矿区带划分方案[M]. 北京: 地质出版社, 2008: 59–70.
- Xu Z G, Chen Y C, Wang D H, et al. The Scheme of the Classification of the Minerogenetic Units in China[M]. Beijing: Geology Press, 2008: 59–70.
- [12] 孟立丰. 华南中生代构造深化特征——来自沉积盆地的研究证据[D]. 杭州: 浙江大学, 2012.
- Meng L F. Mesozoic Tectonic Evolution of the Southeast China Block: A Study from Mesozoic Basins[D]. Hangzhou: Zhejiang University, 2012.
- [13] 肖文舟, 匡文龙, 李雪宇, 等. 湖南衡阳清水塘矿区断裂构造控矿特征[J]. *地质学刊*, 2016, 40(1): 97–106.
- Xiao W Z, Kuang W L, Li X Y, et al. Ore-control characteristics of the fault structures in the Qingshitang ore district of Hengyang, Hunan Province[J]. *Journal of Geology*, 2016, 40(1): 97–106.
- [14] 梁新权, 郭定良. 湖南深部构造活化及其浅部响应[J]. *地质科学*, 2002, 37(3): 332–342.
- Liang X Q, Guo D L. Deep tectonic activation and its shallow response in Hunan province[J]. *Chinese Journal of Geology*, 2002, 37(3): 332–342.
- [15] 张用夏. 华南地区环形构造及其成因[J]. *地质论评*, 1984, 30(5): 437–445.
- Zhang Y X. Ring structures and their genetic mechanism in the South China region[J]. *Geological Review*, 1984, 30(5): 437–445.
- [16] 王敏, 王雨豪, 赵亚娟, 等. 衡阳盆地与周边重力异常的分析[J]. *国土资源导刊*, 2015, 12(4): 30–34, 39.
- Wang M, Wang Y H, Zhao Y J, et al. Analysis of gravity anomalies in Hengyang basin and its surrounding[J]. *Land & Resources Herald*, 2015, 12(4): 30–34, 39.
- [17] 柏道远, 周亮, 王先辉, 等. 湘东南燕山早期钨锡与铅锌多金属矿床组合形成的构造-岩浆动力学机制[J]. *地质学报*, 2007, 81(9): 1238–1247.
- Bai D Y, Zhou L, Wang X H, et al. Tectonic-magmatic mechanisms of the two types of early Yanshanian W – Sn polymetallic and Pb – Zn – polymetallic deposit assemblages in southeast Hunan[J]. *Acta Geologica Sinica*, 2007, 81(9): 1238–1247.
- [18] 涂登峰. 湖南双江口—将军庙萤石矿床矿物中包裹体研究[J]. *地球化学*, 1987, 16(3): 274–279.
- Tu D F. Studies of inclusions in fluorite from the Shuangjiangkuo – Jiangjunmiao fluorite ore deposit in Hunan province[J]. *Geochimica*, 1987, 16(3): 274–279.
- [19] 赵增霞, 徐兆文, 左昌虎, 等. 湖南桂阳大义山南体(太平山单元)花岗岩形成时代及物质来源探讨[J]. *地质论评*, 2017, 63(2): 395–412.
- Zhao Z X, Xu Z W, Zuo C H, et al. Emplacement time and material source of the southern Dayishan granitic batholith (Taipingshan body), Guiyang City, Hunan Province[J]. *Geological Review*, 2017, 63(2): 395–412.
- [20] Zhao Z X, Miao B H, Xu Z W, et al. 2017. Petrogenesis of two types of late Triassic granite from the Guandimiao complex, southern Hunan Province, China[J]. *Lithos*, 282–283: 403–419.
- [21] 缪柏虎, 左昌虎, 赵增霞, 等. 祁东县清水塘矿区周家岭花岗岩形成时代及物质来源[J]. *地质论评*, 2014, 60(3): 611–623.
- Miao B H, Zuo C H, Zhao Z X, et al. Forming age and material source of the Zhoujialing granite in Qingshitang orefield, Qidong County, Hunan Province[J]. *Geological Review*, 2014, 60(3): 611–623.
- [22] 鲁玉龙, 彭建堂, 阳杰华, 等. 湘中紫云山岩体的成因: 锆石 U – Pb 年代学、元素地球化学及 Hf – O 同位素制约[J]. *岩石学报*, 2017, 33(6): 1705–1728.

- Lu Y L, Peng J T, Yang J H, et al. Petrogenesis of the Ziyunshan pluton in central Hunan, South China: Constraints from zircon U - Pb dating, element geochemistry and Hf - O isotopes [J]. *Acta Petrologica Sinica*, 2017, 33(6): 1705 - 1728.
- [23] 陈卫锋, 陈培荣, 周新民, 等. 湖南阳明山岩体的 LA - ICP - MS 锆石 U - Pb 定年及成因研究[J]. *地质学报*, 2006, 80(7): 1065 - 1077.
- Chen W F, Chen P R, Zhou X M, et al. Single - zircon La - ICP - MS U - Pb dating of the Yangmingshan granitic pluton in Hunan, South China and its petrogenetic study [J]. *Acta Geologica Sinica*, 2006, 80(7): 1065 - 1077.
- [24] 马丽艳, 刘树生, 付建明, 等. 湖南塔山、阳明山花岗岩的岩石成因: 来自锆石 U - Pb 年龄、地球化学及 Sr - Nd 同位素证据[J]. *地质学报*, 2016, 90(2): 284 - 303.
- Ma L Y, Liu S S, Fu J M, et al. Petrogenesis of the Tashan - Yangmingshan granitic batholiths: Constraint from zircon U - Pb age, geochemistry and Sr - Nd isotopes [J]. *Acta Geologica Sinica*, 2016, 90(2): 284 - 303.
- [25] 郭爱民, 陈必河, 陈剑锋, 等. 湖南塔山花岗岩 SHRIMP 锆石 U - Pb 年龄及其地质意义[J]. *地质通报*, 2017, 36(2/3): 459 - 465.
- Guo A M, Chen B H, Chen J F, et al. SHRIMP zircon U - Pb age of Tashan granitic pluton from Hu'nan Province and its geological significance [J]. *Geological Bulletin of China*, 2017, 36(2/3): 459 - 465.
- [26] 黄金川, 彭建堂, 阳杰华, 等. 湖南水口山花岗岩闪长岩的地球化学特征及成因[J]. *地球化学*, 2015, 44(2): 131 - 144.
- Huang J C, Peng J T, Yang J H, et al. Geochemistry and genesis of the Shuikoushan granodiorite in Hunan, South China [J]. *Geochimica*, 2015, 44(2): 131 - 144.
- [27] 左昌虎, 路睿, 赵增霞, 等. 湖南常宁水口山 Pb - Zn 矿区花岗岩闪长岩元素地球化学, LA - ICP - MS 锆石 U - Pb 年龄和 Hf 同位素特征[J]. *地质论评*, 2014, 60(4): 811 - 823.
- Zuo C H, Lu R, Zhao Z X, et al. Characterization of element geochemistry, LA - ICP - MS zircon U - Pb age, and Hf isotope of Granodiorite in the Shuikoushan deposit, Changning, Hunan Province [J]. *Geological Review*, 2014, 60(4): 811 - 823.
- [28] 马铁球, 李彬, 陈焰明, 等. 湖南南岳岩体 LA - ICP - MS 锆石 U - Pb 年龄及其地球化学特征[J]. *中国地质*, 2013, 40(6): 1712 - 1724.
- Ma T Q, Li B, Chen Y M, et al. LA - ICP - MS zircon U - Pb age and geochemical characteristics of Nanyue granites in Hunan Province [J]. *Geology in China*, 2013, 40(6): 1712 - 1724.
- [29] 马铁球, 闫全人, 陈辉明, 等. 湖南攸县新市玄武岩锆石 LA - ICP - MS U - Pb 定年及其地球化学特征[J]. *华南地质与矿产*, 2012, 28(4): 340 - 349.
- Ma T Q, Yan Q R, Chen H M, et al. The zircon LA - ICP - MS U - Pb ages and geochemistry features of basalt at Xinshi, Youxian, Hunan Province [J]. *Geology and Mineral Resources of South China*, 2012, 28(4): 340 - 349.
- [30] 刘凯, 毛建仁, 赵希林, 等. 湖南紫云山岩体的地质地球化学特征及其成因意义[J]. *地质学报*, 2014, 88(2): 208 - 227.
- Liu K, Mao J R, Zhao X L, et al. Geological and geochemical characteristics and genetic significance of the Ziyunshan pluton in Hunan Province [J]. *Acta Geologica Sinica*, 2014, 88(2): 208 - 227.
- [31] 刘伟, 曾佐勋, 陈德立, 等. 湖南阳明山复式花岗岩的岩石成因: 锆石 U - Pb 年代学、地球化学及 Hf 同位素约束[J]. *岩石学报*, 2014, 30(5): 1485 - 1504.
- Liu W, Zeng Z X, Chen D L, et al. Petrogenesis of the Yangmingshan composite granites in South Hunan Province: Constraints from geochemistry, zircon U - Pb geochronology and Hf isotope [J]. *Acta Petrologica Sinica*, 2014, 30(5): 1485 - 1504.
- [32] 李勇, 张岳桥, 苏金宝, 等. 湖南大义山、塔山岩体锆石 U - Pb 年龄及其构造意义[J]. *地球学报*, 2015, 36(3): 303 - 312.
- Li Y, Zhang Y Q, Su J B, et al. Zircon U - Pb Dating of Dayishan and Tashan plutons in Hunan Province and its tectonic implications [J]. *Acta Geoscientia Sinica*, 2015, 36(3): 303 - 312.
- [33] 黄金川. 湖南水口山铅锌金矿床同位素年代学及成岩成矿机理研究[D]. 北京: 中国科学院大学, 2016.
- Huang J C. Isotopic Chronology and Diagenetic Metallogenic Mechanism of Lead - Zinc - Gold Deposits in Shuikoushan, Hunan [D]. Beijing: University of Chinese Academy of Sciences, 2016.
- [34] 路睿. 湖南省常宁市水口山铅锌矿床地质特征及成因机制探讨[D]. 南京: 南京大学, 2013.
- Lu R. Geologic Characteristic and Genesis Mechanism of the Shuikoushan Pb - Zn Deposit in Changning City, Hunan Province [D]. Nanjing: Nanjing University, 2013.
- [35] 柏道远, 钟响, 贾朋远, 等. 湘中印支期关帝庙岩体地球化学特征及成因[J]. *沉积与特提斯地质*, 2014, 34(4): 92 - 104.
- Bai D Y, Zhong X, Jia P Y, et al. Geochemistry and petrogenesis of the Indosinian Guandimiao granitic pluton in central Hunan [J]. *Sedimentary Geology and Tethyan Geology*, 2014, 34(4): 92 - 104.
- [36] 王岳军, 范蔚茗, 梁新权, 等. 湖南印支期花岗岩 SHRIMP 锆石 U - Pb 年龄及其成因启示[J]. *科学通报*, 2005, 50(12): 1259 - 1266.
- Wang Y J, Fan W M, Liang X Q, et al. SHRIMP Zircon U - Pb ages and its genesis implication of Indosinian granite in Hunan Province [J]. *Science Bulletin*, 2005, 50(12): 1259 - 1266.
- [37] 戴方元, 陈必河, 刘富国. 湖南关帝庙地区脉岩特征及其地质意义[J]. *国土资源导刊*, 2008, 5(1): 33 - 36.
- Dai F Y, Chen B H, Liu F G. Characteristics and geological significance of vein rocks in Guandimiao area in Hunan Province [J]. *Land & Resources Herald*, 2008, 5(1): 33 - 36.
- [38] 赵增霞, 徐兆文, 缪柏虎, 等. 湖南衡阳关帝庙花岗岩岩基形成时代及物质来源探讨[J]. *地质学报*, 2015, 89(7): 1219 - 1230.
- Zhao Z X, Xu Z W, Miao B H, et al. Diagenetic age and material source of the Guandimiao granitic batholith, Hengyang city, Hunan Province [J]. *Acta Geologica Sinica*, 2015, 89(7): 1219 - 1230.
- [39] 陈迪, 刘玉懿, 王先辉, 等. 湖南五峰仙岩体岩石地球化学、SHRIMP U - Pb 年龄及 Hf 同位素特征[J]. *地质科技情报*, 2017, 36(6): 1 - 12.

- Chen D, Liu J Y, Wang X H, et al. The petrogeochemistry, SHRIMP zircon U - Pb age, and Hf isotope character of Wufengxian pluton in Hunan Province[J]. Geological Science and Technology, 2017, 36(6): 1 - 12.
- [40] 彭能立, 王先辉, 杨俊, 等. 湖南川口三角潭钨矿床中辉钼矿 Re - Os 同位素定年及其地质意义[J]. 矿床地质, 2017, 36(6): 1402 - 1414.
- Peng N L, Wang X H, Yang J, et al. Re - Os dating of molybdenite from Sanjiaotan tungsten deposit in Chuankou area, Hunan Province, and its geological implications[J]. Mineral Deposits, 2017, 36(6): 1402 - 1414.
- [41] Qin J H, Wang D H, Li C, et al. The molybdenite Re - Os isotope chronology, in situ scheelite and wolframite trace elements and Sr isotope characteristics of the Chuankou tungsten ore field, South China[J]. Ore Geology Reviews, 2020, 126: 103756.
- [42] 彭冰霞, 王岳军, 范蔚茗, 等. 湖南中部和广东西部3个典型花岗质岩体的 LA - ICP - MS 锆石 U - Pb 定年及其成岩意义[J]. 地质学报, 2006, 80(10): 1597.
- Peng B X, Wang Y J, Fan W M, et al. U - Pb ages of three typical granitic bodies in the middle of Hunan Province and the western Guangdong Province[J]. Acta Geologica Sinica, 2006, 80(10): 1597.
- [43] 张晓军, 罗华, 吴志华, 等. 湖南大义山矿田白沙子岭钨矿床 Rb - Sr 同位素等时线年龄及其地质意义[J]. 中国地质大学学报: 地球科学版, 2014, 39(10): 1322 - 1332.
- Zhang X J, Luo H, Wu Z H, et al. Rb - Sr Isochron age and its geological significance of Baishaziling Tin deposit in Dayishan ore field, Hunan Province[J]. Journal of China University of Geosciences(Earth Science), 2014, 39(10): 1322 - 1332.
- [44] 刘耀荣, 邝军, 马铁球, 等. 湖南大义山花岗岩南体黑云母 $^{40}\text{Ar} - ^{39}\text{Ar}$ 定年及地质意义[J]. 资源调查与环境, 2005, 26(4): 244 - 249.
- Liu Y R, Kuang J, Ma T Q, et al. $^{40}\text{Ar} - ^{39}\text{Ar}$ dating of biotite in south Dayishan granite and its geological significance[J]. Resources Survey & Environment, 2005, 26(4): 244 - 249.
- [45] Meng L F, Li Z X, Chen H L, et al. Geochronological and geochemical results from Mesozoic basalts in southern South China block support the flat - slab subduction model[J]. Lithos, 2012, 132 - 133: 127 - 140.
- [46] 赵振华, 包志伟, 张伯友. 湘南中生代玄武岩类地球化学特征[J]. 中国科学: D 辑, 1998, 28(S2): 7 - 14.
- Zhao Z H, Bao Z W, Zhang B Y. Geochemical characteristics of Mesozoic basalts in the Southern Guangxi[J]. Science in China Series D, 1998, 28(S2): 7 - 14.
- [47] 谢桂青, 彭建堂, 胡瑞忠, 等. 湖南锡矿山锑矿区煌斑岩的地球化学特征[J]. 岩石学报, 2001, 17(4): 629 - 636.
- Xie G Q, Peng J T, Hu R Z, et al. Geochemical characteristics of lamprophres in the Xikuangshan antimony ore deposits, Hunan Province[J]. Acta Petrologica Sinica, 2001, 17(4): 629 - 636.
- [48] 史国伟, 欧阳志强, 李先灿. 湖南邵东县石桥铺矿区铅锌矿地质特征及找矿前景探讨[J]. 国土资源导刊, 2015, 12(3): 9 - 15.
- Shi G W, Ouyang Z Q, Li X C. Geological characteristics and exploration prospect of the lead - zinc deposit in the Shiqiaopu, Shaodong County, Hunan[J]. Land & Resources Herald, 2015, 12(3): 9 - 15.
- [49] 吴志华, 魏绍六. 留书塘铅锌矿床成矿特征与找矿方向[J]. 华南地质与矿产, 2009, 25(4): 17 - 21.
- Wu Z H, Wei Z L. Metallogenic characteristics and Prospecting direction of Liushutang lead - zinc deposit[J]. Geology and Mineral Resources of South China, 2009, 25(4): 17 - 21.
- [50] 欧阳玉飞, 黄满湘, 郑平. 湖南川口杨林坳钨矿床控矿因素与成矿规律研究[J]. 矿产与地质, 2008, 22(4): 285 - 288.
- Ouyang Y F, Huang M X, Zheng P. Research on the ore - controlling factors and ore - forming rules of the Yanglin'ao W deposit in Chuankou, Hunan[J]. Mineral Resources and Geology, 2008, 22(4): 285 - 288.
- [51] 郑平. 湖南衡南杨林坳白钨矿床控矿构造研究[D]. 长沙: 中南大学, 2008.
- Zheng P. Study on the Ore - controlling Structure of Yanglin'ao Scheelite Deposit in East Hengyang, Hunan Province[D]. Changsha: Central South University, 2008.
- [52] 公凡影. 湖南省康家湾铅锌金银矿床地质特征及矿床成因探讨[D]. 北京: 中国地质大学(北京), 2012.
- Gong F Y. Discussion on the Characteristics and Genesis of Kangjiawan Pb - Zn - Au - Ag Deposit, Hunan[D]. Beijing: China University of Geosciences Beijing, 2012.
- [53] 王宾海, 王诗潮, 周倩, 等. 衡阳盆地北缘盐田桥铜矿床成矿构造地质地球化学特征[J]. 地质科技情报, 2017, 36(6): 232 - 238.
- Wang B H, Wang S C, Zhou Q, et al. Geological and geochemical characteristics of ore controlling structure of the Yantianqiao copper deposit in the northern margin of Hengyang basin[J]. Geological Science and Technology Information, 2017, 36(6): 232 - 238.
- [54] 刘晓敏, 杨亮. 湖南谭子山探山岭矿段铜、重晶石矿成矿地质条件分析[J]. 地球, 2016(3): 88 - 89.
- Liu X M, Yang L. Mineralized geological conditions of copper and barite in Tanshanling section of Tanzishan in Hunan Province[J]. Earth, 2016(3): 88 - 89.
- [55] 王银茹. 湖南省川口三角潭钨矿床成因及成矿模式研究[D]. 长沙: 中南大学, 2012.
- Wang Y R. Research on Ore Genesis and Metallogenic Model of the Sanjiaotan Tungsten Deposit in Chuankou, Hunan[D]. Changsha: Central South University, 2012.
- [56] 缪柏虎. 湖南祁东县清水塘铅锌矿床地质特征及形成机制[D]. 南京: 南京大学, 2014.
- Miao B H. Geologic Characteristic and Genesis Mechanism of the Qingshuitang Pb - Zn Deposit in Qidong County, Hunan Province[D]. Nanjing: Nanjing University, 2014.
- [57] Qin J H, Huang F, Zhong S H, et al. Unraveling evolution histories of large hydrothermal systems via garnet U - Pb dating, sulfide

- trace element and isotopic analyses; A case study of Shuikoushan polymetallic ore field, South China [J]. *Ore Geology Reviews*, 2022, 149: 105063.
- [58] 程顺波, 吴志华, 刘重芃, 等. 湖南省留书塘铅锌矿床 S、Pb 同位素特征及意义 [J]. *地质通报*, 2017, 36(5): 846 – 856.
- Cheng S B, Wu Z H, Liu Z P, et al. Sulfur and lead isotope geochemistry of the Liushutang lead – zinc deposit in Hunan Province and its significance [J]. *Geological Bulletin of China*, 2017, 36(5): 846 – 856.
- [59] 毛景文, 谢桂青, 李晓峰, 等. 大陆动力学演化与成矿研究: 历史与现状——兼论华南地区在地质历史演化期间大陆增生与成矿作用 [J]. *矿床地质*, 2005, 24(3): 193 – 205.
- Mao J W, Xie G Q, Li X F, et al. Geodynamic process and metallogeny: History and present research trend, with a special discussion on continental accretion and related metallogeny throughout geological history in South China [J]. *Mineral Deposits*, 2005, 24(3): 193 – 205.
- [60] Zartman R E, Doe B R. Plumbotectonics – the model [J]. *Tectonophysics*, 1981, 75(1/2): 135 – 162.
- [61] 曾志方. 湖南大义山锡矿田构造控矿作用与成矿机理研究 [D]. 武汉: 中国地质大学, 2013: 1 – 100.
- Zeng Z F. Research on Tectonic Ore – controlling and Metallogenic Mechanism of the Dayishan Tin Field, Hunan, China [D]. Wuhan: China University of Geosciences, 2013: 1 – 100.
- [62] Greentree M R, Li Z X, Li X H, et al. Late mesoproterozoic to earliest neoproterozoic basin record of the Sibao orogenesis in western South China and relationship to the assembly of Rodinia [J]. *Precambrian Research*, 2006, 151(1 – 2): 79 – 100.
- [63] 李献华, 王选策, 李武显, 等. 华南新元古代玄武质岩石成因与构造意义: 从造山运动到陆内裂谷 [J]. *地球化学*, 2008, 37(4): 382 – 398.
- Li X H, Wang X C, Li W X, et al. Petrogenesis and tectonic significance of Neoproterozoic basaltic rocks in South China: From orogenesis to intracontinental rifting [J]. *Geochimica*, 2008, 37(4): 382 – 398.
- [64] Li W X, Li X H, Li Z X, et al. Obduction – type granites within the ne jiangxi ophiolite; implications for the final amalgamation between the Yangtze and cathaysia blocks [J]. *Gondwana Research*, 2008, 13(3): 288 – 301.
- [65] Li X H. U – Pb zircon ages of granites from the southern margin of the Yangtze Block; Timing of Neoproterozoic Jinning; Orogeny in SE China and implications for Rodinia assembly [J]. *Precambrian Research*, 1999, 97(1 – 2): 43 – 57.
- [66] 李献华, 周汉文, 李正祥, 等. 扬子块体西缘新元古代双峰式火山岩的锆石 U – Pb 年龄和岩石化学特征 [J]. *地球化学*, 2001, 30(4): 315 – 322.
- Li X H, Zhou H W, Li Z X, et al. Zircon U – Pb age and petrochemical characteristics of the Neoproterozoic bimodal volcanics from western Yangtze block [J]. *Geochimica*, 2001, 30(4): 315 – 322.
- [67] 舒良树. 华南构造演化的基本特征 [J]. *地质通报*, 2012, 31(7): 1035 – 1053.
- Shu L S. An analysis of principal features of tectonic evolution in South China block [J]. *Geological Bulletin of China*, 2012, 31(7): 1035 – 1053.
- [68] Gilder S A, Keller G R, Luo M, et al. Eastern Asia and the Western Pacific timing and spatial distribution of rifting in China [J]. *Tectonophysics*, 1991, 197(2 – 4): 225 – 243.
- [69] Li X H. Cretaceous magmatism and lithospheric extension in southeast China [J]. *Journal of Asian Earth Sciences*, 2000, 18(3): 293 – 305.
- [70] 夏文臣. 中国东部中、新生代断陷盆地的成因地层格架及其与油气关系 [J]. *地质科技情报*, 1991, 10(1): 41 – 48.
- Xia W C. Genetic stratigraphic framework and its genetic relationship to oil and gas in mesozoic and Cenozoic Faultcontrolled basins of eastern China [J]. *Geological Science and Technology Information*, 1991, 10(1): 41 – 48.
- [71] 华仁民, 陈培荣, 张文兰, 等. 华南中、新生代与花岗岩类有关的成矿系统 [J]. *中国科学(D 辑)*, 2003, 33(4): 335 – 343.
- Hua R M, Chen P R, Zhang W L, et al. Metallogenic systems related to Mesozoic and Cenozoic granitoids in South China [J]. *Science in China Series D: Earth Sciences*, 2003, 46(8): 816 – 829.
- [72] Wernicke B, Axen G J, Snow J K. Basin and Range extensional tectonics at the latitude of Las Vegas, Nevada [J]. *GSA Bulletin*, 1988, 100(11): 1738 – 1757.
- [73] Zhou X M, Li W X. Origin of Late Mesozoic igneous rocks in South-eastern China; implications for lithosphere subduction and underplating of mafic magmas [J]. *Tectonophysics*, 2000, 326(3 – 4): 269 – 287.
- [74] 舒良树, 王德滋. 北美西部与中国东南部盆地构造对比研究 [J]. *高校地质学报*, 2006, 12(1): 1 – 13.
- Shu L S, Wang D Z. A comparison study of basin and range tectonics in the western North America and southeastern China [J]. *Geological Journal of China Universities*, 2006, 12(1): 1 – 13.
- [75] 张进业. 衡山变质核杂岩体西缘构造特征 [J]. *华东地质学院学报*, 1994, 17(1): 18 – 22.
- Zhang J Y. Tectonic feature of the western edge in the metamorphic nucleus complex of Hengshan [J]. *Journal of East China Geological Institute*, 1994, 17(1): 18 – 22.
- [76] Hill R I, Campbell I H, Davies G F, et al. Mantle plumes and continental tectonics [J]. *Science*, 1992, 256(5054): 186 – 193.
- [77] Parsons T, Thompson G A, Smith R P. More than one way to stretch: A tectonic model for extension along the plume track of the Yellowstone hotspot and adjacent Basin and Range Province [J]. *Tectonics*, 1998, 17(2): 221 – 234.
- [78] 王五力, 郭胜哲. 中国东北古亚洲与古太平洋构造域演化与转换 [J]. *地质与资源*, 2012, 21(1): 27 – 34.
- Wang W L, Guo S Z. The evolution and transformation of Paleo – Asia and Paleo – Pacific tectonic domain of northeast China [J]. *Geology and Resources*, 2012, 21(1): 27 – 34.
- [79] 童航寿. 华南地幔柱构造与成矿 [J]. *铀矿地质*, 2010, 26(2): 65 – 72, 94.

Tong H S. Mantle plume structure and metallogenesis in South China[J]. *Uranium Geology*,2010,26(2):65 – 72,94.

[80] 华仁民,陈培荣,张文兰,等. 论华南地区中生代 3 次大规模成矿作用[J]. *矿床地质*,2005,24(2):99 – 107.

Hua R M,Chen P R,Zhang W L,et al. Three major metallogenic events in Mesozoic in South China[J]. *Mineral Deposits*,2005,24(2):99 – 107.

[81] 陈毓川,裴荣富,张宏良. 南岭地区与中生代花岗岩类有关的有色、稀有金属矿床地质[J]. *地球学报*,1990,17(1):79 – 85.

Chen Y C,Pei R F,Zhang H L. The geology of nonferrous and rare metal deposits related to Mesozoic Granitoids in the Nanling region, China[J]. *Acta Geoscientica Sinica*,1990,17(1):79 – 85.

Metallogenic characteristics and regularities of Hengyang Basin and its surrounding areas

LIU Xingzhong¹, QIN Jinhua², WANG Denghong², FAN Zichun³, YANG Xiaofei³

(1. *Bayingolin Geological Branch, Geological Bureau of Xinjiang Uygur Autonomomous Region, Xinjiang Korla, 841000, China;*
2. *MLR Key Laboratory of Metallogeny and Mineral Assessment, Institute of Natural Resources, Chinese Academy of Geological Sciences, Beijing, 100037;* 3. *Zhicun Lithium Group Co., Ltd., Jiangxi Yichun 336000, China*)

Abstract: Hengyang Basin is located at the junction between Jiangxi – Hunan – Guangxi – Guangdong fold belt of South China fold system and Jiangnan platform uplift, with the development of multi – stages and multi – types metallic and non – metallic deposits. The systematic summarization of regional metallogenic regularities is deficient in current research, which hinders the establishment of metallogenic theory and ore prospecting. The authors in this paper summarized and analyzed the characteristics of magmatism and metallogenesis, temporal and spatial distribution of Hengyang Basin. The results show that multi – stage magmatism and mineralization were developed since Paleozoic, mainly in Indosinian and Yanshanian Period. Most of the main metal deposits in the basin are closely related to magmatism, and the mineralization types developed from high temperature to low temperature exist. The spatial distribution of rock mass and deposits in the basin is closely related with the deep – seated fractures, and various types of vertical zoning are developed in each deposit. Three different types of mineralized assemblage zones are developed in the basin from northwest to southeast, with mineralization temperature rising gradually. The *Hengyang type* basin and range structural belt are mainly controlled by the effect of lower mantle plume activities under the tectonic setting of multi – stage lithospheric extension in South China. The diagenesis and metallogenic activities are triggered by the superposition of multiple process, including partial melting and fractional crystallization in different locations of the lithosphere, upwelling of deep fertile ore fluid and the extraction of metals from surrounding rocks. The research results could provide some references for the study of metallogenic regularity and further prospecting in Meso – Cenozoic basins in South China.

Keywords: Hengyang Basin, magmatism, mineralization, lithospheric extension

(责任编辑: 魏昊明)