

doi: 10.12029/gc20170613

钟福军, 潘家永, 夏菲, 张勇, 刘国奇, 刘颖. 2017. 江西玉华山地区铀矿综合信息找矿模型研究[J]. 中国地质, 44(6): 1234–1250.
Zhong Fujun, Pan Jiayong, Xia Fei, Zhang Yong, Liu Guoqi, Liu Ying. 2017. A study of an integrated anomaly model and an exploration model for uranium exploration in Yuhuashan area, Jiangxi Province [J]. Geology in China, 44(6): 1234–1250(in Chinese with English abstract).

江西玉华山地区铀矿综合信息找矿模型研究

钟福军 潘家永 夏菲 张勇 刘国奇 刘颖

(东华理工大学核资源与环境国家重点实验室培养基地, 江西南昌 330013)

摘要:玉华山地区是赣杭构造带西南段重要的铀矿找矿远景区之一, 毗邻中国最大的火山岩型铀矿田——相山铀矿田。玉华山地区基底变质岩、岩浆岩、断裂构造、热液活动和铀矿化特征指示区内具有较大的找矿潜力。与相山矿田对比, 两者成矿条件基本相同, 但在火山活动、晚期热液活动强度、剥蚀程度等方面存在较大差异。玉华山地区地球化学与地球物理异常特征表明, 区内 U-Th-Mo 化探综合异常、正负磁异常交替和放射性正异常等异常叠加区是铀矿勘查的重点区域。同时, 在成矿条件、地球化学条件与地球物理条件的基础上, 构建了研究区综合信息找矿模型, 为区内铀矿勘查工作提供了理论与实践依据。笔者认为为山—筒山断裂带是今后资源量突破所在, 建议部署相关勘探工程, 查明铀资源量。

关键词:综合信息找矿; 找矿模型; 铀矿; 玉华山; 紫云山

中图分类号: P628; P619.14 文献标志码: A 文章编号: 1000-3657(2017)06-1234-17

A study of an integrated anomaly model and an exploration model for uranium exploration in Yuhuashan area, Jiangxi Province

ZHONG Fujun, PAN Jiayong, XIA Fei, ZHANG Yong, LIU Guoqi, LIU Ying

(State Key Laboratory of Nuclear Resources and Environment, East China University of Technology, Nanchang 330013, Jiangxi, China)

Abstract: Located in the southwestern part of Gan-Hang tectonic zone and closed to the Xiangshan uranium orefield, the largest volcanic-type uranium orefield in China, the Yuhuashan area is a significant prospective prediction area for uranium ore deposit. In this paper, a systematic study of uranium metallogenic conditions such as metamorphic basement, magmatism, fracture structure, and hydrothermal activity indicates that Yuhuashan area is an excellent potential area for uranium mineralization. Compared with the Xiangshan uranium orefield, they have many great differences in such aspects as the degree of volcanic activity, the degree of late hydrothermal activity, and the denudation degree. The geochemical and geophysical anomalies of Yuhuashan area indicate that the area within the comprehensive anomaly of U-Th-Mo, the alternate magnetic positive and negative anomalies and positive radioactive anomalies are favorable areas for uranium exploration. Based on the ore-forming geological, geochemical and geophysical conditions, the authors established a comprehensive anomaly model and a uranium exploration model for Yuhuashan

收稿日期: 2016-05-09; 改回日期: 2017-11-23

基金项目: 国家自然科学基金项目(41772066, U1403292)与中国地质调查局矿调项目(1212011085395)联合资助。

作者简介: 钟福军, 男, 1988年生, 博士生, 主要从事铀矿地质科研工作; E-mail: zhongfujun602@126.com。

通讯作者: 潘家永, 男, 1967年生, 博士, 教授, 主要从事铀矿床学教学与科研工作; E-mail: jypan@ecit.cn。

area, which will provide important theoretic and practical reference for uranium exploration in the future. Moreover, the authors hold that more exploration work should be preferentially carried out along the Weishan—Tongshan fault zone which is the key position of resource reserves.

Key words: comprehensive information for exploration; exploratory model; uranium ore; Yuhuashan; Ziyunshan

About the first author: ZHONG Fujun, male, born in 1988, doctor candidate, mainly engages in the study of uranium geology; E-mail: zhongfujun602@126.com.

About the corresponding author: PAN Jiayong, male, born in 1967, doctor, professor, mainly engages in the teaching and study of uranium geology; E-mail: jypan@ecit.cn.

Fund support: Supported by National Natural Science Foundation of China (No. 41772066, U1403292) and China Geological Survey Program (No. 1212011085395).

1 引言

成矿模型与找矿模型是矿床学与矿产勘查学研究的重点(Thomas, et al., 2000; 翟裕生, 2007; 裴荣富等, 2013; Asadi et al., 2014; Seo et al., 2015),对矿床成因研究与资源量突破有重要的理论与实践意义。在充分研究了区域成矿地质条件与成矿规律研究的基础上,结合典型矿床研究,总结找矿模型,是矿产勘查过程中的重要步骤。目前,在地表矿日趋减少及单一找矿方法难以奏效的形势下,运用综合信息找矿方法逐渐成为矿产勘查的主流(唐菊兴, 2003; 王世称, 2010; 江少卿等, 2014; 钟福军等, 2014),也取得了巨大资源量的突破(孙剑等, 2011; 谭华等, 2015)。

铀矿是中国重要的战略资源与能源资源,铀资源量的突破对中国经济建设与国防建设具有重要的意义。玉华山地区位于中国著名的赣杭火山岩型铀成矿带西南段,是该带重要的找矿预测远景区之一(方锡珩等, 2012)。前人在该区开展过一系列生产与科研工作,在岩浆岩成因、控矿因素、成矿规律等方面取得了一系列的成果(王德滋等, 1983; 单林等, 1985; 徐海江等, 1988; 周雪桂等, 1994; 黄长生等, 2001; 李响, 2012; 刘颖, 2013; 周玉龙等, 2015; 张万良等, 2015; Zhang, et al., 2016),然而铀资源量始终未取得较大突破。在找矿方法由单一转为多手段、多技术基础上的背景下,本文充分研究了区域成矿地质条件、成矿规律,将研究区与邻区相山铀矿田进行了系统对比,构建了研究区铀矿的综合信息找矿模型,为区内铀矿勘查提供了理论与实践依据。

2 成矿地质背景

赣杭构造带位于中国东南部一级构造单元拼合部位,横跨江南元古宙岛弧和华南加里东造山带两个二级构造单元,北为扬子板块,南为华夏板块,自加里东期至燕山晚期先后经历了3个构造演化阶段(邓家瑞等, 1989; 余心起等, 2006; 邵飞等, 2010),形成了颇具特色的火山岩、A型花岗岩、断陷红盆、深大断裂、多金属矿分布带(Gilder, et al., 1991; 余达淦, 1992a, 1992b; 张星蒲, 1999; Yu, et al., 2006; Goodell, et al., 2011)。该带是中国东南部火山岩型铀矿床(田)的主要产出区(余达淦, 1992a, 1992b; 张星蒲, 1999; 邓家瑞等, 1999; 邵飞等, 2010),沿带分布着新路、大洲、盛源、相山等著名火山岩型铀矿田(图1),其中又以相山铀矿田规模最大、铀资源量最多。铀成矿年龄为140~70 Ma(邵飞, 2011; 邵飞等, 2010),是华南中生代大规模成矿作用的重要组成部分(华仁民等, 2005)。赣杭构造带铀资源潜力巨大,铀矿床的攻深找盲、扩边将是今后铀矿勘查的主攻方向。

研究区位于赣杭构造带西南段,以赣杭断裂带为界(图1),与相山铀矿田“隔岸相望”。全国火山岩型铀矿资源潜力评价将研究区列为重要预测区,建议优先部署勘查工程(方锡珩等, 2012)。此外,研究区与相山铀矿田相似的成矿地质背景,成矿条件极为相似,表明研究区具有较大的找矿潜力。因此,充分利用相山铀矿田的成矿规律与找矿经验是该区铀资源量取得突破的捷径。

3 成矿地质条件

研究区位于赣杭构造带西南段,距离相山铀矿

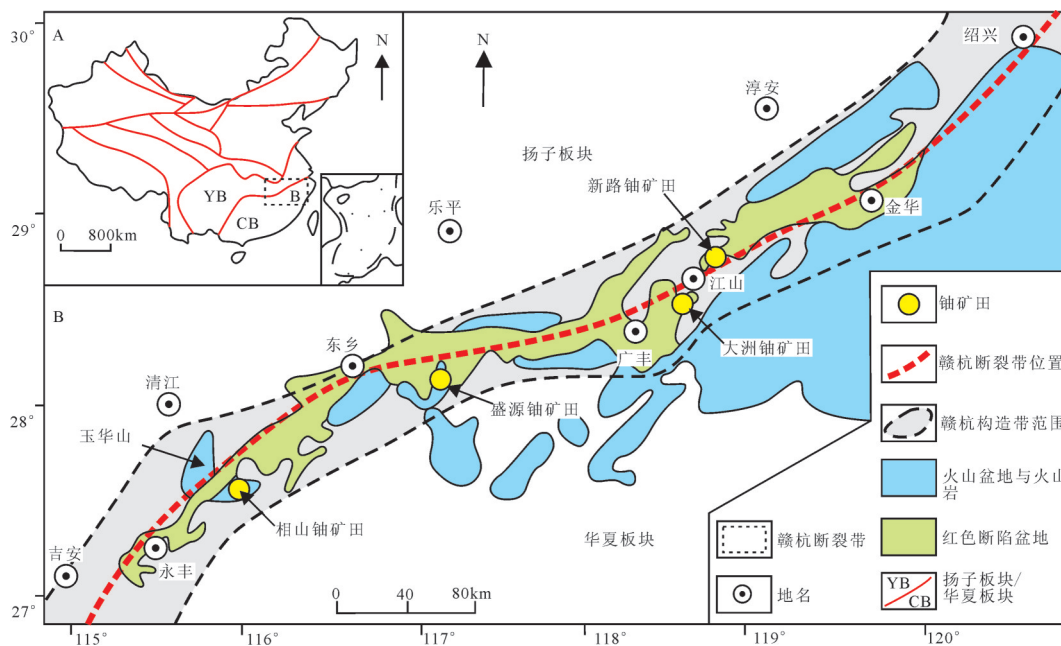


图1 赣杭构造带铀矿地质简图(据余心起等,2006修改)

Fig.1 Uranium geological sketch map of the Gan-Hang zone (after Yu Xinqi et al., 2006)

田仅 10 km 余,由玉华山火山盆地与紫云山花岗岩体两个主体构成。火山盆地整体呈长轴南北向不规则椭圆状,基底由元古宙浅变质岩与三叠纪陆相砂砾岩夹煤层构成(图2)。盖层为早白垩世中酸性火山岩,岩性以碎斑熔岩、碎斑花岗斑岩与次火山岩为主。晚侏罗世紫云山花岗岩出露于盆地东部,岩性以中粗粒黑(二)云母花岗岩为主,局部见长石斑晶,岩体内晚期细粒花岗岩、细晶岩、煌斑岩等中酸性脉岩发育。区内断裂构造、火山构造发育,盆地东部边缘发育的南北向为山—筒山断裂带是主要的控岩、控矿构造(周玉龙等,2015)。

3.1 基底变质岩

中—新元古代浅变质岩构成了研究区的基底变质岩,属低角闪岩相—高绿片岩相。与相山铀矿田基底变质岩类似,共经历了4期变形作用($D_1 \sim D_4$)和3期变质作用($M_1 \sim M_3$)(胡恭任等,1997,2000,2004)。放射性能谱测量获得变质岩现阶段的铀含量均值为 3.2×10^{-6} ,略高于相山铀矿田基底变质岩铀含量 2.86×10^{-6} ,表明变质基底中的铀可能进行了预富集。然而,在漫长的地质演化过程中,以类质同象、独立矿物、矿物包裹体、粒间溶液与分散吸附等形式(王剑峰,1986)存在的铀将发生重新分配(胡恭任等,1998),以类质同象存在于富铀矿物(如锆

石、榍石等)的惰性铀会被活化,独立铀矿物会被分解,最终多数以分散吸附形式赋存于矿物缺陷表面或微裂隙边缘(陈迪云等,1993);此类铀极易在后期构造、岩浆和流体活动下从岩石中迁移出来,从而可能为区域铀成矿提供部分铀源。

3.2 富铀岩浆岩

玉华山火山岩 LA-ICP-MS 锆石 U-Pb 年龄为 $136 \sim 137 \text{ Ma}$ (李响,2012),与相山铀矿田赋矿火山岩成岩年龄 $134 \sim 137 \text{ Ma}$ (杨水源,2013;陈正乐等,2013)基本一致,系早白垩世岩浆活动的产物。以富硅、富碱(钾大于钠)、相对贫 Na、Ca 与 Mg、铝过饱和、钙碱性等地球化学特征^①,与相山铀矿田火山岩地球化学特征(夏林圻等,1992;张万良等,2005;杨水源,2013)颇为相似,可能为同期、同源岩浆在不同地点的喷溢或侵位而成。研究区火山岩铀含量为 7.18×10^{-6} ,最高可达 14.6×10^{-6} ,略高于相山铀矿田火山岩 6.76×10^{-6} (范洪海等,2001),是赣杭构造带产铀火山岩(4.8×10^{-6})的 1.5 倍,略高于华南地壳沉积岩平均铀含量 3.33×10^{-6} (章邦桐等,1998)。热液铀矿床的成矿物质源于区域上富铀的变质岩、火山岩或花岗岩已得到了大多数学者的认可(杜乐天,1982;沈渭洲等,1988;金景福等,1990;Dahlkamp,2013;Mercadier et al.,2013;Cuney,2014)。研究区富铀火

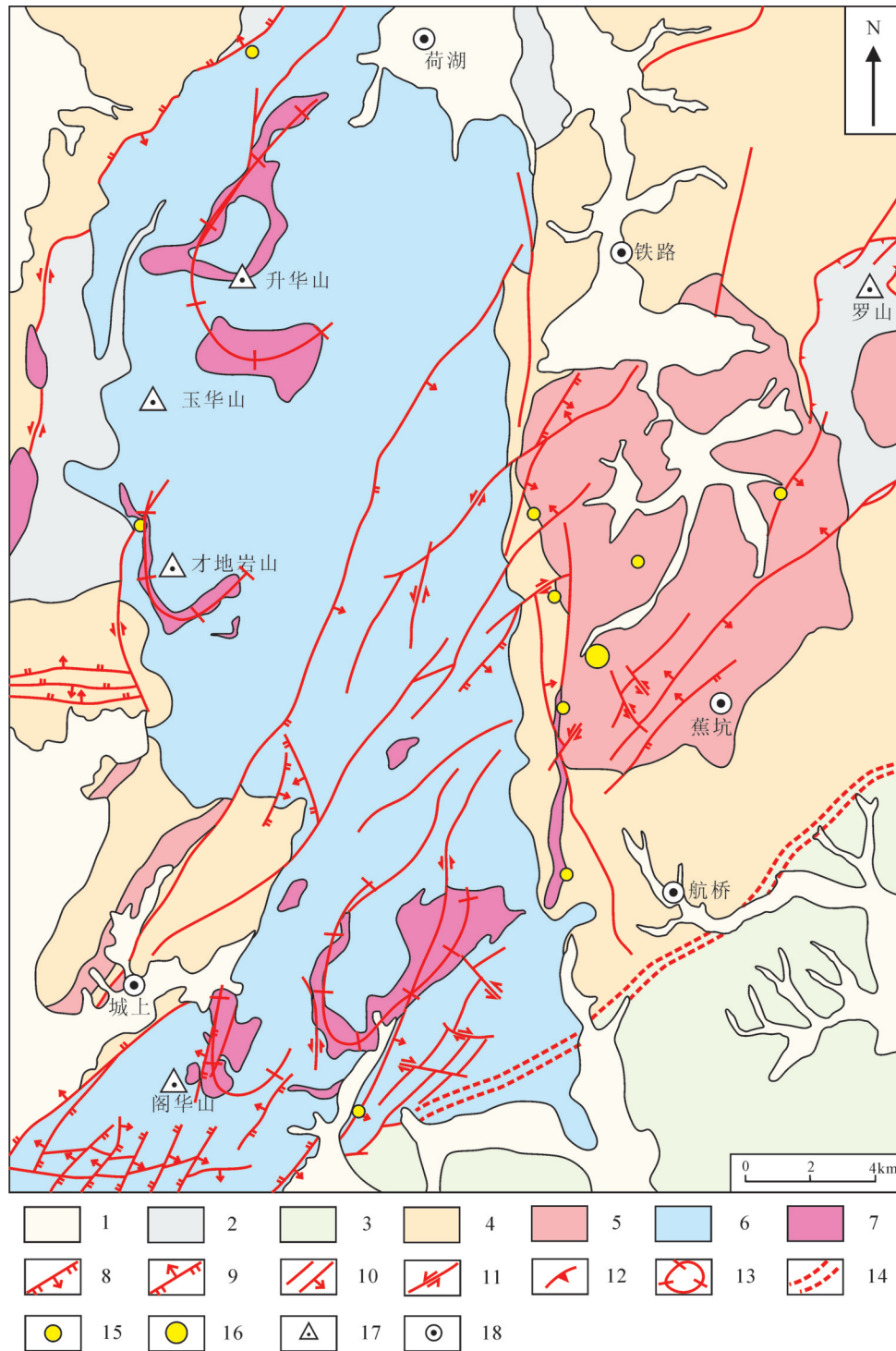


图2 玉华山地区铀矿地质简图[®]

1—第四纪砂砾岩;2—晚三叠世砂砾岩夹煤层;3—白垩纪砂砾岩;4—中—新元古代浅变质岩;5—晚侏罗世花岗岩;6—早白垩世火山岩;
7—早白垩世次火山岩;8—正断层;9—逆断层;10—性质不明断层及倾向;11—平移断层;12—推覆构造;13—环形火山构造;
14—区域深大断裂;15—铀矿点;16—铀矿床;17—山峰;18—乡镇

Fig.2 Uranium geological sketch map of Yuhuashan area[®]

1-Quaternary glutenite; 2-Late Triassic glutenite and coal bed; 3-Cretaceous glutenite; 4-Meso—Neoproterozoic epimetamorphic rock;
5-Late Jurassic granite; 6-Early Cretaceous sub-volcanic rock; 7-Early Cretaceous volcanic rock; 8-Normal fault; 9-Thrust fault;
10-Unknown fault and tendency; 11-Transcurrent fault; 12-Nappe structure; 13-Circular volcanic structure; 14-Regional fault;
15-Uranium ore occurrence; 16-Uranium deposit; 17-Mountain peak; 18-Town

山岩可以为铀成矿作用提供充足的物质基础。

紫云山花岗岩 LA-ICP-MS 锆石 U-Pb 年龄为 158~153 Ma(刘颖, 2013), 系晚侏罗世岩浆活动产物。地球化学特征方面, 紫云山岩体花岗岩富硅、富碱、铝过饱和、贫 Mg、P 与 Ca; Ba、Sr、Ti 明显亏损, U、Th、K 明显富集, ΣREE $62.18 \times 10^{-6} \sim 168.47 \times 10^{-6}$, La_N/Sm_N 为 1.96~3.16, δ_{Eu} 为 0.03~0.35; 与华南产铀花岗岩地球化学特征(章邦桐等, 1988; 张成江, 1996; 冯明月等, 2012)基本一致。铀含量 14.68×10^{-6} , 大于 9×10^{-6} , 远高于一般花岗岩铀含量 $3 \times 10^{-6} \sim 4 \times 10^{-6}$; 钍含量 28.45×10^{-6} ; Th/U 比值为 1.94, 小于 3, 属富铀花岗岩(沈渭洲等, 1988; 章邦桐等, 1988; 翟建平, 1990; 余达淦等, 2005)。此外, 花岗岩广泛发育自变质作用, 以白云母化、钾长石化、钠长石化为主, 以岩体西部最为强烈, 岩石普遍呈深肉红色, 局部见赤铁矿化, 呈现猪肝色。自变质作用是含铀矿物的分解活化过程, 是铀由惰性转化为活性的过程; 铀矿体常产于自变质作用强烈地段(张成江, 1996)。富铀花岗岩在经历自变质作用后, 铀常以分散吸附形式存在, 有利于铀的迁移。因此, 富铀花岗岩在经历自变质作用后可以为区域铀成矿提供丰富的铀源。

3.3 断裂构造与火山构造

自元古宙以来, 研究区断裂构造受到多次造山运动和太平洋板块俯冲作用的影响, 形成了不同期次、不同层次、不同类型的断裂构造和火山构造, 构成了以北东、北西、东西向断裂为主体的构造格局, 将研究区切割成许多菱形块体和不规则块体。北东向断裂为主干构造, 较为发育, 规模大, 贯穿全区, 具控岩、控矿特征; 北西向断裂规模小, 延伸短, 具晚期断裂构造特征, 切穿了早期北东向与南北向断裂; 南北向断裂主要分布于火山盆地东侧, 局部见次火山岩侵入, 是区内主要的控矿断裂。火山构造以火山环状构造、半环状构造、塌陷火山口构造、爆发角砾岩筒构造为主(周玉龙等, 2015), 形成于早白垩世火山活动, 主要分布于玉华山、才地岩山、阁华山等地。晚期火山活动强烈, 导致火山部分塌陷, 形成了火山洼地, 次火山岩沿塌陷构造侵入, 形成次火山岩株或岩墙。遥感构造解译显示, 区内存在 4 个潜在火山机构, 尤以玉华山火山口、环形构造和潜火山通道塌陷构造明显, 分布于玉华山至升华

山一带, 明显受南北向断裂构造与北东向断裂构造的复合控制^①。区内断裂构造构成了深—浅部相互连通的流体循环系统, 为流体的迁移创造了良好的条件, 也为成矿提供了良好的空间, 是有利的导矿通道和储矿空间。

3.4 热液活动与蚀变

研究区发育两类热液蚀变, 即以硅化、云英岩化、水云母化、绿泥石化、赤铁矿化、萤石化、碳酸盐化等为主的酸性蚀变, 以钠长石化为主的碱性蚀变, 显示出热液流体性质的多样性。成矿前为钠长石化、绿泥石化, 为碱性热液蚀变, 成矿期以赤铁矿化、水云母化、萤石化、硅化、绿泥石化、黄铁矿化为主, 为酸性热液蚀变, 成矿后期以碳酸盐化、绿泥石化和硅化为主, 为酸性热液蚀变。其中, 成矿前期形成的钠交代岩是有利的赋矿围岩, 呈带状分布于曲源—明溪、濂坑—孔溪一带, 宽数十米, 南北延伸数千米, 受近南北向为山—筒山断裂构造带控制。钠交代岩具孔隙度高、渗透率高特征, 形成的孔隙和空洞便是良好的矿质沉淀空间, 区内许多铀矿体便产于钠交代岩中。酸性热液蚀变分布范围有限, 蚀变带规模小, 宽度在数厘米至数米之间, 产于断裂构造带两侧, 空间上以断裂构造带为中心, 往两侧热液蚀变逐渐减弱。水云母化与紫黑色萤石化与铀矿化关系密切, 是重要的找矿标志。热液蚀变的规模直接反映了热液活动的强烈, 大规模热液活动往往形成较强烈的热液蚀变, 小规模的热液活动仅形成小规模的热液蚀变。

4 铀矿化地质特征

玉华山地区已探明小型铀矿床 1 处(曲源铀矿床), 铀矿点 6 处, 铀矿化点多处(图 3), 在 Cuney 铀矿床分类(Cuney M, 2009)中属于热液脉型铀矿床。铀矿化类型分水云母-萤石型与钠交代岩型铀矿化两类。前者成矿热液为弱酸性, 围岩发育水云母化和紫黑色萤石化蚀变, 蚀变受控矿断裂构造控制, 矿体产于水云母化带内, 以群脉形式产出, 矿石品位一般较高。后者成矿热液为碱性热液, 发育钠长石化、赤铁矿化、碳酸盐化、绿泥石化和磷灰石化蚀变, 铀主要以显微铀矿物和分散吸附态存在, 矿石矿物以沥青铀矿为主, 极少量的钛铀矿, 矿石品位一般较低, 形成贫矿石。铀矿体多呈脉状、网脉状、

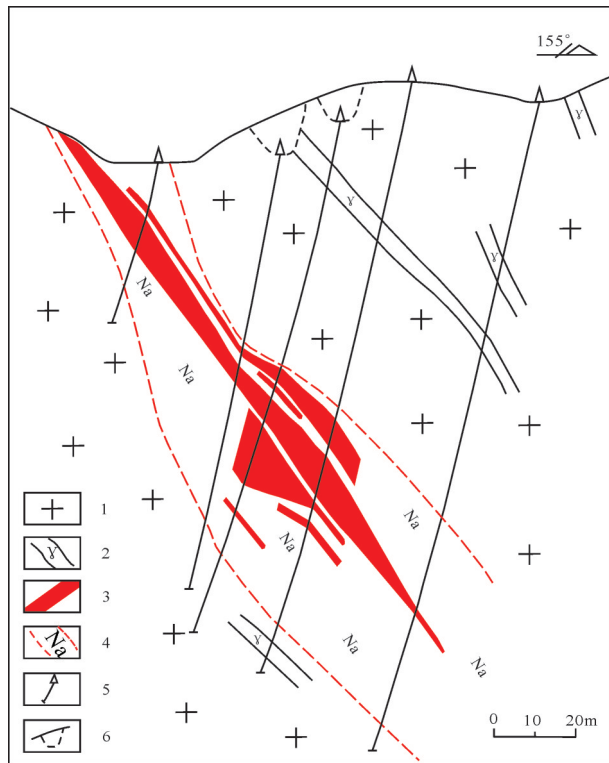


图3 曲源铀矿床52号勘探线剖面图(周玉龙等,2015)

1—黑云母花岗岩;2—细粒花岗岩脉;3—铀矿体;4—钠交代岩;
5—钻孔;6—低洼位置在剖面上的投影

Fig.3 Geological section along No. 52 exploration line of the Quyu uranium deposit (after Zhou Yulong, et al., 2015)

1—Biotite granite; 2—Fine-grained granitic vein; 3—Uranium orebody;
4—Sodium metasomatic rock; 5—Drill hole; 6—Projection position of low-lying area at the section

透镜状、薄层状等,规模大小不等,主矿体走向延伸100~200 m,倾向延伸78~160 m。铀矿体受陡倾断裂构造或次级构造控制,产状与控矿断裂基本一致,倾向为 40° ~ 86° ,大部分矿体倾向陡立。矿体产出部位往往发育强烈的破碎,构造裂隙发育,局部见有角砾状围岩碎块。钠长石化、赤铁矿化、紫黑色萤石化、绿泥石化、碳酸盐化、硅化与铀矿化关系密切。钠交代岩是曲源铀矿床I号矿带的赋矿围岩(图3),含矿钠交代岩受断裂构造控制,较破碎,铀矿化范围小于钠交代范围,并受钠交代岩的变异而变化(周玉龙等,2015)。

区内铀矿化主要受南北向与北东向断裂构造、次火山岩体界面、隐爆角砾岩筒构造、火山岩体界面、塌陷构造、断裂构造与火山构造的叠加复合部位控制,断裂构造与次火山岩体界面的变异部位也

是主要的控矿部位。如江背矿点和洞坑矿点产于北东向断裂与南北向断裂夹持部位,受两者共同控制,矿体产于南北向断裂带内;濂坑矿点受环形火山构造与北东向断裂构造联合控制,矿体产于北东向断裂带内;江背矿点19号矿带受隐爆角砾岩筒构造控制,矿化产于次火山岩体内的隐爆角砾岩筒内,严格受其控制,矿体近似直立;黎山矿点矿化产于火山岩层界面的层间破碎带内,矿体产状与层间破碎带一致。其中,南北向为山—筒山断裂既是区内重要的导矿、控矿断裂,也是重要的储矿断裂(周玉龙等,2015)。该断裂带控制了曲源铀矿床、江背铀矿点、洞坑铀矿点、为山铀矿化点和筒山铀矿化点,控制的资源量约占全区探明资源量的95%以上。次火山岩和辉绿岩以岩脉或岩墙的形式侵入、充填在断裂带内,沿断裂带走向和倾向,断裂带局部有分支复合、膨胀收缩的迹象,局部发育有隐爆角砾岩筒构造,角砾以花岗岩与震旦系变质岩为主。断裂带两侧发育数十米宽的钠长石化蚀变带。主干断裂和次级断裂对铀矿化的控制显著,如曲源铀矿床2号矿带产于断裂带产状变化和断裂带内花岗斑岩脉膨大变异部位(图4);而洞坑铀矿点3号矿带则产于为山—筒山断裂带旁侧的次级构造裂隙带内,矿体形态受次级控制控制,局部有膨胀收缩现象。

5 与相山铀矿田的对比

玉华山地区与相山铀矿田成矿地质条件与铀矿化特征对比(表1)表明,两者成矿地质条件与铀矿化特征基本相同,但在火山机构与次火山岩发育程度、火山活动强烈程度、断裂构造与火山构造复合程度及火山岩厚度等方面存在差异。而导致这类差异的原因可能在于玉华山地区晚期火山活动较弱、火山塌陷程度弱、晚期热液活动较弱、局部地壳抬升过快、剥蚀程度较深等因素所致。

与相山铀矿田相比,虽然玉华山地区的剥蚀程度较深,但现有成矿深度和矿体赋存标高反映仅仅剥蚀了矿体的顶部,未影响到大部分矿体的保存。因为在玉华山火山塌陷盆地的中心和边缘的矿点(如黎山、荷湖矿点)中仍保留着大部分的矿体,且在火山盆地东部的曲源矿床部分勘探线剖面图上大部分矿体仍有向下延伸的迹象,并未尖灭。因

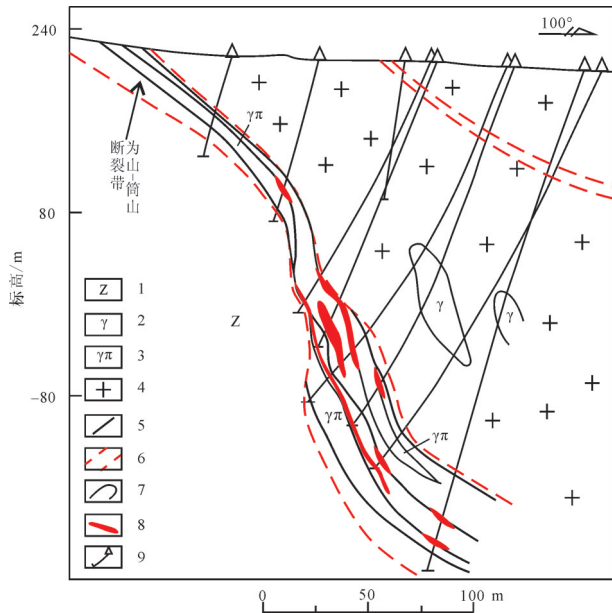


图4 曲源铀矿床6号勘探线剖面图(周玉龙等, 2015)

1—震旦系变质岩; 2—细粒花岗岩; 3—花岗斑岩;
4—中细粒黑云母花岗岩; 5—断裂构造;
6—构造破碎带范围; 7—地质界线; 8—铀矿体; 9—钻孔

Fig.4 Geological section along No. 6 exploration line of the Quyu uranium deposit (after Zhou Yulong, et al., 2015)

1—Sinian metamorphic rock; 2—Fine-grained granite;
3—Granite porphyry; 4—Medium-fine grained biotite granite;
5—Fault structure; 6—Tectonic fracture zone; 7—Geological boundary;
8—Uranium orebody; 9—Drill hole

此,剥蚀程度对区内矿体的保存影响程度较小,大部分矿体得以保留。

6 地球化学条件

在1:5万水系沉积物地球化学测量的基础上,运用多变量统计分析的R型聚类分析和因子分析,U、Th与Mo元素相关性最佳^①,因此,Th与Mo元素可作为研究区铀矿找矿指示元素,对区内铀异常圈定与铀矿找矿潜力评价具有重要指示意义。U元素异常下限为 4.89×10^{-6} ,异常主要分布于紫云山花岗岩周边,整体呈近南北向椭圆状展布,分带明显(图5a)。异常分布区主要出露晚侏罗世富铀花岗岩与基底变质岩,北东向与北西向断裂构造发育,热液蚀变强烈。与铀矿化分布基本对应,推测为断裂构造活动与酸性岩浆活动所致异常,可能为矿致异常。Th元素异常下限为 18.84×10^{-6} ,异常主要分布在紫云山富铀花岗岩周边与玉华山火山盆地边缘,

整体呈北东向展布,分带显著(图5b)。花岗岩内Th异常与岩体内南北向、北东向断裂构造及热液蚀变有关,火山岩区Th异常则与次火山岩和火山构造有关,火山构造发育密集区Th异常强度大,异常范围广,分带也更明显。Mo元素异常下限为 1.44×10^{-6} ,异常较分散,主要分布在紫云山花岗岩东南侧、玉华山、城上等地,分布范围小,呈北东向分布,异常分带较明显(图5c)。紫云山花岗岩东南侧Mo异常与北东向断裂有关,断裂带内有铜钼多金属矿化。城上地区Mo异常与火山塌陷形成的环形断裂构造有关,但区内热液蚀变发育不够。

U-Th-Mo综合异常分布不均,含量变化大,各元素在区内均有较高的峰值出现,但异常范围大小不一(图5d)。最强异常分布于紫云山花岗岩区,呈近南北向的椭圆形展布。在异常区中,U呈近椭圆状,具三级浓度带,多个浓集中心,最高值为 63.97×10^{-6} 。Th具三级浓度带,多个浓集中心,最高值为 1005.00×10^{-6} 。Mo异常呈断续条带状,为三级浓度带,单个浓集中心,最高值为 26.07×10^{-6} 。综合异常与铀矿化对应,南北向和北东向断裂构造与火山盆地东侧的次火山岩是导致异常的重要因素,各元素峰值区发强烈的钠交代、绿泥石化、水云母化等蚀变,显示综合异常区有较好的铀矿找矿前景。

7 地球物理条件

1:20万重力测量显示铁路乡北侧变质岩区为正异常区($10 \times 10^{-5} \sim 20 \times 10^{-5} \text{ m/s}^2$),负异常区位于紫云山花岗岩区,火山岩区重力异常在0值附近^②(图6a)。区内航磁异常呈北东向展布,与断裂构造方向一致。研究区东北部与西南部存在2个显著正异常区,东北部正异常面积最大(达 100 km^2),强度最强,异常中心强度达 1500 nT ,与徐山钨铜矿床有关;西南部正异常区面积大(约 800 km^2)与强度高(最高值 400 nT),可能与城上-潭丘韧性剪切带和火山塌陷构造有关(图6b)。研究区北部存在一个明显的航磁负异常区^③。研究区中部航磁异常接近0值,仅存在零星的正异常区,可能与金属矿化有关。研究区存在3片航放异常,位于研究区的东部、南部和西部。东部航放异常范围最大(达 100 km^2)、异常区铀(钍)矿化点最多,同时存在显著的水化异常,与富铀花岗岩有关^④(图6c)。西部与南部航放异常位于玉华

表1 玉华山地区与相山铀矿田成矿地质条件对比(据刘小宇等,1996;邱爱金等,2002修改)

Table 1 Comparison of metallogenic conditions between Yuhuashan area and the Xiangshan uranium orefield (after Liu Xiaoyu et al., 1996; Qiu Aijin et al., 2002)

地区名称	相山铀矿田	玉华山地区
大地构造位置	赣杭构造-火山岩带西南段抚州-永丰火山活动带	
成矿区带	乐安-广丰铀多金属成矿带与于山-大王山铀多金属成矿带交汇部位	
盆地类型	火山塌陷盆地	
控盆断裂	遂川-德兴深大断裂	
火山机构	发育完整,保存完好,为中心式塌陷火山机构	发育不完整,为边缘式塌陷火山机构
火山通道	少,主火山口1个	多,火山口7个
火山塌陷	发育	发育一般比较局部
环形离张构造	发育	东部发育
火山岩组合	流纹英安岩(136 Ma)、碎斑熔岩(135 Ma)、次火山岩(133~134 Ma)	碎斑熔岩(137 Ma)、碎斑花岗斑岩(136 Ma)、次火山岩(132 Ma)
次火山岩	发育,沿断裂构造,沿层间离张构造侵入	较发育,沿环形状构造侵入
火山岩铀含量	$2.76 \times 10^{-6} \sim 11.39 \times 10^{-6}$	$2.3 \times 10^{-6} \sim 14.6 \times 10^{-6}$
火山活动事件	晚侏罗世至早白垩世,活动时间短	
火山活动旋回	两个旋回	
火山活动强度	活动较强	早期活动较弱,最后一期活动剧烈
活动方式	以中心式喷发为主,形成的火山岩多产在独立的盆地内,具盆式火山岩特征	
变质基底	中-新元古代变质岩(绿片岩相-低角闪岩相)	
变质变形期次	三期变质作用(M ₁ ~M ₃)、四期变形作用(D ₁ ~D ₄)	
基底变质变形	脆性剪切变形、弯滑褶皱变形、深层次固态流变、熔融流动变形	
变质岩铀含量	$2.3 \times 10^{-6} \sim 4.0 \times 10^{-6}$	$2.5 \times 10^{-6} \sim 3.2 \times 10^{-6}$
侵入岩类型	西南侧见加里东期花岗岩	东部位燕山晚期花岗岩
岩性	片麻状黑云母二长花岗岩	细粒-中细粒花岗岩
与铀矿化关系	无直接关系	发育铀矿化
基底构造	发育,以EW向为主,次为SN向和NE向	发育,以NE向为主,次为SN向
盖层构造	发育,具明显的继承性以NE向为主,次为NW向和SN向	发育,具继承性,以NE向为主,次为SN向
与火山构造复合程度	好,尤其与火山塌陷构造复合程度好	较好,NE向、SN向构造与火山环状构造交接
推覆构造	发育,呈EW向	发育,呈NE向
平面形态	EW向椭圆形	SN向椭圆形
面积/km ²	400	302
火山岩总厚度	2900 m	889 m
构造岩浆热事件	中生代大规模火山喷发,白垩纪发生大规模裂隙,并伴有红盆的形成	
岩性界面	复杂多变	较复杂
热液蚀变	强,多期次	弱,期次少
剥蚀程度	适中	深
矿化垂幅	达千米	近800 m
矿化类型	水云母-萤石型、钠交代型	水云母-萤石型、钠交代型
矿石类型	铀-赤铁矿型、铀-绿泥石型 铀-萤石型、铀-硫化物型	铀-黄铁矿-绿泥石型、铀-萤石型 铀-红化型、铀-玉髓型
矿石矿物	沥青铀矿、含钍沥青铀矿、钍铀矿、铀石等	沥青铀矿、铀钍石
脉石矿物	钠长石、萤石、绿泥石、水云母、黄铁矿、绢云母、赤铁矿、方铅矿、闪锌矿、辉钼矿等	钠长石、萤石、绿泥石、水云母、黄铁矿、绢云母、赤铁矿等
围岩蚀变	以钠长石化、绿泥石化、赤铁矿化、萤石化、水云母化、绢云母化为主	以钠长石化为主,次为水云母化、绿泥石化、萤石化、黄铁矿化、赤铁矿化
控矿因素	断裂构造、火山岩、火山塌陷机构、次火山岩	断裂构造、火山机构、次火山岩
矿化品级与规模	品位≥0.3%的富矿占36.2%,已提交大、中、小型矿28个	品位0.1%~0.2%,已提交矿床1个

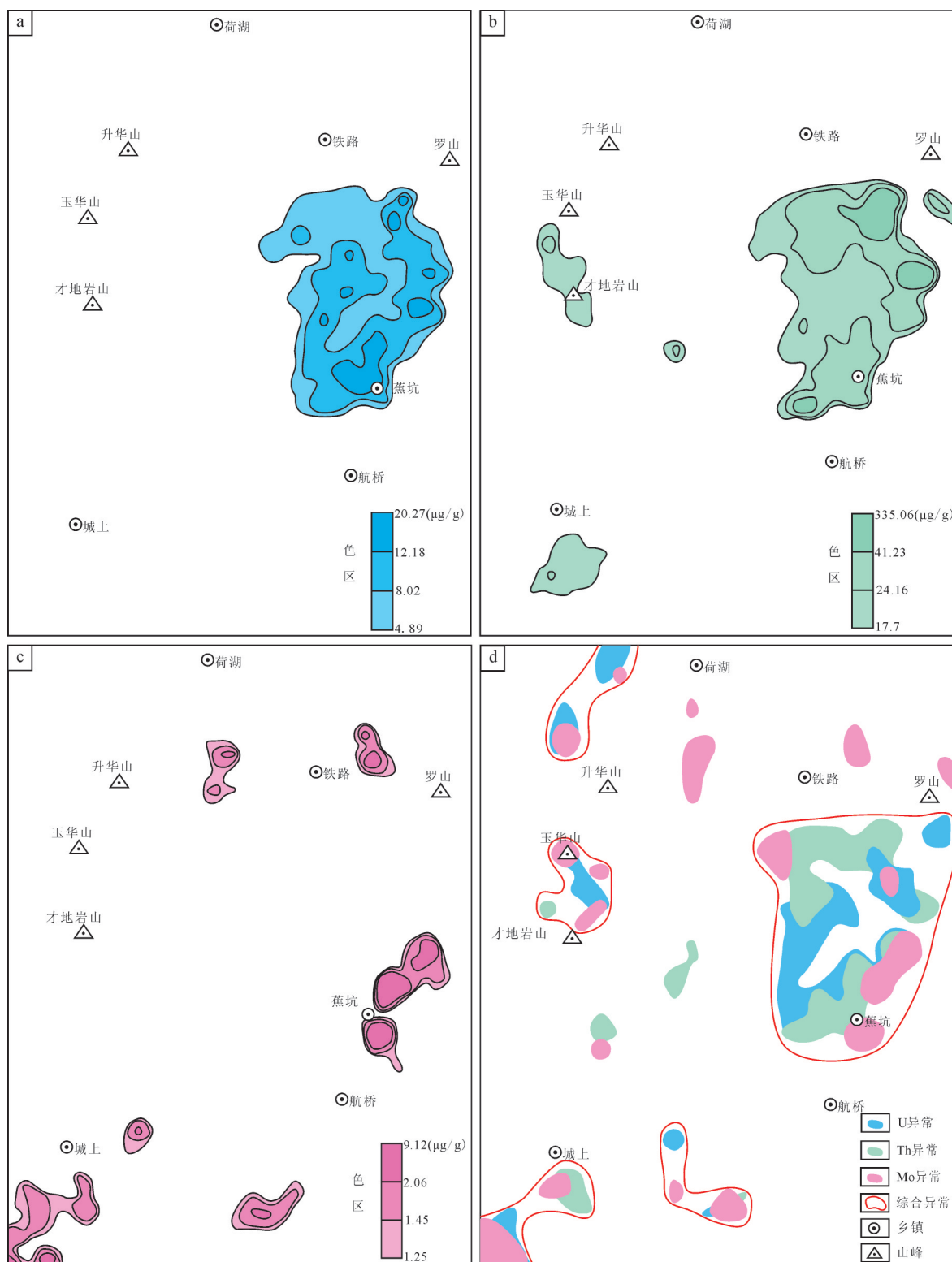


图5 玉华山地区水系沉积物地球化学测量U-Th-Mo异常图与综合异常图

a—U元素异常图;b—Th元素异常图;c—Mo元素异常图;d—U、Th、Mo元素综合异常图

Fig.5 U, Th, Mo anomaly maps and integrated anomaly map of geochemical stream sediment survey in Yuhuashan area

a—U anomaly map; b—Th anomaly map; c—Mo anomaly map; d—U, Th, Mo integrated anomaly map

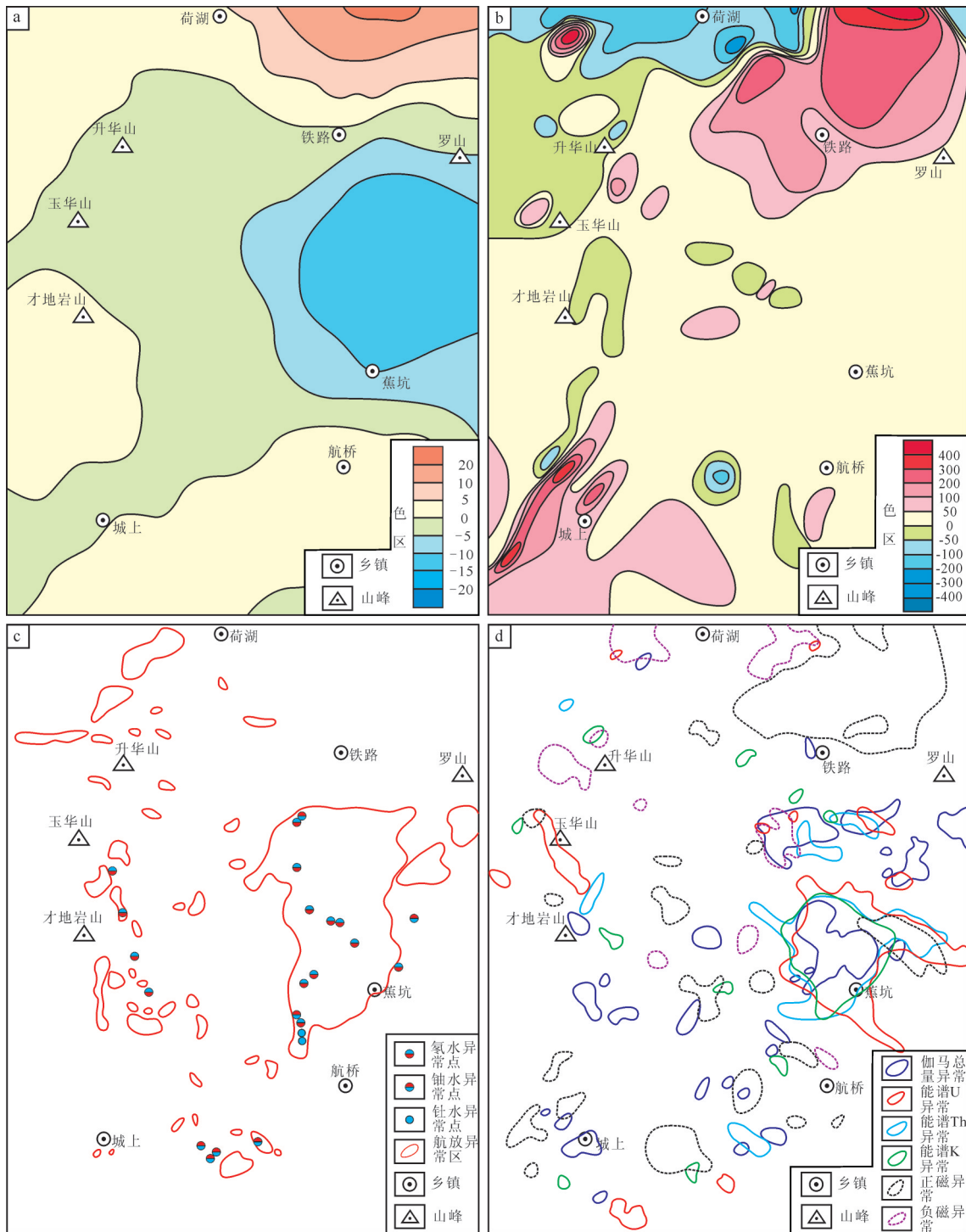


图6 玉华山地区地球物理测量异常图

a—1:20万重力异常图[®]; b—1:20万航磁异常图[®]

c—1:20万航放异常图[®]; d—1:5万放射性测量与高精磁综合异常图

Fig. 6 Geophysical survey anomaly map of Yuhuashan area

a—Gravity anomaly map (1:200000); b—Aeromagnetic anomaly map (1:200000);

c—Airborne radioactivity anomaly map (1:200000); d—Integrated anomaly map of radioactivity and high precision magnetometry (1:50000)

山一带,主要出露早白垩世火山岩与次火山岩,也存在水化异常,可能与富铀火山岩有关。另外在火山岩分布区还存在诸多分布面积较小的航放异常。

1:5万地面高精度磁法测量显示研究区磁异常介于-1347.7~1215.8 nT之间,异常与航磁异常基本吻合,正异常区位于徐山钨铜矿床周边,最高达1215.80 nT。异常梯度大、跳跃骤烈,由隐伏金属矿体所致(图6d)。紫云山花岗岩内正负异常伴生,介于-857.9~743.2 nT之间,西侧存在近南北向的正负异常骤变带,磁异常急剧变化,分布范围广,该区次火山岩墙、隐爆角砾岩筒与花岗岩接触变质带露出部位,广泛发育角岩化、钠交代、绿泥石化、硅化等蚀变,可能为隐伏铀矿体所致。火山岩与砂砾岩内磁场杂乱,异常形状不规则,异常走向不明显,可能是岩性与火山构造的多变性所致。1:5万地表放射性异常与航放异常基本吻合,存在正异常区1处,位于紫云山花岗岩内及周边,异常强度高,面积广(约120 km²),水化异常明显,该异常可能与铀矿化有关。此外,在火山岩分布区存在零星正异常,可能与火山岩分布区的断裂蚀变带有关,但规模小,异常强度低。而白垩纪砂砾岩与元古代浅变质岩分布区放射性测量值接近背景值,无显著异常。

地球物理综合异常主要集中于紫云山花岗岩区与火山盆地东侧边缘,该地区磁异常与放射性异常相互叠加,异常强度高,范围广(图6d)。其中,又以紫云山花岗岩分布区综合异常最为显著,分布范围最广,该异常区内已探明铀矿床1处、矿点与矿化点多处,可能为矿致异常。火山盆地边缘的综合异常强度低、分布范围小,异常区形态不规则,与铀矿化信息匹配程度低,反映铀矿化程度不高。在火山盆地内,综合异常仅有零星分布,异常强度低、范围小,对应于火山岩或次火山岩的构造发育强烈部位,推测由构造活动所致,仅个别综合异常与铀矿化信息匹配。

8 综合信息找矿模型

8.1 找矿有利因素

研究区内铀矿化产出部位受富铀岩浆岩、多期构造叠加与热液蚀变带,三者共同控制。铀矿化分布与火山岩和花岗岩的出露区,受火山构造、北东向构造、南北向构造控制,产于有断裂所引起的热

液蚀变带内。区内铀矿化与其独特的成矿地质背景密不可分,区内找矿有利因素:(1)有利的大地构造背景:研究区位于赣杭构造带西南段,在多期次、多性质的构造-岩浆-热液流体的共同作用下,为成矿流体、成矿物质的迁移与富集提供了先决条件,为成矿介质提供了优质的储矿空间。(2)有利的基底变质岩:研究区基底变质岩经历了长期变形、变质作用,不仅有利于铀元素的迁移、富集,也有利于变质基底构造的发育,为区域铀成矿作用提供了良好的成矿条件。(3)有利的富铀岩浆活动:研究区长期的岩浆活动可为成矿提供热能,而富铀的火山岩与花岗岩可为成矿提供了丰富的物质来源。在叠加了北东向与南北向断裂构造交汇部位便是铀矿化的有利空间。(4)有利的成矿构造网络:以北东向为主体的断裂构造及火山构造构成了热液流体循环系统,局部次火山岩的侵位与隐爆角砾岩筒发育地段是构造-岩浆-热液活动强烈区域,也是成矿有利区域。(5)有利的热液活动:区内酸性与碱性蚀变叠加,广泛发育的钠交代、绿泥石化、水云母化与硅化等蚀变是热液流体强烈活动的标志,蚀变带规模与矿化规模存在一定的相关性。(6)有利的矿化信息:区内探明的铀矿床、矿点与矿化点是良好的找矿标志;盆地边缘断裂带内产出的大量萤石脉,表明在成岩作用之后,深部岩浆存在大量富挥发分气液,该类气液是成矿流体中重要的矿化剂。(7)有利的物化探异常:研究区内存在航空放射性伽玛异常、放射性水化异常、地面高磁异常与放射性异常分布范围广、异常强度大,与铀矿化信息较为匹配,显示出区内找矿潜力大。

8.2 综合信息找矿模型

研究区内探明的铀矿床、矿点和矿化点地质特征与华南热液铀矿床相似,均属于热液脉型铀矿化。矿化受富铀岩浆岩、构造与热液蚀变带三者联合控制,其中断裂构造带又是最为重要的控矿因素。在综合分析研究区成矿地质背景、铀矿化特征、地球化学与地球物理条件的基础上,结合现代铀成矿理论与相山铀矿勘查经验,构建了地质找矿模型(图7)、综合信息找矿模型(图8)与综合信息找矿参数特征(表2),为研究区铀矿勘查提供了重要的依据。

8.3 找矿方向

研究区内铀矿化受断裂带与火山构造控制明

显,其中两类断裂构造相互叠加部位是岩浆、热液活动强烈区域,亦是找矿的有利区域。当断裂带内有次火山岩充填后,更是铀矿化有利的部位。南北向为山—筒山断裂带便是这种情况。该断裂带全长近20 km,带内为硅化碎裂岩,带宽几十米至百余米,产状 $90^{\circ}\angle 80^{\circ}$,发育一系列同方向次级断裂,被晚期次火山岩侵位,局部发育隐爆角岩筒构造。带两侧发育强烈的钠交代、黄铁矿化、绿泥石化、红化、绢云母化、硅化,形成红化蚀变带,宽约数十至百米,延伸数十千米。构造带已控制铀矿床1处、矿点2处及多处铀矿化点;沿带分布有明显的放射性异常、水化异常,磁异常正负交替。断裂构造与次火山岩体叠加部位、隐爆角砾岩筒是铀矿化定位空间,热液蚀变带是良好的找矿标志。总体而言,该断裂构造带是研究区的重要找矿远景区,是铀资源量取得重大突破地段,建议部署有关工程,查明铀资源量。

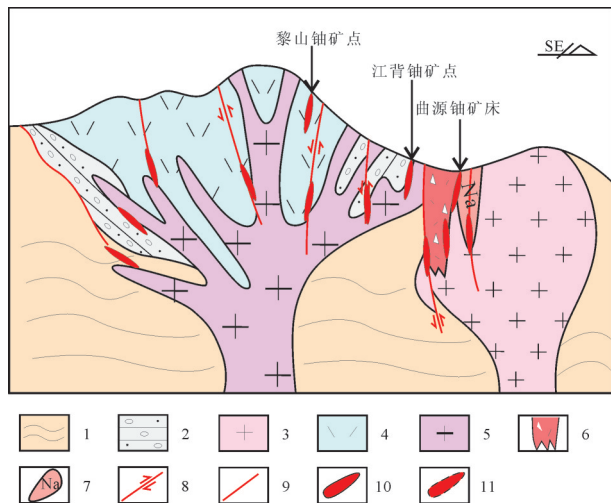


图7 玉华山地区铀矿地质找矿模型

1—中—新元古代浅变质岩;2—晚三叠世砂砾岩;3—晚侏罗世花岗岩;4—早白垩世火山岩;5—早白垩世次火山岩;6—隐爆角砾岩筒;7—钠交代岩;8—断层;9—性质不明断层;10—已探明铀矿体;11—预测铀矿体

Fig.7 Uranium geological prospecting model of Yuhuashan area

1—Mesoproterozoic—Neoproterozoic metamorphic rock;
2—Late Triassic glutenite; 3—Late Jurassic granite;
4—Early Cretaceous volcanic rock; 5—Early Cretaceous sub-volcanic rocks; 6—Cryptoexplosive breccia pipe; 7—Sodium metasomatic rock;
8—Fault; 9—Unknown fault; 10—Identified uranium orebody;
11—Predicted uranium orebody

9 结论

玉华山地区是赣杭断裂带上重要的铀矿远景区,成矿条件与相山铀矿田颇为相似。在充分分析该区成矿地质条件、地球化学条件、地球物理条件的基础上,与相山铀矿田进行了系统对比,构建了综合信息找矿模型与相关特征参数,并取得了以下认识:

(1)玉华山地区成矿条件较为有利,富铀岩石与自变质作用为成矿提供了好的物质基础,多期与多方向的断裂构造为成矿提供了良好的流体循环系统,不同类型的热液活动为铀的迁移创造了良好环境。

(2)研究区铀矿化属于热液脉型铀矿化,与相山铀矿田相比,成矿条件与矿化特征基本相同,但在火山构造、火山活动强度、热液活动强度、剥蚀程度

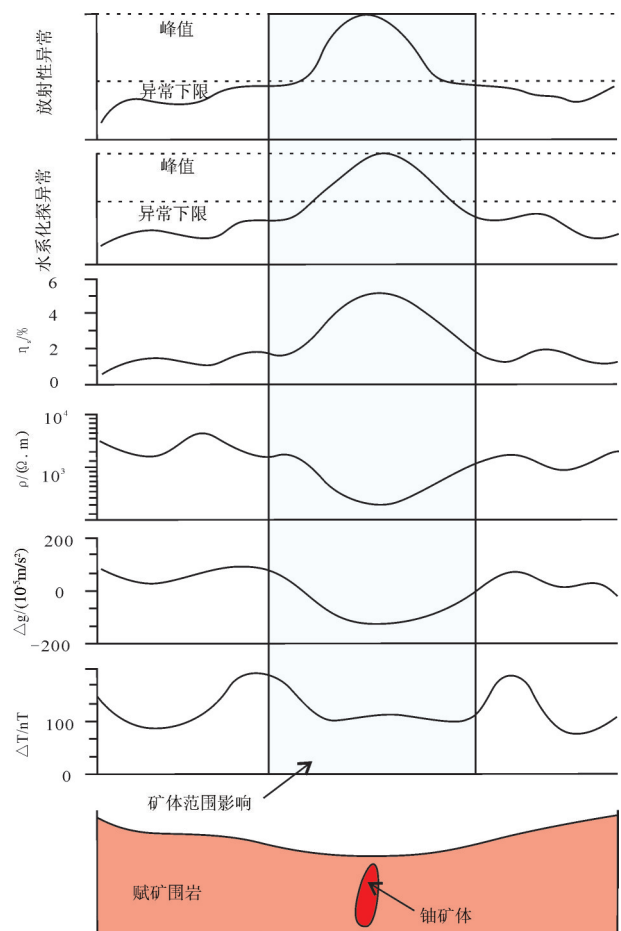


图8 玉华山地区铀矿综合信息找矿模型

Fig.8 Comprehensive information prospecting model of uranium ore deposit for Yuhuashan area

表2 玉华山地区铀矿综合信息找矿参数特征

Table 2 Parameters of comprehensive information exploration for uranium ore deposit in Yuhuashan area

信息类型	标志分类	参数特征	
地质信息	区域构造	构造单元 断裂	扬子古陆块与华夏古陆块拼合带中段, 赣杭轴成矿带西南段 火山构造及近南北向、北东向区域断裂构造
	区域岩性	沉积建造	原岩为陆源碎屑岩偶夹碳酸盐岩沉积建造
		岩性	绢云千枚岩、变质粉砂岩, 含钙质夹层
		变质作用	区域变质作用, 变质程度浅, 为绿片岩相
		岩层破碎	矿体周围岩层整体破碎, 节理发育
	区域成因	岩浆活动时期	燕山期, 具多期次火山喷发和岩浆侵入活动特征
		成因类型	火山喷发、溢流及岩浆侵入作用
		岩性	碎斑熔岩、碎斑花岗岩斑岩及花岗岩
		岩石类型	属陆壳重熔型火山杂岩
		源区	源于成熟度较高的上地壳, 以变质沉积岩为主
		岩石地球化学	富硅、富碱、铝过饱和
		U含量	成矿元素含量高, 是地壳克拉克值得数到数十倍
	地球物理信息	成矿母岩	燕山期富U的碎斑熔岩、碎斑花岗岩斑岩及花岗岩
		赋矿围岩	中—新元古代浅变质岩、火山岩、次火山岩与花岗岩
		围岩蚀变	钠交代、赤铁矿化、绿泥石化、水云母化、萤石化等酸碱蚀变
		表生氧化矿物	钙铀云母、铜铀云母、铝铀云母等次生铀矿物
		矿化类型	钠交代型、水云母-萤石型
		矿化特征	与断裂构造带上产出的多期次酸碱蚀变关系密切
矿化范围		火山岩、次火山岩和花岗岩体内部, 岩体外接触带附近	
矿体形态		主要为脉状, 少数为层状、似层状矿体	
成矿时代		燕山期	
矿床类型		中低温热液脉型铀矿床	
矿床成因	富U成矿热液沿断裂、裂隙等上侵, 在有利物理化学环境沉淀富集		
地球物理信息	航磁特征	中等强度的航磁异常, 花岗岩体外接触带有磁性壳	
	布格重力特征	富铀花岗质岩体处于负异常区	
	激电测量特征	具低电阻率、高极化率特征	
	地面磁法测量特征	具中-低磁异常特征, 异常梯度变化大地段是找矿有利区域	
	土壤 ²¹⁰ Po测量特征	具 ²¹⁰ Po正异常特征	
	放射性伽马测量特征	具放射性伽马正异常特征	
地球化学信息	能谱U/Th/K测量特征	具能谱U-Th-K正异常特征	
	铀与氦水测量特征	具铀、氦水异常	
	水系沉积物地球化学特征	具U-Th-Mo综合异常, 衬度高, 浓集中心明显, 分带重合好	
地球化学信息	土壤地球化学特征	具U-Th-Pb等元素的综合异常	
	岩石地球化学特征	具U-Sb-Mo-W原生异常	

等方面差异较大。

(3)根据成矿地质条件、水系地球化学异常和高磁与放射性异常构建了研究区综合信息找矿模型, 认为断裂构造发育、多期热液活动强烈、U-Th-Mo

综合正异常、高磁正负异常交替、放射性正异常等特征的叠加区是有利的铀矿找矿远景区。

(4)区内富铀岩浆岩、断裂构造与热液蚀变带三者联合控矿特征显著, 其中南北向为山—筒山断裂

带是研究区最为有利的找矿远景区,建议部署相关勘查工程,查明铀资源量。

致谢:感谢匿名审稿专家及编辑部老师在本文修改过程中提出的宝贵意见。

注释

① 东华理工大学. 2015. 江西玉华山火山盆地矿产远景调查成果报告[R].

② 江西地质矿产调查研究大队. 1995. 1:5万七琴街幅、店下幅、洛市幅、白陂幅区域地质调查报告与附图[R].

③ 江西省核工业地质局261大队. 2009. 江西省玉华山地区铀资源评价[R].

References

- Asadi H, Kianpouryan S, Lu Y, Mccuaig T. 2014. Exploratory data analysis and C-a fractal model applied in mapping multi-element soil anomalies for drilling: a case study from the Sari Gunay epithermal gold deposit, NW Iran[J]. *Journal of Geochemical Exploration*, 145: 233–241.
- Chen Diyun, Xu Weichang. 1993. Geochemical characteristics of uranium of Chencai group metamorphic rock[J]. *Uranium Geology*, 9(4): 31–37(in Chinese with English abstract).
- Chen Zhengle, Wang Yong, Zhou Yonggui, Han Fengbing, Wang Pingan, Gong Hongliang, Shao Fei, Tang Xiangsheng, Xu Jinshan. 2013. SHRIMP U–Pd dating of zircons from volcanic–intrusive complexes in the Xiangshan uranium ore field, Jiangxi Province, and its geological implications[J]. *Geology in China*, 35(1): 217–231(in Chinese with English abstract).
- Cuney M. 2009. The extreme diversity of uranium deposits[J]. *Mineralium Deposita*, 44(1): 3–9.
- Cuney M. 2014. Felsic magmatism and uranium deposits[J]. *Bulletin De La Societe Geologique De France*, 185(2): 75–92.
- Dahlkamp F. 2013. *Uranium Ore Deposits*[M]. Springer Science & Business Media, 1–460.
- Deng Jiarui, Zhang Zhiping. 1989. Gan–Hang tectonic belt and its geologic significance[J]. *Uranium Geology*, 5(1): 15–21(in Chinese with English abstract).
- Deng Jiarui, Zhang Zhiping. 1999. Discussion on regional geotectonic setting of Ganhang tectonic belt[J]. *Uranium Geology*, 15(2): 8–13 (in Chinese with English abstract).
- Du Letian. 1982. *Corpus of Granite–type Deposits*[M]. Beijing: Atomic Energy Press, 1–404 (in Chinese).
- Fan Honghai, Ling Hongfei, Wang Dezi, Shen Weizhou, Liu Changshi, Jiang Yaohui. 2001. Ore–forming material sources for Xiangshan uranium ore–field in Jiangxi Province: Evidence from Nd–Sr–Pb isotopes[J]. *Geological Journal of China Universities*, 7(2): 139–145(in Chinese with English abstract).
- Fang Xiheng, Fang Maolong, Luo Yi, Liu Rongrong, Liu Quan, Zhang Minglin, Wang Shuhong, Liu Hu, Fu Jing, Wang Yuanzhi, Zhan Junwei, Xie Yingchun. 2012. The potential evaluation of volcanic type uranium resources in China[J]. *Uranium Geology*, 28(6): 342–348(in Chinese with English abstract).
- Feng Mingyue, He Debao. 2012. Uranium rich granite and uranium productive granite in South China[J]. *Uranium Geology*, 28(4): 199–207(in Chinese with English abstract).
- Gilder S, Keller G, Luo M, Goodell P. 1991. Eastern Asia and the Western Pacific timing and spatial distribution of rifting in China[J]. *Tectonophysics*, 197(2): 225–243.
- Goodell P, Gilder S, Fang X. 1991. A preliminary description of the Gan–Hang failed rift, southeastern China[J]. *Tectonophysics*, 197(2): 245–255.
- Hu Gongren, Liu Congqiang, Zhang Bangtong, Yu Ruilian. 2000. Composition and structural metamorphism–deformation features of the central Jiangxi metamorphic zone[J]. *Regional Geology of China*, 19(4): 375–381 (in Chinese with English abstract).
- Hu Gongren, Yu Ruilian. 2004. Redivision of the metamorphic facies zonation and definition of metamorphism P–T of metamorphic rocks belt in central Jiangxi province[J]. *Geology of Chemical Minerals*, 26(2): 65–75(in Chinese with English abstract).
- Hu Gongren, Zhang Bangtong. 1997. Composition, evolution and basic structural framework of the central Jiangxi metamorphic basement[J]. *Jiangxi Geology*, 11(3): 47–51 (in Chinese with English abstract).
- Hu Gongren, Zhang Bangtong. 1998. Nerodymium isotope composition and source materials of the meta–basement in central Jiangxi Province[J]. *Acta Petrologica et Mineralogica*, 17(1): 36–41 (in Chinese with English abstract).
- Hua Renmin, Chen Peirong, Zhang Wenlan, Lu Jianjun. 2005. Three major metallogenic events in Mesozoic in South China[J]. *Mineral Deposits*, 24(2): 99–107(in Chinese with English abstract).
- Huang Changsheng, Liao Xianzheng, Lei Liangcheng. 2001. The fixed position mechanism of high intrusive mixtite in Yuhua mountain[J]. *Journal of East China Geological Institute*, 24(2): 104–108(in Chinese with English abstract).
- Jiang Shaoqing, Sun Xingguo, Yang Tiezheng, Yin Xianbo, Wang Ce, Pan Yanbin. 2014. Integrated anomaly model and metallogenic prediction of the Duolong porphyry copper–gold ore concentration area in northern Tibet[J]. *Geology in China*, 36(2): 497–509(in Chinese with English abstract).
- Jiang Y, Zhao P, Zhou Q, Liao S Y, Jin G D. 2011. Petrogenesis and tectonic Implications of early cretaceous S and A–type Granites in the Northwest of the Gan–Hang Rift, Se China[J]. *Lithos*, 121(1): 55–73.
- Jin Jingfu, Hu Ruizhong. 1990. Physicochemical conditions of mineralization of XW uranium deposit[J]. *Journal of Chengdu College of Geology*, 17(3): 1–9(in Chinese with English abstract).
- Li Xiang. 2012. Petrogenesis and uranium–bearing capability evaluation of the Yuhua volcanic–intrusive complex in the

- Jiangxi Province[D]. Nanjing: Nanjing University, 1–45(in Chinese with English abstract).
- Liu Xiaoyu, Chen Zhaobo. 1996. Continental Volcanism and Uranium Mineralization[M]. Beijing: Atomic Energy Press, 1–167(in Chinese).
- Liu Ying. 2013. Geochronology and Geochemical of Ziyunshan Pluton at Yuhuashan Area in Jiangxi and its Geological Significance[D]. Nanchang: East China University of Technology, 1–51(in Chinese with English abstract).
- Mercadier J, Annesley I, Mckechnie C, Bogdan T, Creighton S. 2013. Magmatic and metamorphic uraninite mineralization in the western margin of the trans– hudson orogen (saskatchewan, Canada): A uranium source for unconformity– related uranium deposits[J]. *Economic Geology*, 108(5): 1037–1065.
- Pei Rongfu, Mei Yanxiong, Qu Hongying, Wang Haolin. 2013. Geological tectonic settings, depositional environments and ore–hosting rock assemblages for mineral deposits model with universality[J]. *Geology in China*, 35(1): 31–41(in Chinese with English abstract).
- Qiu Aijin, Guo Lingzhi, Zheng Dayu. 2002. The Constraint of Xiangshan Super Mineralization from Continental Tectonics[M]. Beijing: Geological Press, 1–103(in Chinese).
- Seo J, Choi S, Dong W, Park J, Chang W. 2015. A new genetic model for the Triassic Yangyang iron– oxide– apatite deposit, South Korea: constraints from in situ U–Pb and trace element analyses of accessory minerals[J]. *Ore Geology Reviews*, 70: 110–135.
- Shan Lin, Liu Xiaodong. 1985. A study on inclusions of main rocks in Xiangshan and some other volcanic basins[J]. *Acta Petrologica Mineralogica et Analytica*, 4(4): 289–294 (in Chinese with English abstract).
- Shao Fei. 2011. Trisection distribution pattern of volcanic type uranium deposits and metallogenic prognosis in northeast section of Qinhang metallogenic belt[J]. *Uranium Geology*, 27(5): 286–292 (in Chinese with English abstract).
- Shao Fei, Zhu Yonggang, Li Jia, He Xiaomei. 2010. Uranium metallogenic regularity and further exploration in Gan– Hang tectono– volcanic belt[J]. *Shanghai Geology*, 31(Supp.): 133–136 (in Chinese with English abstract).
- Shen Weizhou, Zhang Zuhuan, Zhang Bangtong. 1988. Strontium, oxygen and lead isotopic geochemical studies of U– bearing granites in Southern China[J]. *Uranium Geology*, 4(1): 23–30(in Chinese with English abstract).
- Sun Jian, Chen Yuelong, Li Dapeng. 2011. New advances in geochemical exploration of concealed deposits[J]. *Advances in Earth Science*, 200(8): 822–836(in Chinese with English abstract).
- Tan Hua, Chen Guoyong, Zhao Zheng, Lu Guangyan, Zou Jianbo. 2015. Achievements a significance of lead– zinc exploration in Zhangwei–Wuzhishan area of Guizhou Province[J]. *Geological Survey of China*, 7(4): 1–7(in Chinese with English abstract).
- Tang Juxing. 2003. The study on Metallogeny and Localizing Forecast of Yulong Porphyry Copper– molybdenum Mineralization, Xizang (Tibet)[D]. Chengdu: Chengdu University of Technology, 1–175(in Chinese with English abstract).
- Thomas D, Matthews R, Sopuck V. 2002. Athabasca basin (Canada) unconformity– type uranium deposits: Exploration model, current mine developments and exploration directions[J]. *Geology and Ore Deposits*, 24: 15–18.
- Wang Dezi, Zhou Jincheng. 1983. Autoclases volcanic rock–intrusive rock and exploring significance[J]. *Geology in China*, 8(10): 21–23 (in Chinese with English abstract).
- Wang Jianfeng. 1986. Uranium Geochemical Tutorial[M]. Beijing: Atomic Energy Press, 1–572(in Chinese with English abstract).
- Wang Shicheng. 2010. The new development of theory and method of synthetic information mineral resources prognosis. *Geological Bulletin of China*[J], 29(10): 1399–1403(in Chinese with English abstract).
- Xia Lingqi, Xia Zuchun, Zhang Cheng, Clocchiatti R, Joron JL, Dardel J. 1992. Differentiation mechanism and evolution of high level magma reservoir from Xiangshan, China[J]. *Acte Retrologica Science*, 8(3): 205–221, 303(in Chinese with English abstract).
- Xu Haijiang, Lai Shaocong. 1988. Approach to the lithologic features and the origin of the volcanic rocks in Xiangshan and its adjacent areas[J]. *Geoscience*, 2(4): 440–450(in Chinese with English abstract).
- Yang Shuiyuan. 2013. Petrogenesis and Geodynamic Setting of Magmatic Rocks from Uranium– bearing Volcanic Basins, Gan– Hang belt, Southeast China[D]. Nanjing: Nanjing University, 1–130(in Chinese with English abstract).
- Yu Dagan. 1992a. The structure environment, rock– magma system mineral– forming series and pattern of volcanic mineral– forming of uranium deposit in southeast of China[J]. *Journal of East China Geological Institute*, 15(1): 11–22(in Chinese with English abstract).
- Yu Dagan. 1992b. Metallogenic environment and genetic model of uranium in meso– cenozoic volcano– magmatic belt in Southeast China[J]. *Uranium Geology*, 8(2): 75–82(in Chinese with English abstract).
- Yu Dagan, Wu Rengui, Chen Peirong. 2005. Uranium Geology[M]. Harbin: Harbin Engineering University Press, 1–450(in Chinese).
- Yu X, Wu G, Zhang D, Yan T, Di Y. 2006. Cretaceous extension of the Gan– Hang tectonic belt, Southeastern China: Constraints from geochemistry of volcanic rocks[J]. *Cretaceous Research*, 27(5): 663–672.
- Yu Xinqi, Wu Ganguo, Shu Liangshu, Yan Tiezeng, Zhang Da, Di Yongjun. 2006. The cretaceous tectonism of the Gan– Hang tectonic belt, Southeastern China[J]. *Earth Science Frontiers*, 13(3): 31–43(in Chinese with English abstract).
- Zhang Bangtong, Ni Qisheng, Dai Yongshan, Wang Xiangsheng. 1988.

- The relationships of the formation of genaite-type uranium deposits with the crustal evolution along the active continental margin of south China[J]. *Mineral Deposits*, 7(4): 43–51(in Chinese with English abstract).
- Zhang Chengjiang. 1996. The genesis of uranium and non-uranium bearing granites from several complexes in South China and their relationship to uranium mineralization[J]. *Journal of Chengdu College of Geology*, 23(4): 33–40(in Chinese with English abstract).
- Zhai Jianping. 1990. Three kinds of genetic models for granite type uranium deposits and their significance search of deposit[J]. *Journal of Nanjing University(Natural Science Edition)*, 26(1): 124–130(in Chinese with English abstract).
- Zhai Yusheng. 2007. Earth system, metallogenic system to exploration system[J]. *Earth Science Frontiers*, 14(1): 172–178(in Chinese with English abstract).
- Zhang C, Yu J, O'reilly S, Griffin W L, Qian J. 2016. Granulite facies xenoliths from the Yuhuashan complex, central Jiangxi, South China: Constraints on Late Palaeozoic orogeny and middle-lower crust components[J]. *Journal of Metamorphic Geology*, 34(1): 45–61.
- Zhang Xingpu. 1999. Formation and evolution of Mesozoic volcanic basins in Gan-Hang tectonic belt[J]. *Uranium Geology*, 15(1): 19–24(in Chinese with English abstract).
- Zhang Wanliang, Liu Dechang, Li Ziyang. 2005. Comparative research of litho geochemistry for Jiulongzhang and Xiangshan volcano-intrusive complexes[J]. *Geoscience*, 19(2): 205–210(in Chinese with English abstract).
- Zhang Wangliang, Li Ziyang, Liu Dechang, Zhao Yingjun. 2015. The geotectonic activity trail of Fuzhou-Yongfeng fault and its significance to uranium ore exploration in central Jiangxi Province[J]. *Contributions to Geology and Mineral Resources Research*, 30(1): 23–29(in Chinese with English abstract).
- Zhong Fujun, Pan Jiayong, Liu Xiansen, Zhang Yong, Liu Guoqi, Liu Ying. 2014. A metallogenic model based on comprehensive information and genesis analysis for the Houerdaogou copper-gold deposit in Inner Mongolia[J]. *Geology and Exploration*, 452(3): 432–444(in Chinese with English abstract).
- Zhou Xuegui, Chen Lugeng, Fan Bin. 1994. Lithodemic division and emplacement mechanism of high compound plutonic complex in Yuhuashan, Jiangxi[J]. *Jiangxi Geology*, 8(4): 296–308(in Chinese with English abstract).
- Zhou Yulong, Cheng Jixing, Fu Jianping. 2015. Ore-controlling characteristics of Weishan-Tongshan fault zone in the uranium deposit of volcanic basin of Yuhua mountain[J]. *World Nuclear Geoscience*, 126(1): 13–18(in Chinese with English abstract).
- 质, 9(4): 31–37.
- 陈正乐, 王永, 周永贵, 韩凤彬, 王平安, 宫红良, 邵飞, 唐湘生, 徐金山. 2013. 江西相山火山-侵入杂岩体锆石 SHRIMP 定年及其地质意义[J]. *中国地质*, 354(1): 217–231.
- 邓家瑞, 张志平. 1989. 赣杭构造带及其地质意义[J]. *铀矿地质*, 5(1): 15–21.
- 邓家瑞, 张志平. 1999. 赣杭构造带区域大地构造背景的探讨[J]. *铀矿地质*, 15(2): 8–13.
- 杜乐天. 1982. 花岗岩型铀矿床文集[M]. 北京: 原子能出版社, 1–404.
- 范洪海, 凌洪飞, 王德滋, 沈渭洲, 刘昌实, 姜耀辉. 2001. 江西相山铀矿田成矿物质来源的 Nd, Sr, Pb 同位素证据[J]. *高校地质学报*, 7(2): 139–145.
- 方锡珩, 方茂龙, 罗毅, 刘蓉蓉, 刘权, 张明林, 王树红, 刘祐, 付锦, 汪远志, 张俊伟, 谢迎春. 2012. 全国火山岩型铀矿资源潜力评价[J]. *铀矿地质*, 28(6): 342–348.
- 冯明月, 何德宝. 2012. 华南富铀花岗岩和产铀花岗岩特征[J]. *铀矿地质*, 28(4): 199–207.
- 胡恭任, 刘从强, 章邦桐, 于瑞莲. 2000. 赣中变质岩带的组成及构造变质变形特征[J]. *地质通报*, 19(4): 375–381.
- 胡恭任, 于瑞莲. 2004. 赣中变质岩带变质带的重新划分及变质作用 P-T 条件的确定[J]. *化工矿产地质*, 26(2): 65–75.
- 胡恭任, 章邦桐. 1997. 赣中变质基底的组成演化及其基本结构格局[J]. *江西地质*, 11(3): 47–51.
- 胡恭任, 章邦桐. 1998. 赣中变质基底的 Nd 同位素组成和物质来源[J]. *岩石矿物学杂志*, 17(1): 36–41.
- 华仁民, 陈培荣, 张文兰, 陆建军. 2005. 论华南地区中生代 3 次大规模成矿作用[J]. *矿床地质*, 24(2): 99–107.
- 黄长生, 廖显珍, 雷良诚. 2001. 玉华山高位侵入杂岩定位机制[J]. *华东地质学院学报*, 24(2): 104–108.
- 江少卿, 孙兴国, 杨铁铮, 李丽, 印贤波, 王策, 潘燕兵. 2014. 藏北多龙斑岩铜金矿集区综合信息找矿模型研究[J]. *中国地质*, 361(2): 497–509.
- 金景福, 胡瑞忠. 1990. XW 铀矿床成矿物理化学条件[J]. *成都地质学院学报*, 17(3): 1–9.
- 李响. 2012. 江西玉华山火山-侵入杂岩成因机制及产铀能力评价[D]. 南京: 南京大学, 1–45.
- 刘小宇, 陈肇博. 1996. 大陆火山作用与铀成矿[M]. 北京: 原子能出版社, 1–167.
- 刘颖. 2013. 江西省玉华山地区紫云山岩体年代学、地球化学特征及地质意义[D]. 南昌: 东华理工大学, 1–51.
- 裴荣富, 梅燕雄, 瞿泓滢, 王浩琳. 2013. 矿床类型模型的地质构造背景、成矿环境和容矿岩石组合[J]. *中国地质*, 354(1): 31–42.
- 邱爱金, 郭令智, 郑大瑜. 2002. 大陆构造作用对相山富大铀矿形成的制约[M]. 北京: 地质出版社, 1–103.
- 单林, 刘晓东. 1985. 相山等火山盆地主体岩石包裹体研究[J]. *岩石矿物及测试*, 4(4): 289–294.
- 邵飞, 朱永刚, 李嘉, 何晓梅. 2010. 赣杭构造火山岩带铀成矿规律及深入找矿[J]. *上海地质*, 31(增刊): 133–136.

附中文参考文献

陈迪云, 徐伟昌. 1993. 陈蔡群变质岩铀的地球化学特征[J]. *铀矿地*

- 邵飞. 2011. 钦杭成矿带北东段火山岩型铀矿定向三等距分布规律及成矿预测[J]. 铀矿地质, 27(5): 286-292.
- 沈渭洲, 张祖还, 章邦桐. 1988. 华南产铀花岗岩锶、氧和铅同位素地球化学研究[J]. 铀矿地质, 4(1): 23-30.
- 孙剑, 陈岳龙, 李大鹏. 2011. 隐伏矿床勘查地球化学新进展[J]. 地球科学进展, 200(8): 822-836.
- 谭华, 陈国勇, 赵征, 陆光艳, 邹建波. 2015. 贵州张维一五指山地区铅锌矿评价成果及意义[J]. 中国地质调查, 7(4): 1-7.
- 唐菊兴. 2003. 西藏玉龙斑岩(铜)矿成矿作用与矿床定位预测研究[D]. 成都: 成都理工大学, 1-175.
- 王德滋, 周金城. 1983. 自碎火山-侵入岩及其找矿意义[J]. 中国地质, 8(10): 21-23.
- 王剑峰. 1986. 铀地球化学教程[M]. 北京: 原子能出版社, 1-572.
- 王世称. 2010. 综合信息矿产预测理论与方法体系新进展[J]. 地质通报, 185(10): 1399-1403.
- 夏林圻, 夏祖春, 张诚, Clocchiatti R, Joron J. L, Dardel J. 1992. 相山高位岩浆房分异机制和演化[J]. 岩石学报, 8(3): 205-221, 303.
- 徐海江, 赖绍聪. 1988. 相山及邻区七个火山盆地火山岩岩性特征及成因探讨[J]. 现代地质, 2(4): 440-450.
- 杨水源. 2013. 华南赣杭构造带含铀火山盆地岩浆岩的成因机制及动力学背景[D]. 南京: 南京大学, 1-130.
- 余达淦, 吴仁贵, 陈培荣. 2005. 铀资源地质学[M]. 哈尔滨: 哈尔滨工程大学出版社, 1-450.
- 余达淦. 1992a. 中国东南部火山岩型铀矿成矿构造环境、岩浆岩体系、成矿系列及成矿模式[J]. 华东地质学院学报, 15(1): 11-22.
- 余达淦. 1992b. 中国东南部中生代火山-岩浆带中铀的成矿环境及成矿模式[J]. 铀矿地质, 8(2): 75-82.
- 余心起, 吴淦国, 舒良树, 颜铁增, 张达, 狄永军. 2006. 白垩纪时期赣杭构造带的伸展作用[J]. 地学前缘, 13(3): 31-43.
- 翟建平. 1990. 花岗岩型铀矿床的三种成矿模式及其找矿意义[J]. 南京大学学报(自然科学版), 26(1): 124-130.
- 翟裕生. 2007. 地球系统、成矿系统到勘查系统[J]. 地学前缘, 14(1): 172-181.
- 张成江. 1996. 华南几个杂岩体中产铀与非产铀花岗岩的成因及其与铀成矿关系[J]. 成都理工学院学报, 23(4): 33-40.
- 张万良, 李子颖, 刘德长, 赵英俊. 2015. 赣中抚州-永丰断裂新构造活动踪迹及其找矿意义[J]. 地质找矿论丛, 30(1): 23-29.
- 张万良, 刘德长, 李子颖. 2005. 江西九龙岗和相山火山-侵入杂岩岩石地球化学的对比研究[J]. 现代地质, 19(2): 205-210.
- 张星蒲. 1999. 赣杭构造带中生代火山盆地的形成和演化[J]. 铀矿地质, 15(1): 19-24.
- 章邦桐, 倪琦生, 戴永善, 王湘生. 1988. 华南花岗岩型铀矿床的形成与活动大陆边缘陆壳演化的关系[J]. 矿床地质, 7(4): 43-51.
- 钟福军, 潘家永, 刘贤森, 张勇, 刘国奇, 刘颖. 2014. 内蒙后二道沟铜金矿床综合信息找矿模型及矿床成因探讨[J]. 地质与勘探, 452(3): 432-444.
- 周雪桂, 陈鲁根, 范斌. 1994. 江西玉华山高位复式深成杂岩体岩石谱系单位划分及定位机制[J]. 江西地质, 8(4): 296-308.
- 周玉龙, 程纪星, 付建平. 2015. 玉华山火山盆地铀矿床为山-筒山断裂带控矿特征[J]. 世界核地质科学, 126(1): 13-18.