

DOI: 10.12401/j.nwg.2023131

## 莫桑比克上利戈尼亚地区航磁、航放异常特征 及钽-铌矿找矿方向

滕菲<sup>1,2,3</sup>, 任军平<sup>1,2,3,\*</sup>, 张国立<sup>1,2,3</sup>, 苏永军<sup>1,2,3</sup>, 古阿雷<sup>1,2,3</sup>, 唐文龙<sup>1,2,3</sup>

(1. 中国地质调查局天津地质调查中心, 天津 300170; 2. 中国地质调查局南部非洲矿业研究所, 天津 300170;  
3. 华北地质科技创新中心, 天津 300170)

**摘要:** 为深化莫桑比克上利戈尼亚钽-铌稀有元素成矿带区域成矿规律研究, 充分挖掘已有区域成果资料中隐含的找矿有利信息, 笔者对所收集莫桑比克北部地区高精度航磁、航放测量网格数据进行转换处理, 加强成矿弱信息提取, 并在已有成果认识基础上开展区内地质构造的综合推断解释, 分析总结区内的航磁、航放异常展布特征及与本区伟晶岩型钽-铌矿的空间对应关系, 查明区内主要控矿构造-纳玛玛逆冲推覆带的分布范围和内部断裂构造展布特征。结合区内姆艾尼大型钽铌矿床航空物探综合异常特征, 对全区进行类比找矿预测, 圈定钽铌矿远景区 5 处。研究认为, 该成矿带北东向延伸被 F2 断裂错断, 南西向断距超过 20 km, 引起成矿有利区的整体北西转移, 追索异常找矿意义重大。

**关键词:** 钽铌矿; 航磁异常; 航放异常; 找矿预测; 纳玛玛逆冲推覆带; 上利戈尼亚地区

中图分类号: P618.71

文献标志码: A

文章编号: 1009-6248(2023)05-0049-12

### Aeromagnetic and Aeroradiometric Characteristics in Alto Ligonha Area, Mozambique and Prospecting Direction of Ta-Nb deposits

TENG Fei<sup>1,2,3</sup>, REN Junping<sup>1,2,3,\*</sup>, ZHANG Guoli<sup>1,2,3</sup>, SU Yongjun<sup>1,2,3</sup>, GU Alei<sup>1,2,3</sup>, TANG Wenlong<sup>1,2,3</sup>

(1. Tianjin Center of China Geology Survey, Tianjin 300170, China; 2. Southern African Mining Research Institute, China Geological Survey, Tianjin 300170, China; 3. North China Center for Geoscience Innovation, Tianjin 300170, China)

**Abstract:** In order to deepen the study on the metallogenic regularity of Ta-Nb rare element metallogenic belt and fully exploit the ore-prospecting favorable information contained in the aerial geophysical data in Alto Ligonha, Mozambique, the high-precision aeromagnetic and aeroradiometric survey grid data are collected in northern Mozambique and converted to enhance the extraction of weak metallogenic information. Based on the achievement recognition, the comprehensive inference and interpretation are carried out about the geological structure in the area. The distribution characteristics are analyzed and summarized of the aeromagnetic and aeroradiometric anomalies, and their spatial correspondences with pegmatite Ta-Nb ore in the area is discussed. A comparative study is carried out to find out the scope of Namama overthrust nappe belt, the main ore-control-

收稿日期: 2023-05-08; 修回日期: 2023-07-13; 责任编辑: 吕鹏瑞

基金项目: 国家重点研发计划课题(2021YFC2901804)、商务部技术援外项目([2015]352、[2012]558)及中国地质调查局项目(DD20230125, DD20221801, DD20201150, DD20190439、1212011220910)联合资助。

作者简介: 滕菲(1982-), 女, 硕士, 正高级工程师, 主要从事区域地球物理综合研究工作。E-mail: 77128889@qq.com。

\* 通讯作者: 任军平(1980-), 男, 硕士, 正高级工程师, 主要从事地质矿产勘查与研究工作。E-mail: rjp2333@126.com。

ling structure in the area and the distribution characteristics of internal fault structures. Combined with the comprehensive anomaly characteristics of the large Ta niobium deposit in the area, the analogy prospecting prediction was made for the whole area, and five Ta-Nb deposit prospects were delineated. It is believed that the northeastward extension of the metallogenic belt is faulted by F2 fault, and the southwestward fault distance is more than 20 km, which leads to the overall NW transfer of the favorable ore-forming area, and it is of great prospecting significance to pursue the anomaly.

**Keywords:** Ta-Nb deposit; airborne magnetic anomaly; airborne radioactivity anomaly; ore prediction; Namama overthrust nappe belt; Alto Ligonha area

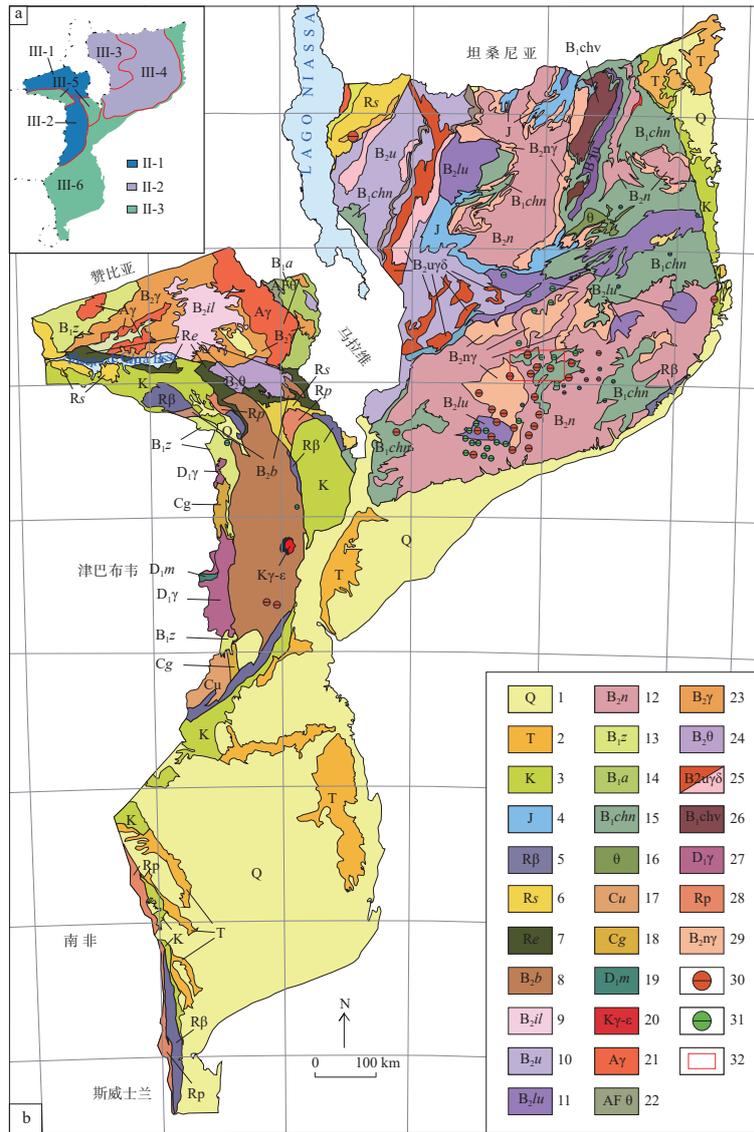
钽、铌作为重要的稀有金属,广泛应用于医疗、航天、军工等各种高科技领域(邓攀等, 2019)。中国是全球钽铌矿的主要消费国,国内钽铌矿贫矿多、生产成本低,原材料多依靠进口(商俊伟等, 2008; 蔡肖等, 2013; 李建康等, 2019; 任军平等, 2021a, 2022; 朱清等, 2023)。近年来,全球主要的钽铌矿供应国卢旺达和巴西等国分别对中国降低钽铌出口量。为了稳定进口渠道,中资企业在资源“走出去”过程中,积极开展南部非洲钽铌资源调查评价工作(邓德伟, 2020; 杨远东等, 2020; 孙宏伟等, 2021; 曾瑞垠等, 2023),培育新的生产基地,在莫桑比克也陆续开展一些地质勘查工作,在区域地质背景、成矿规律、资源开发情况等方面取得了一定的认识(王西荣等, 2016; 任军平等, 2021b; 徐涛等, 2021; 王杰等, 2022; 龚鹏辉等, 2023)。上利戈尼亚(Alto Ligonha)地区是莫桑比克乃至全球重要的 Ta-Nb-Li-Be-Cs 稀有元素成矿带(Hutchinson, 1956; Correia et al., 1971a, 1971b; Von Knorring et al., 1987; Dias et al., 2000)。到目前为止,该带发现大型钽-铌矿床 3 处、中型 9 处、小型 8 处、矿(化)点 129 处,所有矿床(点)类型均为伟晶岩型(Detlef et al., 2012; 董津蒙等, 2022; 唐文龙等, 2022)。但该区基础地质工作程度低,地质、地球物理勘探和系统找矿工作因受长期内战在内的多方面因素影响进展缓慢(Barros et al., 1963; Correia et al., 1971a, 1971b; Pinna et al., 1993)。世界银行曾出资对莫桑比克北部地区进行高精度航磁、航放测量,本区作为“优选区”被覆盖,区内航测资料的综合找矿研究工作亟待开展。笔者依托中国地质调查局天津地质调查中心承担的项目收集航测数据,在已有成果认识基础上对区内地质构造进行综合推断解释,查明控矿构造展布,分析总结区内已知钽铌矿床航空物探综合异常特征,对全区进行类比找矿预测,圈定钽铌矿远景区,为该地区钽铌矿资源的找矿及科研工作提供重要参考信息。

## 1 区域地质矿产概况

研究区地处莫桑比克北部楠普拉省与赞比亚省交界地带,构造位置处于东非新元古代莫桑比克活动带,中元古代楠普拉地体中。受新元古代—古生代泛非造山事件影响,该带大部分地质单元变形、变质作用强烈(图 1)。全区主要由构造史基本相似的角闪岩相正、副片麻岩及赋含稀有元素的伟晶岩组成,包括玛玛拉(Mamala)片麻岩和莫库巴(Mocuba)杂岩组成的赞比亚(Zambezia)群基底岩石、莫罗奎(Molocue)群变质碎屑岩盖层、库利库伊(Culicui)岩套花岗质正片麻岩等 3 个岩石单元(图 2),泛非期花岗岩类和赋含稀有元素的伟晶岩侵入其中(唐文龙等, 2022)。研究区是莫桑比克境内最有经济价值的花岗伟晶岩型钽铌成矿省之一,已产出大量钽精矿,主要以稀有元素副矿物形式富存于花岗伟晶岩中(徐涛等, 2016, 2021; 冉子龙等, 2021)。研究区东南部姆艾尼(Muiane)大型钽铌矿床矿石资源量为 138 万 t(Ta<sub>2</sub>O<sub>5</sub>),平均品位为 0.025%。Melcher 等(2008, 2009)获得的花岗伟晶岩型钽铁矿 U-Pb 年龄为 480~440 Ma,与上利戈尼亚泛非期(490 Ma)花岗岩事件密切相关(Jamal et al., 1999)。区内的主要构造纳玛玛逆冲推覆带是上利戈尼亚钽-铌稀有元素成矿带的主要控矿构造,区内已发现的伟晶群主要分布于逆冲推覆带内。

## 2 方法原理及数据有效性

研究区的航空磁法测量数据、航空放射性测量数据为天津地质调查中心团队于 2020 年 1 月出访莫桑比克期间,从莫桑比克国家地质矿山理事会(INAMI)处收集的网格数据,包含  $\Delta T$  异常、U 异常、Th 异常、



II-1. 尼亚萨-津巴布韦成矿省; II-2. 莫桑比克成矿省; II-3. 鲁伍玛-赞比西-马普托成矿省; III-1. 尼亚萨-安格尼亚-津巴布韦成矿带; III-2. 津巴布韦-森托奥-巴鲁埃成矿带; III-3. 巴洛克-乌南戈成矿带; III-4. 莫桑比克成矿带; III-5. 森托奥-赞比西成矿带; III-6. 森托奥-鲁伍玛-赞比西-马普托成矿带; 1. 第四纪; 2. 三叠纪; 3. 白垩纪; 4. 侏罗纪; 5. 卡鲁超群; 玄武岩; 6. 下卡鲁波弗特(Beaufort)组: 砾岩和砂岩; 7. 下卡鲁埃卡(Ecca)组: 砾岩、砂岩和页岩、产煤层; 8. 巴鲁瓦(Báruè)杂岩: 片麻岩、混合岩、麻粒岩、大理石层、石英岩; 9. 卢亚(Luia)组: 片麻岩, 麻粒岩, 混合岩, 正片麻岩, 大理石层; 10. 乌南戈(Unango)组: 片麻岩、麻粒岩、花岗岩、正长岩; 11. 鲁瑞姆(Lurium)超群: 麻粒岩、麻粒状霞石岩、锰白云石、细砾岩; 12. 楠普拉(Nampula)超群: 片麻岩和花岗二长岩、钠长石和奥长花岗岩混合岩; 13. 赞布瓦(Zâmbuè)组: 片麻岩和副片麻岩, 含石英岩、大理岩; 14. 安格尼亚(Angónia)群: 花岗质片麻岩, 含微量麻粒岩、镁铁质片麻岩、浅色正片麻岩、石英岩、铁闪锌矿、蛇纹岩、霞石片麻岩和石墨化合物; 15. 妮皮德(Nipiode)超群: 云母片岩、白云母、石英岩和砾岩; 16. 斜长岩; 17. 乌姆孔多(Umkondo)组: 石英岩、页岩、泥质岩、安山岩; 18. 格拉齐(Grazi)组: 云母石英岩、糜棱岩和石英片麻岩; 19. 马斯昆斯(Macequece)组: 玄武岩、科马提岩、滑石岩和绿柱石、橄榄岩和蛇纹岩; 20. 花岗岩、正长岩和二长岩、霞石正长岩; 21. 花岗岩和“后-芬苟瓦(Fingòè)”正长岩和二长花岗岩; 22. 阿池扎(Atchiza)杂岩体: 橄榄岩、蛇纹岩、闪长岩; 23. 花岗闪长岩和二长花岗岩“前-芬苟瓦(Fingòè)” ; 24. 太特(Tete)杂岩体: 辉长岩、斜长岩、辉石岩; 25. 花岗岩类: 正长岩、二长岩; 26. 辉长岩; 27. 花岗片麻岩; 28. 卡鲁系流纹岩(Karoo rhyolite); 29. 花岗岩、硅化花岗岩; 30. 铌钽矿; 31. 铍矿; 32. 研究区范围

图 1 莫桑比克构造分区图(a)和莫桑比克地质矿产图(b)(据 Marques et al., 2000 修改)  
Fig. 1 (a) Tectonic map of Mozambique and (b) geological and mineral map of Mozambique



表1 不同岩石类型 K、U 与 Th 含量及比值表

Tab. 1 K, U, Th contents and U/Th ratios in various rocks

岩石类型	K(%)	U(10 <sup>-6</sup> )	Th(10 <sup>-6</sup> )	U/Th	
岩浆岩	超基性岩	0.03	0.003	0.005	0.600
	基性岩(玄武岩)	0.83	0.5	3	0.167
	中性岩(闪长岩)	2.3	1.8	7	0.257
	酸性岩(花岗岩)	3.34	3.5	18	0.194
沉积岩	页岩	2.6	3.7	12	0.308
	砂岩	1.07	0.45	1.7	0.265
	碳酸盐岩	2.7	2.2	1.7	1.294
	黏土	25	1.3	7	0.186
变质岩	角闪岩		3.57	5	0.714
	带状片麻岩(深变质)		0.28	0.85	0.329
	片麻岩(浅变质)		0.14	4.09	0.034

注:放射性含量来自张万良等(2005)。

布,在矿床上形成有规律分布的扩散晕。成因类型、成矿温度、介质 pH 值等相同的钽铌矿床,具有相同的表征成矿物理、化学环境的局部放射性异常特征。航空伽玛能谱法找矿实质上是利用 K、U、Th 元素,通过模拟相似成矿环境、研究成矿规律,寻找非放射性多金属矿产的环境放射性地化标志找矿方法(张恩等, 2014)。针对研究区钽铌矿均为低温热液型的特点,为消除 K 异常作为造岩元素含量普遍较高的影响,突出低温的钾化蚀变带,笔者利用不同温度的热液中 Th、U 富集程度不同,选用 F 参数,即 Th、K 含量之积与 U 含量之比来加强成矿弱信息的提取(辛福成等, 2007)。

### 3 航磁航放异常分布特征

#### 3.1 航磁异常

区域航磁异常场整体表现为西低东高,局部异常条带以北东向延伸为主,并受北西向构造应力错动分段(图 3)。西北部低磁异常区(磁异常幅值主体为 350~560 nT)基本对应研究区内库利库伊花岗质正片麻岩岩套(Pt<sub>2</sub>γmgInM)的主要分布范围。东南部“人”字形高磁异常组合(北东向与北西向),磁异常幅值在 -100~2 400 nT 之间急剧变化,主要对应莫洛奎群变泥质、变砂质和变火山质片麻岩(Pt<sub>2</sub>NMa)和局部出露的基性片麻岩(Pt<sub>2</sub>NMam)。莫罗奎群变质碎屑岩盖层分布区是区内的主要伟晶岩区和成矿区,其中具有强磁异常表征的是基性片麻岩(Pt<sub>2</sub>NMam)背景。盖层空间分布严格受纳玛玛逆冲推覆带控制,所引起航磁异

常形态的剧烈变化也充分反映了推覆带构造应力演化的强烈性和复杂性。

#### 3.2 航放异常

总体来说,研究区的航放异常整体表现为一定的北东向分带展布特征和区域性的低异常背景场,充分反应区内北东向为主体的构造格局及区内岩性以地质年龄较老的偏中基性岩群为主的特征。F 参数(归一化后的 K 异常)与 U 异常、Th 异常具有较好的正相关关系,异常分布范围与整体形态均有较高的吻合度。主体显示为东南部异常整体幅值低,西北部分两高夹一低(图 4)。西侧相对高航放异常区与低磁异常区呼应,对应库利库伊花岗质正片麻岩岩套(Pt<sub>2</sub>γmgInM)。中部规模最大的航放高值异常带呈北东向转北西向的扫帚形,与库利库伊花岗质片麻岩带(Pt<sub>2</sub>γπNM)空间展布基本对应。东南角相对平静的低航放异常区与“人”字形高磁异常组合直接对应,共同圈定莫罗奎群变质碎屑岩盖层分布范围,其中的极低放射性异常主要是基性片麻岩(Pt<sub>2</sub>NMam)的反应。

### 4 地质解释与找矿方向

#### 4.1 纳玛玛逆冲推覆带的展布

纳玛玛逆冲推覆带是上利戈尼亚钽-铌稀有元素成矿带主要的控矿构造,已发现的伟晶岩群主要分布于逆冲推覆带内(Cadoppi et al., 1987; Ueda et al., 2012),航磁航放异常解释结果显示该带具有典型的左旋张扭构造特征,构造体系总体走向北东-北北东。按断裂延展方向可进一步划分为北北东、北东

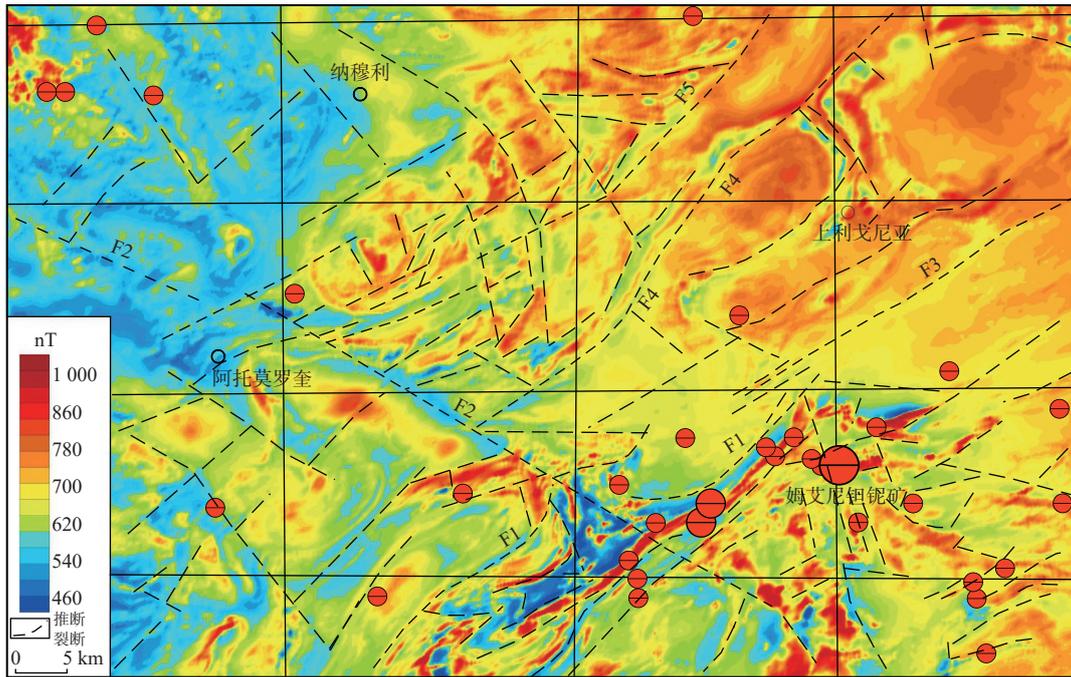


图3 航磁  $\Delta T$  化极异常及推断地质构造图

Fig. 3 Reduction to the pole of aeromagnetism map and structural inference

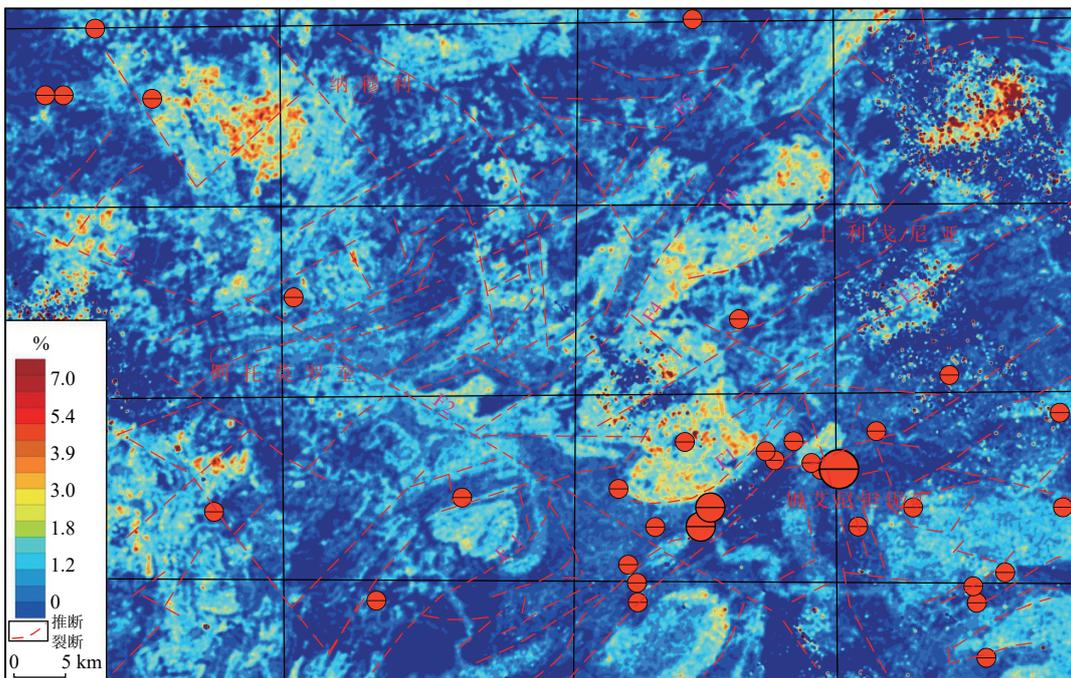


图4 航放 F 参数异常图

Fig. 4 F parameter of aerial radioactivity survey

向、北西向、北北西 4 组。北东向、北西向 2 组断裂代表全区主构造方向,宏观上呈现出“网格状”的基本构造样式。北东向为早期主体构造,后期受北西向构造改造,发生错断、平移,区内钨钽矿分布整体受航磁异常推断断裂构造控制,主断裂与次级断

裂的交会部位,断裂构造倾角转折部位是成矿有利地段(图 3、图 5)。从航磁异常场分析,区内主要控矿构造北东向 F1 断裂表现为高磁异常带与平静磁异常场区的分界线和航放低异常场区的边界。规模最大的北西向 F2 断裂错断区内多组北东向航磁航放异

常, 并部分表现为低磁异常条带。该断裂向北西方向水平错动超过 20 km, 错断了区内主干北东向断裂 F1、F4、F5。以此为界, 南部北东向正负异常相间的高磁异常条体整体突然截止, 北部的北东向异常带

存在明显的大规模的西北向水平错动, 航磁  $\Delta T$  上延 2 km 异常图(图 6)上 F2 断裂亦有明显反映, 从深部验证其构造规模及影响。地质图上莫罗奎群变质碎屑岩盖层的空间展布、相似的航放异常特征也佐

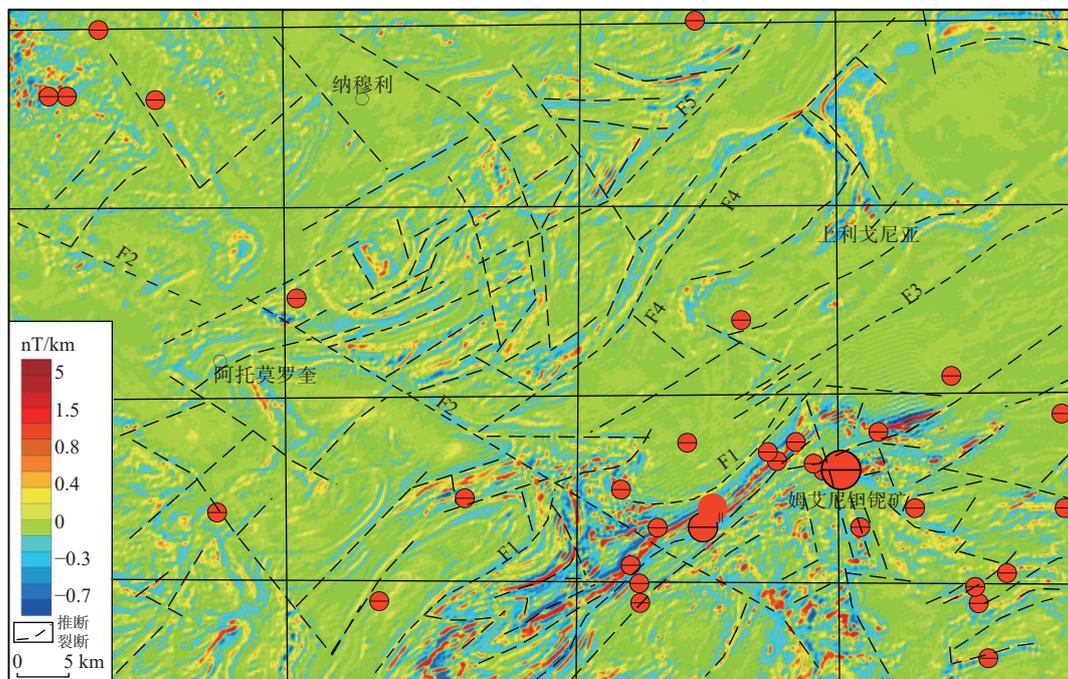


图 5 航磁  $\Delta T$  化极垂向一阶导数异常及推断地质构造图

Fig. 5 The aeromagnetic map after reduction to the pole and the vertical first-order derivative operation overlaid with structural inference

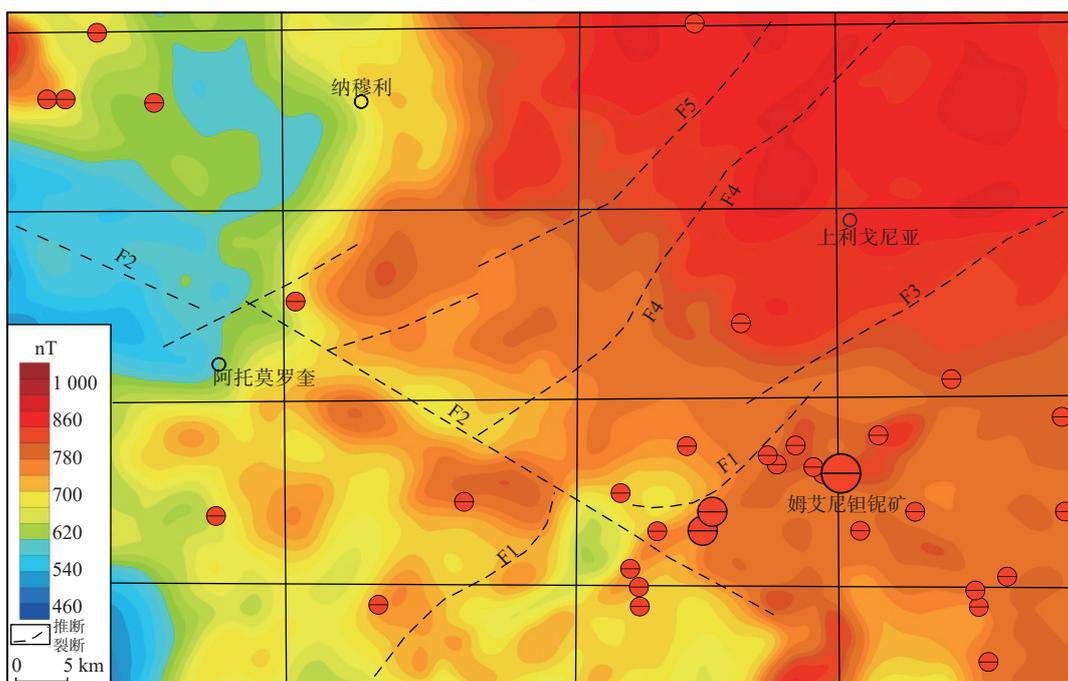


图 6 航磁化极上延 2 km 异常及推断地质构造图

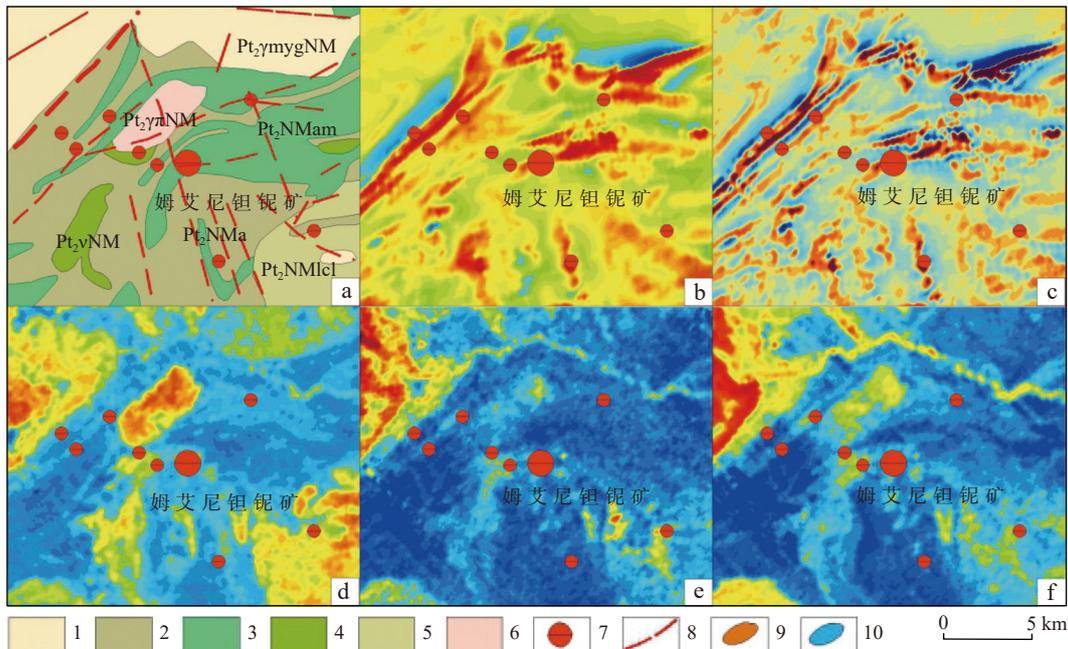
Fig. 6 Contour map of aeromagnetic  $\Delta T$  anomaly after reduction to the pole and upward continuation to 2 km and structural inference

证了这一推断。主要控矿构造的北西向错动可能导致F2断裂以北钽-铌矿成矿有利区整体向北西方向水平错动移超过20 km。

#### 4.2 典型矿床的航磁航放异常特征

姆艾尼钽铌矿床是上利戈尼亚稀有元素成带规模最大(大型)的伟晶岩矿之一,其矿床赋存的地质空间位置、形成地质条件、控矿因素在本区极具代表性。笔者针对该矿床进行数据裁剪,单独成图分析,旨在详细掌握矿床航磁航放异常特征(图7)。从姆艾尼钽铌矿床区域地质背景与航空物探异常的对比可以看出,矿床主体分布在航磁化极高异常、航放低异常所共同对应的莫罗奎变质碎屑岩盖层上。其中,与含矿伟晶岩空间关系最为密切的莫罗奎群基性片麻岩

(Pt<sub>2</sub>NMam)岩石磁性更高,航磁垂向一阶导数异常图上表现为幅值变化最大的正负磁异常组合;具有明显的高航放异常和低航磁异常的库利库伊岩套花岗岩正片麻岩与成矿表现为负相关关系。从推断断裂构造分布来看,姆艾尼钽铌矿床正处于推断北东向与北北西向断裂构造交汇处,断裂控矿作用明显;航磁场处于北东东向航磁高异常带边界高低磁异常过度的梯级带上;在航放异常场中处于区域低异常场中的局部微弱高异常边部,这也是研究区大多数钽铌矿床空间分布规律:产出在区域航磁化极高异常、航放低异常背景下,局部高磁异常、局部弱放射性异常边部;受北东、北西向断裂构造控制;与成矿相关的地质单元航磁、航放异常特征明显,易于识别。



a. 地质图; b. 航磁化极异常图; c. 航磁化极垂向一阶导数异常图; d. K异常图; e. U异常图; f. Th异常图; 1. 库利库伊岩套浅色花网质正片麻岩; 2. 莫罗奎群变泥质、变砂质和变火山质片麻岩; 3. 莫罗奎群基性片麻岩; 4. 莫罗奎群变质超基性片麻岩; 5. 玛玛拉长英质片麻岩; 6. 库利库伊岩套巨晶花岗岩质片麻岩; 7. 钽铌矿; 8. 推断断裂构造; 9. 航磁航放高异常; 10. 航磁航放低异常

图7 姆艾尼钽铌矿综合剖析图

Fig. 7 Comprehensive analysis of Maini Ta-Ni deposit

#### 4.3 找矿方向

通过对上利戈尼亚地区钽铌矿床的地质特征与航磁、航放特征对比研究,发现航磁、航放异常对成矿环境具有较强的指示性,矿床航空异常特征也呈现出一定的规律性,具体可以总结为以下三点:

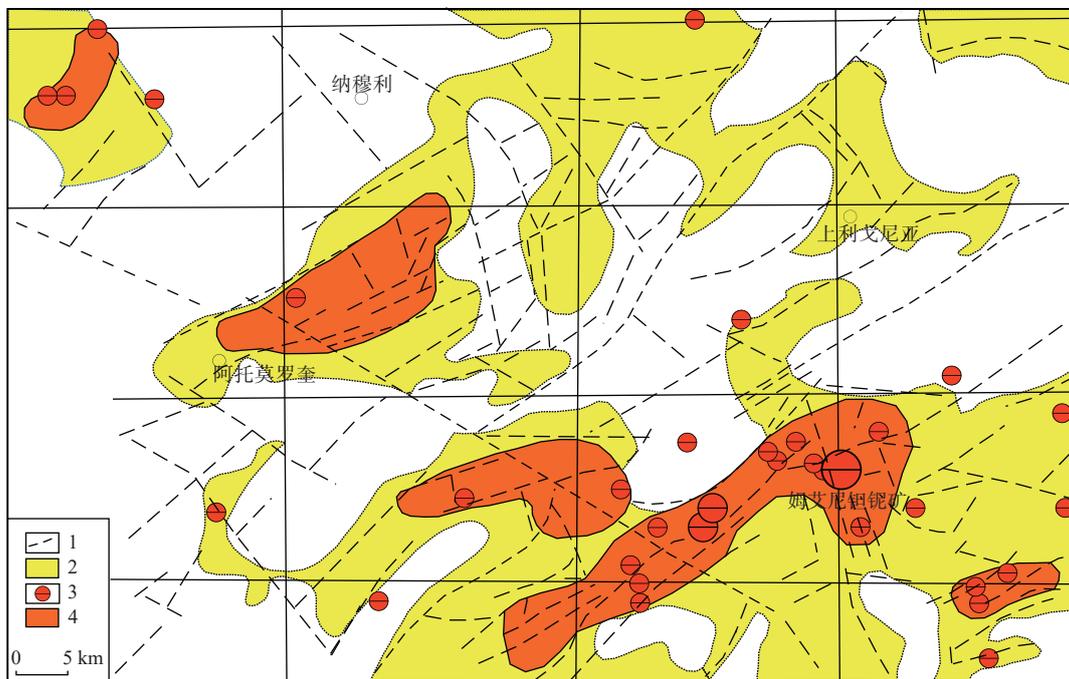
(1)航磁异常可以识别纳玛玛推覆带内断裂构造的展布。区内北东-北北东向构造体系不仅控制着与

稀有元素密切相关的伟晶岩的分布形态,更直接影响着矿床的空间分布,矿脉赋存在断裂构造及其次级构造、断裂交汇部位。航磁异常推断断裂构造是钽-铌矿找矿的重要预测要素。

(2)区内矿产地展布的总体趋势表现出相对的航磁高异常、航放低异常背景特征,主要对应莫罗奎群表壳岩带。由此以航磁ΔT化极异常等值线图(图3)

值域大于 700 nT 为界,手动提取区域性高磁异常和  
低相间磁异常区带。在此基础上,进一步限定航放 F

参数异常图(图 4)上值域整体小于 1.6% 的片状区域,  
初步圈定成矿有利区域(图 8)。



1. 航磁推断断裂构造; 2. 航空物探综合推断成矿有利区; 3. 钽铌矿床; 4. 钽铌矿远景区

图 8 上利戈尼亚地区找矿远景区划图

Fig. 8 Prospecting prospect zoning plan of Alto Ligonha area

(3)从区内矿床空间展布来看,航磁垂向一阶导  
数异常正负伴生,异常变化显著区域构造应力作用明  
显且多次叠加,更有利成矿,矿床集中分布;航放 U、  
Th、K、Th/U 异常场的区域性低异常区中,相对高异  
常边界缓冲带是重要的成矿有利区。

基于以上要素,综合圈定找矿远景区五处并主要  
依据各区内已知矿产地数量及规模,进行远景区分级

(表 2)。I 区是区内主要的矿集区,成矿条件优越,成  
矿潜力巨大(图 8)。纳玛玛逆冲推覆带的展布受 F2  
断裂影响,向北西方向水平错动移超过 20 km,同时也  
错断了推覆带上相邻分布的 II 区与 I 区,由此推断 II  
区与 I 区成矿相关性最高,找矿潜力次之,可能是区  
内可拓展的新的主要找矿区域。

表 2 远景区综合情况表

Tab. 2 Prospect summary table

编号	面积(km <sup>2</sup> )	矿床数(个)	地质出露	异常特征	预测等级
I	330.9	15	莫罗奎群	低放射性异常, 北东磁异常条带状平行展布	一级
II	176.5	1	莫罗奎群和 库利库侵入岩	低放射性异常, 环状和北东向, 磁异常条带	二级
III	134.9	2	莫罗奎群	低放射性异常, 北东北西向磁异常交汇	三级
IV	36.5	3	欧库瓦杂岩与 库利库侵入岩	低放射性异常, 磁异常条带北东东向展布	三级
V	47.7	3	莫罗奎群	高低磁异常与高低放射性异常过度带	三级

## 5 结论

(1)航磁异常解释结果显示,上利戈尼亚地区成  
矿主要受北东、北西向 2 组断裂构造组成的“网格状”

断裂构造格架所控制。其中,北东向为早期构造,后  
期受北西向构造改造,发生错断或平移。F2 断裂为改  
变区内构造格局的主要断裂,主要控矿的纳玛玛逆冲  
推覆带在 F2 断裂北侧发生大规模的北西向水平错动,  
移动距离超过 20 km。在此断裂体系控制下,区内钽

铌矿成矿带整体向北西方向偏移。

(2)通过航磁异常掌握纳玛玛逆冲推覆带区域构造格架及次级断裂构造展布,通过航放异常圈定与成矿相关的莫罗奎群地质体及与本区伟晶岩型铌矿矿化相关的低温钾化蚀变带开展找矿预测,笔者共圈定找矿远景区5处。在此基础上,借助重点区域的局部航磁、航放异常边界缓冲带叠加分析可进一步缩小找矿范围。

致谢:本文完成过程中得到中国地质调查局天津地质调查中心张素荣高级工程师的指导;胡婷博士、曹占宁博士等给予诸多帮助并进行有益探讨,审稿专家给论文提出许多宝贵意见,在此一并表示感谢。

## 参考文献(References):

- 蔡肖,宋扬,王登红,等.国外重要铌钽矿床分布规律及成矿地质特征[J].矿物学报,2013,33(S2):193-194.
- CAI Xiao, SONG Yang, WANG Denghong, et al. Distribution and Metallogenic geological characteristics of important niobium tantalum deposits abroad[J]. Acta Mineralogica Sinica, 2013, 33(S2): 193-194.
- 陈树军,刘菁华,王祝文.航空伽玛能谱测量在浅覆盖区地质填图单元划分中的应用[J].物探与化探,2007,31(2):110-114.
- CHEN Shujun, LIU Jinghua, WANG Zhuwen. The application of the magnetic method to the detection of underground coal fires[J]. Geophysical & Geochemical Exploration, 2007, 31(2): 110-114.
- 陈中华.应用航放资料寻找非放射性金属矿产效果探讨[J].铀矿地质,2003,(02):106-113.
- CHEN Zhonghua. Discussion on effectiveness of application of airborne radiometric data to prospecting for non-radioactive metallic mineral resources[J]. Uranium Geology, 2003, (02): 106-113.
- 崔志强.高精度航空物探在重要成矿带资源调查中的应用[J].物探与化探,2018,42(01):38-49.
- CUI Zhiqiang. The application of the high precision airborne geophysical survey to the investigation of important metallogenic belts[J]. Geophysical & Geochemical Exploration, 2018, 42(01): 38-49.
- 邓德伟.刚果(金)卡通格地区铌钽矿航磁航放特征及找矿意义[J].矿产勘查,2020,11(03):570-579.
- DENG Dewei. Aeromagnetic and aeroradiometric characteristics of a Nb-Ta mining area in the Congo (Kinshasa) and prospecting significance[J]. Mineral Exploration, 2020, 11(03): 570-579.
- 邓攀,陈玉明,叶锦华,等.全球铌钽资源分布概况及产业发展形势分析[J].中国矿业,2019,28(04):63-68.
- DENG Pan, CHEN Yuming, YE Jinhua, et al. Study on the resource distribution and industry development of global niobium and tantalum[J]. China Mining Magazine, 2019, 28(04): 63-68.
- 董津蒙,任军平,孙宏伟,等.莫桑比克矿产资源特征及投资环境[J].地质通报,2022,41(1):184-195.
- DONG Jimeng, REN Junping, SUN Hongwei, et al. Mineral resources and investment environment in Mozambique[J]. Geological Bulletin of China, 2022, 41(1): 184-195.
- 范正国,方迎尧,王懋基,等.航空物探技术在1:25万区域地质调查中的应用[J].物探与化探,2007,31(6):504-509.
- FAN Zhengguo, FANG Yingyao, WANG Maoji, et al. The application of aerogeophysical techniques to 1:250 000 regional geological mapping[J]. Geophysical & Geochemical Exploration, 2007, 31(6): 504-509.
- 龚鹏辉,刘晓阳,孙凯,等.浅析坦桑尼亚卡鲁超群地质特征及含矿性[J].华北地质,2023,46(01):50-60.
- GONG Penghui, LIU Xiaoyang, SUN Kai, et al. Review on geological characteristics and mineralization of the Karoo Supergroup, Tanzania[J]. Geology of North China, 2023, 46(01): 50-60.
- 李建康,李鹏,王登红,等.中国铌钽矿成矿规律[J].科学通报,2019,64(15):1545-1566.
- LI Jiankang, LI Peng, WANG Denghong, et al. A review of niobium and tantalum metallogenic regularity in China[J]. Chinese Science Bulletin, 2019, 64(15): 1545-1566.
- 李侃,高永宝,滕家欣,等.新疆和田县大红柳滩一带花岗伟晶岩型稀有金属矿成矿地质特征、成矿时代及找矿方向[J].西北地质,2019,52(04):206-221.
- LI Kan, GAO Yongbao, TENG Jiaxin, et al. Metallogenic Geological Characteristics, Mineralization Age and Resource Potential of the Granite-Pegmatite-Type Rare Metal Deposits in Dahongliutan Area, Hetian County, Xinjiang[J]. Northwestern Geology, 2019, 52(04): 206-221.
- 冉子龙,李艳军.伟晶岩型稀有金属矿床成矿作用研究进展[J].地质科技通报,2021,40(02):13-23.
- RAN Zilong, LI Yanjun. Research Advances on Rare metal Pegmatite Deposits[J]. Bulletin of Geological Science and Technology, 2021, 40(02): 13-23.
- 任军平,胡鹏,王杰,等.非洲矿业发展概况[J].地质学报,2021a,95(4):945-961.
- REN Junping, HU Peng, WANG Jie, et al. Mining development status of Africa[J]. Acta Geologica Sinica, 2021a, 95(4): 945-961.
- 任军平,王杰,古阿雷,等.莫桑比克钛锆砂矿资源开发现状及投资环境分析[J].地质与资源,2021b,30(1):45-52.
- REN Junping, WANG Jie, GU Alei, et al. Development status and investment environment of the ilmenite-zircon resources in

- mozambique[J]. *Geology and Resources*, 2021b, 30(1): 45–52.
- 任军平, 张航, 古阿雷, 等. 非洲稀土资源研究进展[J/OL]. *地质通报*, 2022: 1–25.
- RENG Junping, ZHANG Hang, GU Alei, et al. Research Progress of Rare Earth Element Resources in Africa [J/OL]. *Geological Bulletin of China*, 2022:1–25.
- 商俊伟. 莫桑比克钽铌资源概述[J]. *中国金属通报*, 2008, (18): 29–33.
- SHANG Junwei. Overview of tantalum niobium resources in Mozambique[J]. *China Metal Bulletin*, 2008, (18): 29–33.
- 孙宏伟, 王杰, 任军平, 等. 南部非洲花岗岩型与伟晶岩型钽铌床地质特征[J]. *地质论评*, 2021, 67(01): 265–278.
- SUN Hongwei, WANG Jie, REN Junping, et al. Geological characteristics analysis of granite type and pegmatite type tantalum deposits in southern Africa[J]. *Geological Review*, 2021, 67(01): 265–278.
- 唐文龙, 付超, 王杰, 等. 莫桑比克上利戈尼亚钽-铌稀有元素成矿带成矿规律及资源潜力[J]. *地质通报*, 2022, 41(07): 1269–1281.
- TANG Wenlong, FU Chao, WANG Jie, et al. Metallogenic regularity and resources potential of Alto Ligonha Ta- Nb rare element metallogenic belt in Mozambique[J]. *Geological Bulletin of China*, 2022, 41(07): 1269–1281.
- 王杰, 刘晓阳, 任军平, 等. 坦桑尼亚前寒武纪成矿作用[J]. *华北地质*, 2022, 45(01): 101–110.
- WANG Jie, LIU Xiaoyang, REN Junping, et al. Precambrian mineralization in Tanzania[J]. *Geology of North China*, 2022, 45(01): 101–110.
- 王西荣, 李绍侠, 王哲, 等. 莫桑比克穆塔拉地区钽铌矿地质特征及找矿方向的探讨[J]. *资源环境与工程*, 2016, 30(01): 55–59+65.
- WANG Xirong, LI Shaoxia, WANG Zhe, et al. Discussion about Geological Characteristics and Prospect of Finding Mineral of Niobium and Tantalum Ore in Motala Area of Mozambique[J]. *Resources Environment and Engineering*, 2016, 30(01): 55–59+65.
- 伍显红, 杜化宇, 李晓禄, 等. 新疆天山金多金属矿航磁航放特征及找矿方向[J]. *矿产与地质*, 2019, 33(04): 703–710.
- WU Xianhong, DU Huayu, LI Xiaolu, et al. Geophysical characteristics of aerial magnetic and radioactive survey data and prospecting direction of gold-polymetallic deposit in West Tianshan, Xinjiang[J]. *Mineral Resources and Geology*, 2019, 33(04): 703–710.
- 辛福成, 李志勇, 黄福学. 放射性物探方法在辽宁团山子地区金矿找矿中的应用[J]. *地质与资源*, 2007, (03): 218–221+225.
- XIN Fucheng, LI Zhiyong, HUANG Fuxue. Application of radiometric method in the prospecting for gold deposits in tuanshanzi area, liaoning province[J]. *Geology and Resources*, 2007, (03): 218–221+225.
- 徐涛, 陈峰, 徐明钻, 等. 莫桑比克前寒武纪地质与成矿特征[J]. *矿产勘查*, 2021, 12(10): 2083–2096.
- XU Tao, CHEN Feng, XU Mingzhan, et al. Geology and metallogenic characteristics of Precambrian in Mozambique[J]. *Mineral Exploration*, 2021, 12(10): 2083–2096.
- 徐涛, 王亮, 周强. 上利戈尼亚矿集区伟晶岩型矿床地质特征及成矿规律[J]. *吉林地质*, 2016, 35(02): 60–63.
- XU Tao, WANG Liang, ZHOU Qiang. Pegmatite type deposits geological features and metallogenic regularities of the Alto Ligonha ore concentration area in Mozambique[J]. *Jilin Geology*, 2016, 35(02): 60–63.
- 杨学明, 李世斌, 韩杰, 等. 基于重磁异常的天津市平原区深部构造特征识别[J]. *华北地质*, 2021, 44(01): 61–69.
- YANG Xueming, LI Shibin, HAN Jie, et al. Recognition of deep structural characteristics in Tianjin plain area which based on gravity and magnetic anomalies[J]. *North China Geology*, 2021, 44(01): 61–69.
- 杨雪, 范正国, 黄旭钊, 等. 新疆梧南地区航磁异常特征分析及找矿标志研究[J]. *地质与勘探*, 2015, 51(06): 1033–1040.
- YANG Xue, FAN Zhengguo, HUANG Xuzhao, et al. Aeromagnetic Anomaly Characteristics and Prospecting indicators of the Wunan area in Xinjiang[J]. *Geology and Exploration*, 2015, 51(06): 1033–1040.
- 杨远东, 李继业, 祝永平, 等. 刚果(金)马诺诺(Manono)东部某伟晶岩型钽铌矿地质特征[J]. *矿产勘查*, 2020, 11(07): 1428–1435.
- YANG Yuandong, LI Jiye, ZHU Yongping, et al. Geological characteristics of a pegmatite niobium and tantalum deposit in the east of Manono, Congo (Kinshasa)[J]. *Mineral Exploration*, 2020, 11(07): 1428–1435.
- 曾瑞垠, 祝新友, 王蓉, 等. 刚果(金)Manono-Kitotolo 含锂-铯-钽伟晶岩地质与矿化特征研究[J/OL]. *中国地质*: 2023: 1–15. <http://kns.cnki.net/kcms/detail/11.1167.P.20201010.0903.002.html>.
- ZENG Ruiyin, ZHU Xinyou, WANG Rong, et al. Geological and mineralization characteristics of Manono-Kitotolo pegmatite in the Democratic Republic of Congo [J/OL]. *Geology in China*: 2023: 1–15. <http://kns.cnki.net/kcms/detail/11.1167.P.20201010.0903.002.html>.
- 张恩, 汪冰, 全旭东. 航放资料在冀北铅锌(银)矿产成矿预测中的应用[J]. *地质找矿论丛*, 2014, 29(02): 274–277.
- ZHANG En, WANG Bing, QUAN Xudong. Application of air-borne radiometric data to prediction of Pb, Zn, Ag mineral resources for the north Hebei province[J]. *Contributions to Geology and Mineral Resources Research*, 2014, 29(02): 274–277.
- 张万良. 遥感岩性识别研究的发展趋势—遥感与航空放射性信

- 息集成[J]. 矿物岩石地球化学通报, 2005, (01): 88-91.
- ZHANG Wanliang. Advances on study of rock identification by remote sensing-integration of remote sensing and airborne radioactive information[J]. Bulletin of Mineralogy, Petrology and Geochemistry, 2005, (01): 88-91.
- 朱清, 顾本杰, 邹谢华, 等. 试论中非矿业合作的机遇与挑战[J]. 西北地质, 2023, 56(01): 174-185.
- ZHU Qing, GU Benjie, ZOU Xiehua, et al. On the Opportunities and Challenges of China-Africa Mining Cooperation[J]. Northwestern Geology, 2023, 56(01): 174-185.
- 朱雪丽, 董王仓, 李维成, 等. 陕南秦岭造山带侵入岩的控矿作用及其找矿意义[J]. 西北地质, 2021, 54(03): 163-172.
- ZHU Xueli, DONG Wangcang, LI Weicheng, et al. Ore-controlling Factors and Prospecting Significance of Intrusive Rocks in Shaanxi Qinling Orogenic Belt[J]. Northwestern Geology, 2021, 54(03): 163-172.
- Barros R M, Vicente C A M. Estudo dos campos pegmatiticos da Zambezia relatorio da mossão de estudos em Mozambique campanha de 1963[M]. Junta de Energia Nuclear, 1963, 1-133.
- Cadoppi P, Costa M, Sacchi R. A cross-section of the Namama Thrust Belt (Mozambique)[J]. Journal of African Earth Sciences, 1987, 6(4): 493-504.
- Correia N J M, Lopes N J E, Lucas D B. Mineralogy and structure of some pegmatites from Mozambique (P. E. A. ) [J]. Rev. Ciênc. Geológicas, Lourenç o Marques, 1971a, 4: 34-42.
- Correia N J M, Lopes N J E, Lucas D B. Mineralogy and geochemistry of pegmatites from Mozambique[J]. Rev. Ciênc. Geológicas, Lourenç o Marques, 1971b, 4: 1-11.
- Council for Geoscience. Map Explanation: Sheets 1537 Alto Molócuè, 1538 Murrupula, 1539 Nampula, 1540 Mogincual, 1637 Errego, 1638 Gilé and 1639-40 Angoche, Ministério dos Recursos Minerais e Energia[R]. Direção Nacional de Geologia, Maputo, Mozambique and Council for Geoscience, Pretoria, South Africa, 2007: 392.
- Detlef G E, Elias X F D, Elônio A M, et al. Crisp clustering of airborne geophysical data from the Alto Ligonha pegmatite field, northeastern Mozambique, to predict zones of increased rare earth element potential[J]. Journal of African Earth Sciences, 2012, 62: 26-34.
- Dias M B, Wilson W E. The Alto Ligonha pegmatites, Mozambique [J]. The Mineralogical Record, 2000, 31: 459-497.
- Hutchinson R W, Claus R J. Pegmatite deposits, Alto Ligonha, Portuguese East Africa[J]. Economic Geology, 1956, 51(8): 757-780.
- Jamal D L, Zartman R E, De Wit M J. U-Pb single zircon dates from the Lúrio Belt, northern Mozambique: Kibaran and Pan-African orogenic events highlighted[J]. Journal of African Earth Sciences, 1999, 32.
- Marques J M, Laechelt S, Ferrara M. Carta De Jazigos E Ocorr-Encias Minerais (1:1 000 000) [R]. Ministério dos Recursos Minerais e Energia, Direção Nacional de Geologia, Maputo, Mozambique and Council for Geoscience, 2000.
- Melcher F, Sitnikova M A, Graupner T, et al. Fingerprinting of conflictminerals: columbite-tantalite ( “ coltan ” ) ores[J]. SGA News, 2008, 23: 1-14.
- Melcher F, Graupner T, Sitnikova M, et al. Ein Herkunftsnachweis für Niob-Tantalizerze am Beispiel afrikanischer Selten-Element-Pegmatite. Mitt[J]. Mitteilungen der Osterreichischen Mineralogischen Gesellschaft, 2009, 155: 231-267.
- Pinna P, Jourde G, Calvez J Y, et al. The Mozambique Belt in northern Mozambique: Neoproterozoic(1100-850 Ma) crustal growth and tectogenesis, and superimposed Pan-African(800-550 Ma) tectonism[J]. Precambrian Research, 1993, 62: 1-59.
- Ueda K, Jacobs J, Thomas R J, et al. Delamination-induced late-tectonic deformation and high-grade metamorphism of the Proterozoic Nampula Complex, northern Mozambique[J]. Precambrian Research, 2012, 197: 275-294.
- Von Knorring O, Condliffe E. Mineralized pegmatites in Africa[J]. In: Bowden P, Kinnaird J, Eds. African Geology Reviews[M]. Geological Journal, Thematic Issue, 1987, 22: 253-270.