

doi: 10.11720/wtyht.2019.1353

张恩,段明,卢辉雄,等.林西—乌兰浩特地区铀成矿多源信息分析与成矿预测[J].物探与化探,2019,43(5):948-957.http://doi.org/10.11720/wtyht.2019.1353

Zhang E, Duan M, Lu H X, et al. An analysis of multivariate uranium metallogenic information and metallogenic prognosis in Linxi-Ulanhot area[J].Geophysical and Geochemical Exploration, 2019, 43(5):948-957.http://doi.org/10.11720/wtyht.2019.1353

林西—乌兰浩特地区铀成矿多源信息分析与成矿预测

张恩^{1,2}, 段明³, 卢辉雄^{1,2}, 冯博¹, 曹秋义^{1,2}, 杨彦超¹

(1.核工业航测遥感中心,河北 石家庄 050002; 2.东华理工大学 地球科学学院,江西 南昌 330013; 3.中国地质调查局 天津地质调查中心,天津 300170)

摘要:林西—乌兰浩特地区位于大兴安岭铀成矿省中南段,构造岩浆活动强烈,铀成矿地质条件优越。限于植被发育、覆盖厚等因素制约,单一勘查手段难以满足当前深部找矿的需求。在成矿条件及控矿因素分析的基础上,综合航放、航磁、地球化学、遥感等多源信息,构建了火山岩型铀矿综合找矿模型。利用地理信息系统(GIS)空间分析功能,提取了多源找矿信息,采用证据权重法开展铀矿定量预测,优选了与成矿密切相关的 16 个证据层。其中上侏罗统满克头鄂博组为主要赋矿地层;晚侏罗世—早白垩世潜火山岩与成矿关系密切;NE-NNE 向断裂控矿作用显著,铀矿化多发育在断裂密集带及交切带;航放参数异常(U 高场、F 高值晕、U/K 高值晕、Hu 低值晕)、化探异常(Mo、Ag、Pb、W、Sn)及遥感蚀变异常(铁染异常、羟基异常)对铀矿化指示作用明显。依据证据权重法确定的后验概率圈定成矿远景区 18 处,覆盖了区内多数铀矿床(点),表明预测结果较为可靠,其中 7 处成矿远景区内尚未发现铀矿床(点),其成矿地质条件优越,找矿线索丰富,找矿前景较好,对进一步找矿具有一定的指导意义。

关键词:铀成矿;多源信息;成矿预测;林西—乌兰浩特地区

中图分类号: P631

文献标识码: A

文章编号: 1000-8918(2019)05-0948-10



0 引言

随着找矿难度的日益加大,单一勘查手段已很难满足现今找矿工作的需要,综合使用各种有效的找矿方法,获取多源地学信息,并通过信息集成技术,获取深层次的隐蔽信息,已成为当前成矿预测研究的发展趋势^[1]。面临现今多源、多尺度、多量纲的海量地学信息,传统预测方法难以适应从定性到定量预测的要求。随着 GIS 技术的快速发展和非线性方法的引进,多源成矿信息提取及定量评价技术日趋成熟,使得找矿预测更为精准、有效^[2-4]。近年来,国内外学者基于 GIS 平台应用证据权重法、神经网络法、特征分析法等定量评价方法开展不同尺度、不同矿种的成矿预测,均取得了较好的找矿效果^[5-16]。

林西—乌兰浩特地区处于扎兰屯铀成矿远景带中南段^[17-18],区内发现有百余处铀矿(化)点,成矿地质条件优越。该区铀矿工作程度较低,以往成矿预测研究多基于中小比例尺定性分析,受当时基础地质工作程度低、物化探资料匮乏等因素限制^[19-20],预测依据不够系统全面,未能客观、准确地反映该区成矿远景面貌。受覆盖厚、地表风化强烈等因素制约,与成矿关系密切的断裂构造形迹不明显,各类找矿线索不明显,铀成矿条件、控矿因素及找矿标志等研究不够系统与深入。近年来,随着中大比例尺区调、航磁、航放、化探等工作的快速实施^[21-24],各项研究成果也为新一轮的成矿预测奠定了基础。

笔者综合地质、矿产、物化遥等资料,在成矿条件及控矿因素分析的基础上,利用航磁、航放、遥感等数据对断裂进行推断与解释,对矿致异常信息进

收稿日期: 2018-09-26; 修回日期: 2019-03-31

基金项目: 中国地质调查局项目“大兴安岭铀成矿带及周缘铀矿地质调查选区”(DD20160129-09)

作者简介: 张恩(1985-),男,高级工程师,在读硕士,主要从事地质矿产勘查方面的工作。Email: zhangen600@126.com

行挖掘,进一步丰富和深化了成矿地质背景和找矿信息,依托 GIS 平台对多源找矿信息进行优化综合,应用证据权重法开展铀矿定量预测,对该区找矿具有较好的参考意义。

1 区域地质矿产背景

研究区位于天山—兴蒙造山系大兴安岭弧盆系,处于古亚洲洋构造域与中生代滨西太平洋构造域叠加部位,是我国中生代火山岩最为发育的区域之一^[17-18]。前中生代基底主要由太古宙变质岩,古生代浅变质岩、酸性火山岩及碎屑岩组成。盖层主要由中生代中期陆相中酸性火山岩和中生代晚期—新生代裂隙—玄武岩组成。岩浆活动频繁,华力西晚期—燕山早期侵入岩最为发育,以中酸性为主。晚侏罗世—早白垩世中酸性潜火山岩分布较为广泛,与铀成矿关系密切。NE-NNE 向断裂最为发育,

其次为 NW 向、近 EW 向、近 SN 向,交切呈网格状。NE-NNE 向深大断裂控制着含铀沉积建造、含铀古火山岩及侵入岩、中生代火山岩带的喷发及分布。深大断裂交切复合部位控制着火山盆地、火山机构和潜火山岩体的展布。铀矿化异常点密集分布,产出小型铀矿床 1 处,铀矿点 8 处,铀矿化点 105 处^[17-18]。铀成矿类型为火山热液型,铀矿化受 NE-NNE 向区域断裂、火山构造、酸性火山岩、潜火山岩、岩体接触带、低序级断裂及层间裂隙带和热液蚀变等复合控制。铀成矿时代为中生代中晚期。

2 铀成矿多源信息分析

在成矿地质特征及控矿因素分析的基础上,对航放、航磁、化探、遥感等成矿有利信息进行分析,建立铀矿综合找矿模型(表 1)。

1) 赋矿地层:铀矿化主要赋存于上侏罗统满克

表 1 区域铀矿多源找矿信息统计

Table 1 Multi-source prospecting informations for uranium deposits in the region

矿床(点)	成矿类型	地层	潜火山岩	构造方向	放射性异常	航磁区间	化探异常	遥感蚀变
701 矿床	蚀变裂隙带型	满克头鄂博组、哲斯组		EW	地面伽玛高场	—	Mo、Ag	铁染、羟基异常
78510 矿点	蚀变裂隙带型	玛尼吐组		SN、NE	航放铀高场、U/K 高值晕	50~75 nT	Mo、Pb、Cu	铁染异常
25 矿点	潜火山岩型	满克头鄂博组	花岗斑岩	SN、NE	航放铀高场、铀增量及 U/K 高值晕	-100~-75 nT	Mo	铁染、羟基异常
306 矿点	潜火山岩型	白音高老组	流纹斑岩	NW、NE	地面伽玛高场	—	Cu、Pb、Zn、Mo、Sn	羟基异常
3044 矿点	潜火山岩型	满克头鄂博组	石英斑岩	EW、NE	地面伽玛高场	—	Pb、Zn、Sn、Mo	羟基、铁染异常

注:“—”表示无数据。

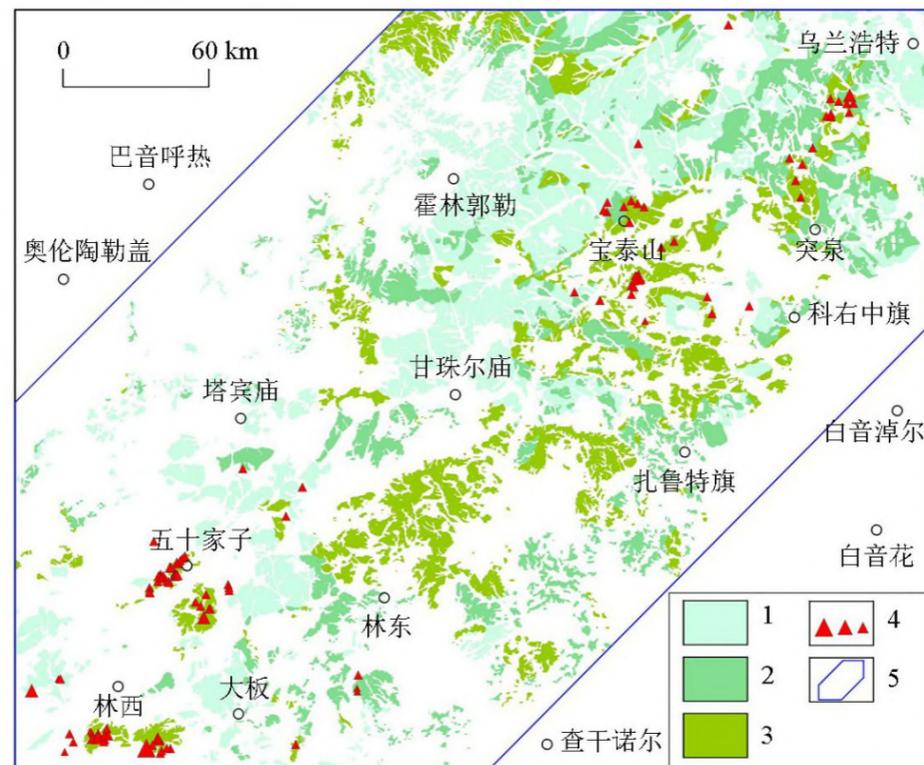
头鄂博组酸性火山岩,其次为白音高老组、玛尼吐组中酸性火山岩(图 1),少数赋存于二叠系哲斯组、林西组、大石寨组等地层。上侏罗统中酸性火山岩铀含量较高,一般为 $(6\sim 10)\times 10^{-6}$,具多旋回、多韵律、多岩相等特征,存在多个构造界面及岩相组合界面,易于矿液迁移及赋存。

2) 潜火山岩:晚侏罗世—早白垩世花岗斑岩、流纹斑岩、石英斑岩、正长斑岩等潜火山岩受火山构造和断裂控制,与铀成矿关系密切。铀矿化多赋存于潜火山岩及其内外接触带,一方面其铀含量较高,一般为 $(6.3\sim 7.2)\times 10^{-6}$ ^[17-18],能为成矿提供丰富的铀源;一方面其接触带附近由于受应力作用影响,易于产生断裂和裂隙带,为热液循环和铀矿沉淀提供了良好的通道和空间。

3) 控矿构造:根据 1:5 万航磁及 ETM 影像信息推断、解释,区域断裂呈近等间距分布,NW 向断裂

相间约 40~60 km,NE 向断裂相间约 30~50 km(图 2)。NE-NNE 向区域断裂为主要导矿构造,控制着燕山期火山—构造活动格局及铀矿化带的展布,以五十家子—乌兰浩特断裂最为显著。大中型近 EW、NW 向断裂为区域铀矿化定位构造,区域断裂旁侧的次级断裂及密集裂隙带则为赋矿构造,多组中小型断裂交汇部位赋矿最为有利。

4) 航放异常:航放异常是寻找铀矿最直接有利的信息。由于 K、U、Th 化学性质稳定性存在较大差异,成矿作用过程多伴随着 K、U、Th 的重新分配^[25-26]。依据铀矿(化)点集中区 K、U、Th 含量特征,在航放数据连片处理的基础上,选用多种参数模型(表 2),突显了铀矿化有关的异常信息。航放 U 高场、 ΔU 高值晕、U/K 比值高值晕、F 高值晕及 Hu 低值晕与铀矿化关系密切,其总体呈 NE 向展布,受 NE 向、NW 向区域断裂和火山岩浆岩带控制。

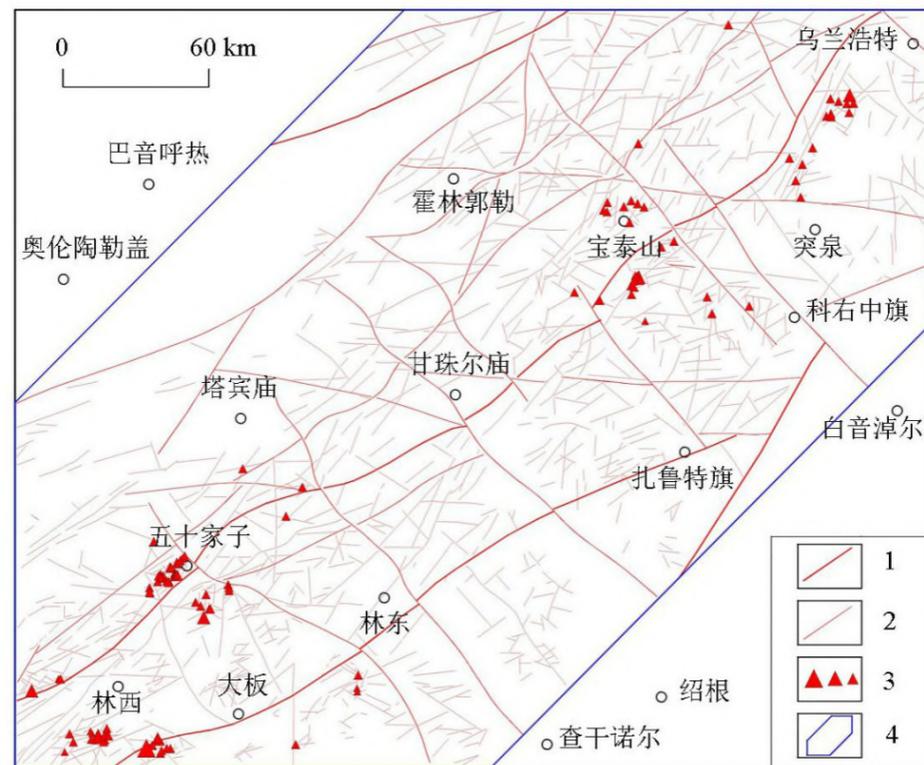


1—白音高老组;2—玛尼吐组;3—满克头鄂博组;4—铀矿床、矿点、矿化点;5—研究区

1—Baiyingaolao formation;2—Manitu formation;3—Manketou Obo formation;4—uranium deposit and uranium occurrences and uranium mineralization point;5—study area

图 1 林西—乌兰浩特地区主要赋矿地层分布

Fig.1 Distribution of main ore-bearing strata in Linxi-Ulanhot area



1—区域断裂;2—一般断裂;3—铀矿床、矿点、矿化点;4—研究区

1—regional fault;2—general fault;3—uranium deposit and uranium occurrences and uranium mineralized site;4—study area

图 2 林西—乌兰浩特地区断裂分布

Fig.2 Distribution of faults in Linxi-Ulanhot area

表 2 航放参数数学模型及地质意义

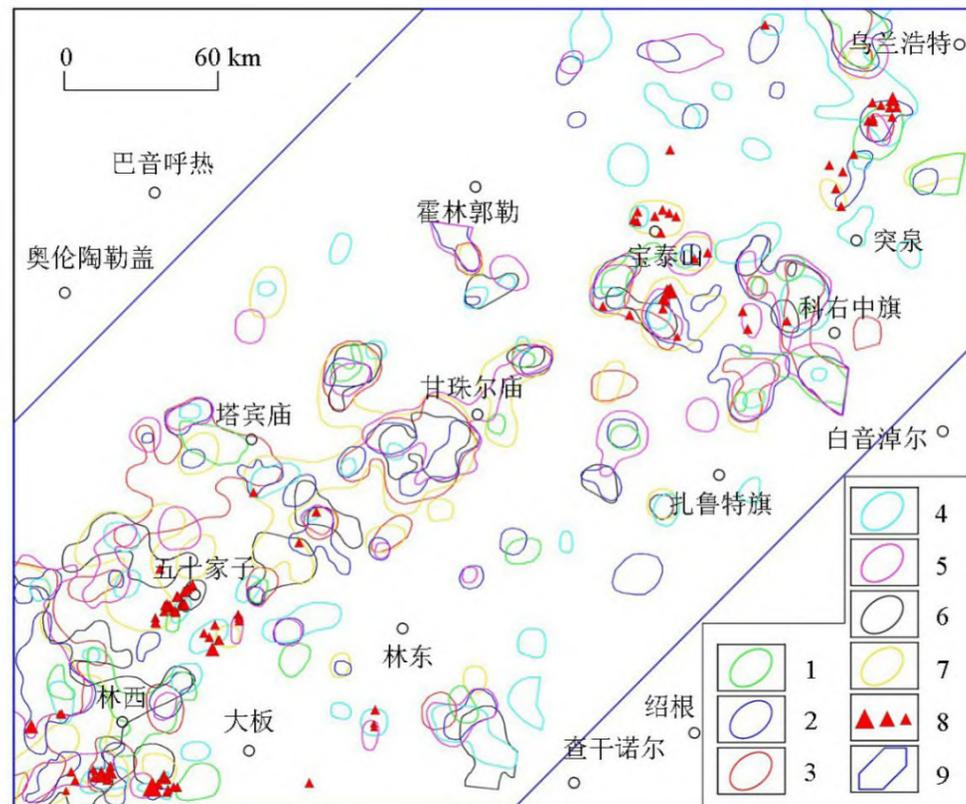
Table 2 Mathematical model of airborne radioactive parameters and geological significance

航放参数	数学模型	单位	地质意义
铀增量	$\Delta U = U - U'$	10^{-6}	U' 为同一地质单元铀含量平均值; ΔU 正值表示铀迁入,并反映迁出量; ΔU 负值表示铀迁出
F	$F = U \times K / Th$	10^{-2}	指示蚀变带,非蚀变岩比值小,蚀变岩比值大
铀钾比	U / K	10^{-4}	增强显示钾、铀含量变化的局部性差异,突出显示钾钠交代作用
活性铀	$Hu = (Th/b) - U$	10^{-6}	初始铀含量与现今铀含量之间的差值,表征成岩后铀活化迁移的数值。 b 为同一地质单元各测点钍/铀比值的平均值

5) 航磁信息:铀矿(化)点多处于磁场梯度变化带上,显示出区域深大断裂控制铀成矿的特征;部分处于狭窄带状和不规则小片状磁场显著减弱或相对减弱区,反映了中小型断裂破碎带及潜火山岩对铀成矿的控制特征。

6) 化探异常:区内铀与多金属矿关系密切,铀矿化多伴生 Mo、Pb、Zn、Ag、Cu、W、Sn 等元素化探异常^[17-18,27-29]。1:20 万上述化探异常总体呈 NE 向展

布(图 3),局部呈 NW 向、近 EW 向展布,集中分布于林西—甘珠尔庙、宝泰山—科右中旗、突泉—乌兰浩特等地带,与航放异常集中区大致相似,多处于燕山期花岗岩及其接触带、晚侏罗世—早白垩世潜火山岩、上侏罗统酸性火山岩及二叠系碎屑岩夹酸性火山岩,受断裂及火山岩浆岩带控制作用明显。Mo 化探异常多分布于火山盆地内部,W、Cu 化探异常多分布于隆起带及周边。



1—Cu 异常;2—Pb 异常;3—Zn 异常;4—Mo 异常;5—Ag 异常;6—W 异常;7—Sn 异常;8—铀矿床、矿点、矿化点;9—研究区
1—Cu anomaly;2—Pb anomaly;3—Zn anomaly;4—Mo anomaly;5—Ag anomaly;6—W anomaly;7—Sn anomaly;
8—uranium deposit and uranium occurrences and uranium mineralized site;9—study area

图 3 林西—乌兰浩特地区化探异常分布

Fig.3 Distribution of geochemical anomalies in Linxi- Ulanhot area

7) 遥感蚀变:区内铀矿化多伴生黄铁矿化、赤铁矿化、褐铁矿化、水云母化、绿泥石化等热液蚀变。ETM 数据提取羟基、铁染异常结果显示,由于植被、残坡积物覆盖率较高,蚀变信息总体较弱,多为点状、斑状。蚀变异常总体沿断裂构造、火山机构或岩体接触带展布,断裂密集分布部位蚀变规模及强度显著提高。区内铀矿床(点)多位于或邻近遥感蚀变异常。

3 多源信息成矿预测

3.1 证据权重法

证据权重法是加拿大数学地质学家 Agterberg 提出的一种地质学统计方法,是以贝叶斯统计分析模式为基础,通过对成矿密切相关的地质学信息的叠加复合分析,来进行矿产成矿远景预测^[2-10]。其数学原理及计算步骤如下。

1) 前验概率:首先将研究区划分成面积相等的 T 个单元,其中有矿单元数为 D ,则任一单元中矿床(点)出现的概率为:

$$P_{\text{先验}} = D/T, \quad (1)$$

先验几率为:

$$O_{\text{先验}} = P_{\text{先验}} / (1 - P_{\text{先验}})。 \quad (2)$$

2) 证据权重:任一证据因子权重值定义为:

$$W_j^+ = \ln \left[\frac{P(B/D)}{P(B/D^-)} \right], \quad (3)$$

$$W_j^- = \ln \left[\frac{P(B^-/D)}{P(B^-/D^-)} \right]。 \quad (4)$$

式中: W_j^+ 、 W_j^- 分别为证据因子 j 存在区和不存在区的权重值,原始数据缺失区域的权重值为 0; B 、 B^- 分别为因子存在区和不存在区的单元数; D 、 D^- 分别为含矿和不含矿的单元数。

证据因子与矿床(点)的相关程度为:

$$C = W_j^+ - W_j^-, \quad (5)$$

式中： $C > 0$ ，表明有利于成矿； $C = 0$ ，表明对找矿无指示意义； $C < 0$ ，表明不利于成矿。 C 值是选取证据因子的重要依据。

3) 后验概率：后验概率的大小与成矿概率的大小相对应。

对于任一单元 k 为有矿的后验几率为：

$$O_{\text{后验}} = e^{\ln O_{\text{先验}} + \sum_{j=1}^n W_j^k}; j = 1, 2, 3, \dots, n. \quad (6)$$

任一单元 k 为有矿单元的后验概率为：

$$P_{\text{后验}} = O_{\text{后验}} / (1 + O_{\text{后验}}). \quad (7)$$

3.2 成矿信息提取

以 1:20 万地质图、1:20 万化探异常图、1:5 万航放及航磁数据、ETM 遥感数据及最新的矿产数据库等资料为基础，在数据处理、解释、解译及信息提取的基础上，分别建立点、线、面矢量属性层。

线性信息有利度分析主要是进行密度、角度、对称度等计算^[2]。面状有利信息选取主要从其必要性和有效性两方面考虑^[5-7]，必要性体现在其是否覆盖大量矿床（点），有效性体现在其矿产当量（ N ）、单位矿产当量（ M ）和矿床出现率（ F ）的大小。矿产当量是由池顺都等学者于 20 世纪 90 年代末提出，是将不同规模的矿产地折算成相当于矿（化）点规模的矿产地的个数^[4]。

$$N = N_1 K_1 + N_2 K_2 + N_3 K_3, \quad (8)$$

$$M = N/S, \quad (9)$$

$$F = N/N_{\text{sum}}, \quad (10)$$

其中： S 为图层面积； N_1 、 N_2 、 N_3 及 K_1 、 K_2 、 K_3 分别为图层覆盖小型矿床、矿点、矿化点的数量及权系数； N_{sum} 为全区矿产当量的总和，即全区小型矿床、矿

点、矿化点数量与权系数乘积的总合。矿产当量概念提出初期，多数学者根据区域大、中、小型矿床与矿点储量之间的关系^[4]，在计算矿产当量时，取权系数 K （大型矿床）= 125、 K （中型矿床）= 25、 K （小型矿床）= 5、 K （矿点）= 1。近几年一批学者认为基于储量的系数设置片面，夸大了大、中型矿床的指示作用，弱化了小型矿床、矿点甚至矿化点的指示作用^[6-8]，经多次对比试验，确定了 K （大型矿床）= 40、 K （中型矿床）= 20、 K （小型矿床）= 10、 K （矿点）= 5、 K （矿化点）= 1，其在铀及多金属预测中取得了较好的应用效果。本次沿用陈金声、吴现兴等学者关于铀矿权系数划分的方案，预测采用 $K_1 = 10$ 、 $K_2 = 5$ 、 $K_3 = 1$ 。因全区 N_1 、 N_2 、 N_3 分别为 1、8、105，故 $N_{\text{sum}} = 155$ 。

研究区面积为 87 013 km²，单位矿产当量为 0.0018 个/km²。理论上，任一证据层单位矿产当量 > 0.0018 个/km² 时，即为有利证据层。

1) 赋矿地层：区内 96 处矿床、矿（化）点处于满克头鄂博组、白音高老组和玛尼吐组（表 3），其余星散分布。满克头鄂博组单位矿产当量最大，矿床出现率达 72.26%，为有利证据层。白音高老组和玛尼吐组覆盖有多处矿（化）点，由于出露面积大，单位矿产当量较小；二叠系哲斯组、林西组、大石寨组等地层覆盖矿点较少，成矿指示作用不明显。

2) 潜火山岩：考虑到潜火山岩热液活动有一定影响范围，将晚侏罗世—早白垩世中酸性潜火山岩外边界线分别以 0.5~3.0 km 为半径形成缓冲区。当半径为 2.0 km 时， C 值最大，覆盖有 49 处矿床、矿（化）点（表 4），为有利证据层。

表 3 地层找矿有利度分析

Table 3 Beneficial degree of rock formations

地层	矿床规模个数			N /个	S /km ²	M /(个/km ²)	F /%	C
	矿床	矿点	矿化点					
白音高老组	0	0	8	8	10866	0.0007	5.16	-0.944
玛尼吐组	0	1	8	13	7344	0.0017	8.39	-0.295
满克头鄂博组	1	6	72	112	7096	0.0158	72.26	2.461

表 4 晚侏罗世—早白垩世潜火山岩缓冲区找矿有利度分析

Table 4 Beneficial degree of buffer zone of the Late Jurassic-Early Cretaceous sub-volcanic rocks

缓冲半径 /km	矿床规模个数			N /个	S /km ²	M /(个/km ²)	F /%	C
	矿床	矿点	矿化点					
0.5	0	2	19	29	7757	0.0037	18.71	0.827
1.0	1	2	28	48	13916	0.0035	34.97	0.700
1.5	1	3	42	67	20490	0.0032	43.22	0.852
2.0	1	4	59	104	27063	0.0038	67.10	1.094
2.5	1	5	62	110	33381	0.0033	70.10	1.037
3.0	1	5	87	122	39174	0.0026	78.71	1.008

3) 控矿构造:据矿床(点)到断裂距离统计显示,矿床(点)均位于断裂缓冲区 1.8 km 范围内。将断裂以 0.1~1.8 km 为半径形成缓冲区,当缓冲半径为 450 m 时, C 值最大,覆盖 76 处矿床、矿(化)点,为有利证据层。当断裂密度区间大于 0.15 时,分布有 69 处矿床(点),单位矿产当量为 0.087 个/ km^2 ,为成矿有利区间。

4) 航放异常:航放数据区覆盖铀矿点 5 处、矿化点 86 处。叠加统计显示,航放 U 高场、 ΔU 高值晕、 F 参数高值晕、 U/K 高值晕、 Hu 低值晕 5 个航放参数 C 值均较大(表 5),均为找矿有利信息。

5) 航磁信息:航磁 ΔT 化极等值图分级图层与矿床(点)叠加分析显示,矿床(点)主要分布于-200

~175 nT 值域范围内,-100~75 nT 区域 C 值最大,覆盖矿(化)点 76 个,单位矿产当量为 0.0158 个/ km^2 ,矿床出现率为 86.49%,为找矿有利区间。

6) 化探异常:1:20 万 Mo 、 Pb 、 Zn 、 Ag 、 Cu 、 W 、 Sn 化探异常与铀矿床(点)叠加分析显示(表 6), Cu 、 Zn 元素化探异常覆盖矿(化)点较少,找矿指示意义较小;其余元素化探异常均覆盖较多铀矿床、矿(化)点, C 值均较大,具有较好的指示意义。

7) 遥感蚀变异常:热液蚀变是判断地质构造环境和成矿作用优劣的主要依据,是找矿重要标志。铁染蚀变及羟基蚀变分别覆盖矿床、矿(化)点 48 处、46 处,单位矿产当量分别为 0.04 个/ km^2 、0.173 个/ km^2 ,对找矿具有一定的指示意义。

表 5 航放特征参数找矿有利度分析

Table 5 Beneficial degree of airborne radioactive characteristic parameters

参数	矿床规模个数			$N/\text{个}$	S/km^2	$M/(\text{个}/\text{km}^2)$	$F/\%$	C
	矿床	矿点	矿化点					
U 高场	0	4	75	95	4024	0.0236	85.59	2.987
ΔU 高值晕	0	3	71	86	2962	0.0290	77.48	2.607
F 参数高值晕	0	4	57	77	1881	0.0409	69.37	2.417
U/K 高值晕	0	5	66	86	2723	0.0316	77.48	2.842
Hu 低值晕	0	3	69	84	3223	0.0261	75.68	2.619

表 6 研究区元素异常找矿有利度分析

Table 6 Beneficial degree of each element anomaly

元素	矿床规模个数			$N/\text{个}$	S/km^2	$M/(\text{个}/\text{km}^2)$	$F/\%$	C
	矿床	矿点	矿化点					
Cu	0	0	10	10	3643	0.0027	6.45	0.824
Pb	0	3	32	47	7975	0.0059	30.32	1.667
Zn	0	3	16	31	8912	0.0035	20.00	0.669
Mo	1	4	54	84	6027	0.0139	54.19	2.587
Ag	1	3	27	52	8446	0.0062	33.54	1.377
W	0	4	32	52	7237	0.0072	33.55	1.577
Sn	0	6	52	82	10429	0.0079	52.90	1.973

3.3 证据图层构置

研究区按 $2\text{ km} \times 2\text{ km}$ 单元格进行划分,共计 21 912 个单元格,先验概率为 0.004 1。证据层经条件独立性检验显示,在显著性水平为 0.05 的条件下,航放 U 高场与 ΔU 高值晕两个证据层相关性较高,其余证据层基本满足条件独立性。因此,对 ΔU 高值晕证据层进行了剔除,运用证据权重法对本次预测选用的地质、航放、航磁、遥感、化探等方面的 16 个证据层成矿有利度进行计算(表 7)。

计算结果显示,与前人研究成果对比^[5-9],研究区断裂缓冲区、断裂等密度、潜火山岩缓冲区、磁场有利区、 Mo 化探异常、航放 U 高场、 F 参数高值晕、 U/K 高值晕、 Hu 低值晕、铁染蚀变异常、羟基蚀变异常等证据层的选取多与前人相一致,仅证据层值

域范围选取不一。而 Ag 、 Pb 、 W 、 Sn 化探异常证据层的选取与前人不一,显示出研究区的特殊性,研究区铀矿多伴生 Ag 、 Pb 、 W 、 Sn 化探异常。研究区断裂与成矿关系最为密切,显示出火山岩型铀矿断裂控矿的普遍特征;满克头鄂博组与成矿关系较为密切,显示出酸性火山岩控矿的特征;航放参数示矿性较为显著,显示出航放资料探寻铀矿的优势性; Mo 化探异常与成矿关系密切,与区域铀钼矿共生规律性相一致;潜火山岩边界 2 km 缓冲区、航磁有利区(-100~75 nT)、遥感蚀变异常及 Ag 、 Pb 、 W 、 Sn 化探异常 C 值相对较小,对找矿指示意义相对较小。

3.4 预测结果及评价

原则上,后验概率大于先验概率(0.004 1)的区域即为成矿有利区。在对后验概率与其对应累计面

表 7 铀矿证据层权重值的计算

Table 7 Weight value of evidence layers of uranium deposits

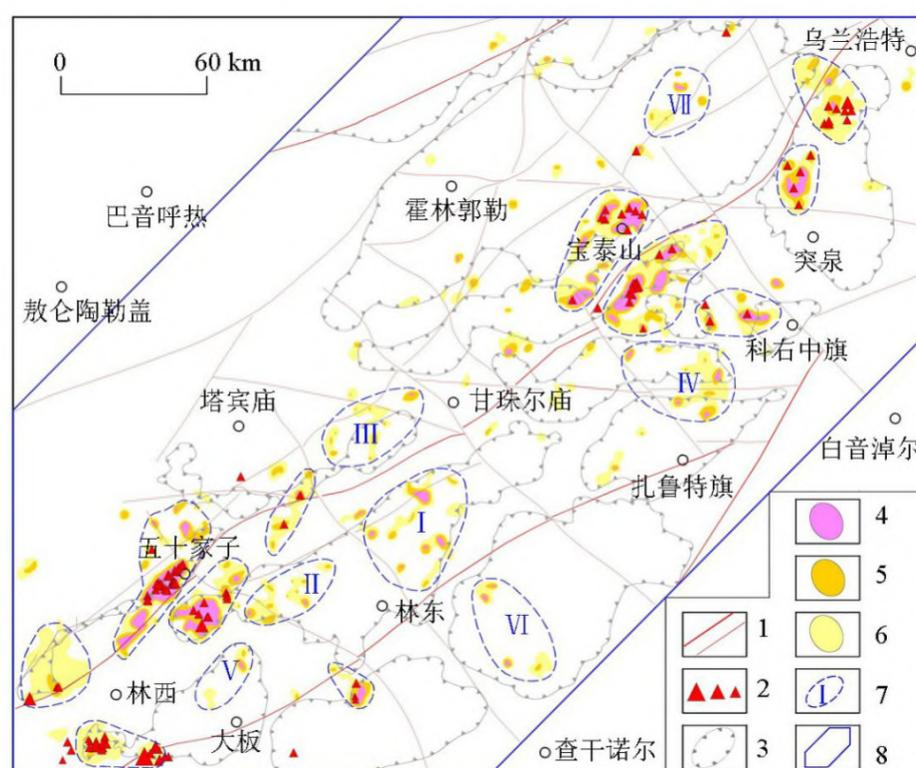
证据图层	W^+	W^-	C	
地质变量	满克头鄂博组	1.342	-1.119	2.461
	潜火山岩边界 2 km 缓冲区	0.436	-0.659	1.094
	断裂 450 m 缓冲区	0.761	-3.875	4.636
	断裂等密度	1.959	-0.630	2.589
	U 高场	1.885	-1.102	2.987
航放	F 参数高值晕	1.763	-0.655	2.417
	U/K 高值晕	1.816	-1.026	2.842
	Hu 低值晕	1.725	-0.894	2.619
航磁	磁场有利区 (-100~75 nT)	0.023	-0.267	0.290
化探	Mo 化探异常	1.813	-0.773	2.587
	Ag 化探异常	1.061	-0.316	1.377
	Pb 化探异常	1.240	-0.427	1.667
	W 化探异常	1.250	-0.327	1.577
	Sn 化探异常	1.332	-0.641	1.973
遥感	铁染蚀变异常	0.526	-0.522	1.049
	羟基蚀变异常	0.874	-0.556	1.430

积进行统计分析的基础上,通过后验概率求拐点的方法^[5-7],确定后验概率的临界值为0.007 3,结合后验概率值大小和已知矿床(点)分布特征,将远景区分为三级:以后验概率值 ≥ 0.8 圈定 I 级远景区;以 $0.4 \leq$ 后验概率值 < 0.8 圈定 II 级远景区;以 $0.007 3 <$ 后验概率值 < 0.4 圈定 III 级远景区。

本次共圈定成矿远景区 18 处,总体呈 NE-NNE 向展布,主要分布于五十家子北—宝泰山北断裂(F_1)与大板—扎鲁特旗断裂(F_3)夹持部位,集中分

布于五十家子—乌兰浩特(F_2)断裂两侧,与区域构造和火山岩喷发带展布相一致。预测结果显示,区内 91.23%的矿床、矿(化)点位于成矿远景区内(图 4),表明预测准确度及可信度较高,预测方法有效。

五十家子东部及南部、林西南部、宝泰山—科右中旗、突泉—乌兰浩特等地带存在多处远景区,规模大且后验概率值高,存在多处铀矿点、矿化点及异常点,与前人预测成矿远景区相一致。本次新圈定成矿远景区 7 处(图 4),林东盆地中部(I 区)及西部



1—区域断裂、一般断裂;2—铀矿床、矿点、矿化点;3—火山盆地边界;4—一级远景区;5—二级远景区;6—三级远景区;7—成矿远景区及编号;8—研究区

1—regional fault、general fault;2—uranium deposit、uranium occurrences、uranium mineralized site;3—volcanic basin and numbering;4—first prospective areas;5—second prospective areas;6—third prospective areas;7—prospective areas and numbering;8—study area

图 4 林西—乌兰浩特地区铀成矿远景预测

Fig.4 Prospective map of uranium mineralization in Linxi-Ulanhot area

(II区)、浩尔吐盆地北东部(III区)、格尔楚鲁盆地东部及扎鲁特旗盆地西部(IV区)存在多处远景区,规模较大、后验概率值较高,均处于五十家子—乌兰浩特(F_2)、大板—扎鲁特旗(F_3)区域断裂夹挟地带,位于已知矿化带延伸部位,NE、NW及EW向断裂交切复合,火山机构发育,满克头鄂博组及晚侏罗世—早白垩世潜火山岩分布广泛,航放及化探异常线索丰富,铁染蚀变分布较为密集,尚未发现铀矿,找矿潜力较大。大板盆地北部(V区)、天山盆地西部及南部(VI区)、宝石盆地中部(VII区)等地带,成矿地质条件及找矿线索与已知矿床(点)相似,具有一定的找矿前景。

4 结论

1) 在铀成矿条件分析及控矿因素解剖的基础上,结合物、化、遥异常信息,建立了铀矿综合找矿模型。研究区铀成矿主要受断裂、晚侏罗世—早白垩世潜火山岩、满克头鄂博组火山岩复合控制。航放特征参数(U高场、 F 参数高值晕、U/K高值晕、 H_u 低值晕)、航磁异常、遥感铁染及羟基蚀变和Mo、Ag、Pb等元素化探异常为找矿有利信息。

2) 通过GIS平台,优选构置了16个证据层,采用证据权重法开展成矿预测,圈定成矿远景区18处,多数铀矿床、矿(化)点位于成矿远景区内,表明预测结果较为可靠。其中林东、格尔楚鲁、扎鲁特旗等盆地内存在7处成矿远景区,尚未发现铀矿床(点),远景区多位于已知矿化带延伸部位,成矿地质条件优越,找矿线索丰富,具备较好的找矿潜力。

3) 应用证据权重法进行铀成矿预测,对不同尺度、多源地学信息进行高效提取、优选和综合,预测结果更为精准、可靠。

参考文献(References):

- [1] 陈建平,陈勇,王全明.基于GIS的多元信息成矿预测研究——以赤峰地区为例[J].地学前缘,2008,15(4):18-26.
Chen J P, Chen Y, Wang Q M. Study on synthetic informational mineral resource prediction using GIS: A case study in Chifeng region[J]. Earth Science Frontiers, 2008, 15(4): 18-26.
- [2] 张恩,李名松,汪冰,等.基于GIS的证据权重法在小兴安岭北段金成矿预测中的应用[J].物探与化探,2015,39(4):756-761.
Zhang E, Li M S, Wang B, et al. The application of GIS evidence weight method to the gold metallogenic prognosis in the northern part of the Xiao Hingan Mountains[J]. Geophysical and Geochemical Exploration, 2015, 39(4): 756-761.
- [3] 孔旭,密文天,莫雄,等.基于MRAS证据权重法的湖南怀化地

区金矿成矿预测[J].物探与化探,2016,40(3):467-474.

Kong X, Mi W T, Mo X, et al. Metallogenic prediction of gold deposits with weighting of evidence based on MRAS in Huaihua area, Hunan Province[J]. Geophysical and Geochemical Exploration, 2016, 40(3): 467-474.

- [4] 池顺都,周顺平,吴新林.GIS支持下的地质异常分析及金属矿产经验预测[J].地球科学,1997,22(1):99-103.
Chi S D, Zhou S P, Wu X L. Geological anomaly analysis and experience prognosis of metallic mineral under GIS[J]. Earth Science, 1997, 22(1): 99-103.
- [5] 张恩,汪冰,王瑞军,等.基于MORPAS的证据权重法在沽源盆地铀成矿预测中的应用[J].地质找矿论丛,2013,28(4):540-545.
Zhang E, Wang B, Wang R J, et al. An application of MORPAS-based weight evidence method to uranium metallogenic prognosis in Guyuan basin[J]. Contributions to Geology and Mineral Resources Research, 2013, 28(4): 540-545.
- [6] 陈金声,吴现兴.基于MORPAS的证据权重法在百顺地区铀成矿预测中的应用[J].铀矿地质,2011,27(5):302-308,320.
Chen J S, Wu X X. An application of weight evidence method with MORPAS to uranium metallogenic prognosis in Baishun area[J]. Uranium Geology, 2011, 27(5): 302-308, 320.
- [7] 吴现兴,李冬玉,陈金声,等.基于MORPAS空间分析分模块的铀矿找矿有利度分析——以百顺地区为例[J].化工矿产地质,2010,32(3):226-231.
Wu X X, Li D Y, Chen J S, et al. Ore-finding beneficial degree analysis of uranium based on spatial analysis modules of MORPAS system in Take Baishun area as example[J]. GEOLOGY OF CHEMICAL MINERALS, 2010, 32(3): 226-231.
- [8] 张琪,王建国,李必红,等.基于GIS的证据权重法在铀成矿远景预测中的应用——以内蒙古巴音戈壁盆地为例[J].世界核地质科学,2012,29(1):41-46.
Zhang Q, Wang J G, Li B H, et al. Application of GIS based on evidence weighting method to the evaluation of uranium metallogenic target areas: A case study of Bayingebi Basin in Inner Mongolia[J]. World Nuclear Geoscience, 2012, 29(1): 41-46.
- [9] 曹翠,吴虹,黄晓娟,等.基于RS&GIS的证据权重法在花山岩体铀成矿预测中的应用[J].桂林理工大学学报,2012,32(2):162-168.
Cao C, Wu H, Huang X J, et al. Application of evidence weights method based on RS&GIS for prospecting uranium in mines in Huashan granite body, Guangxi[J]. Journal of Guilin University of Technology, 2012, 32(2): 162-168.
- [10] Scott M, Dimitrakopoulos R. Quantitative analysis of mineral resources for strategic planning: implications for Australian geological surveys[J]. Natural Resource Research, 2001, 10(3): 159-177.
- [11] 全旭东,王永军,汪冰,等.基于GIS的人工神经网络模型在铀成矿预测中的应用——以塔里木盆地北缘为例[J].铀矿地质,2013,29(6):374-379.
Quan X D, Wang Y J, Wang B, et al. Application of ANN and GIS in uranium metallization prediction: A case study of northern Tarim basin[J]. Uranium Geology, 2013, 29(6): 374-379.
- [12] Boleneus D E, Raines G L, Causey J D, et al. Assessment method

- for epithermal gold deposits in Northeast Washington State using weights of evidence GIS modeling [R]. Open File Report 01-501, Reston: USGS, 2001: 1 - 42.
- [13] 李堃, 胡光道, 段其发, 等. 基于 MORPAS 平台特征分析法的成矿远景区预测——以个旧西区锡多金属矿为例 [J]. 地质科技情报, 2009, 28(4): 65 - 70.
- Li K, Hu G D, Duan Q F, et al. Application of characteristic analysis in metallogenic prediction based on MORPAS: A case study of western Gejiu Tin polymetallic deposit, Yunnan Province [J]. Geological Science and Technology Information, 2009, 28(4): 65 - 70.
- [14] 刘世翔, 薛林福, 郗瑞卿, 等. 基于 GIS 的证据权重法在黑龙江省西北部金矿成矿预测中的应用 [J]. 吉林大学学报: 地球科学版, 2007, 37(5): 889 - 894.
- Liu S X, Xue L F, Qie R Q, et al. An application of GIS based weights of evidence for gold prospecting in the northwest of Heilongjiang Province [J]. Journal of Jilin University: Earth Science Edition, 2007, 37(5): 889 - 894.
- [15] 李随民, 姚书振, 韩玉丑, 等. 证据权重法在张家口地区铅锌银富集区定量评价中的应用 [J]. 矿床地质, 2008, 27(5): 647 - 654.
- Li S M, Yao S Z, Han Y C, et al. Application of weights of evidence method to quantitative prognosis and evaluation of mineral resources in Zhangjiakou area, Hebei Province [J]. Mineral Deposits, 2008, 27(5): 647 - 654.
- [16] 魏冠军, 党亚民, 章传银, 等. GIS 的信息量法在澜沧老厂成矿预测中的应用 [J]. 测绘科学, 2010, 35(6): 217 - 218.
- Wei G J, Dang Y M, Zhang C Y, et al. Application of GIS based information method to minor prediction in Lancang Laochang [J]. Science of Surveying and Mapping, 2010, 35(6): 217 - 218.
- [17] 刘庆, 李占春, 于振清, 等. 大兴安岭中南段铀及多金属成矿远景预测及找矿靶区优选项目成果报告 [R]. 赤峰: 核工业二四三大队, 2011, 12 - 18.
- Liu Q, Li Z C, Yu Z Q, et al. Report on the results of the project of uranium and polymetallic metallogenic prospecting and target selection in the middle south section of Daxing'an Mountains [R]. Chifeng: Geologic Party of No.243, 2011, 12 - 18.
- [18] 王青, 李长华, 王世成, 等. 内蒙古林西—乌兰浩特地区铀矿远景调查报告 [R]. 赤峰: 核工业二四三大队, 2016: 55 - 252.
- Wang Q, Li C H, Wang S C, et al. Prospective investigation report of uranium deposits in Linxi-Ulanhot area, Inner Mongolia [R]. Chifeng: Geologic Party of No.243, 2016: 55 - 252.
- [19] 庄廷新, 范裕杰, 韩维久, 等. 大兴安岭火山岩带富大型铀矿成矿地质条件研究 [R]. 沈阳: 核工业二四〇研究所, 1996: 1 - 5.
- Zhuang T X, Fan Y J, Han W J, et al. Study on metallogenic geological conditions of large scale uranium rich deposits in the Daxing'anling volcanic belt [R]. Shenyang: Research Institute of No.240, 1996: 1 - 5.
- [20] 罗毅, 刘权, 汪远志, 等. 扎兰屯预测工作区火山岩型铀矿资源潜力评价 [R]. 北京: 中国核工业地质局, 2010.
- Luo Y, Liu Q, Wang Y Z, et al. Potential evaluation of volcanic-type uranium resources in Zhalantun prediction work area [R]. Beijing: Bureau of Geology, 2010.
- [21] 高卫东, 孟庆敏, 崔志强, 等. 内蒙古自治区锡林郭勒盟—赤峰市东部 1:5 万航空物探综合站测量报告 [R]. 廊坊: 中国地质科学院地球物理地球化学勘查研究所, 2013.
- Gao W D, Meng Q M, Cui Z Q, et al. Survey report of 1:50000 aerophysical geophysical complex station in the East of Xilingol League-Chifeng City, Inner Mongolia Autonomous Region [R]. Langfang: Institute of Geophysical and Geochemical Exploration, 2013.
- [22] 王卫平, 王德发, 徐东礼, 等. 内蒙古自治区锡林浩特—巴林左旗一带 1:5 万航空物探综合站勘查成果报告 [R]. 北京: 中国自然资源航空物探遥感中心, 2012.
- Wang W P, Wang D F, Xu D L, et al. Report on the exploration results of 1:50000 aerophysical geophysical comprehensive station in Xilinhot-Bahrain Zuoqi, Inner Mongolia Autonomous Region [R]. Beijing: China Aero Geophysical Survey & Remote Sensing Center for Natural Resources, 2012.
- [23] 崔志强, 廖桂香, 孟庆敏, 等. 内蒙古自治区大兴安岭中南段、二连—东乌旗一带 1:5 万航空物探综合站勘查报告 [R]. 廊坊: 中国地质科学院地球物理地球化学勘查研究所, 2012.
- Cui Z Q, Liao G X, Meng Q M, et al. Survey report of 1:50000 aerogeophysical integrated station in the middle-south section of Daxing'an Mountains and Erlian-Dongwuqi area of Inner Mongolia Autonomous Region [R]. Langfang: Institute of Geophysical and Geochemical Exploration, 2012.
- [24] 张梅. 大兴安岭中南段铜多金属矿床成矿系统研究 [D]. 北京: 中国地质大学(北京), 2011.
- Zhang M. Study on the Metallogenic System of Copper-polymetallic Deposits in the middle-southern part of Da Hinggan Mountains [D]. Beijing: China University of Geosciences (Beijing), 2011.
- [25] 张恩, 卢辉雄, 汪冰, 等. 大兴安岭铀成矿带及周缘铀矿地质调查选区成果总结报告 [R]. 石家庄: 核工业航测遥感中心, 2018.
- Zhang E, Lu H X, Wang B, et al. Summary report on the results of geological survey and concentration of uranium deposits in and around the Daxing'anling uranium metallogenic belt [R]. Shijiazhuang: Airborne Survey and Remote Sensing Center of Nuclear Industry, 2018.
- [26] 李怀渊, 江民忠, 陈国胜, 等. 我国航空放射性测量进展及发展方向 [J]. 物探与化探, 2018, 42(4): 645 - 652.
- Li H Y, Jing M Z, Chen G S, et al. The brilliant achievements and technological innovation of airborne radioactivity survey in China [J]. Geophysical and Geochemical Exploration, 2018, 42(4): 645 - 652.
- [27] 王青, 李长华, 苏连驰, 等. 内蒙古白音沙那林场破火山机构铀成矿条件分析 [J]. 铀矿地质, 2015, 31(6): 578 - 581.
- Wang Q, Li C H, Su L C, et al. Analysis on uranium metallogenic condition of Baiyinchana woodland caldera in Inner Mongolia [J]. Uranium Geology, 2015, 31(6): 578 - 581.
- [28] 吴燕清, 张春雨, 王青, 等. 内蒙古新城子火山盆地铀成矿条件分析 [J]. 铀矿地质, 2018, 34(1): 20 - 24.
- Wu Y Q, Zhang C Y, Wang Q, et al. Uranium metallogenic conditions evaluation of Xinchengzi volcanic basin in Inner Mongolia [J]. Uranium Geology, 2018, 34(1): 20 - 24.
- [29] 席海银, 马超, 卢胜军, 等. 大兴安岭中段铀成矿地质条件及找

矿方向[J].东华理工大学:自然科学版,2017,40(3):237-245.

Xi H Y, Ma C, Lu S J, et al. Metallogenic condition and prospecting

orientation of uranium deposits in the middle district of Daxinganling Mountains[J]. Journal of East China University of Technology: Natural Science, 2017, 40(3): 237-245.

An analysis of multivariate uranium metallogenic information and metallogenic prognosis in Linxi-Ulanhot area

ZHANG En^{1,2}, DUAN Ming³, LU Hui-Xiong^{1,2}, FENG Bo¹, CAO Qiu-Yi^{1,2}, YANG Yan-Chao¹

(1. Airborne Survey and Remote Sensing Center of Nuclear Industry, Shijiazhuang 050002, China; 2. Faculty of Earth Sciences, East China Institute of Technology, Nanchang 330170, China; 3. Tianjin Center of China Geological Survey, Tianjin 330017, China)

Abstract: Located in the south-central part of Da Hinggan Mountains uranium metallogenic province, Linxi-Ulanhot area is characterized by strong tectonic magmatic activity and favorable geological conditions for uranium mineralization. Limited by such factors as vegetation development and thick cover, it is difficult for the single exploration method to meet the demand of the current deep prospecting. Based on the analysis of ore-forming conditions and ore-controlling factors, the authors constructed a comprehensive volcanic-type uranium ore comprehensive prospecting model by integrating such pieces of multivariate information as airborne radioactivity, aeromagnetic survey, geochemistry and remote sensing. Using spatial analysis function of the geographic information system (GIS), the authors extracted the multivariate prospecting information, carried out quantitative prognosis for uranium ore by evidence weighting method, and selected 16 evidence layers closely related to mineralization. Among them, the Upper Jurassic Manketouebo Formation is the main ore-bearing strata, the Late Jurassic-Early Cretaceous subvolcanic rocks are closely related to ore formation, the ore-controlling effect of NE-NNE trending fracture is significant, and uranium mineralization is mostly developed in the fault-dense zone and the intersection zone. Such anomalies as airborne radioactive anomalies (U high field, F high value halo, U/K high value halo, Hu low value halo), geochemical anomalies (Mo, Ag, Pb, W, Sn) and remote sensing alterations (Iron alteration, hydroxy alteration) play important roles in the indication of volcanic uranium mineralization. According to the posterior probability determined by the evidence weight method, 18 prospective areas were delineated, covering most uranium deposits (ore spots) in the area, indicating that the prediction results are reliable. In seven of them, uranium deposits (ore spots) were found for the first time. All these places have excellent metallogenic geological conditions, rich prospecting clues and good prospecting prospects, and the results obtained by the authors have certain guiding significance for further prospecting.

Key words: uranium mineralization; multivariate information; metallogenic prediction; Linxi-Ulanhot area

(本文编辑:王萌)