



新疆谢米斯台成矿带火山岩型铀矿预测^{*}

孙远强¹, 范洪海^{1* * *}, 薛春纪², 耿瑞瑞¹, 陈金勇¹, 田建吉¹, 马汉峰³

(1 中核集团铀资源勘查与评价技术重点实验室 核工业北京地质研究院, 北京 100029; 2 地质过程与矿产资源国家重点实验室 中国地质大学地球科学与资源学院, 北京 100083; 3 中广核铀业发展有限公司, 北京 100029)

摘要 谢米斯台成矿带是中国新疆北部重要的铀多金属成矿带, 铀矿勘查突破令人期待。文章通过对典型铀矿床观察研究, 建立了火山岩型铀成矿预测模型, 在 GIS 平台系统提取了赋矿地层、含矿围岩、控矿构造、航磁推断隐伏岩体及断裂构造、U-Be 元素组合异常、铀矿床和矿化点等各类成矿、找矿信息, 采用 MRAS 系统中的特征分析模块进行铀矿产定位预测。按照后验概率大小划分了三级有利成矿远景区, 其中 A 级包括赛力克、白杨河和七一工区 3 个远景区, 显示出较大的铀成矿找矿潜力, 在今后的找矿勘查中应给予充分重视。

关键词 地质学 火山岩型铀矿 白杨河铀矿床 预测模型 特征分析法 谢米斯台成矿带

中图分类号: P619.14

文献标志码: A

Metallogenic prediction of volcanic type uranium resources in Xiemisitai metallogenic belt, Xinjiang

SUN YuanQiang¹, FAN HongHai¹, XUE ChunJi², GENG RuiRui¹, CHEN JinYong¹,
TIAN JianJi¹ and MA HanFeng³

(1 CNC Key Laboratory of Uranium Resource Exploration and Evaluation Technology, Beijing Research Institute of Uranium Geology, Beijing 100029, China; 2 State Key Laboratory of Geological Processes and Mineral Resources, Faculty of Earth Sciences and Resources, China University of Geosciences, Beijing 100083, China; 3 CGN Uranium Resources Co., Ltd., Beijing 100029, China)

Abstract

The Xiemisitai metallogenic belt is an important uranium and polymetallic ore belt in northern Xinjiang, and the discovery of new uranium deposits is hopefully expected. In this study, the prediction model of volcanic type uranium deposits was constructed through the observation and study of typical uranium deposits. All kinds of favorable metallogenic and exploration information, including the hosted strata, country rocks, mineralization-controlling structures, buried intrusions and faults inferred by aeromagnetic data, U-Be element anomalies, uranium deposits and ore spots, was extracted by GIS. The Eigen-analyzing model in MRAS was used to predict and locate the potential uranium ore spots. The uranium metallogenic prospective areas were assigned to three levels according to the values of posterior probabilities which show great exploration potentiality of the Xiemisitai metallogenic belt. The authors hold that much attention should be paid to three A-level prospective areas, i. e., Sailike, Baiyanghe and Qiyi area, in future uranium exploration.

Key words: geology, volcanic type uranium deposits, Baiyanghe uranium deposit, prediction model, Eigen-analysis method, Xiemisitai metallogenic belt

^{*} 本文得到国家科技支撑计划(编号:2011BAB06B07、2011BAB06B02)和国家自然科学基金(编号:U1303292)资助

第一作者简介 孙远强, 男, 1981 年生, 工程师, 从事铀成矿预测研究工作。Email: sunyq508@126.com

^{**} 通讯作者 范洪海, 男, 1963 年生, 高级工程师, 从事铀矿地质科研与勘查工作。Email: fhh270@263.net

收稿日期 2016-03-03; 改回日期 2017-03-28。秦思婷编辑。

在古生代早期成吉思-塔尔巴哈台造山带自哈萨克斯坦东延至西准噶尔地区(Zhao et al., 2013), 塔尔巴哈台-谢米斯台成矿带作为其重要组成部分在巴尔喀什湖北缘至准噶尔盆地西北侧孕育(图 1), 境内地段简称为谢米斯台成矿带, 铀多金属成矿作用显著, 白杨河地区是重要的 U-Be-Cu-Au 矿集区(沈远超等, 1993; 申萍等, 2010; 王谋等, 2012; 朱永峰, 2014), 同时, 研究区内白杨河微晶花岗岩斑岩成因机制也有助于理解西准噶尔地区在石炭纪晚期构造演化的历程(Zhang et al., 2014)。尽管对成矿带内 Au-Cu 等贵重、有色金属勘查和研究已经取得明显进展, 但铀矿勘查相对滞后, 迫切需要开展成矿预测, 明确找矿勘探方向(王谋等, 2012)。本文在对成矿带开展地质矿产调查的基础上, 围绕铀矿预测进行白杨河典型铀矿床解剖, 建立成矿带火山岩型铀成矿预测模型, 在 GIS 平台上提取有利的铀成矿信息, 试图用特征分析法圈定找矿远景区, 明确火山岩型铀矿下一步的找矿方向。

1 成矿地质环境

谢米斯台成矿带处在西伯利亚板块与塔里木板块之间, 是古亚洲洋演化并最终造山形成的中亚型复杂造山带(图 1)。古亚洲洋中存在多个小陆块, 谢

米斯台成矿带是巴尔喀什-准噶尔微陆块的重要组成部分, 其南侧为准噶尔中央地块, 北、西和东侧是图瓦-巴颜乌拉震旦纪—寒武纪活动陆缘(图 1)。区域经历了前震旦纪陆核生成和多陆块形成、震旦纪—早石炭世古亚洲洋打开与关闭、晚石炭世—二叠纪碰撞后演化、三叠纪以来的陆内演化 4 个地质构造演化阶段(Burmistrow et al., 1990; Choulet et al., 2012; 薛春纪等, 2014)。

谢米斯台成矿带广泛出露上古生界, 志留系浅变质海相碎屑沉积岩仅零星出露(沈远超等, 1993; He et al., 2006)。泥盆系构成了谢米斯台成矿带的主体, 由中酸性火山熔岩、火山碎屑岩和沉积岩组成, 包括下统马拉苏组(D_1ml)和孟布拉克组(D_1mb), 厚度 5519 m; 中统呼吉尔斯特组(D_2hj), 厚 438~1851 m; 上泥盆统朱鲁木特组(D_3zl), 厚 613~1165 m, 少量塔尔巴哈台组(D_3te), 主要岩性为熔结凝灰岩、流纹岩、安山岩等。出露下石炭统海相碎屑沉积岩和中基性-中酸性火山熔岩及火山碎屑岩, 主要分布在谢米斯台山南坡, 从下至上包括和布克河组(C_1hb)、黑山头组(C_1hs)、南明水组(C_1nm)、巴塔玛依内山组(C_1bt), 厚度 1200~9300 m。中石炭统一下二叠统为陆相中酸性-酸性火山熔岩及火山碎屑岩, 中石炭统由石钱滩组(C_2sq)陆相砾岩、砂岩、碳质泥质粉砂岩组成, 下二叠统包括哈

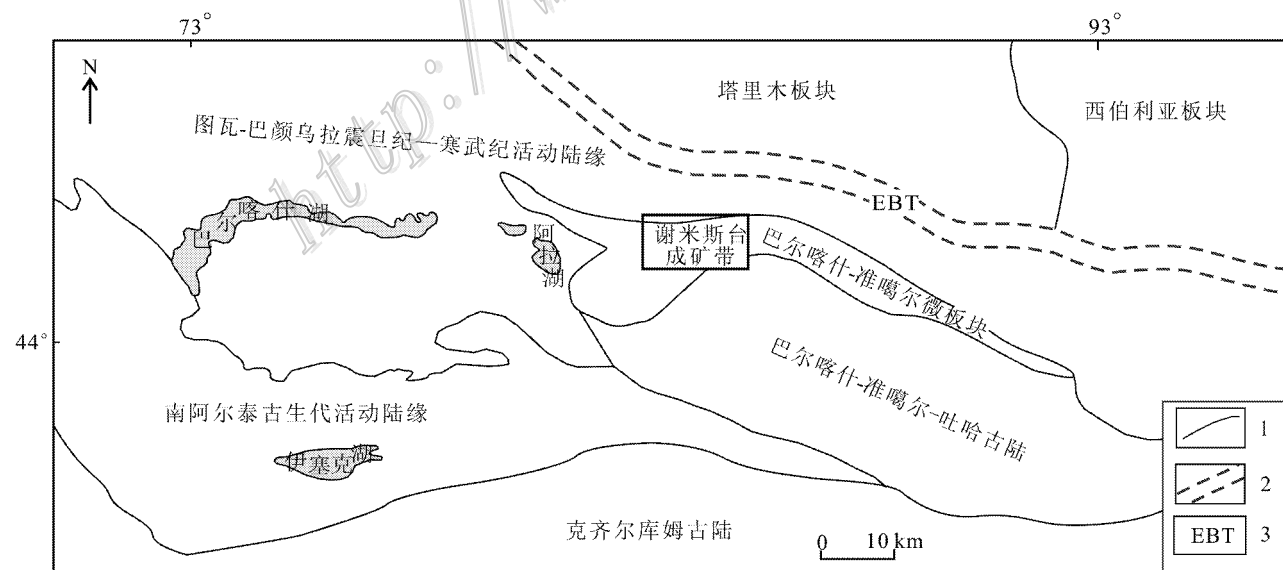


图 1 谢米斯台成矿带区域构造图(据赵磊等, 2013 修编)

1—构造单元界线; 2—缝合带界线; 3—额尔齐斯-布尔根/木扎尔特-红柳河板块缝合带

Fig. 1 Tectonic map of Xiemisitai metallogenic belt (modified after Zhao et al., 2013)

1—The tectonic boundary; 2—The plate suture zone boundary; 3—Erqis-Bulgen/Muzhaerte-Hongliuhe plate suture zone

尔加乌组 (P_{1he}) 和卡拉岗组 (P_{1kl}), 为陆相中酸性火山熔岩及火山碎屑岩, 厚度 2153 m, 是区内矿床、矿点的含矿地层 (图 2)。中生界和新生界主要分布在成矿带南、北两侧, 分别构成和什托洛盖构造盆地、和布克赛尔构造盆地 (图 2)。

成矿带内出露的侵入岩主要为偏碱性的花岗岩, 时代多为海西晚期 (杨海英等, 2005; 杨梅珍等, 2006; 徐新等, 2008)。在空间上受构造控制明显, 岩体展布方向与区域构造线基本一致, 呈北东东向延伸。海西晚期岩浆侵入按照时间先后, 大致依次出现超基性岩、闪长岩、钾长花岗岩、花岗斑岩、次火山岩、霏细斑岩及辉绿岩 (周良仁等, 1987; 周涛发等, 2006)。海西晚期侵入体的典型代表是波尔托复式岩体、库鲁木苏岩体和赛力克岩体, 以岩基产出。

成矿带地质构造主要为华力西期断裂构造和褶皱构造, 燕山期和喜马拉雅期出现地壳升降运动, 导致古生界地层褶皱及早期断裂构造的复活 (Li et al., 2006; 刘刚等, 2012)。古生代褶皱构造多为复式背斜和复式向斜, 和什托洛盖-巴阿托斯特复式向斜 (由②、③、④、⑤号小向斜组成)、白杨河复向斜与吾尔喀什山复背斜是该时期主要的褶皱构造

(图 2)。

成矿带内断裂活动强烈, 主要出现近东西向和北东向 2 组区域性大断裂。前者如铁列克德断裂, 呈舒缓波状东西向延伸 41 km 左右, 倾向南, 倾角约 75°, 切割上泥盆统, 控制中、上泥盆统的南部边界, 沿断裂带可见中、上泥盆统的火山岩系与下泥盆统的火山碎屑沉积岩或陆源碎屑沉积岩直接接触, 压性特征明显, 继承性长期活动, 早期为压性, 后期火山强烈活动时局部显示张性, 古近纪以来显示右行压扭性。后者如孟布拉克大断裂, 走向 65°~70°, 倾向南东, 倾角 60°~75°, 呈舒缓波状延伸约 80 km, 切割泥盆纪、石炭纪的所有地层, 也切割了海西晚期的钾质花岗岩体, 具左行压扭性质, 石炭纪末期和二叠纪为其主要活动时期。

2 典型铀矿床地质

谢米斯台成矿带内现已发现白杨河、中心工地、新西工地、七一工区、十月工区、马门特等铀矿床、矿点/矿化点以及 I~IV 号异常点。白杨河是谢米斯台成矿带内典型铀矿床。

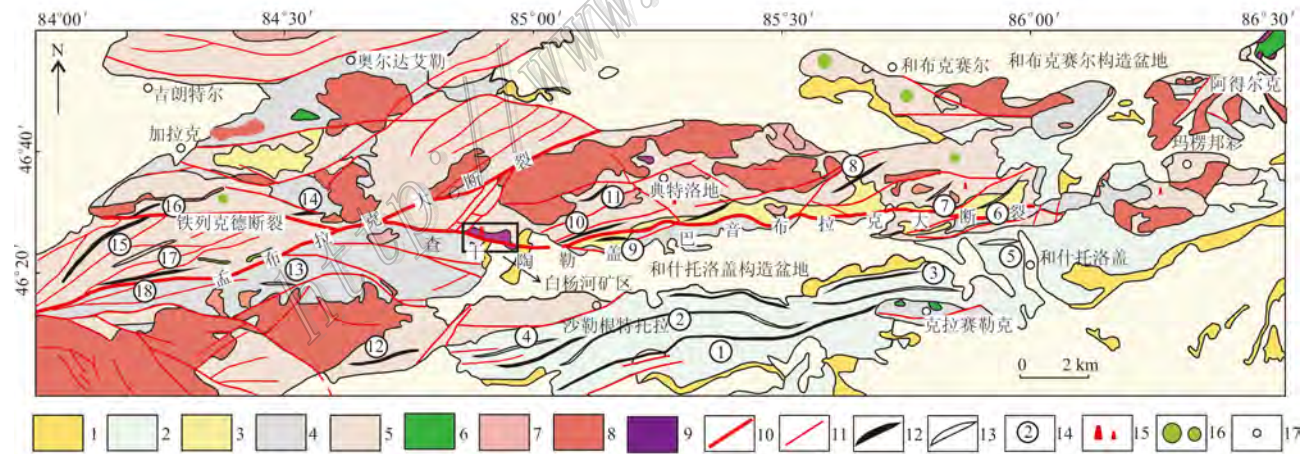


图 2 谢米斯台成矿带地质矿产图 (据王果等, 2008 修改)

1—古近系; 2—侏罗系碎屑岩; 3—二叠系中酸性火山熔岩夹火山碎屑岩; 4—石炭系碎屑岩夹火山碎屑岩; 5—泥盆系中酸性火山岩夹碎屑岩; 6—志留系浅变质海相碎屑沉积岩; 7—海西晚期第二次侵入的花岗岩; 8—海西晚期第三次侵入的花岗斑岩; 9—次火山岩; 10—深大断裂; 11—二级断裂; 12—背斜; 13—向斜; 14—褶皱编号; 15—铀矿床 (点); 16—铜矿床 (点); 17—地名

Fig. 2 Geological and mineral resource map of the Xiemisitai metallogenic belt (modified after Wang et al., 2008)
1—Paleogene; 2—Jurassic clastic rocks; 3—Permian intermediate-acid volcanic rocks with some pyroclastic rocks; 4—Carboniferous clastic rocks intercalated with some pyroclastic rocks; 5—Devonian intermediate-acid volcanic rocks intercalated with some clastic rocks; 6—Silurian lower metamorphic marine clastic sedimentary rocks; 7—Second granitic intrusion in late Variscan; 8—Third granite-porphry intrusion in late Variscan; 9—Subvolcanics; 10—Deep faults; 11—Second-order faults; 12—Anticline; 13—Syncline; 14—Serial number of fold; 15—Uranium deposit (ore spot); 16—Copper deposit (ore spot); 17—Place name

2.1 白杨河矿床

白杨河铀矿区出露于上古生界(图 3a、b)。泥盆系仅出露上统塔尔巴哈台组,与石炭系、二叠系均呈断层接触,主要由紫红色熔结凝灰岩、凝灰熔岩、流纹岩、紫红色气孔状安山岩、绿色杏仁状玄武岩等组成,夹少量凝灰质砂岩、凝灰质泥岩;紫红色流纹质凝灰熔岩中锆石 U-Pb 等值线法测得((401.1 ± 3.1) Ma)的成岩年龄,确定地层时代为早泥盆世晚期(马汉峰,2010)。石炭系仅出露下统黑山头组、和布克河组,由碎屑岩、火山碎屑岩组成。下二叠统哈尔加乌组为陆相中酸性火山熔岩及火山碎屑岩,主要由凝灰砾岩、火山角砾岩、凝灰岩、凝灰砂岩、安山玢岩、灰黑色粉砂岩、火山碎屑岩等组成。

白杨河铀矿区出露的岩体主要为杨庄微晶花岗斑岩岩体,该岩体内见辉绿岩脉和闪长岩脉侵入。杨庄岩体东西长约 6 km,平均宽约 1 km,东部最宽,西部次之,中部宽度居中,呈平躺的“花生”状(图 3b)。

矿区断裂构造发育。总体上走向以东西向为主,且为多期多次活动的继承性断裂。其次为东北、北西向及南北向断裂,规模相对较小。在白杨河矿区发育杨庄断裂,是杨庄花岗斑岩体的南界,走向 100°左右,断层面倾向北,倾角为 65°~75°,在矿区范围延伸 9 km 以上,该断裂构造控制了杨庄花岗斑岩体的分布,岩体呈带状产在断裂上盘。

从地表看,铀矿体的规模都比较小,最长者 400 m,一般数十米,多成孤立的矿体分布,整个矿体群有北西向展布的趋势。钻孔深部揭露的矿体呈板状、脉状、透镜状产在微晶花岗斑岩体与泥盆系地层接触带附近(图 4)。岩体与地层接触带的铀矿石品位较高,最高可达 13%,厚度 2~3 m,长度可达 400 m。

除产在接触带附近的铀矿体外,少部分矿体赋存在花岗斑岩体或地层内部。根据矿体产状,白杨河矿区可见到位于接触带部位的铀矿体(Ⅰ类)、泥盆系中的铀矿体(Ⅱ类)、微晶花岗斑岩内部的铀矿

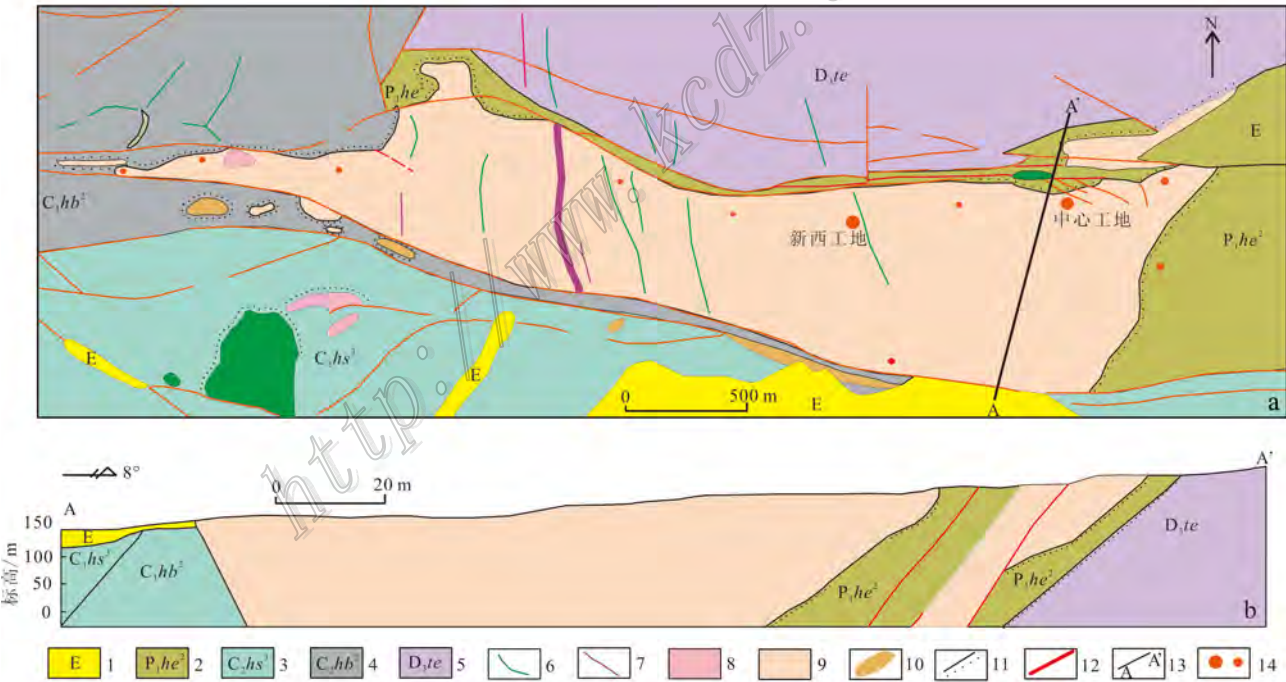


图 3 白杨河铀矿床地质图(a)及 A-A' 剖面图(b)(据王谋等,2012)

1—古近系; 2—下二叠统哈尔加乌组第二岩性段; 3—中石炭统黑山头组第三分层; 4—中石炭统和布克河组上亚段; 5—上泥盆统塔尔巴哈台组; 6—晚二叠世中基性脉岩; 7—早二叠世闪长岩脉; 8—早二叠世二长闪长岩; 9—晚石炭世微晶花岗斑岩; 10—中石炭世橄榄玄武岩; 11—不整合接触界线; 12—断层; 13—剖面线; 14—铀矿床(矿化点)

Fig. 3 Geological map (a) and geological section (b) along A-A' line of the Baiyanghe uranium deposit (after Wang et al., 2012)
1—Paleogene; 2—Lower Permian second lithologic member of Haerjiawu Formation; 3—The middle Carboniferous third stratified bed of Heishan-tou Formation; 4—The middle Carboniferous upper sub-member of Hebukehe Formation; 5—Upper Devonian Taerbahatai Formation; 6—Late Permian mafic dykes; 7—Early Permian diorite dikes; 8—Early Permian monzodiorite; 9—Late Carboniferous microcrystal granite-porphry; 10—Middle Carboniferous olivine basalt; 11—Unconformable boundary; 12—Fault; 13—Section line; 14—Uranium deposit (ore spot)

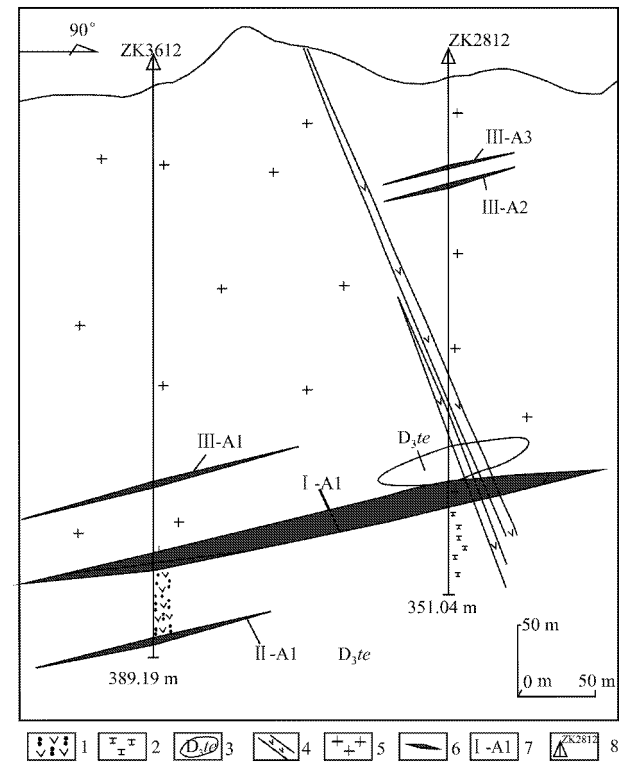


图 4 白杨河铀矿床 ZK3612-ZK2812 钻孔剖面图
(据王果等,2008)

1—下二叠统凝灰质砂岩；2—下二叠统凝灰岩；3—下泥盆统孟布拉克组；4—晚石炭世辉绿岩；5—石炭纪微晶花岗岩；6—工业铀矿体；7—矿体编号；8—钻孔及其编号

Fig. 4 Drill hole cross section ZK3612-ZK2812 of the Baiyanghe uranium deposit (after Wang et al., 2008)

1—Lower Permian tuffaceous sandstone；2—Lower Permian tuff；3—Lower Devonian Mengbulake Formation；4—Late Carboniferous diabase；5—Carboniferous microcrystal granite-porphry；6—Economic uranium orebody；7—Serial number of orebody；8—Drill hole and its serial number

体(Ⅲ类)(图 4)。统计表明,Ⅱ类和Ⅲ类铀矿体多位于距接触带 20~50 m 范围内,个别矿体距接触带的距离超过 50 m。

2.2 中心工地矿体

铀矿体产在微晶花岗斑岩的内外接触带,受裂隙和花岗斑岩接触面的双重控制,接触带附近的裂隙发育地段及裂隙交叉区是矿化富集部位,赋矿岩性为微晶花岗斑岩及晶屑熔屑凝灰岩。该矿床主要由 2 个矿体组成,1 号矿体规模较大,矿体形态复杂,呈不规则透镜体或矿巢断续出现。铀矿体走向 105°~127°,倾向北北东,倾角 50°~75°,地表长度 161.6 m,厚度 2~10 m,平均厚度 5.97 m,上薄下厚,深度从地表至地下 140 m,品位 0.187%~0.275%,随深

度增大,平均品位 0.263%,高品位样品的铀含量大于 2%,个别达 4.538%。2 号矿体规模小,呈不规则板状延伸或断续的透镜状,倾向 95°,倾伏角 20°,透镜体单个长 4~15 m,平均厚度 2.13 m,延深 52.6 m,平均品位 0.234%。

2.3 新西工地矿体

矿体产在微晶花岗斑岩的内外接触带,受断层、花岗斑岩体内凹接触面和有利的凝灰岩、碳质泥板岩三者联合控制,赋矿岩性是花岗斑岩、凝灰岩、凝灰质砂岩和碳质泥板岩。主要矿体呈似层状,走向近南东向,倾向南,倾角 28°~35°,长约 300 m,宽约 50~100 m,平均厚度 2.61 m,厚度变化系数为 89%,深度在 40~300 m 之间,比较稳定,仅在边缘出现分支,平均品位 0.165%,品位变化系数 70%~189%,品位与厚度相关系数 0.32,含矿系数 0.57。次级矿体为巢状或透镜状,规模小、延伸短、品位较富,沿走向、倾向均不稳定。

白杨河矿床铀矿石可划分为原生矿石和氧化矿石,原生矿石铀矿物主要是沥青铀矿,氧化矿石次生铀矿物主要为硅钙铀矿和钙铀云母,在深度 150~200 m 附近仍可见到,由于氧化深度较大,大部分原生矿石均不同程度的发生氧化作用,形成次生铀矿物。根据围岩可划分为花岗斑岩型铀矿石、凝灰岩型(晶屑岩屑凝灰岩、凝灰质泥岩、凝灰质砂岩)铀矿石、辉绿岩型铀矿石和氧化型铀矿石(图 5a~d)。铀矿石主要为自形粒状结构,脉状构造、假流纹构造、浸染状构造和块状构造等。

矿区的铀主要以铀矿物的形式存在,其次为吸附的铀和含铀矿物。铀矿物分为原生铀矿物和次生铀矿物 2 种,次生铀矿物主要为硅钙铀矿,还有少量的硅铜铀矿,多呈脉状或薄膜状充填于裂隙中、铀矿石表面或在坑道壁上,它们是现在铀矿石中的主要铀矿物。原生铀矿物主要有沥青铀矿和铌钛铀矿,其中最主要的为沥青铀矿。

3 铀矿预测模型

预测模型以矿床成因模式为基础,是矿床成因模式向勘查模式的转换。预测模型是资源评价的基础,是资源评价变量选择和优化的依据(陈毓川等,1996;陈建平等,2009;董庆吉等,2010;史蕊等,2013)。根据对谢米斯台成矿带控矿特征的研究,成矿带内具有工业价值的铀矿床类型与接触带有直接

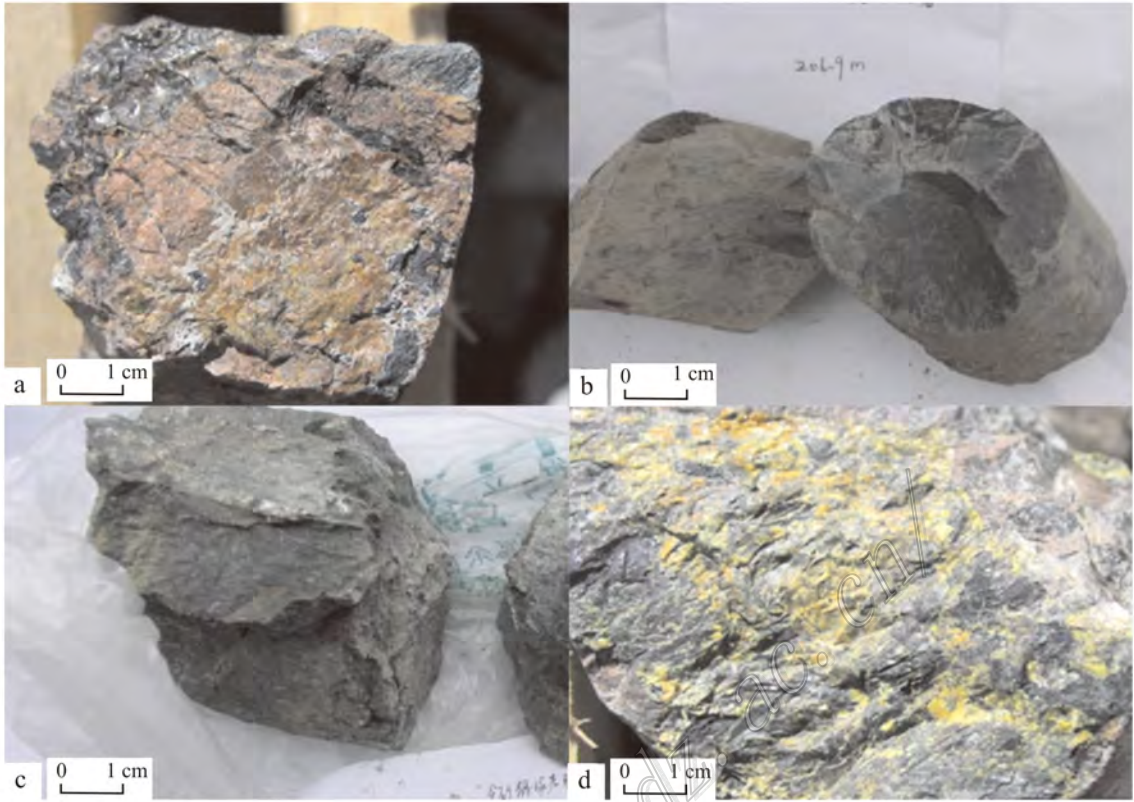


图 5 白杨河矿床铀矿石类型

a. 花岗岩型铀矿石; b. 凝灰岩型铀矿石; c. 辉绿岩型铀矿石; d. 氧化型铀矿石

Fig. 5 The type of uranium ore in the Baiyanghe uranium deposit

a. Granite-porphyry type uranium ore; b. Tuffaceous type uranium ore; c. Diabase type uranium ore; d. Oxidation type uranium ore

关系,接触带上发育多处铀矿点,矿化密度大,强度高;矿床的定位与次一级断裂构造有密切关系,次级构造既是成矿热液的通道,又控制铀矿体的产出和基本形态,岩石破碎裂隙区易发育淋滤和交代作用,有利于铀的活化和迁移富集;成矿带内铀高场区是铀矿体在地表的露头或踪迹,为找矿提供直接信息。

铀矿床的预测模型概括为:①成矿有利地层是下泥盆统马拉苏组、孟布拉克组、中泥盆统呼吉尔斯特组和上泥盆统朱鲁木特组、塔尔巴哈台组以及下石炭统和布克河组;②微晶花岗岩及其内接触带是成矿有利部位,纹岩和酸性凝灰岩也是有利的成矿岩性;③断裂和褶皱有利于铀的活化和富集,近东西向主干和北东向次级断裂都是成矿有利构造;④水系沉积物地球化学测量中 U-Be 元素异常区,选择大于异常下限的区域作为有利成矿地段(图 6)。

4 火山岩型铀成矿要素分析

基于对成矿带预测模型的认知,典型铀矿床或铀矿(化)点均发育在酸性火成岩体与地层接触带内外两侧;构造活动发育区,以断裂构造两侧一定影响范围内为铀矿物集中富集区。本文拟选择有利赋矿地层、控矿构造、有利酸性火成岩体、U-Be 组合元素异常区等因素开展成矿预测。

4.1 地层

成矿带内下泥盆统马拉苏组和孟布拉克组属滨、浅海相火山碎屑建造;中泥盆统呼吉尔斯特组以陆相为主的中酸性火山岩及火山碎屑岩建造;上泥盆统朱鲁木特组和塔尔巴哈台组为陆相-海陆交互相中酸性火山岩及火山碎屑岩建造。下石炭统和布克河组分布在白杨河矿床至七一工区之间,呈狭长

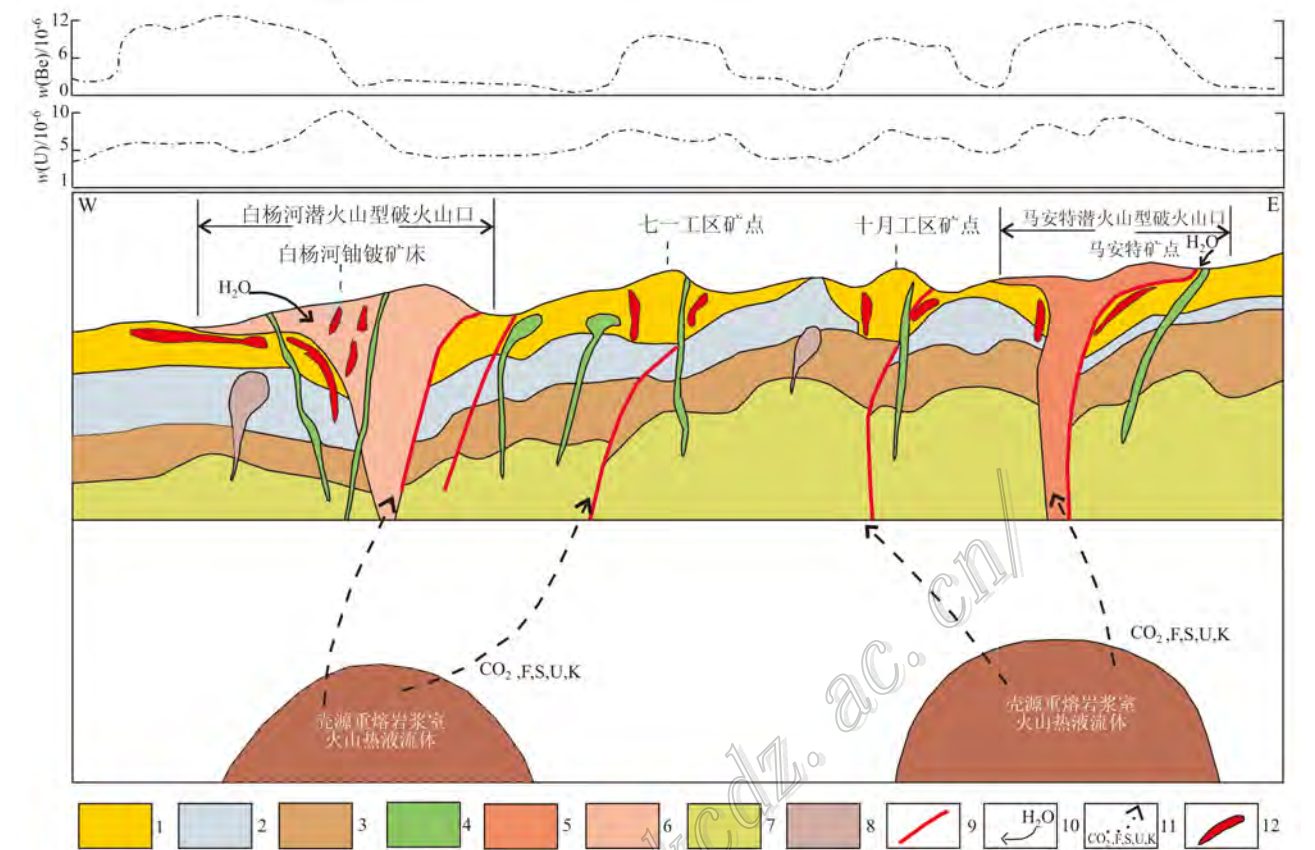


图 6 谢米斯台成矿带预测模型图

1—下二叠统陆相富铀酸性火山岩建造；2—下石炭统海陆交互相富铀中酸性火山岩建造；3—泥盆系陆相富铀中酸性火山岩建造；4—二叠纪辉绿玢岩墙建造；5—早二叠世富铀次流纹斑岩建造；6—早二叠世富铀微晶花岗斑岩建造；7—志留系—奥陶系大洋中性火山岩(岛弧)建造；8—晚古生代富铀花岗岩建造；9—断裂构造 10—含铀、含氧地下水溶液及流向；11—成矿火山热液流体及运移方向；12—铀矿体

Fig. 6 Prognostic model of the Xiemisitai metallogenic belt

1—Lower Permian continental rich uranium acidic volcanic rocks formation; 2—Lower Carboniferous marine-terrigeneous facies rich uranium intermediate-felsic volcanic rocks formation; 3—Devonian continental rich uranium intermediate-felsic volcanic rocks formation; 4—Permian diabase porphyrite formation; 5—Early Permian rich-uranium subvolcanic rhyolite-porphyry formation; 6—Early Permian rich uranium microcrystal granite-porphyry formation; 7—Silurian-Ordovician oceanic mafic-intermediate volcanic rocks (island arc) formation; 8—Late Paleozoic rich uranium granite formation; 9—Fault structure; 10—Uranium-bearing oxidizing ground water and flow direction; 11—Metallogenic volcanic hydrothermal fluid and flow direction; 12—Uranium orebody

带状,在研究区西部成片状分布,岩性为海相沉积碎屑岩夹安山玢岩,黑山头组为浅海相、海陆交互相中基性火山岩,中酸性火山岩及火山碎屑岩建造,分布在白杨河西端与和什托洛盖附近。下泥盆统和下石炭统的铀平均含量 4.54×10^{-6} ,为区内有利的成矿地层(图 7)。

4.2 构造

不同规模的褶皱和断裂构造带形成的致矿范围不同(赵鹏大, 2002; Zhao, 2006; Zhou et al., 2006),为解决不同规模构造在成矿预测中的致矿影

响范围,以线型构造为中心,根据一定的半径构建缓冲带,表征该缓冲区内成矿活动可能较为集中。

谢米斯台成矿带复背斜、复向斜以及近东西向、北东向的大断裂构造带是主要的控矿构造带。吾尔喀什尔山复背斜、和什托洛盖-巴阿托斯特复式向斜与白杨河复向斜等褶皱构造体系以及铁列克德断裂、孟布拉克大断裂等断裂带(组)控制铀矿床的空间展布,次级断裂控制矿体的定位。分别提取主干断裂和次级断裂进行缓冲,设置它们的致矿范围分别为 1 km 和 0.5 km,形成构造体系的控矿域。

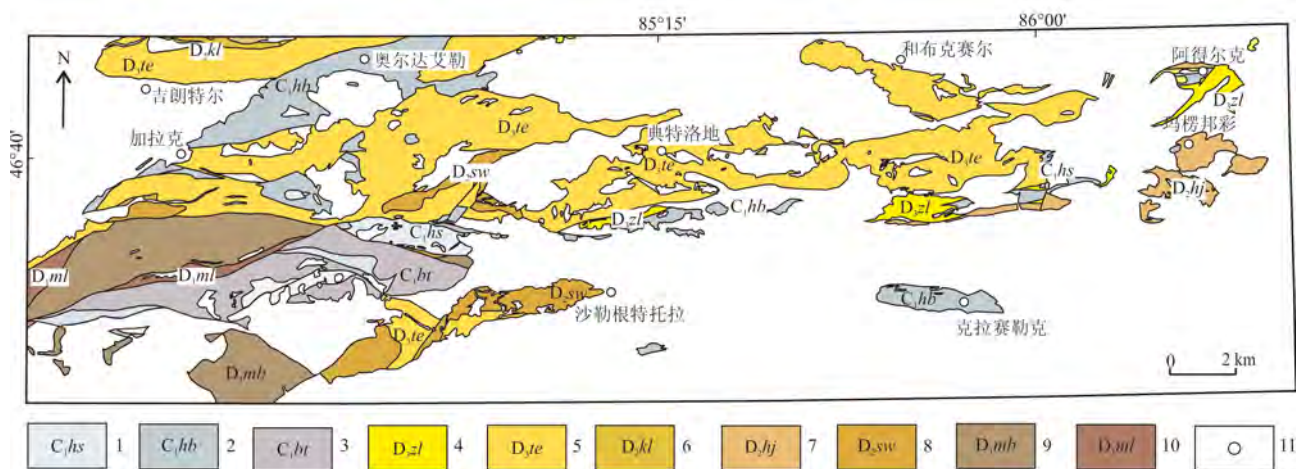


图 7 谢米斯台成矿带有利赋矿地层分布图

1—下石炭统黑山头组；2—下石炭统和布克河组；3—下石炭统巴塔马依内山组；4—上泥盆统朱鲁木特组；5—上泥盆统塔尔巴哈台组；6—中泥盆统库鲁木迪组；7—中泥盆统呼吉尔斯特组；8—中泥盆统萨吾尔山组；9—下泥盆统孟布拉克组；10—下泥盆统马拉苏组；11—地名

Fig. 7 Favorable ore-hosting strata distribution map of the Xiemisitaï metallogenic belt

1—Lower Carboniferous Heishantou Formation; 2—Lower Carboniferous Hebuoke Formation; 3—Lower Carboniferous Batamayineishan Formation; 4—Upper Devonian Zhulumute Formation; 5—Upper Devonian Taerbahatai Formation; 6—Middle Devonian Kulumudi Formation; 7—Middle Devonian Hejiersite Formation; 8—Middle Devonian Sawuershan Formation; 9—Lower Devonian Mengbulake Formation; 10—Lower Devonian Malasu Formation; 11—Place name

4.3 岩体

成矿带内主要赋矿围岩为微晶花岗斑岩和流纹岩等酸性火成岩。白杨河工区为酸性流纹岩和流纹质凝灰岩、I~IV号异常点均为酸性流纹岩和流纹质晶屑岩屑凝灰岩，中心工地赋矿围岩以酸性微晶花岗斑岩和凝灰岩为主，七一工区和十月工区的赋矿围岩都是流纹岩，马门特赋矿围岩是酸性角砾凝灰岩，谢米斯台成矿带自西部到东部的铀矿化主要赋存于该类酸性岩体中；结合钻探工程揭露的铀矿化特征分析，酸性岩体与其周边地层接触带部位也是重要的赋矿层位。

对杨庄岩体、库鲁木苏岩体和赛力克岩体等酸性岩体进行提取，并对岩体以 2 km 为半径进行缓冲，构建接触带的赋矿区，作为重要的预测要素之一。

4.4 航磁推断隐伏岩体及构造

隐伏岩体及断裂构造的解译有利于提高深部预测的可靠性。采用网格化方法(网格化间距 200 m)对谢米斯台成矿带的航磁数据进行标准化分析，通过化极处理消除斜磁化的影响。分析航磁 ΔT 磁场在水平及垂向上的变化规律，判断磁性体边界及断

裂构造的位置，在此基础上推断隐伏岩体的面积、位置和断裂构造的走向、规模等深部成矿地质信息(图 8)。

4.5 U-Be 组合元素异常

U-Be 组合元素异常数据是谢米斯台铀成矿预测的重要信息，对成矿远景区的圈定具有直接指示意义。

选取与火山岩型铀矿床密切相关的水系沉积物中 U、Be 成矿元素的化学异常数据作为预测因子。U、Be 元素地球化学异常基本呈团块状展布于成矿带内，U、Be 元素分别呈高场和中低异常场分布在白杨河矿床及外围、七一工区和十一工区等地段，尤其在白杨河矿区呈现明显的浓集中心，在和布克赛尔及和什托洛盖地区亦有浓集中心发育。

U 元素采用累频分级方式确定异常下限，根据谢米斯台成矿带内的异常特征划分为 4 级：异常高背景区(75% 累频)，异常外带(85% 累频)，异常中带(95% 累频)，异常内带(98% 累频)，大于 85% 累频的异常带均是成矿有利区；Be 元素采用 75% 累频的等值线作为异常边界，大于 75% 累频的范围作为成矿带内地球化学异常区。

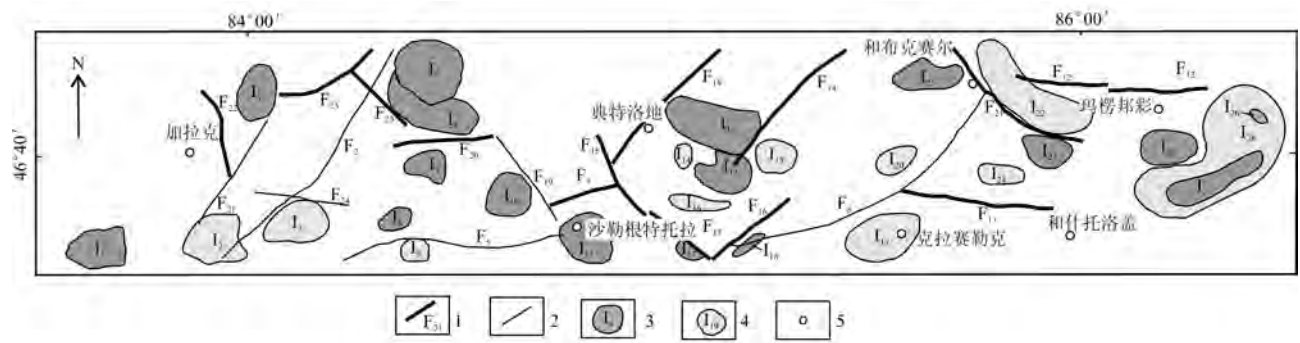


图 8 谢米斯台成矿带隐伏岩体及推断构造分布图

1—推断一级断裂；2—推断二级断裂；3—推断中酸性侵入岩体及编号；4—推断基性-超基性侵入岩体；5—居民地

Fig. 8 Concealed rock bodies and inferred structures distribution map of the Xiemisitai metallogenic belt

1—Inferred first order faults; 2—Inferred secondary order faults; 3—Inferred intermediate-acid intrusive rocks and its number;

4—Inferred basic-ultrabasic intrusive rocks; 5—Residential area

5 特征分析法定位预测

特征分析法是一种多元统计分析方法，表现为类比的数学思想。其基本思想是针对某一类矿产中，通过一定的数学方法找到该类矿床的共性表现，这一共性反映了该类型矿床的地质因素之间的特定关系(Agterberg et al., 2002; Cao, 2004; Wu et al., 2005; Chen et al., 2012)。

5.1 预测要素数据准备

参与远景区圈定的预测要素信息不宜过多，且应尽力避免过于偏重于某一要素(如避免均选择与构造相关的等密度、优益度信息)，否则会导致圈定结果的失真。在选取圈定要素时应更多的考虑其存在标志出现与否，使要素分布具有均衡性、代表性和概括性的特点。

在对新疆谢米斯台成矿带火山岩型铀成矿要素分析的基础上，选取变量结构相对简单，且能直接反映研究区成矿、控矿特征的预测要素进行远景预测区的圈定，主要预测要素：① 预测区含矿地层和赋矿岩体分布数据；② 控矿、含矿断裂构造的缓冲数据；③ 根据航磁基础数据解译推断的隐伏构造和岩体；④ 预测区铀、钼元素化探异常数据；⑤ 已知铀矿(化)点的位置分布数据，区内已知铀矿床、矿(化)点是找矿的重要线索，将其缓冲区域作为圈定要素之一。

5.2 预测单元划分

预测单元的划分是开展预测工作的重要环节，划分的单元网格能够使预测区内不同的地段具有明确地质意义，能够反映预测要素组合，具有统计对比

意义，便于在 GIS 环境下处理与成图。

选择划分方法简单的、便于计算机操作的、多种要素特征分析综合的网格化单元法，实现预测单元的划分。笔者经过反复尝试，将对谢米斯台成矿带划分预测单元网格设为 5 km×5 km，即长×宽是 5 km×5 km，该网格非常适宜在 1:20 万地质底图开展火山岩型铀成矿预测，明确预测区每个已知铀矿床、矿(化)点分布在相对应的单元网格内，该类单元网格作为预测模型单元。

5.3 预测单元有利度计算

单元成矿有利度的计算是定量圈定预测远景区及其分级评价的基础。根据单元内变量和铀矿化信息，采用特征分析法计算单元的成矿有利度。特征分析法是传统类比法的一种量化方法，通过研究预测模型单元的控矿变量特征，查明变量之间的内

表 1 谢米斯台成矿带特征分析法预测变量标志权系数
Talbe 1 Prediction variables coefficient of the Eigen-analysis in the Xiemisitai metallogenic belt

序号	预测要素变量	标志权系数
1	断裂缓冲带	0.515
2	航磁推断构造缓冲带	0.436
3	航磁推断隐伏岩体	0.476
4	U-Be 元素地球化学异常	0.305
5	有利含矿岩体	0.534
6	岩体接触带	0.522
7	朱鲁木特组	0.426
8	马拉苏组	0.437
9	孟布拉克组	0.521
10	呼吉尔斯特组	0.396
11	和布克河组	0.695
12	矿床、矿化、异常点数据	0.757

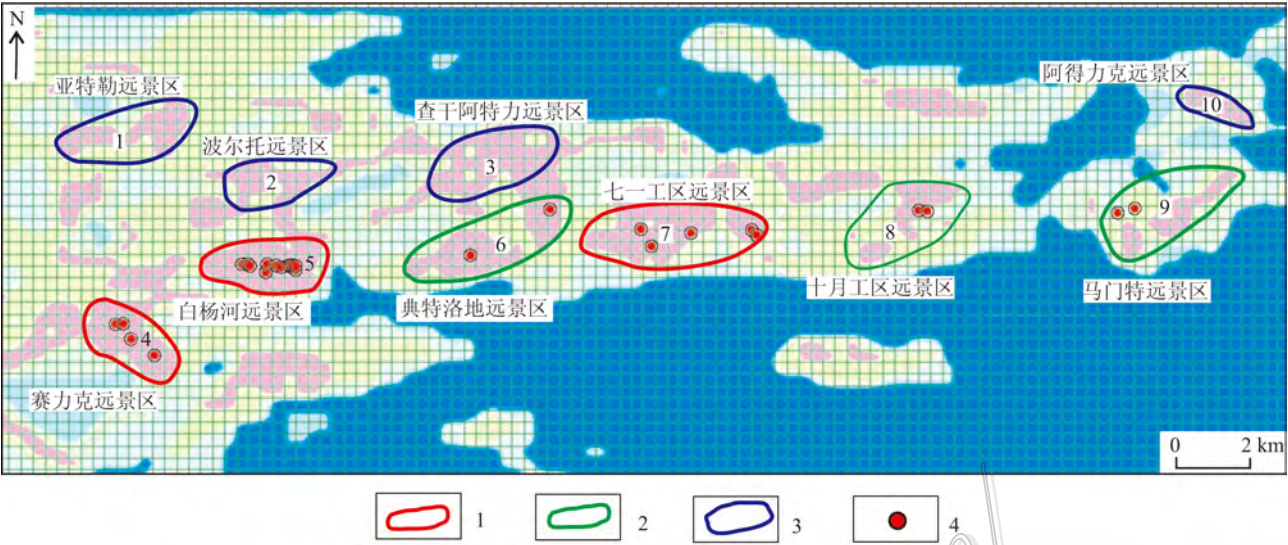


图 9 谢米斯台成矿带成矿后验概率及预测远景区划分图

1—A 级成矿远景区；2—B 级成矿远景区；3—C 级成矿远景区；4—铀矿床（矿点）

Fig. 9 Posterior probability and prospective area of exploration prognosis in the Xiemisitai metallogenic belt

1—Grade A metallogenic prospective area; 2—Grade B metallogenic prospective area; 3—Grade C metallogenic prospective area; 4—Uranium deposit (ore spot)

在联系，确定各个地质变量的成矿和找矿意义，建立起铀矿成矿有利度类比模型，然后将模型应用到预测区，将预测单元与模型单元的各种特征进行类比，用它们的相似程度表示预测单元的成矿有利性，计算网格单元的成矿后验概率值。

笔者借助 MRAS 软件的特征分析模块对谢米斯台成矿带进行预测。首先将研究区 MAPGIS 格式的区文件划分成 5 km×5 km 的网格单元，然后对前面依据成矿预测模型所建立的有利成矿图层进行区文件属性提取，再分别计算各图层的特征分析变量权重系数（表 1），据此计算研究区内各个网格单元的成矿后验概率值。

5.4 预测区圈定

依据火山岩型铀矿床后验概率等值线图（图 9）以及区域内已有矿床的分布概况，大致划分出 A、B、C 三级成矿远景区共 10 个。其中，A 级成矿远景区 3 个，分别为赛力克远景区、白杨河远景区和七一工区远景区；B 级成矿远景区 3 个，分别为典特洛地远景区、十月工区远景区、马门特远景区；C 级成矿远景区 4 个，分别为亚特勒远景区、波尔托远景区、查干阿特力远景区、阿得力克远景区。A 级成矿远景区内各成矿要素配套齐全、铀背景值较高且铀异常分布范围广泛，火山岩型铁矿床主要赋存于岩体及

周边接触带附近，区域内已勘查矿床较多，包括白杨河铀矿床等。B 级成矿远景区内各成矿要素配套较齐全，矿化线索比较明显，成矿潜力较大。C 级成矿远景区内各成矿要素配套一般，发育一定的矿化线索，有一定的成矿潜力。就本次预测结果看，后验概率的高值区与已知矿床（点）的分布具有良好的空间吻合性，表明预测结果的准确程度，并预示谢米斯台成矿带具有良好的找矿潜力。

6 结 论

- （1）根据前人研究成果及对地质、物探、化探资料的综合分析建立谢米斯台成矿带火山岩型铀成矿预测模型，铀矿体主要赋存在微晶花岗斑岩体及其接触带地层内。该模型对分析火山岩型铀成矿因素提供重要指导意义。
- （2）利用 GIS 平台提取赋矿地层、含矿围岩、控矿构造、航磁推断隐伏岩体及断裂构造、U-Be 元素异常组合、矿床和矿化点等有利成矿信息作为预测要素进行综合分析和预测。与传统的单一的预测方法相比，这种大数据的融合提高了成矿预测的合理性和可靠性。
- （3）运用特征分析法共圈定了 10 个成矿有利远

景区,其中A级远景区3个,B级远景区3个,C级远景区4个。预测结果表明,91%的已知矿床(点)位于成矿远景区内,说明了本次预测工作的合理性。此外,这些已知矿床(点)周围仍有较大的资源潜力,应在今后的勘查工作中得到重视。

References

- Agterberg F P and Cheng Q M. 2002. Contional independence test for weights-of-evidence modeling [J]. *Natural Resources Research*, 11 (4): 249-255.
- Burmistrow A A, Ivanov V N and Frolow A A. 1990. Structural and mineralogical types of molybdenum-tungsten deposits of central Kazakhstan [J]. *International Geology Review*, 32(1): 92-99.
- Cao Z Q. 2004. Geological characteristics and prospecting model of Da-jishan niobium-tantalum deposit [J]. *Geology and Prospecting*, 40 (6): 34-37 (in Chinese with English abstract).
- Chen J P, Shan B C, Lv P, Zhao J and Hu Q. 2009. Large-scale 3D metallogenic prediction of concealed orebody in Gejiu, Yunnan Province [J]. *Chinese Journal of Geology*, 44(1): 324-337.
- Chen J P, Shi R, Wang L M and Sun Y. 2012. 3D positional and quantitative prediction of the Xiaoqinling gold ore belt in Tonggua, Shanxi, China [J]. *Acta Geological Sinica*, 86(3): 653-660.
- Chen Y C, Ye Q T and Feng J. 1996. Metallogenic condition and prognosis in Asele Cu-Zn metallogenic belt [M]. Beijing: Geological Publishing House. 1-70.
- Choulet F, Faure M, Cluzel D, Chen Y, Lin W, Wang B and Jahn B M. 2012. Architecture and evolution of accretionary orogens in the Altaids collage: The Early Paleozoic West Junggar (NW China) [J]. *American Journal of Science*, 312(10): 1098-1145.
- Dong Q J, Xiao K Y, Chen J P and Cong Y. 2010. The quantitative analysis of regional metallogenic fault in the northern segment of the Sanjiang metallogenic belt, southwestern China [J]. *Geological Bulletin of China*, 29(10): 1479-1485.
- He G Q and Zhu Y F. 2006. Comparative study of the geology and mineral resources in Xinjiang, China, and its adjacent regions [J]. *Geology in China*, 33(3): 451-460 (in Chinese with English abstract).
- Li J Y, He G Q, Xu X, Li H Q, Sun G H, Yang T N, Gao L M and Zhu Z X. 2006. Crustal tectonic framework of northern Xinjiang and adjacent regions and its formation [J]. *Acta Geologica Sinica*, 80 (1): 148-168 (in Chinese with English abstract).
- Liu G, Chen X H, Dong S W, Chen Z L, Han S Q, Yang Y, Ye B Y and Shi W. 2012. Late Paleozoic crustal growth and tectonic evolution in Balkhash metallogenic belt [J]. *Acta Petrologica Sinica*, 28 (7): 1995-2008.
- Ma H F, Yi L S and Xiu X Q. 2010. The potential evaluation of U-Be resources in Xuemisitan metallogenic belt [R]. Beijing Research Institute of Uranium Geology. Internal Reporting. 1-94.
- Shen P, Shen Y C, Liu T B, Pan H D, Meng L, Song G X and Hua D W. 2010. Discovery of the Xiemisitai copper deposit in western Junggar, Xinjiang and its geological significance [J]. *Xinjiang Geology*, 28(4): 413-418.
- Shen Y C, Jin C W, Qi J Y and Ding Q S. 1993. The metallogenic model and mechanism of gold mineralization concentration area on the western Junggar area [C]. Beijing: Science Press. 295-310.
- Shi R, Chen J P and Wang G. 2013. Geological characters and prospecting prediction model of the sediment-metamorphic iron deposits in the North China Craton [J]. *Acta Petrologica Sinica*, 29 (7): 2606-2616.
- Wang G, Lu K G, Wang G R and Zhang C J. 2008. The general exploration report of Baiyanghe uranium deposit in Xinjiang [R]. (internal reporting). 1-76.
- Wang M, Li X F, Wang G, Li Y L, Shi Z L and Lu K G. 2012. Geological characteristics of Baiyanghe Beryllium-Uranium deposits in Xuemisitan volcanic belt, Xinjiang [J]. *Mineral Exploration*, 3(1): 34-40.
- Wu Q, Xu H and Zou X K. 2005. An effective method for 3D geological modeling with multi-source data integration [J]. *Computers & Geosciences*, 31(1): 35-43.
- Xu X, Chen C, Ding T F, Liu X Y and Li H Q. 2008. Discovery of Lisa basalt northwestern edge of Junggar Basin and its geological significance [J]. *Xinjiang Geology*, 26(1): 35-40.
- Xue C J, Zhao X B, Mo X X, Dong L H and Gu X X. 2014. Asian gold belt in western Tianshan and its dynamic setting, metallogenic control and exploration [J]. *Earth Science Frontiers*, 21(5): 128-155.
- Yang H Y, Wei G Z and Xu D L. 2005. The discussion on geochemical characteristics and genesis of the intrusive rocks in the East section of Sawushan [J]. *Xinjiang Nonferrous Metal*, S1: 13-15.
- Yang M Z, Wang F Z and Zhen J P. 2006. Geochemistry and tectonic of basic volcanic rocks in Ke-Xia region, northwest Junggar Basin [J]. *Acta Petrologica et Mineralogica*, 25(3): 27-31.
- Zhang X and Zhang H. 2014. Geochronological, geochemical and Sr-Nd-Hf isotopic studies of the Baiyanghe A-type granite porphyry in the western Junggar: Implications for its petrogenesis and tectonic setting [J]. *Gondwana Research*, 25(2014): 1554-1569.
- Zhao L and He G Q. 2013. Tectonic entities connection between West Junggar (NW China) and East Kazakhstan [J]. *Journal of Asian Earth Sciences*, 72: 25-32.

- Zhao P D. 2002. Three-Component quantitative resource prediction and assessments-Theory and practice of digital mineral prospecting [J]. *Earth Science*, 27(5): 482-490.
- Zhao P D. 2006. Theories and methods for mineral exploration [M]. Wuhan: China University of Geosciences Press. 1-334 (in Chinese).
- Zhou L R. 1987. The essential features of geotectonic development and magmatic evolution on the western Junggar area [J]. *Northwest Geoscience*, 1: 1-54.
- Zhou T F, Yuan F, Tan L G, Fan Y and Yang W P. 2006. Time limit, geochemical characteristics and tectonic setting of late Paleozoic magmatism in Sawuer region, Xinjiang [J]. *Acta Petrologica Sinica*, 22(5): 1225-1237.
- Zhou Y. 2006. Numerical simulations of structural deformation and fluid flow in Xiangshan deposit [J]. *China Univ. of Mining & Tech. (English Edition)*, Vol. 16, No. 4, 404-408.
- Zhu Y F, Xu X, Luo Z H, Shen P, Ma H D and Chen X X. 2014. Geological evolution and metallogenesis in core part of Central Asian metallogenic region [M]. Beijing: Geological Publishing House. 19-81.
- 附中文参考文献**
- 陈建平, 尚北川, 吕鹏, 赵洁, 胡青. 2009. 云南个旧某隐伏矿床大比例尺三维预测 [J]. *地质科学*, 44(1): 324-337.
- 陈毓川, 叶庆同, 冯京. 1996. 阿舍勒铜锌成矿带成矿条件和成矿预测 [M]. 北京: 地质出版社, 1-70.
- 董庆吉, 肖克炎, 陈建平, 丛源. 2010. 西南“三江”成矿带北段区域成矿断裂信息定量化分析 [J]. *地质通报*, 29(10): 1479-1485.
- 刘刚, 陈宣华, 董树文, 陈正乐, 韩淑琴, 杨屹, 叶宝莹, 施炜. 2012. 巴尔喀什成矿带晚古生代地壳增生与构造演化 [J]. *岩石学报*, 28(7): 1995-2008.
- 马汉峰, 衣龙升, 修晓茜. 2010. 雪米斯坦成矿带铀钍资源潜力评价 [R]. 北京: 核工业北京地质研究院. 内部报告: 1-94.
- 申萍, 沈远超, 刘铁兵, 潘鸿迪, 孟磊, 宋国学, 代华五. 2010. 西准噶尔谢米斯台铜矿的发现及意义 [J]. *新疆地质*, 28(4): 413-418.
- 沈远超, 金成伟, 齐进英, 丁奎首. 1993. 西准噶尔金矿化集中区的成矿模式和形成机理 [C]. 北京: 科学出版社. 295-310.
- 史蕊, 陈建平, 王刚. 2013. 华北克拉通沉积变质型铁矿床的特征与预测评价模型 [J]. *岩石学报*, 29(7): 2606-2616.
- 王果, 鲁克改, 王国荣, 张成江. 2008. 新疆白杨河铀矿床详查地质报告 [R]. (内部报告). 1-76.
- 王谋, 李晓峰, 王果, 李彦龙, 师志龙, 鲁克改. 2012. 新疆雪米斯坦火山岩带白杨河铀矿床地质特征 [J]. *矿产勘查*, 3(1): 34-40.
- 徐新, 陈川, 丁天府, 刘兴义, 李华芹. 2008. 准噶尔西北缘早侏罗世玄武岩的发现及地质意义 [J]. *新疆地质*, 26(1): 35-40.
- 薛春纪, 赵晓波, 莫宣学, 董连慧, 顾雪祥. 2014. 西天山“亚洲金腰带”及其动力背景和成矿控制与找矿 [J]. *地学前缘*, 21(5): 128-155.
- 杨海英, 魏广智, 徐丹丽. 2005. 萨吾尔山东段侵入岩地球化学特征及其成因初探 [J]. *新疆有色金属*, S1: 13-15.
- 杨梅珍, 王方正, 郑建平. 2006. 准噶尔盆地西北部克-夏基性火山岩地球化学特征及其构造环境 [J]. *岩石矿物学杂志*, 25(3): 27-31.
- 赵鹏大. 2002. “三联式”资源定量预测与评价-数字找矿理论与实践探讨 [J]. *地球科学*, 27(5): 482-490.
- 周良仁. 1987. 西准噶尔地区地质构造发展及岩浆演化特征 [J]. *西北地质科学*, 1: 1-54.
- 周涛发, 袁峰, 谭绿贵, 范裕, 杨文平. 2006. 新疆萨吾尔地区晚古生代岩浆作用的时限、地球化学特征及地球动力学背景 [J]. *岩石学报*, 22(5): 1225-1237.
- 朱永峰, 徐新, 罗照华, 申萍, 马华东, 陈宣华. 2014. 中亚成矿域核心区地质演化与成矿作用 [M]. 北京: 地质出版社. 19-81.