

吴兆剑, 韩效忠. 煤田资料的铀矿二次开发技术及其找矿意义——以二连盆地 ZS 煤田铀矿点的发现为例[J]. 中国地质, 2016, 43(2): 617-627.
Wu Zhaojian, Han Xiaozhong. A new uranium exploring technical system for secondary development of coalfield data and its prospecting significance: A case study of the ZS coalfield, Erlian basin[J]. Geology in China, 2016, 43(2): 617-627(in Chinese with English abstract).

煤田资料的铀矿二次开发技术及其找矿意义 ——以二连盆地 ZS 煤田铀矿点的发现为例

吴兆剑 韩效忠

(中国煤炭地质总局特种技术勘探中心, 中煤地质工程总公司, 北京 100040)

摘要: 在中国北方主要盆地铀矿地质调查工作中, 煤田自然伽马异常作为主要矿化信息和找矿线索, 为一系列铀矿床(点)的快速发现奠定了坚实基础。为进一步提高煤田资料铀矿二次开发的高效性和准确性, 运用水成铀矿理论, 以中国二连盆地 ZS 煤矿区典型铀矿点的发现为例, 初步探讨了煤田资料的铀矿二次开发技术, 提出了“异常筛选与选区分析、原位验证与环境判别、等时地层格架建立与沉积体系分析、综合分析 with 靶区定位”四位一体的煤矿区铀矿地质调查模式。这对中国北方含煤盆地铀矿地质调查工作提供了新的找矿思路和技术路线, 具有较重要的指导意义。

关键词: 煤田资料; 二次开发; 铀矿地质调查; ZS 煤矿区; 二连盆地

中图分类号: P 624; P962 文献标志码: A 文章编号: 1000-3657(2016)02-0617-11

A new uranium exploring technical system for secondary development of coalfield data and its prospecting significance: A case study of the ZS coalfield, Erlian basin

WU Zhao-jian, HAN Xiao-zhong

(Special Technology Exploration Center of China Coal Geology Bureau, China Corporation of Coal Geology Engineering, Beijing 100040, China)

Abstract: As the main mineralization information, high natural gamma anomaly in coalfield lays a foundation for the fast discovery of a series of uranium ores in uranium geological survey. In order to improve efficiency and accuracy of coalfield data's secondary development, the authors chose the exploration of the ZS uranium deposit in Erlian basin as a study case and constructed a new uranium exploring technical system for coalfield data's secondary development. On such a basis, the authors established coalfield's

收稿日期: 2015-03-09; 改回日期: 2015-07-03

基金项目: 国家 973 项目(2015CB453000)与中国地质调查局地质调查项目(12120113076000、12120113076100、12120115010301)联合资助。

作者简介: 吴兆剑, 男, 1987 年生, 工程师, 硕士, 矿物学、岩石学、矿床学专业, 主要从事铀矿地质的研究和生产工作;

E-mail: wuzhj06@126.com。

通讯作者: 韩效忠, 男, 1973 年生, 高级工程师, 博士, 矿床地球化学专业, 主要从事构造地质和铀矿地质的研究和生产工作;

E-mail: geohxz@163.com。

uranium geological survey model of “quaternary” involving “natural gamma anomaly sieving and prospective area forecasting”, “drilling verification in situ and geochemical environment discrimination”, “isochronous stratigraphic framework establishing and sedimentary system analysis” and “comprehensive study and target localization”. This model which provides a new thought and technological route may play an important role in northern China’s uranium exploration.

Key words: coalfield data; secondary development; uranium exploring technical system; ZS coalfield; Erlian basin

About the first author: WU Zhao-Jian, male, born in 1987, engineer, engages in exploration of uranium deposits; E-mail: wuzhj06@126.com.

Fund support: Supported by Major State Basic Research Development Program of China (973 Program) (No. 2015CB453000) and China Geological Survey Program (No. 12120113076000, 12120113076100, 12120115010301).

中国北方大多数盆地均属于石油、天然气、煤炭、铀矿等多矿种叠合富集的能源基地。在以往单一矿种的地质勘探中,受行业隔阂和专业视野的制约,油田及煤田资料特别是放射性测井资料未能引起相关部门的足够重视。而在全球能源紧缺、铀资源价格回涨的新形势下^①,能源盆地中煤铀、油铀等多矿种共同勘探开发受到愈来愈多的聚焦和瞩目^[1-2],特别是大营铀矿床的发现,进一步坚定了中国以煤(油)找铀的信心和决心^[3]。在中国北方主要盆地以往的铀矿地质调查中,通过对煤田钻孔资料和测井资料的二次开发利用,圈定了一系列铀成矿远景区,发现了大量工业铀矿体^[1-2,4]。这充分表明煤田资料的铀矿二次开发是经济高效和切实可行的。但在实际工作中,存在仅注重放射性测井资料等直接找矿线索,而忽视钻孔岩心资料等间接找矿信息的情况,这势必影响煤矿区铀资源的调查评价工作。因此,本文以中国北方部分煤盆以煤找铀工作取得的重要进展为基础,选取典型实例重点阐述煤田测井资料和钻孔岩心资料在铀矿找矿中的作用,首次建立了煤田资料的铀矿二次开发技术体系。这对深入提取煤田资料的铀矿化信息和提高煤田资料的二次开发利用效率具有重要的指导意义。

1 北方主要煤盆地质特征

中国北方主要含煤盆地,从大地构造上可分为克拉通内部凹陷盆地、大陆增生带盆地、碰撞期后盆地、大陆内部裂谷盆地及活动边缘带盆地等类型,形成时代从晚古生代到古近—新近纪系均有发育(图1)^[5-6]。目前中国北方已探明的砂岩型铀矿在上述不同构造背景下的含煤盆地中均有发现^[7-9],且主要产出于中下侏

罗统和上白垩统中^[10-14],这在图1-a上有很好的反映。

由图2可知,石炭纪以来,尽管存在海平面上升、大陆面积下降的幕式活动,但中国大陆整体呈现为海退和大陆面积稳步增加的趋势。而前人对中国北方主要含煤盆地煤系地层研究结果^[16-20]亦表明,侏罗纪、白垩纪、古近纪和新近纪成煤期主要为河流、三角洲和湖泊等陆相沉积环境。前人分析总结中国主要砂岩型铀矿盆地沉积体系特征认为,北方砂岩型铀矿多产于侏罗纪和白垩纪含煤岩系或与含煤岩系相关的地层中,且最佳赋矿载体为陆相盆地辫状河沉积及辫状河三角洲沉积体系^[15,21-22]。这表明,中国北方主要含煤盆地具备铀成矿的储层条件。

同时,对准噶尔、吐哈、伊犁、鄂尔多斯、二连及松辽盆地等北方主要产煤铀盆地沉积盖层的典型剖面进行综合分析可知,地层往往呈现“下黑、中灰、上杂”三段式特征分布,且“上杂”与“中灰”常呈不整合或假整合接触(图3)。“下黑中灰”表明,煤层与铀成矿目的层常密切共生,且呈现出下煤上铀的特征分布,而煤及赋存其中的还原性气体为铀矿体的形成和保存提供了充足的还原物质;“中灰上杂”及其不整合接触关系表明,铀成矿目的层沉积期后往往处于较长时间干旱—半干旱气候环境,而炎热干燥的古环境为含氧含铀水的渗入和目的层的后生蚀变提供了良好条件,同时提升古地下水中铀的浓度。

综上所述,中国北方主要煤盆地多具备良好的铀成矿地质条件,是寻找砂岩型铀矿的理想场所。

2 二次开发技术研究

煤田资料主要包括煤田测井资料及钻孔岩心资料(包括测井岩性解释)。其中测井资料尤其是放

①OECD NEA & IAEA. Uranium 2014: resources, production and demand[R]. 2014.

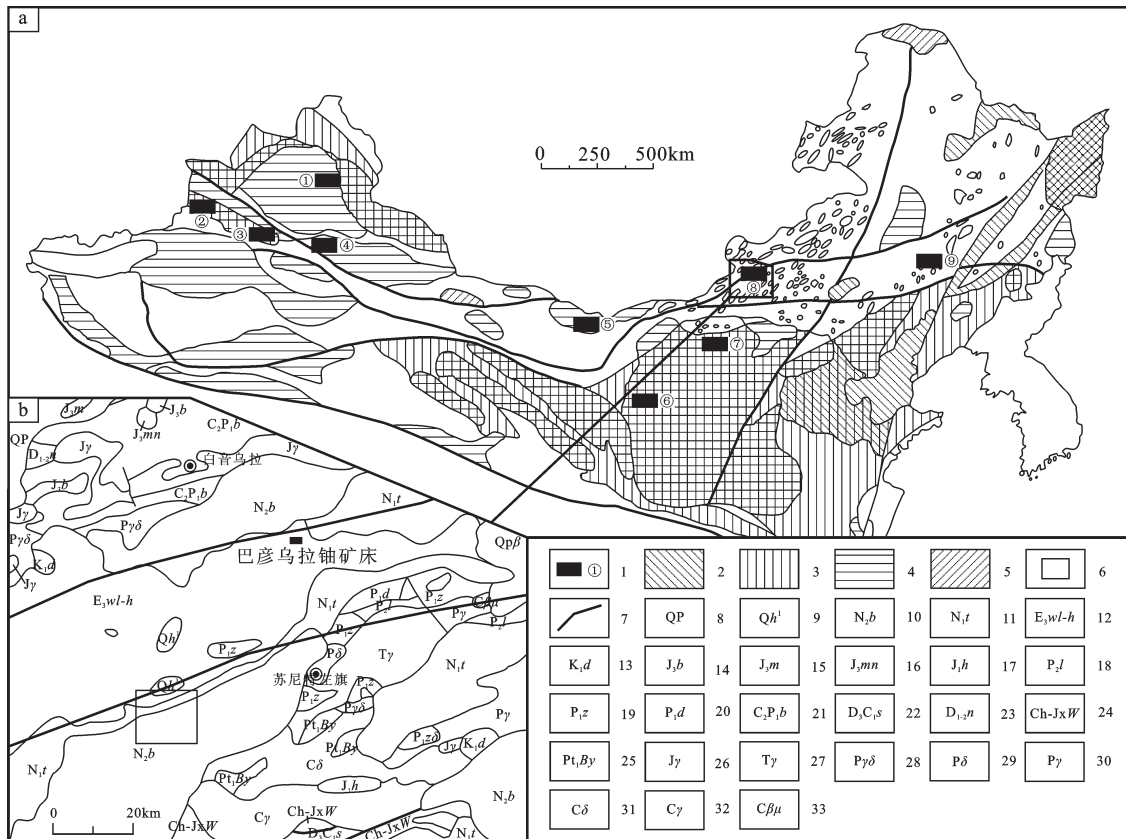


图1 中国北方主要含煤铀盆地分布简图(据文献[5, 15]和①修改)

1—铀矿床(点)及编号: ①—准噶尔盆地东缘KMST铀矿, ②③—伊犁盆地南缘铀矿田, ④—吐哈盆地十红滩铀矿床, ⑤—巴音戈壁盆地塔木素铀矿床, ⑥—鄂尔多斯盆地宁东地区铀矿田, ⑦—鄂尔多斯盆地北缘东胜铀矿田, ⑧—二连盆地努和廷铀矿床、赛罕高毕—巴彦乌兰铀矿床, ⑨—松辽盆地西南部钱家店铀矿床; 2—C-P盆地; 3—T₃-J₁₋₂盆地; 4—T₃-K₁盆地; 5—Tr盆地; 6—ZS煤矿区位置; 7—断裂构造; 8—更新统; 9—全新统; 10—宝格达乌拉组; 11—通古尔组; 12—乌兰古楚组—呼尔井组; 13—大磨拐河组; 14—白音高老组; 15—满克头鄂博组; 16—玛尼吐组; 17—红旗组; 18—林西组; 19—哲斯组; 20—大石寨组; 21—宝力高庙组; 22—色日巴彦敖包组; 23—泥鳅河组; 24—温都尔庙群; 25—宝音图群; 26—侏罗纪花岗岩; 27—三叠纪花岗岩; 28—二叠纪花岗岩闪长岩; 29—二叠纪闪长岩; 30—二叠纪花岗岩; 31—石炭纪闪长岩; 32—石炭纪花岗岩; 33—石炭纪辉绿岩

Fig. 1 Distribution of coal & uranium-bearing basin in northern China (modified after [5, 15] and ①)

1—Uranium deposits: ①—KMST uranium deposit in eastern Junggar, ②③—Uranium orefield in southern Ili basin, ④—Shihongtan uranium deposit in Turpan-Hami basin, ⑤—Tamusu uranium deposit in Bayingabi basin, ⑥—Ningdong uranium orefield in western Ordos basin, ⑦—Dongsheng uranium orefield in northeastern Ordos basin, ⑧—Nuheting and Saihangaobi-Bayanwalia uranium deposits in Erlian basin; ⑨—Qianjiadian uranium deposit in southwestern Songliao basin; 2—Carboniferous-Permian basin; 3—Late Triassic and early-middle Jurassic basin; 4—Late Triassic to early Cretaceous basin; 5—Triassic basin; 6—Location of ZS work area; 7—Fault; 8—Pleistocene; 9—Holocene; 10—Baogedawula Formation; 11—Tongguer Formation; 12—Wulangechu and Huerjing Formation; 13—Damoguaihe Formation; 14—Baiyingaolao Formation; 15—Manketouebo formation; 16—Manitu Formation; 17—Hongqi Formation; 18—Linxi Formation; 19—Zhesi Formation; 20—Dashizhai Formation; 21—Baoliogaomiao Formation; 22—Seribayanaobao Formation; 23—Niquihe Formation; 24—Wenduermiao Formation; 25—Baoyintu Group; 26—Jurassic granite; 27—Triassic granite; 28—Permian granodiorite; 29—Permian diorite; 30—Permian granite; 31—Carboniferous diorite; 32—Carboniferous granite; 33—Carboniferous diabase

放射性测井资料常用于“异常筛选与选区分析”、“原位验证与环境判别”,是煤田资料用以铀矿勘查的直接二次开发;钻孔岩心资料则主要用于选区“等时地层格架建立与沉积体系分析”,是煤田资料内

蕴信息的深度挖掘;而“综合分析”则将两者有机合并用于“靶区精确定位”。下文以二连盆地马尼特拗陷ZS煤田铀矿点的发现为例,重点阐述煤田资料的铀矿二次开发技术,并初步建立技术体系。

①韩效忠, 吴兆剑, 胡航. 内蒙古恩格日音和乌兰诺尔铀矿地质调查[R]. 北京: 中国煤炭地质总局特种技术勘探中心, 2014.

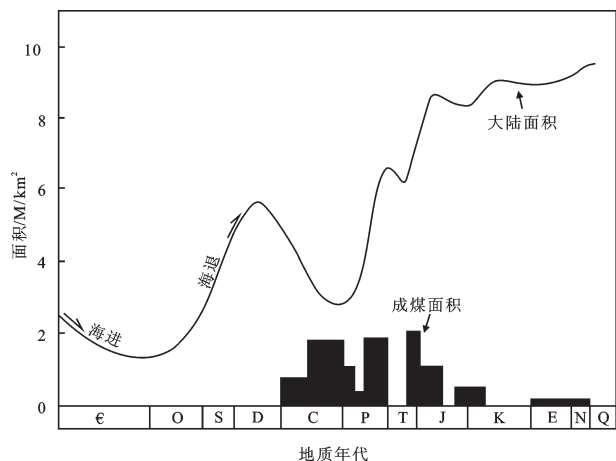


图2 中国大陆增生与成煤关系图(据文献[5])

Fig.2 The relationship of continental accretion to coal-forming area (after reference [5])

2.1 异常筛选与选区分析

2.1.1 筛选指标

对煤田部门的放射性测井资料的定向筛选是远景区圈定的前提。根据砂岩型铀矿成矿规律和赋矿条件的分析,初步确定了自然 γ 异常强度及厚度、矿层埋深、赋矿围岩岩性、砂体(累计)厚度等筛选指标^①(表1)。

2.1.2 选区分析

选区分析是开展铀矿地质调查的基础,选区的合理与否直接关系到该区的资源评价与后续工作的部署安排。前人在远景区预测方面已有大量研究^[27-32],多注重对铀源条件、古气候与古构造、古地下水条件、砂体发育特征等方面的约束,而缺少直接的矿化信息。而基于煤田资料的选区分析则正好弥补了这一不足。

二连盆地 ZS 选区北部的巴音宝力格隆起和南部的苏尼特隆起发育有大量花岗岩(图1),岩体伽马照射量率为 9.55~10.06 nC/(kg·h),最高为 12.13 nC/(kg·h)^②,指示源区具备良好的铀源条件。图3-e 清晰地展示出目的层赛汉塔拉组被古近纪伊尔丁曼哈组不整合覆盖,指示选区铀储层沉积期后,遭受较长时间隆升剥蚀作用,有利于含氧含铀水的渗入。同时,选区目的层砂体发育,泥砂泥结构发育(图3-e),且选区西北部发育北东东向的区域断裂(图1),具备基本的补径排体系。最为重要的是,据煤田钻孔伽马异常筛选可知,选区内伽马异常明显,呈区带大致呈北东向展布(图4),指示良好的找矿前景。

运用相同的方法,优选出诸如准噶尔盆地东缘 KMST 选区^[9]、二连盆地马尼特坳陷 EGRY 和 WLNE 选区,松辽盆地西南部陆家堡凹陷 SG 选区等(这些选区在工作中均发现有工业铀矿孔的存在)。

2.2 原位验证与环境判别

2.2.1 原位验证

原位验证多选取埋藏较浅、异常强度高、异常厚度大、目的层砂体固结程度低且碎屑颗粒较粗的煤田孔展开。自2012年天津地质调查中心组织选区工作以来,对一系列优选区展开钻孔原位验证工作,取得了丰硕的成果^[2,9]。如准噶尔盆地东缘 KMST 选区共实施4个原位验证孔,其中工业孔1个、矿化孔3个;二连盆地 ZS 选区共实施4个原位验证孔和1个新布设钻孔,其中4个原位验证孔中2个为矿化孔,而新布设孔为工业孔(将在下文重点阐述);松辽盆地西南部 SG 选区共实施5个原位验证孔,其中工业孔1个,矿化孔1个。这充分表明对煤

表1 煤田钻孔资料的筛选指标
Table 1 Sieving index of coalfield data

自然 γ 异常绝对强度			自然 γ 异常	异常(累计)	矿层埋深	围岩岩性	砂体(累计)
潜在铀矿孔	潜在矿化孔	正常孔	相对强度	厚度/m	/m		厚度/m
>7 PA/kg 或 >300 API	3.5 PA/kg < γ < 7 PA/kg 或 150 API < γ <300 API	<3.5 PA/kg 或 <150 API	>本底值 10 倍	>1 m	<500 m	中粗砂岩(包括砾岩)为宜,细砂岩次之,粉砂岩及泥岩再次	30~50

①中国地质调查局天津地质调查中心. 我国主要盆地煤铀等多矿种综合调查评价计划项目工作技术要求(试行)[S]. 2013(有改动).

②韩效忠, 吴兆剑, 胡航. 内蒙古恩格日音和乌兰诺尔铀矿地质调查[R]. 北京: 中国煤炭地质总局特种技术勘探中心, 2014.

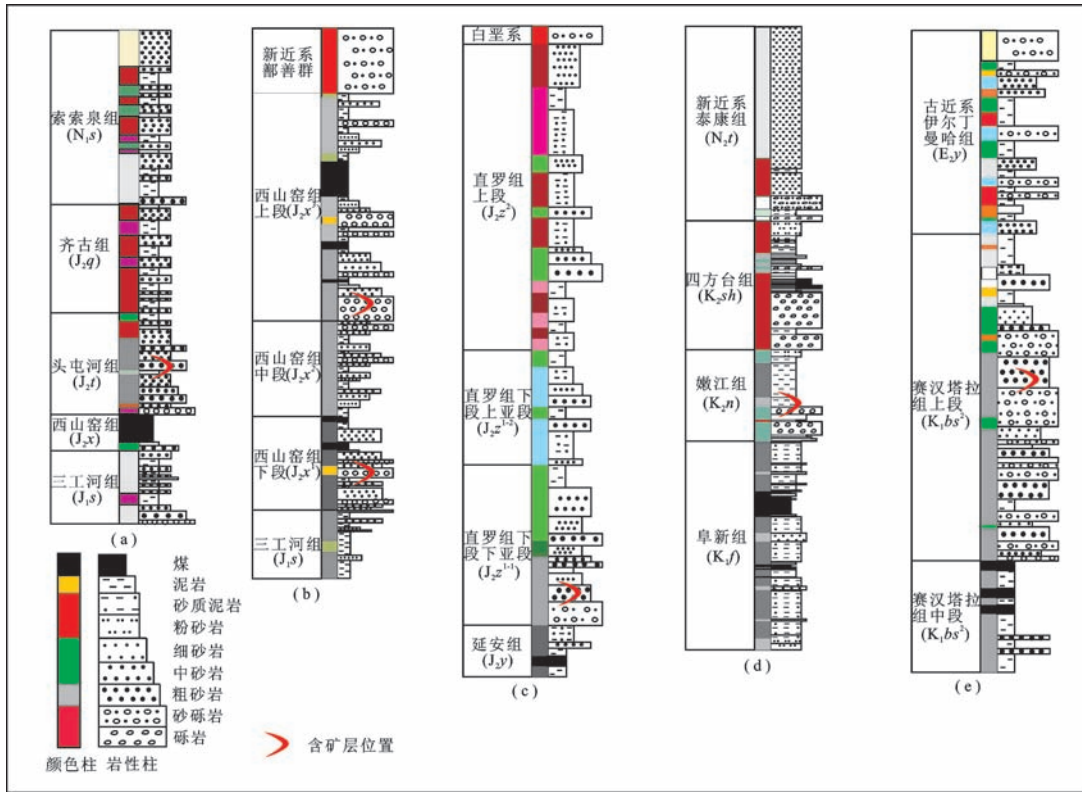


图3 中国北方主要含煤铀盆地典型柱状图

a—准噶尔盆地东缘KMST选区(据文献[2]); b—吐哈盆地南缘(据文献[23-26]); c—鄂尔多斯盆地东北缘HQL选区; d—松辽盆地西南缘SG选区; e—二连盆地马尼特拗陷ZS选区

Fig. 3 Typical columnar section of coal and uranium bearing basin in northern China

a—Eastern Junggar basin; b—Southern Turpan-Hami basin; c—Northeastern Ordos basin; d—Southwestern Songliao basin; e—Manite depression in Erlian basin

田自然伽马高异常孔展开原位验证工作是必须的, 不仅有效地规避勘探风险, 提高找矿成功率, 同时达到验证煤田资料可靠性和快速评估选区找矿前景的目的。

2.2.2 环境判别

尽管中国北方多数煤盆存在煤铀紧密伴生、下煤上铀的情况, 但同时必须认识到赋煤和赋铀主体空间的不一致性: 煤层多靠近盆地沉积中心, 赋铀砂体则多位于盆地边缘, 煤田钻孔往往并非位于最佳铀成矿位置。因此, 不能仅仅依靠原位验证的成果来判断选区的成矿前景, 亦不能把以煤找铀工作停留在原位验证上。此时, 据原位验证孔岩心后生蚀变特征展开地球化学环境判别对后续工作部署显得尤为重要。

一般而言, 目的层砂体呈灰色且发育炭屑、油迹和黄铁矿等, 常常指示还原环境; 目的层砂体呈灰绿色(东胜地区独有)、红褐色及黄褐色等, 且常发

育褐铁矿等后生矿物则指示氧化环境。如东胜地区呼斯梁地区目的层“下灰上绿”层序指示区内成矿类型为潜水氧化型; 准噶尔盆地东缘KMST选区和二连盆地ZS选区目的层“下灰中黄上灰”层序则常指示区内成矿类型为层间氧化带型。同时, 结合其他地质特征, 可约束氧化还原前锋线位置, 其具体判别将在后文综合分析中详细论述。

2.3 等时地层格架建立与沉积体系分析

等时地层划分主要遵循“先对标志层和辅助标志层, 由大及小, 旋回控制和精细划分”的原则^[33-35], 并结合伽马异常曲线识别目的层。沉积体系分析是在等时地层格架的基础上展开的, 主要针对含矿目的层砂体等厚和含砂率分布特征展开分析研究, 并为成矿有利区带划分提供沉积学依据。

2.3.1 等时地层格架的建立

二连盆地ZS煤田资料(图5)显示, 赛汉塔拉组(K₁bs)中段存在一套稳定的煤系地层, 而古近系伊

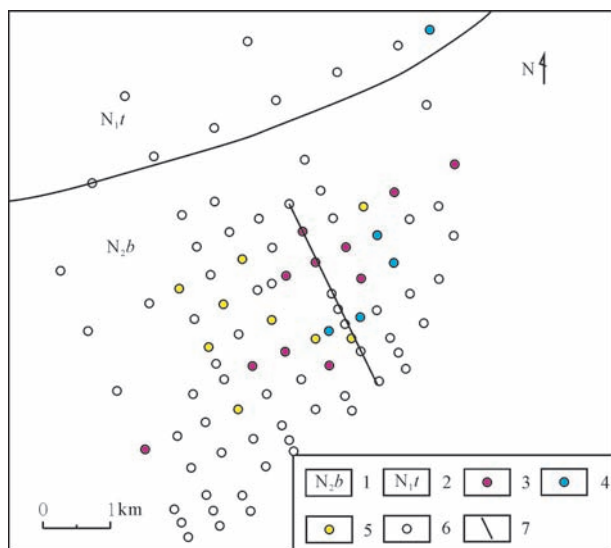


图4 二连盆地马尼特坳陷ZS选区煤田钻孔异常分布图
1—新近系宝格达乌拉组; 2—新近系通古尔组; 3—潜在铀矿孔;
4—潜在矿化孔; 5—潜在异常孔; 6—正常孔; 7—勘探线纵剖面位置
Fig. 4 Natural gamma anomaly distribution in the ZS coalfield,
Manite depression, Erlan basin

1— Baogedawula Formation; 2— Tongguer Formation; 3— Potential industrial drill hole; 4— Potential mineralized drill hole; 5— Potential anomaly drill hole; 6— Normal drill hole; 7— Longitudinal section

尔丁曼哈组(E_{2y})底部则为一套洪泛沉积砂岩、砂砾岩层, 两者均在选区内稳定延伸。因此, 可选取上

述两者为标志层建立选区大的地层格架, 并将赛汉塔拉组以上地层划分为 E_{2y} 、 K_1bs^3 、 K_1bs^2 三个大层。对赛汉塔拉组上段(K_1bs^3)精细研究时发现, 该段呈现出两个较为完整的旋回, 据此可将其进一步精细划分为赛汉塔拉组上段上亚段(K_1bs^{3-2})和下亚段(K_1bs^{3-1})两段。而放射性曲线异常峰值的位置, 指示赛汉塔拉组上段上亚段(K_1bs^{3-2})为选区主要含矿目的层。

2.3.2 沉积体系分析

在等时地层格架建立的基础上, 对目的层赛汉塔拉组上段上亚段(K_1bs^{3-2})砂体等厚和含砂率分布特征展开分析。由图5和图6可知, 选区目的层倾向北西, 且南东部和北东部已剥蚀殆尽, 这表明赛汉塔拉组上段上亚段(K_1bs^{3-2})南东部和北东部曾隆升出露地表遭受剥蚀, 而后为伊尔丁曼哈组(E_{2y})所覆盖。目的层砂体等厚特征(图6-a)表明, 砂体主要分布于选区北缘和南东部, 厚度(累计厚度)多大于30 m, 中部砂体较薄, 暗示ZS选区可能为三周围限, 西缘未封闭的汇水洼地。从目的层砂地比分布特征(图6-b)来看, 砂地比高值区和低值区常相间出现, 且含砂区带砂地比多大于0.5, 东南部砂体较厚地段砂地比可达0.7~0.8。结合钻孔岩心认为, 该亚段沉积相可能为三角洲分流河道和分流间湾微

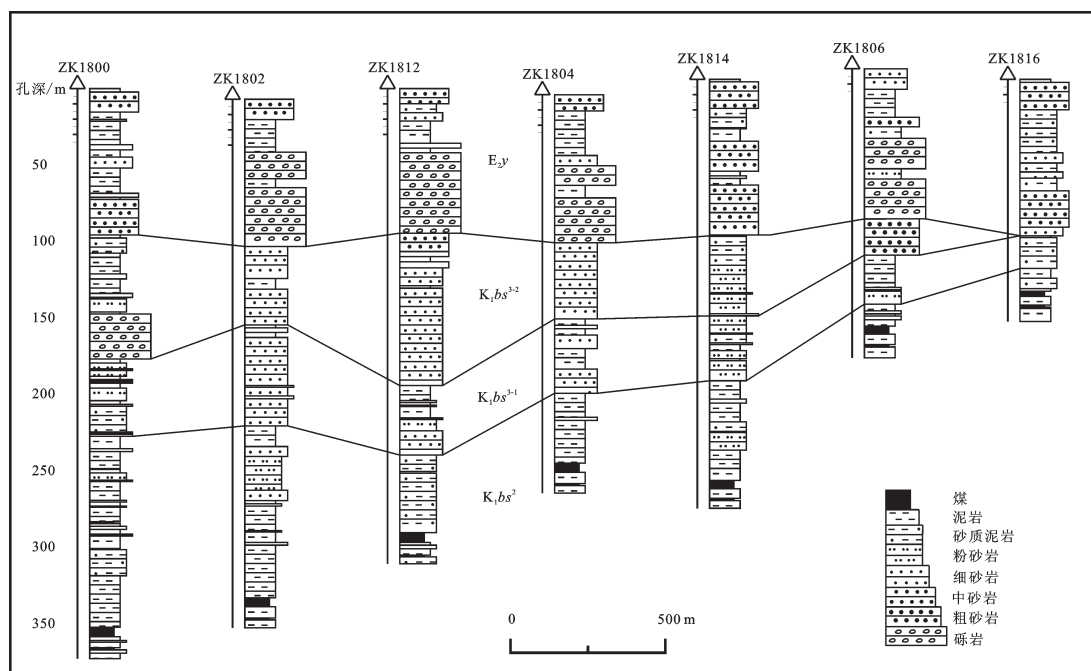


图5 二连盆地马尼特坳陷ZS选区等时地层格架兼纵剖面图
Fig.5 Diagram of isochronous stratigraphic framework and longitudinal section in the ZS coalfield, Manite depression, Erlan basin

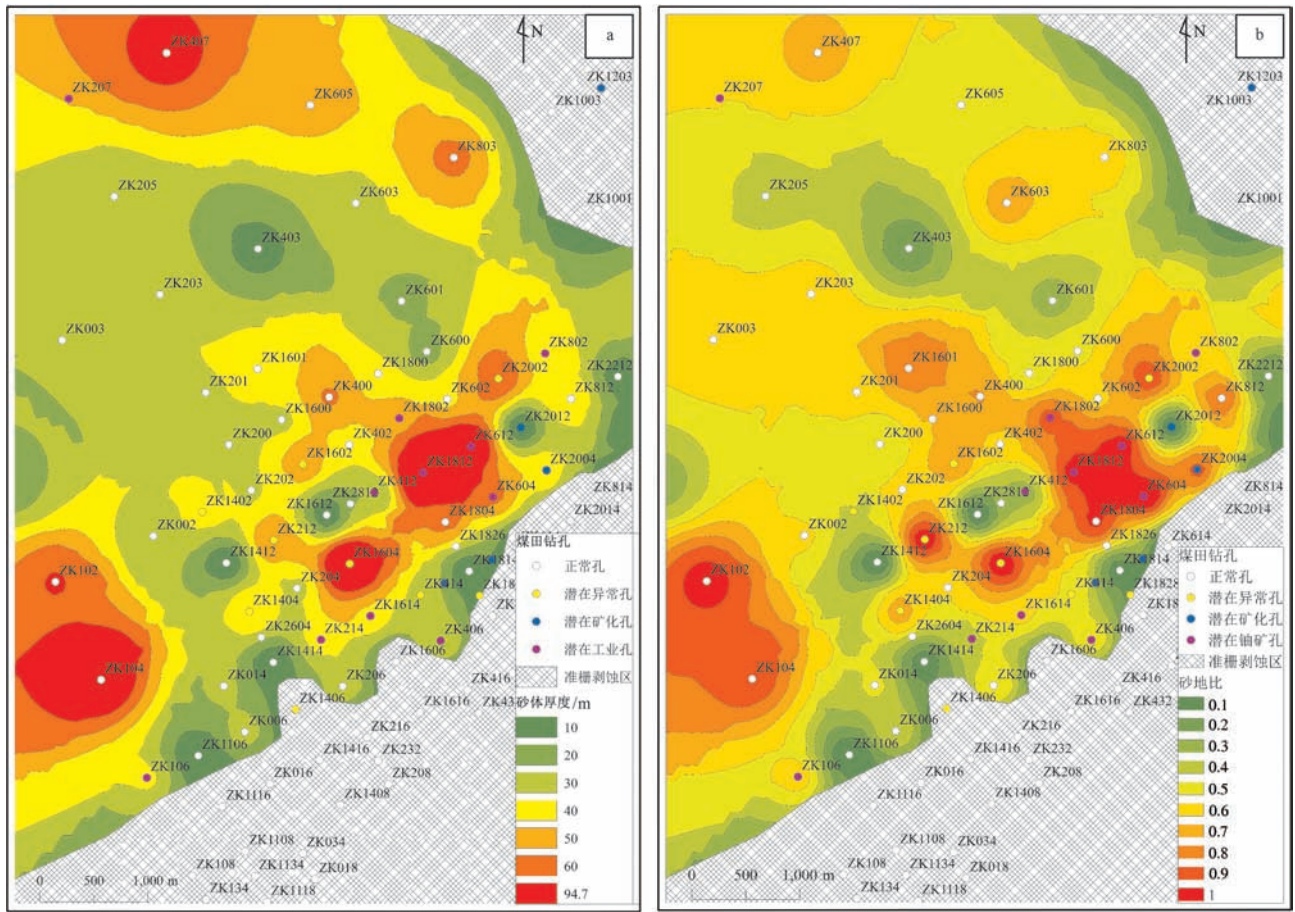


图6 二连盆地马尼特坳陷ZS选区赛汉塔拉组上段上亚段砂体分散体系分析
a—砂体等厚图; b—砂地比图

Fig.6 Sand bodies dispersion system of the submember of the upper member of Saihantala Formation in the ZS coalfield, Manite depression, Erlian basin
a—Isopach map of sand bodies; b—Sand-bearing contour map

相。而据铀矿地质实践可知,砂体分散体系突变区域或沉积相变部位,诸如分流河道和分流间湾交界处或主河道边部沉积物粒径变细、泥质和有机质含量增高处等,是有利的成矿部位^[21,36-38]。

2.4 综合分析 与靶区定位

综合“异常筛选与选区分析”、“原位验证与环境判别”及“等时地层格架建立与沉积相特征分析”能大致确定氧化线前锋位置,并大致圈定有利成矿区段。为有效缩小靶区,亦应充分注重煤田放射性测井曲线的形态特征及相应钻孔的相对位置。如图7所示,曲线异常段以厚层、锯齿状为特征,暗示该孔可能位于铀矿体卷头更靠近还原带位置;曲线异常段呈现薄层双峰式发育,说明该孔可能位于铀矿体卷头更靠近氧化带位置;而曲线异常段呈箱状

发育,则常常指示该孔可能位于铀矿体卷头部位。

对ZS煤田钻孔放射性异常筛选发现,ZS选区潜在铀矿孔和潜在矿化孔大致呈北东-南西向区带展布,指示矿体可能的走向。而对ZK604等孔的原位验证发现,孔性为矿化孔,矿化段测井曲线呈双峰式展布,且对应岩心段具有“灰黄灰”的层序,指示该区存在典型的层间氧化带,且氧化带前锋线应位于该孔北西侧(图7)。等时地层格架清晰地展示出选区东南部为剥蚀区,且铀成矿目的层大致倾向北西;而沉积体系分析则发现钻孔ZK1802、ZK1812等位于砂地比较高(>0.7)且高值区与低值区相间出现的部位,即位于分流河道和分流间湾微相的交汇部分(理想的成矿场所)。综上,对上述煤田钻孔的伽马异常曲线展开进一步分析,发现潜在铀矿孔

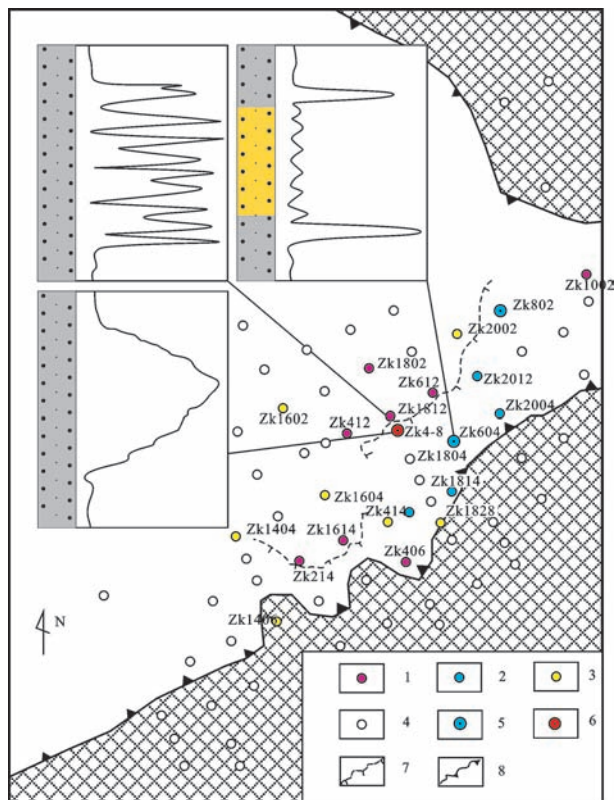


图7 二连盆地马尼特坳陷ZS选区综合分析图

1—潜在铀矿孔; 2—潜在矿化孔; 3—潜在异常孔; 4—无矿孔;
5—已验证矿化孔; 6—已验证工业孔; 7—推测氧化带前锋线;
8—剥蚀边界

Fig.7 Schematic diagram of the comprehensive analysis in the ZS coalfield, Manite depression, Erlian basin

1—Potential industrial drill hole; 2—Potential mineralized drill hole;
3—Potential anomaly drill hole; 4—Normal drill hole;
5—Confirmed mineralized drill hole; 6—Confirmed industrial drill hole;
7—Conjectural oxidation front; 8—Denudation boundary

ZK1802具有典型的锯齿状异常曲线, 暗示其南东侧可能为铀矿体卷头部位。

因此, 以ZK1802为基准点沿目的层倾向方向反推200 m, 布设ZK4-8进行精确定位, 结果显示其为工业孔。

2.5 铀矿二次开发技术

在总结上文找矿思路基础上, 本文初步建立了煤田资料的铀矿二次开发技术(图8)。提出“异常筛选与选区分析、原位验证与环境判别、等时地层格架建立与沉积体系分析、综合分析 with 靶区定位”四位一体的煤矿区铀矿地质调查模式。其中“异常筛选与选区分析”用于找矿远景区的圈定; “原位验证与环境判别”则探求优选区的成矿潜力、后生蚀变

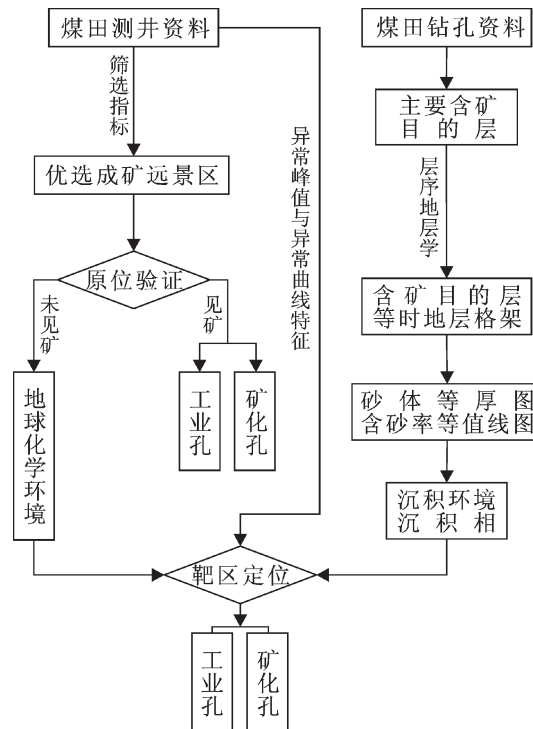


图8 煤田资料的铀矿二次开发技术体系

Fig.8 Uranium exploring technical system for coalfield data's secondary development

特征; “等时地层格架建立与沉积相特征分析”挖掘地层展布特征、含矿目的层砂体发育特征、优势成矿相及空间分布特征等; 而“综合分析 with 靶区定位”用以约束选区成矿类型、可能氧化前锋线位置、后生蚀变分带特征及矿体空间分布特征, 并最终精确定位找矿靶区。

3 讨论与结论

以上实例表明, 以煤田钻孔自然伽马异常作为主要矿化信息和矿化线索指导铀矿找矿是经济高效和切实可行的, 同时也是有序可循和有的放矢的。若仅仅注重煤田自然伽马异常信息, 而忽略钻孔岩心的沉积环境和后生蚀变信息, 很可能会极大地约束煤矿区的铀矿地质调查和评价工作, 造成大矿变小矿, 有矿变无矿的不良局面。

而煤田资料的铀矿二次开发技术体系, 不仅强调煤田钻孔伽马异常的重要性, 更重要的是利用钻孔岩心资料, 挖掘了矿体空间信息, 提高了找矿准确性。因此, “四位一体”的煤矿区铀矿地质调查模式, 为“以煤找铀”和“煤铀兼探”工作提供了新的找

矿思路和技术路线,具有较好的指导性和推广性。

致谢: 本文在成文过程中得到云南省地质科学研究所朱江工程师的建议,中国煤炭地质总局特种技术勘探中心马建国高级工程师对煤田相关知识给予有益指导;胡航工程师参加了部分野外工作;审稿专家及责任编辑杨艳老师对论文提出了宝贵修改意见,在此一并表示感谢!

参考文献(References):

- [1] 金若时,覃志安. 中国北方含煤盆地砂岩型铀矿找矿模式层序研究[J]. 地质调查与研究, 2013, 36(2): 82-83.
Jin Ruoshi, Qin Zhi'an. Study on the exploration sequence of sandstone-hosted uranium deposits in North China[J]. Geological Survey and Research, 2013, 36(2): 82-83(in Chinese with English abstract).
- [2] 金若时,黄澎涛,苗培森,等. 准噶尔盆地东缘侏罗系砂岩型铀矿成矿条件与找矿方向[J]. 地质通报, 2014, 33(2/3): 359-369.
Jin Ruoshi, Huang Pengtao, Miao Peisen, et al. Metallogenic conditions and prospecting targeting of the Jurassic sand type uranium deposits on the eastern margin of Junggar basin[J]. Geological Bulletin of China, 2014, 33(2/3): 359-369(in Chinese with English abstract).
- [3] 于德福,王俊. 大营模式铸就大赢[N]. 中国国土资源报, 2012.
Yu Defu, Wang Jun. Daying model results in bumper harvest[N]. China Land and Resource News, 2012(in Chinese).
- [4] 王琼杰,王俊. 大营西段铀矿普查获阶段性重大进展[N]. 中国矿业报, 2014.
Wang Qiongjie, Wang Jun. Daying western section uranium prospecting makes a great stage progress[N]. China Mining News, 2014(in Chinese).
- [5] 王仁农,李桂春. 中国含煤盆地的聚煤规律[J]. 地质论评, 1995, 41(6): 487-498.
Wang Rennong, Li Guichun. A discussion on coal-accumulating regularity of coal-bearing basins in China[J]. Geological Review, 1995, 41(6): 487-498(in Chinese with English abstract).
- [6] 王仁农,李桂春,关世桥,等. 中国含煤盆地演化和聚煤规律[M]. 北京:煤炭工业出版社, 1998: 0-236.
Wang Rennong, Li Guichun, Guan Shiqiao, et al. Evolution and Coal-accumulating Regularity of Coal-bearing Basins in China[M]. Beijing: China Coal Industry Publishing House, 1998: 0-236(in Chinese).
- [7] 徐高中,李万华. 中国北西部东段中生代盆地砂岩型铀矿找矿目标类型探讨[J]. 矿床地质, 2006, 25(Z2): 265-268.
Xu Gaozhong, Li Wanhua. Prospecting target types of sandstone-type uranium deposits in Meso-Cenozoic basins of eastern northwest China[J]. Mineral Deposits, 2006, 25(Z2): 265-268(in Chinese with English abstract).
- [8] 权志高,徐高中. 中国北西部地区砂岩型铀矿含矿建造及找矿前景[J]. 地质学报, 2012, 86(2): 307-315.
Quan Zhigao, Xu Gaozhong. Ore-bearing formation and exploration perspective of sandstone-type uranium deposits in northeastern China[J]. Acta Geologica Sinica, 2012, 86(2): 307-315 (in Chinese with English abstract).
- [9] 金若时,张成江,冯晓曦,等. 流体混合对砂岩型铀矿成矿作用的影响[J]. 地质通报, 2014, 33(2/3): 354-358.
Jin Ruoshi, Zhang Chengjiang, Feng Xiaoxi, et al. The influence of fluid mixing on the mineralization of sandstone type uranium deposits[J]. Geological Bulletin of China, 2014b, 33(2/3): 354-358 (in Chinese with English abstract).
- [10] 权志高,李占双. 新疆十红滩砂岩型铀矿基本特征及其成因分析[J]. 地质论评, 2002, 48(4): 430-436.
Quan Zhigao, Li Zhanshuang. Geological characteristics and genesis of the shihongtan sandstone-type uranium deposit, Xinjiang[J]. Geological Review, 2002, 48(4): 430-436(in Chinese with English abstract).
- [11] 刘家铎,林双幸. 伊犁盆地南缘侏罗系沉积微相及铀矿控矿条件研究[J]. 矿物岩石, 2003, 23(1): 30-36.
Liu Jiaduo, Lin Shuangxin. The lower-middle Jurassic sedimentary facies in the south part of Yili basin and research of ore-controlling conditions[J]. Journal of Mineralogy and Petrology, 2003, 23(1): 30-36(in Chinese with English abstract).
- [12] 李胜祥,韩效忠,蔡煜琦,等. 伊犁盆地南缘西段中下侏罗统水西沟群沉积体系及其对铀成矿的控制作用[J]. 中国地质, 2006, 33(3): 582-590.
Li Shengxiang, Han Xiaozhong, Cai Yuqi, et al. Depositional system of the lower-middle Jurassic Shuixigou group in the western segment of the southern margin of the Ili basin and its controls on uranium mineralization[J]. Geology in China, 2006, 33(3): 582-590(in Chinese with English abstract).
- [13] 张金带,徐高中,林锦荣,等. 中国北方6种新的砂岩型铀矿对铀资源潜力的提示[J]. 中国地质, 2010, 37(5): 1434-1449.
Zhang Jindai, Xu Gaozhong, Lin Jinrong, et al. The implication of six kinds of new sandstone-type uranium deposits to uranium resources potential in North China[J]. Geology in China, 2010, 37(5): 1434-1449(in Chinese with English abstract).
- [14] 刘正邦,焦养泉,薛春纪,等. 内蒙古东胜地区侏罗系砂岩铀矿体与煤层某些关联性[J]. 地学前缘, 2013, 20(1): 146-153.
Liu Zhengbang, Jiao Yangqun, Xue Chunji, et al. The correlation between sandstone uranium ore-body and the coal bed in Jurassic system, Dongsheng, Inner Mongolia[J]. Earth Science Frontiers, 2013, 20(1): 146-153(in Chinese with English abstract).

- [15] 焦养泉, 吴立群, 彭云彪, 等. 中国北方古亚洲构造域中沉积型铀矿形成发育的沉积-构造背景综合分析[J]. 地学前缘, 2015, 22(1): 189-205.
Jiao Yangquan, Wu Liqun, Peng Yunbiao, et al. Sedimentary-tectonic setting of the deposition-type uranium deposits forming in the Paleo-Asian tectonic domain, North China[J]. Earth Science Frontiers, 2015, 22(1): 189-205(in Chinese with English abstract).
- [16] 时志强, 韩永林, 赵俊兴, 等. 鄂尔多斯盆地中南部中侏罗世延安期沉积体系及岩相古地理演化[J]. 地球学报, 2003, 24(1): 49-54.
Shi Zhiqiang, Han Yonglin, Zhao Junxing, et al. Depositional system and paleogeographic evolution of the middle Jurassic Yananian stage in the central and southern Ordos basin[J]. Acta Geoscientica Sinica, 2003, 24(1): 49-54(in Chinese with English abstract).
- [17] 蔡厚安, 李宝芳, 邵龙义, 等. 辽宁阜新盆地地下白垩统沙海组沉积环境与聚煤规律[J]. 古地理学报, 2011, 13(5): 481-491.
Cai Hou'an, Li Baofang, Shao Longyi, et al. Sedimentary environments and coal accumulation patterns of the Lower Cretaceous Shapai Formation in Fuxin Basin, Liaoning Province[J]. Journal of Palaeogeography(Chinese edition), 2011, 13(5): 481-491(in Chinese with English abstract).
- [18] 王东东, 邵龙义, 李智学, 等. 陕西省中侏罗统延安组层序地层格架与煤层形成[J]. 中国煤炭地质, 2011, 23(8): 22-27.
Wang Dongdong, Shao Longyi, Li Zhixue, et al. Middle Jurassic series yan'an Formation sequence stratigraphic framework and coal seam formation in Shaanxi Province[J]. Coal Geology of China, 2011, 23(8): 22-27(in Chinese with English abstract).
- [19] 王东东. 鄂尔多斯盆地中侏罗世延安组层序-古地理与聚煤规律[D]. 北京: 中国矿业大学(北京), 2012.
Wang Dongdong. Sequence-paleogeography and Coal-Accumulation of the Middle Jurassic Yan'an Formation in Ordos Basin[D]. Beijing: China University of Mining & Technology (Beijing), 2012.
- [20] 商晓旭, 邵龙义, 马立军, 等. 黑龙江七星河含煤盆地古近纪一新近纪沉积相及层序地层特征[J]. 中国煤炭地质, 2014, 26(9): 1-7.
Shang Xiaoxu, Shao Longyi, Ma Lijun, et al. Paleogene-Neogene sedimentary facies and sequence stratigraphic characteristics in Qixinghe coal-bearing basin, Heilongjiang[J]. Coal Geology of China, 2014, 26(9): 1-7(in Chinese with English abstract).
- [21] 焦养泉, 吴立群, 杨生科, 等. 铀储层沉积学: 砂岩型铀矿勘查与开发的基础[M]. 北京: 地质出版社, 2006.
Jiao Yangquan, Wu Liqun, Yang Shengke, et al. Uranium Reservoirs sedimentology: Base of Uranium Exploration and Development[M]. Beijing: Geological Publishing House, 2006(in Chinese).
- [22] 权建平, 樊太亮, 徐高中, 等. 中国北方盆地中油气运移对砂岩型铀矿成矿作用讨论[J]. 中国地质, 2007, 34(3): 470-477.
Quan Jianping, Fan Taiyang, Xu Gaozhong, et al. Effects of hydrocarbon migration on sandstone-type uranium mineralization in basins of northern China[J]. Geology in China, 2007, 34(3): 470-477(in Chinese with English abstract).
- [23] 沈守文, 彭大钧, 颜其彬, 等. 吐哈盆地侏罗系层序地层学研究[J]. 沉积学报, 2001, 19(2): 263-270.
Shen Shouwen, Peng Dajun, Yan Qibin, et al. Sequence stratigraphy of Jurassic in Turpan-Hami basin[J]. Acta Sedimentologica Sinica, 2001, 19(2): 263-270(in Chinese with English abstract).
- [24] 周巧生, 李占游. 吐哈盆地西南缘地浸砂岩型铀矿地质特征及找矿前景[J]. 中国地质, 2003, 30(2): 186-191.
Zhou Qiaosheng, Li Zhanyou. Geological characteristics and ore prospects of underground leaching sandstone-type uranium deposits on the southwestern margin of the Turpan-Hami basin[J]. Geology in China, 2003, 30(2): 186-191(in Chinese with English abstract).
- [25] 吴伯林, 徐高中, 李卫红, 等. 吐哈盆地地浸砂岩型铀矿成矿条件与盆地动力学演化[J]. 中国地质, 2004, 31(1): 101-107.
Wu Bolin, Xu Gaozhong, Li Weihong, et al. Metallogenic conditions of in-situ leachable sandstone-type uranium deposits and dynamic evolution of the Turpan-Hami basin[J]. Geology in China, 2004, 31(1): 101-107(in Chinese with English abstract).
- [26] 权志高, 张甲民, 孙延怀, 等. 吐哈盆地西南部铀矿化特征与成矿潜力评价[J]. 中国地质, 2011, 38(6): 1563-1575.
Quan Zhigao, Zhang Jiamin, Sun Yanhuai, et al. Uranium mineralization characteristics of southwest Turpan-Hami basin and evaluation of metallogenic potential[J]. Geology in China, 2011, 38(6): 1563-1575(in Chinese with English abstract).
- [27] 赵忠华, 范玉杰, 张振强, 等. 松辽盆地西部斜坡区层间氧化带砂岩型铀矿成矿条件及远景预测[J]. 铀矿地质, 2003, 19(3): 154-160.
Zhao Zhonghua, Fan Yujie, Zhang Zhenqiang, et al. Analysis on metallogenic conditions and prospect prognosis for interlayer oxidation zone sandstone-type uranium deposit at western slope of Songliao basin[J]. Uranium Geology, 2003, 19(3): 154-160(in Chinese with English abstract).
- [28] 李胜祥, 韩效忠, 蔡煜琦, 等. 天山造山带山间盆地砂岩型铀矿成矿模式及找矿方向探讨[J]. 矿床地质, 2006, 25(Z1): 241-244.
Li Shengxiang, Han Xiaozhong, Cai Yuqi, et al. Metallogenic model and prospecting targets for interlayer oxidation type sandstone-hosted uranium deposits in intermountain basins of the

- Tianshan orogenic belt[J]. *Mineral Deposits*, 2006, 25(Z1): 241–244(in Chinese).
- [29] 马汉峰, 罗毅, 李子颖, 等. 松辽盆地南部姚家组沉积特征及铀成矿条件[J]. *铀矿地质*, 2009, 25(3): 144–149.
- Ma Hanfeng, Luo Yi, Li Ziying, et al. Sedimentary features and uranium metallogenic conditions of Yaojia formation in southern Songliao basin[J]. *Uranium Geology*, 2009, 25(3): 144–149(in Chinese with English abstract).
- [30] 于文斌. 松辽盆地南部白垩系砂岩型铀矿成矿条件研究[D]. 长春: 吉林大学, 2009.
- Yu Wenbin. Research on Metallogenic Conditions of Sandstone Type Uranium Deposit of Cretaceous in Southern Songliao Basin[D]. Changchun: Jilin University, 2009(in Chinese with English abstract).
- [31] 郭庆银. 鄂尔多斯盆地西缘构造演化与砂岩型铀矿成矿作用[D]. 北京: 中国地质大学(北京), 2010.
- Guo Qingyin. Tectonic Evolution at the Western Margin of Ordos Basin with Respect to Metallogenesis of Sandstone Type Uranium Deposits[D]. Beijing: China University of Geosciences (Beijing), 2010(in Chinese with English abstract).
- [32] 鲁宝龙. 鄂尔多斯盆地南部铀成矿条件及远景预测[D]. 西安: 西北大学, 2013.
- Lu Baolong. Uranium Metallogenic Condition and Potential Prediction in Southern Ordos Basin[D]. Xi'an: Northwest University(in Chinese with English abstract)
- [33] 朱筱敏. 层序地层学[M]. 东营: 中国石油大学出版社, 2000.
- Zhu Xiaomin. Sequence Stratigraphy[M]. Dongying: China University of Petroleum Press, 2000 (in Chinese).
- [34] 张蓉. 姬塬地区长3, 长4+5油层组沉积相及储层特征研究[D]. 西安: 西北大学, 2005.
- Zhang Rong. Research on Sedimentary Facies and Reservoir Characteristic of Chang3 and Chang4 + 5 Member in Jiyuan Area[D]. Xi'an: Northwest University, 2005(in Chinese with English abstract).
- [35] 肖丽. 鄂尔多斯盆地晚三叠世早期沉积体系与沉积演化规律[D]. 西安: 西北大学, 2008.
- Xiao Li. Sedimentary System and Depositional Evolution of Ordos Basin in Early Period of Late Triassic[D]. Xi'an: Northwest University, 2008(in Chinese with English abstract).
- [36] 韩效忠, 张字龙, 姚春玲, 等. 鄂尔多斯盆地东北部砂岩型铀成矿模式研究[J]. *矿床地质*, 2008, 27(3): 415–422.
- Han Xiaozhong, Zhang Zilong, Yao Chunling, et al. Discussion on metallogenic model for sandstone-hosted uranium deposits in northeastern Ordos Basin[J]. *Mineral Deposits*, 2008, 27(3): 415–422(in Chinese with English abstract).
- [37] 张字龙, 韩效忠, 李胜祥, 等. 鄂尔多斯盆地东北部中侏罗统直罗组下段沉积相及其对铀成矿的控制作用[J]. *古地理学报*, 2010, 12(6): 749–758.
- Zhang Zilong, Han Xiaozhong, Li Shengxiang, et al. Sedimentary facies of the lower part of middle Jurassic Zhiluo formation in northeastern Ordos basin and its controls on uranium mineralization[J]. *Journal of Palaeogeography*, 2010, 12(6): 749–758(in Chinese with English abstract).
- [38] 鲁超, 彭云彪, 刘鑫扬, 等. 二连盆地马尼特坳陷西部砂岩型铀成矿的沉积学背景[J]. *铀矿地质*, 2013, 29(6): 336–343.
- Lu Chao, Peng Yunbiao, Liu Xinyang, et al. Sedimentary backgrounds of sandstone-type uranium deposits in western Manite depression of Erlian basin[J]. *Uranium Geology*, 2013, 29(6): 336–343(in Chinese with English abstract).