

中一新生代盆地煤铀协同勘查及对策建议

韩效忠,林中湘,吴兆剑,蒋喆,殷栋法,王行军,季辉

中国煤炭地质总局特种技术勘探中心(中煤地质集团有限公司),北京,100042



内容提要: 我国铀资源对外依存度高,供应安全不容乐观,加大国内铀资源勘探投入势在必行。目前我国铀资源产量主要来自于北方砂岩型铀矿床,将来可能占比越来越高将由其提供。砂岩型铀矿产出与含煤地层关系密切,煤田勘查发现的放射性信息是砂岩型铀矿找矿的重要线索,鄂尔多斯盆地皂火壕和纳林沟大型砂岩型铀矿床的发现与之关系密切,大营超大型砂岩型铀矿床的发现更是煤铀协同勘查的典型范例。受此启发,中国地质调查局实施了北方砂岩型铀矿调查工程,发现了一系列大型砂岩型铀矿产地和多个经钻探验证的远景区,“铀煤兼探”成效显著。中国地质调查局主要职责为公益性地质调查,由其主导发现的矿产地和远景区勘查精度较低,要使其达到提交储量的级别,就需要企业接盘。我国现行铀矿政策和部门利益冲突限制了社会资本的进入,严重影响了铀矿找矿的进程,为此笔者等建议:①在国家层面制定相关配套政策,进一步放开铀矿权,允许非核企业进入铀矿勘查领域,激活市场潜力,重点推进、做深前期“煤铀兼探”获得的成果,加快我国铀资源勘查进程;②持续不断地推进“煤铀、油铀”等协同勘查工作,提高多能源综合勘查研究水平,节省勘查资金,制定我国协同勘查的基本原则和勘查规范,使能源型盆地勘查工作有序高效并合理利用。

关键词: 砂岩型铀矿;煤铀协同勘查;对策建议;铀矿权;中一新生代盆地

铀资源是具有放射性的矿产资源,对核电等的发展具有重要作用。相关资料显示,2019年我国铀资源需求量为9834 t,国内产量约为1885 t(陈军强等,2021),缺口量达到80%,铀资源严重依赖进口(何鸿等,2020),对外依存度已经超过石油、铁矿石。随着世界格局新变化、世界铀矿公司削减产量,加之新冠疫情影响,我国铀资源供应安全不容乐观,加大国内铀资源勘探投入势在必行。

21世纪初,我国铀矿资源勘探重心,由南方硬岩型铀矿(包括花岗岩型和火山岩型,传统洞采方式开采)过渡为北方砂岩型铀矿(地浸方式开采),这一趋势在表1中显示明显。表1显示的铀资源量(包括可靠和推断的)是由中国政府官方提供给国际原子能机构的数据,换句话讲该数据是中国政府可公开的铀资源量,从该数据中可以明显看出,近年来,我国铀矿勘查的类型发生了显著的变化,砂岩型铀矿逐渐主导我国铀矿格局。

从表1可见,硬岩型铀矿资源量除赣州火山岩型铀矿在2013年至2015年增加22 kt外,其他火山

岩型和花岗岩型铀资源量没有新增,且随着开采活动的进行,硬岩型铀矿的地质储量还在不断减少,如2015至2017年,相山、诸广南部、大洲和本溪铀资源量分别减少了2 kt、3 kt、2 kt和1.5 kt,减少部分为上述矿山采铀扣减资源量,即便是赣州火山岩型铀矿,其资源量也在2015年以来一直保持在34 kt,未发生变化,表明此类硬岩型铀矿勘查活动基本处于停止状态。与之相对应,新疆和内蒙古中一新生代盆地内的砂岩型铀矿勘查活动十分活跃,取得明显的铀矿找矿成果,砂岩型铀资源量从2013年的122 kt增长到2017年的204 kt,增幅达到41%(图1),其中贡献最大的是鄂尔多斯盆地大营铀矿床的发现,结束了我国无世界级砂岩型铀矿的历史。在我国主要铀矿类型中,砂岩型铀矿探获铀资源在2017年初已占我国总量的55%,成为我国铀资源量的主力类型。2017年至今,中核集团在砂岩型铀矿勘查方面取得了明显突破,加之由中国地质调查局主导,中国煤炭地质总局及其他省属煤田局承担实施的“煤铀兼探”取得的成果,在Uranium 2020:

注:本文为中国煤炭地质总局科研项目(编号:ZMKJ-2022-J02-2)和国家重点研发计划项目(编号:2018YFC0604200)的成果。

收稿日期:2021-11-26;改回日期:2022-01-25;网络首发:2022-02-20;责任编辑:刘志强。Doi: 10.16509/j.georeview.2022.02.041

作者简介:韩效忠,男,1973年生,博士,正高级工程师,主要从事构造地质学和矿床学方面的研究工作;Email: geohxz@163.com。通讯作者:林中湘,男,1971年生,博士,教授级高工,主要从事水文地质和矿业政策研究;Email: lzx226100@sina.com。

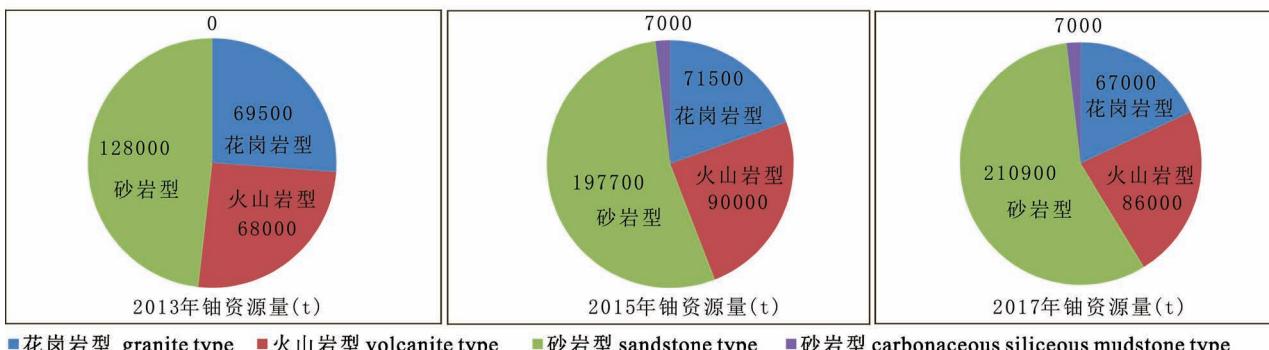


图 1 2013 年~2017 年中国主要铀矿资源类型份额图

Fig. 1 The portion of major uranium resources in China from 2013 to 2017

表 1 中国铀资源量分布(2013 年 1 月 1 日至 2017 年 1 月 1 日)

Table 1 Distribution of uranium resources in China
(January 1, 2013 to January 1, 2017)

编号	位置	成矿类型	铀资源量(kt)		
			2013	2015	2017
1	江西	相山	火山岩型	32	32
		赣州	火山岩型	12	34
		桃山	花岗岩型	12.5	12.5
2	广东	下庄	花岗岩型	15	15
		诸广南部	花岗岩型	25	22
		河源	花岗岩型	4	4
3	湖南	湖槽大湾(鹿井)	花岗岩型	9	9
4	广西	资源	火山岩	11	11
5	新疆	伊犁	砂岩型	33	40
		吐哈	砂岩型	10	10
6	内蒙古	鄂尔多斯	砂岩型	35	70.2
		二连	砂岩型	40	48
		通辽	砂岩型	4	13
		巴音戈壁	砂岩型	/	10.5
7	河北	青龙	火山岩型	8	8
8	云南	腾冲	砂岩型	6	6
9	陕西	蓝田	花岗岩型	2	2
10	浙江	大洲	火山岩型	5	5
11	辽宁	本溪	花岗岩型	2	2
12	甘肃	龙首山	花岗岩型	/	2
13	四川	若尔盖	碳硅泥岩型	/	7
总计			265.5	366.2	370.9

数据来源:IAEA, 2016 and 2018。

表 2 2014~2017 年不同方法采铀量一览表(浓缩铀:t)

Table 2 List of uranium mined by different methods
in 2014~2017 (enriched uranium:t)

开采方式	2014 年	2015 年	2016 年	2017 年
硐采(南方硬岩型)	1070	1070	650	650
地浸开采(北方砂岩型)	480	530	1000	1050
合计	1550	1600	1650	1700

数据来源:IAEA, 2018。

Resources, Production 和 Demand 发布时, 砂岩型铀矿主导地位会表现的更加明显。

基于砂岩型铀矿成为我国将来重点勘查的类型和协同勘查出现的突出矛盾, 本文拟在简要介绍砂岩型铀矿与含煤地层的相关性、煤系铀的资源性和污染性等基础上, 提出煤铀协同勘查的对策建议, 供相关职能部门政策制定时参考。

1 砂岩型铀矿地浸开采逐渐成为我国铀产品的主力来源

因勘探成果转化为开采, 需要一个较长时间, 硬岩型铀矿发现时间较早, 所以较长时期以来该类矿山是我国铀产品的主要产出地, 为我国核电发展和国防建设发挥了重要作用。

2012 年以来, 在新时代中国特色社会主义生态文明建设的指导下, “绿色发展”、“绿水青山就是金山银山”等发展理念深入人心, 加之实行最严格的生态环境保护制度的实施和国际铀价的持续低迷压力下, 更加经济、环保的地浸砂岩型铀矿逐渐成为我国铀产品的主力来源。

从表 2 可见, 2014 年度和 2015 年度, 我国铀产品主要由硬岩型铀矿山提供, 占比为总量的 2/3; 2016 年度和 2017 年度, 北方砂岩型铀矿铀产量占比显著提高, 硬岩型铀矿铀产量退居次要位置。随着南方铀矿山相继关闭, 未来一段时间, 我国铀产品可能绝大部分、甚至全部将由北方砂岩型铀矿山提供。

2 砂岩型铀矿与含煤地层之间的关系

砂岩型铀矿产出与含煤地层关系密切, 在空

间分布上有一定的内在联系(金若时等,2017; Cheng Yinhang et al., 2019, 2020; Han Xiaozhong et al., 2021)。在横向,我国大型砂岩型铀矿床主要分布在北方各中—新生代陆相盆地残留边缘(图2),这些盆地同时也是我国重要的产煤盆地,进一步研究发现:针对小型成煤凹陷,砂岩型铀矿体定位于凹陷边部煤层尖灭线的外侧(康世虎等,2017; 韩效忠等,2018);针对大型产煤盆地,砂岩型铀矿床定位于盆地边部煤层尖灭线的内侧(Zhang Pingchuan et al., 2022; Wu Zhaojian et al., 2021)。在垂向上,铀矿体或直接产出在煤层和含煤地层中,或定位于紧邻含煤地层之上的沉积地层当中,表现为由煤层、炭屑或煤层气为铀的沉淀富集提供了还原剂(焦养泉等,2018),通常来讲,大型煤盆地含煤地层之上的含砂地层是砂岩型铀矿找矿的重点目标层。

伊犁盆地南缘:铀矿体产于早、中侏罗统水西沟群含煤地层当中,在平面上呈带状沿东西向断续分布,由西向东划分为洪海沟、库捷尔太、乌库尔其、扎吉斯坦、蒙其古尔等砂岩型铀矿床。垂向上可划分出7个旋回(含矿层),自下而上为I~VII,其中I~IV旋回相当于八道湾组,V₁和V₂相当于三工河组,V₃~VII旋回相当于西山窑组(图2b1)。上述各个旋回均有铀矿化显示,下部层位矿体发育较好的I和II旋回,上部层位则为V₂~VII旋回铀矿体发育最好,是该区铀矿规模最大,连续性最好的含矿层位(韩效忠等,2020)。

鄂尔多斯盆地区:矿体主要产于中侏罗统直罗组(图2b2),呈板状、似层状产出,其下为中侏罗统延安组大面积分布的煤层,在平面上砂岩型铀矿体主要分布在盆地边缘,即延安组煤盆地的边部,但直罗组砂岩型铀矿体主体位于延安组煤层尖灭线的内侧,即垂向上铀矿体下部发育延安组煤层(张字龙等,2010)。

二连盆地区:砂岩型铀矿含矿层位为下白垩统赛汉组(含煤地层)(图2b3),矿体明显受古河道砂岩控制,且河道砂岩的规模和砂体厚度与矿体规模和品位呈明显的正相关关系。本区铀矿找矿的重点为寻找“古河道”,即发现了“古河道”也就基本发现了铀矿体(郭宏伟,2014; 韩效忠等,2018; 林中湘,2019; 蒋喆等,2020)。同时发现铀矿体与含矿目标层中的煤层具有一定的空间配置关系,即铀矿体多发育在含煤凹陷边部煤层尖灭线外侧附近,而含煤凹陷的中心区铀矿体不发育。

松辽盆地开鲁坳陷绍根凹陷区:在该区上白垩统嫩江组和四方台组发现铀工业矿体(图2b4)。其中前者为泥岩型铀矿,矿体呈板状,连续性较好,分布在绍根凹陷中部(吴兆剑等,2018),与下伏下白垩统阜新组主要煤层中心区垂向重叠;后者为砂岩型铀矿,矿体呈透镜状,走向与绍根凹陷北部边缘平行,产于该凹陷煤层尖灭线外侧附近之上的地层中。

准噶尔盆地东缘区:在喀木斯特矿区,铀矿体产于中侏罗统头屯河组,呈板状、似层状产出,其下发育中侏罗统西山窑组和下侏罗统煤层,与鄂尔多斯盆地相类似,铀矿体位于盆地边缘,多位于下伏煤盆地煤层尖灭线的内侧;而帐篷沟背斜铀矿体产于西山窑组煤层(煤岩型铀矿体)当中,在其东翼下侏罗统八道湾组上段紧贴煤层之上的砂岩中发现砂岩型铀工业矿体(殷栋法等,2019)。

综上所述,砂岩型铀矿与含煤地层的密切关系表明,在煤田勘探时绝不能忽视对其共、伴生的铀矿兼探,大营铀矿的发现就是这一协同勘查的典型范例。

3 含铀煤资源属性和放射性环境影响的概述

3.1 含铀煤型矿床

含铀煤型铀矿分属于砂岩型铀矿亚类(蔡煜琦等,2015),目前我国已发现的此类矿床有达拉地(509)中型铀矿床、唐家沟和大庆沟小型铀矿床及煤窑沟等铀矿点。下文简要介绍达拉地和大庆沟矿床一般特征。

新疆达拉地(509)是我国唯数不多建矿开采的含铀煤矿床,该矿1964年开始建矿,1982年采矿基本结束,共采出金属铀523.58 t。矿体位于伊犁盆地南缘东段达拉地向斜中,含矿煤层为水西沟群(J₁₋₂sh)12煤层(刘武生等,2011)。矿床煤质多为亮煤,暗煤次之,含铀煤与不含铀煤无明显的界线,铀平均品位0.15%,最高可达4%(王前裕,1997)。

大庆沟铀矿床位于准噶尔盆地东部卡拉麦里山以南的帐篷沟隆起两翼,规模相对较大,属典型的煤岩型铀矿床。工业铀矿体主要产于西山窑组(J_{2x})煤层中,部分赋存在炭质泥岩和含炭屑的粉砂岩、细砂岩中,铀矿化主要沿帐篷沟隆起的东西两翼断续分布,以地表矿体为主,矿体埋深一般小于40 m,铀成矿与潜水氧化作用密切相关,主要产于遭受强烈氧化风化和淋滤改造的煤层中,为准噶尔盆地侏罗系含煤建造中重要的铀成矿类型之一。矿体多呈透

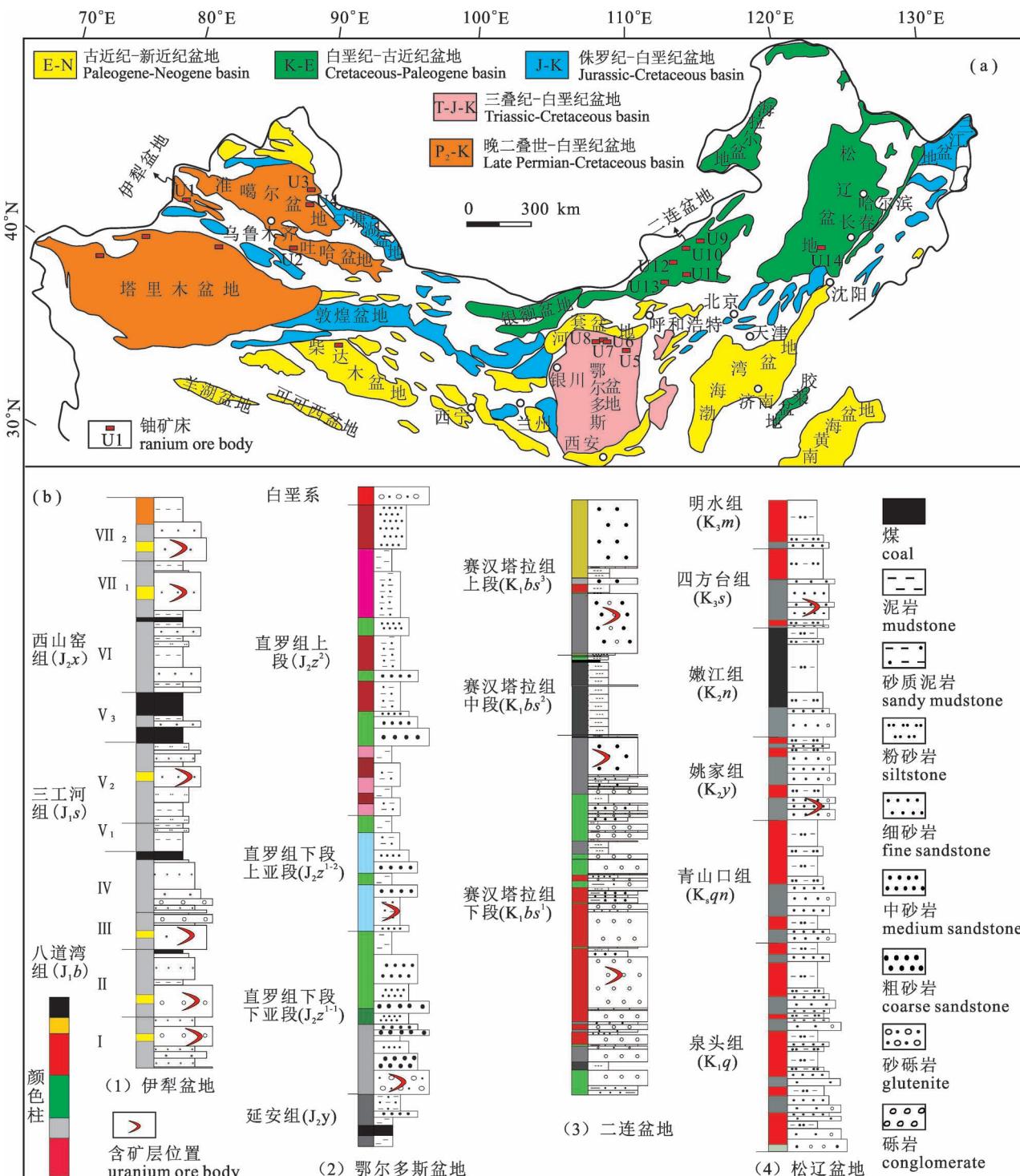


图 2 中国北方典型砂岩型铀矿床分布(a)和综合状图(b)

Fig. 2 Distribution (a) and synthesis columnar section of sandstone uranium deposit in North China (b)

U1—伊犁铀矿田; U2—十红滩铀矿床; U3—喀木斯特铀矿床; U4—大庆沟铀矿床; U5—皂火壕铀矿床; U6—纳林沟铀矿床; U7—塔拉壕(乌力桂庙)铀矿床; U8—大营铀矿床; U9—白音乌拉铀矿床; U10—陆海铀矿床; U11—恩格日音铀矿床; U12—赛汉高毕铀矿床; U13—齐哈日格图铀矿床; U14—钱家店铀矿床
 U1—Uranium ore field in the southern margin of Ili Basin; U2—Shihongtan uranium deposit; U3—Kamusite uranium deposit; U4—Daqinggou uranium deposit; U5—Zaohuobao uranium deposit; U6—Nalinggou uranium deposit; U7—Talahao (Wuliguimiao) uranium deposit; U8—Daying uranium deposit; U9—Bayinwula uranium deposit; U10—Luhai uranium deposit; U11—Engeriyin uranium deposit; U12—Saihanggobi uranium deposit; U13—Qiharigetu uranium deposit; U14—Qianjiadian uranium deposit

镜状、扁豆状和带状,沿走向延伸较长,一般60~100 m,最长450 m;沿倾向矿体较短,一般25~50 m,最窄仅几米、最宽75 m。矿体平均品位0.108%,样品最高品位3.404%;矿体平均厚度0.95 m,最大厚度8.1 m。矿石矿物由铀黑、板菱铀矿、钒钙铀矿等次生铀矿物,黄铁矿、褐铁矿、黄铜矿等金属矿物及石膏、方解石等脉石矿物组成。矿床铀矿物多以网脉状及脉状分布在煤的裂隙中,与浅表淋滤带中的次生石膏、方解石和褐铁矿相伴生(秦明宽等,2017)。

3.2 我国煤中铀分布

我国煤炭资源储量较为丰富,煤中铀分布报道较多,但多以零星的、碎片化的报道为主。周贤青(2019)较为系统地总结了我国煤中铀的分布特征。该文指出我国煤中铀主要分布在云南、贵州、广西、新疆、内蒙、重庆等地(表3)。我国煤中铀煤层具有明显的时代分布规律,云南和贵州主要为古生代石炭纪到二叠纪,部分为新生代煤层,内蒙古和新疆地区则以侏罗纪煤层为主。含铀煤以低阶长焰煤和褐煤为主,只有少量为高阶烟煤,如贵州省东南部晚二叠世含碳酸盐岩煤中的烟煤,平均铀含量为211×

10^{-6} ,广西合山煤田的晚二叠世碳酸盐岩性煤系中的烟煤,平均 74×10^{-6} ,最高 175×10^{-6} (邵龙义等,2006)。

目前有些学者提出,煤中铀含量达到 40×10^{-6} 以上就可综合利用(代世峰等,2004;漆富成等,2011;孙玉壮等,2014;周贤青等,2019)。从表3提供的数据来看,所列地区的煤中铀高值均超过了可综合利用边界品位。此外,含铀煤燃烧后铀的含量将会提高6~8倍(Ketris et al., 2009),其煤灰也可成为铀资源的一种类型。当然能否形成可开发利用的资源,除了品位这一指示外,更重要的是规模大小。

3.3 煤中铀放射性环境影响

上文从资源的角度评价了煤中铀的正面因素,但目前来讲,此部分分散的(未形成矿床规模)煤中铀开发利用多存在于概念上,更多的情况是未对其加以利用或利用率过低,一方面造成资源的巨大浪费,另一方面未经放射性处理的煤灰被丢弃、抛撒或制成建材等,这必将引起严重的环境污染问题。此类问题也引起了相关部门、学者的重视。

表3 我国部分地区煤中铀分布(据周贤青,2019)

Table 3 Distribution of uranium in coal in China (after Zhou Xianqing, 2019&)

序号	地点	煤层	地层	铀含量($\times 10^{-6}$)	样品数
1	新疆伊宁洪海沟	M12	西山窑组(J_2x)	503~5 720/992	4
2	新疆伊宁新汶煤矿	M5, M10	西山窑组(J_2x)	17.1~136/84.4	3
3	新疆伊宁加尕斯台	M10, M11, M12	西山窑组(J_2x)	1.76~7 207/323.9	50
4	新疆萨瓦布其	M9, M12	铁米尔苏组($J_{1+2}tm$)	2~90/23.5	12
5	内蒙古胜利煤田	No. 6-1	巴彦花组(K_1b)	0.2~148/23.9	54
6	鄂尔多斯盆地东胜地区	—	延安组(J_2y)	19~464/136.5	4
7	山西大同北部煤田	M3, M5, M8	太原组(C_2t)	5.0~92.0/28.8	24
8	山西沁水盆地	M8, M9, M10, M15	太原组(C_2t)	0.57~71.6/6.41	23
9	陕西陈家山矿	4号	延安组(J_2y)	0.33~67.4/17.4	8
10	四川古叙煤田	M25	龙潭组(P_3l)	1.22~128/15.4	11
11	四川石屏	C19, C25	龙潭组(P_3l)	0.75~155/39.8	4
12	重庆磨心坡	K1, K2	龙潭组(P_3l)	2.34~476/190.48	8
13	广西宜山煤田	K3, K6, K7	合山组(P_2h)	35~123/72.44	23
14	广西合山煤田	—	龙潭组(P_3l)	10.2~326/66	41
15	云南蒙自	—	—	0.14~141/36.8	223
16	云南丘北	—	—	38.3~64.7/55.7	5
17	云南干河	—	—	0.10~316/66.3	115
18	云南砚山煤田	M9	吴家坪组(P_3w)	111~178/155	7
19	云南临沧	—	新近系	1.05~640/54.8	78
20	贵州贵定煤田	—	吴家坪组(P_3w)	67.9~288/205.1	17
21	贵州普安煤田	M1, M2, M8, M11, M17	龙潭组(P_3l)	2.54~133/32.4	5
22	贵州兴仁煤田	—	—	1.40~77.0/24.6	5
23	贵州织纳煤田	M27	龙潭组(P_3l)	bdl~56.0/12.9	7
24	贵州织金煤田	—	—	0.10~176/19.3	24

注:表中503~5 720/992表示最小值~最大值/平均值;“—”表示煤层编号或地层未知;bdl表示检测限以下。

卢新卫等(2007)对宝鸡燃煤电厂粉煤灰中天然放射性核素进行了测量,发现²²⁶Ra、²³²Th 和⁴⁰K 的比活度分别为:63.31~165.09 Bq/kg,平均 108.64 Bq/kg;95.35~173.57 Bq/kg,平均 141.00 Bq/kg;193.49~502.31 Bq/kg,平均 354.94 Bq/kg,分别是全国煤中放射性核素的比活度平均值 2.0,4.4 和 3.3 倍,是陕西省煤中比活度平均值的 2.9,3.4 和 3.5 倍,是甘肃煤中比活度平均值的 4.5,10.1 和 8.3 倍。农田模拟试样研究表明,土壤中天然放射性核素的比活度和地面 1m 高处空气 γ 剂量率及地面 γ 辐射所致人均年有效剂量当量随粉煤灰的施用量增加呈现增加的趋势。因此,对粉煤灰的农田施用要加强管理和监测。

而宝鸡燃煤电厂所用煤炭主要来自陕西铜川及甘肃华亭,日产粉煤灰在 2100 t 左右(黄文辉等,2002),综合上述研究成果,宝鸡燃煤电厂周围放射性核素污染主要来自于陕西铜川和甘肃华亭煤田。

上例只是煤中铀对环境影响的一个缩影,如何利用此部分资源,减少其对环境的放射性污染,变废为宝,是对政府和相关研究机构的考验。

4 砂岩型铀矿与煤田协同勘查存在的主要问题

(1) 煤田勘查时获得的放射性测井信息能提供砂岩型铀矿找矿线索,缩小了砂岩型铀矿找矿范围,提高了找矿效率,同时因煤铀空间定位不完全重合性,煤田勘查不能代替砂岩型铀矿找矿工作。

通过上述分析,在成因上砂岩型铀矿与煤和含煤地层存在相关性;在空间分布上两者存在一定的关联性,但又不完全重合;在勘探手段上两者很相似,钻孔孔径相同,选用测井类型相近,均配有伽马放射性测井,只不过铀矿测井时使用了定量伽马放射性测井,而煤田测井使用定性伽马放射性测井。基于上述原因,我国现已发现的砂岩型铀矿床其找矿线索,有近半数是来自于煤田勘探过程中的放射性测井信息。同时因两者在平面分布上不完全重合性,铀矿体往往分布在煤盆地的边缘地带,为煤田勘查的收边区段,钻孔相对稀疏,加之铀矿体沿走向相对较长,倾向很窄,导致找煤收边孔直接揭露工业铀矿体的机率较低,但因此类钻孔相对靠近铀矿体,通常多有放射性异常显示,因而其放射性测井可提供砂岩型铀矿找矿的放射性异常线索,缩小了砂岩型铀矿找矿范围,提高了找矿效率,但不能代替砂岩型铀矿找矿工作。

(2) 近年来由中国地质调查局牵头,煤田部门为主要参与单位开展的“北方砂岩型铀矿调查工程”取得了明显突破,但因政策壁垒和行业利益限制,后续进一步产业化工作陷入了僵局,难以实现“国家先行,企业跟进”这一基本策略。

基于煤田钻孔资料能为寻找砂岩型铀矿提供良好的指示作用,中国地质调查局牵头,煤田部门为主要参与单位开展了“北方砂岩型铀矿调查工程”(2013 年至 2021 年),先后排查了我国北方主要产煤盆地内几乎所有的煤田钻孔资料。依据煤田钻孔伽马测井异常,选出了 100 多个砂岩型铀矿远景区并对其进行远景查证,发现了准噶尔盆地东缘喀木斯特、二连盆地中部恩格日音和陆海、鄂尔多斯北部塔然高勒及其西缘宁东石槽村等多个大型到特大型砂岩型铀矿产地,多个中小型矿产和大批铀成矿远景区,铀矿找矿取得了巨大成功,更重要的是使沉睡多年的煤田钻孔资源焕发了青春,为国家节省大量勘查资金。

在砂岩型铀矿找矿取得重大突破的同时,重大问题也突显出来。中国地质调查局因其履行的国家和社会职责,地质勘查程度只能做到预查精度,部分找矿线索特别明显的区段也只能做到近似于普查程度。要想将这些找矿成果转换为地质储量,还需大量的投入将其做到详查和勘探的程度,这就需要政府先行,企业接盘。我国目前铀矿实行的政策是采矿权由核工业专营,由于部门利益不同,上述主要由煤田部门发现的找矿远景区(其所在地多为煤探矿权)不可能由核工业接手,但因铀矿的专营性,限制了非核工业部投资铀矿找矿的积极性和可行性,导致这些区段更进一步的工作短期内陷入了僵局。

(3) 煤铀赋存关系密切,部分地区两种资源在垂向上相互叠置,存在上铀下煤(如鄂尔多斯盆地)或铀煤相间产出(如伊犁盆地和吐哈盆地十红滩地区),如果先采煤则会导致地下水水位下降,地浸开采的砂岩型铀矿则难以实施,造成环境污染的同时,更重要的是导致不可逆的铀资源浪费。先铀后煤的有序开采方式显然是唯一正确的路径,但我国矿业权排他性和部门利益不同,使得这一有序开采方式在实操层面困难重重。如纳林沟和大营铀矿床开采陷入了停滞状态。

(4) 目前人们对煤中铀存在资源性和有害性的属性认识较深,但更多是处于概念认识层面,在基于实操层面的有效利用技术研究和政策指导还不够深入。对如何利用好,尤其是针对煤中铀在煤层中分

散分布,丰度较高,但连续性差,难以达到直接利用程度的此类煤中铀更是缺乏统一部署、综合利用的合理方案,导致资源浪费和局部地区环境污染的现象时有发生。

5 结论和建议

(1)持续不断的推进“煤铀、油铀”等协同勘查工作,提高多能源综合勘查研究水平,节省勘查资金,制定我国协同勘查的基本原则和勘查规范,使能源型盆地勘查工作有序高效并合理利用。

当前矿产资源勘查的发展趋势是由单一的矿床研究向其同生、伴生的一组大中小型矿床族的研究转变,从小尺度矿床成因研究向中、大尺度的矿聚集区和全球成矿体系方向发展(林双幸等,2019)。针对煤铀等相伴生矿产协同勘查,当下非常有必要及时推进“煤铀、油铀兼探”工作,加强多种能源矿产协同勘查技术研发。加强同一地质构造体系下盆地演化、层序结构、构造岩浆时空演化、多矿产成矿机制和富集规律、矿产聚集单元与矿产聚集形式等方面研究;将产于同一地质单元的铀、煤、油(气)、盐(K、Li)矿产纳入同一矿床族(赵平等,2021),深入研究其成矿过程中的地球化学、地球物理学、地质建造、构造形式之间的依存关系特征,研发集成配套、相互兼顾、标准融合的勘查技术(黄炳香等,2016);强化协同勘查机制、体制建设和勘查模式建立,制定我国协同勘查的基本原则和勘查规范,使能源型盆地勘查工作有序高效并合理利用。

(2)在国家层面制定相关配套政策,进一步放开铀探矿权,允许非核企业进入铀矿勘查领域(刘志逊等,2015),激活市场潜力,重点推进、做深前期“煤铀兼探”获得的成果,加快我国铀资源勘查进程。

针对上述问题及面临的严峻形势,需要国家与相关部门加大勘探投入,协调各相关系统协作,提高相关工作区的工作程度。而针对铀勘查工作中面上调查较为薄弱的现状,应加强核工业地质系统与石油、煤田等部门的合作,共享相关地质数据,提高勘查和调查评价的成功率。

与此同时,国家应积极改革,制定与当前“煤铀、油铀”兼探取得的成果相适应的矿业权政策,进一步放开铀探矿权,使我国铀资源勘查开发投融资体制,由过去的国家财政拨款模式,转向包括完成预算内地质工作、开拓社会地勘市场、寻求矿业开发、开展工贸经营等内容的多元化融资模式,加大社会

资金的介入,建立铀勘探采治多元化投资体制,允许社会资金参与投资,按照“谁投资、谁受益”的原则,在探索新区的同时,重点推进、做深前期“煤铀兼探”获得的成果,依据成果的大小和勘查程度的不同,将资源量落实为地质储量,将找矿线索转化为矿床,最终形成中央、地方和企业对铀矿勘查、开发的多元化投入机制,化解上文提到的煤铀有序开采的困局。

(3)在推动新一轮煤炭资源潜力评价和首次煤与含煤矿产的生态地质勘查的基础上,将煤中铀作为一种特殊的煤进行单独分类,制定其勘查、开发、利用等相关规范或标准,对其开采、运输、利用和废渣再利用等进行闭环式管理,达到资源充分应用,减少或避免环境污染的双重效果。

(4)进一步加大公益性铀矿地质调查的力度,推动煤、油资料区及其外围区铀矿调查工作,提升我国铀矿找矿进程,缓解我国铀资源短缺问题。

参 考 文 献 / References

- (The literature whose publishing year followed by a “&” is in Chinese with English abstract; The literature whose publishing year followed by a “#” is in Chinese without English abstract)
- 蔡煜琦,张金带,李子颖,郭庆银,宋继叶,范洪海,刘武生,漆富成,张明林. 2015. 中国铀矿资源特征及成矿规律概要. 地质学报, 89(6): 1051~1069.
- 陈军强,曾威,王佳营,马亮,杨君. 2021. 全球和我国铀资源供需形势分析. 华北地质, 44(2): 25~34.
- 代世峰,任德贻,孙玉壮,唐跃刚. 2004. 鄂尔多斯盆地晚古生代煤中铀和钍的含量与逐级化学提取. 煤炭学报, 29(增刊): 56~60.
- 郭宏伟. 2014. 内蒙古巴彦乌拉铀矿床成矿特征及成矿规律研究. 导师:陈岳龙. 北京:中国地质大学(北京)博士学位论文: 1~50.
- 韩效忠,吴兆剑,林中湘,蒋喆,胡航,殷栋法,季辉,李紫楠. 2020. 浅论中国北方主要产铀盆地含矿目标层沉积相对砂岩型铀矿的制约. 大地构造与成矿学, 44(4): 697~709.
- 韩效忠,吴兆剑,司马献章,俞初安,李建国,胡航,蒋喆. 2018. 二连盆地马尼特坳陷南北双向供源铀成矿模式探讨. 煤田地质与勘探, 46(6): 1~10.
- 何鸿,邢万里. 2020. 2000~2017年全球天然铀资源贸易格局演变特征分析. 中国矿业, 29(1): 16~22.
- 黄炳香,赵兴龙,张权. 2016. 煤与煤系伴生资源共采的理论与技术框架. 中国矿业大学学报, 45(4): 653~662.
- 黄文辉,唐修义. 2002. 煤燃烧过程中微量元素的迁移和富集. 中国煤田地质, 14(z1): 75~87.
- 蒋喆,韩效忠,胡航,吴兆剑,李紫楠,来强,郭鹏. 2020. 二连盆地恩格日音砂岩型铀矿床地质特征及成矿作用初探. 大地构造与成矿学, 44(4): 742~753.
- 焦养泉,吴立群,荣辉. 2018. 砂岩型铀矿的双重还原介质模型及其联合控矿机理: 兼论大营和钱家店铀矿床. 地球科学, 43(2): 459~474.
- 金若时,程银行,李建国,司马献章,苗培森,王少轶,奥琮,里宏

- 亮, 李艳锋, 张天福. 2017. 中国北方晚中生代陆相盆地红—黑岩系耦合产出对砂岩型铀矿成矿环境的制约. 中国地质, 44(2): 205~223.
- 康世虎, 杨建新, 刘武生, 赵兴齐, 乔鹏, 杜鹏飞, 吕永华. 2017. 二连盆地中部古河谷砂岩型铀矿成矿特征及潜力分析. 铀矿地质, 33(4): 206~214.
- 林双幸, 张书成, 张铁岭, 权小辉. 2019. 铀资源勘查理论与技术研究方向. 世界核地质科学, 36(4): 187~192.
- 林中湘. 2019. 砂岩型铀矿找矿目标层识别技术研究. 中国煤炭地质, 31(8): 49~53.
- 刘武生, 贾立城. 2011. 达拉地含铀煤型矿床成矿作用. 矿物学报, (增刊1): 271~272.
- 刘志逊, 岳来群, 马腾, 韩效忠. 2015. 中国能源资源形势与能源地质调查工作部署研究(2015). 北京: 地质出版社, 202~222.
- 卢新卫, 王峰凌, 贾晓丹, 王凌青. 2007. 宝鸡燃煤电厂粉煤灰农田施用的环境放射性评价. 农业环境科学学报, (01): 273~276.
- 漆富成, 张字龙, 李治兴, 王志明, 何中波, 王文全. 2011. 中国非常规铀资源. 铀矿地质, 27(4): 193~199.
- 秦明宽, 何中波, 刘章月, 郭强, 宋继叶, 许强. 2017. 准噶尔盆地砂岩型铀矿成矿环境与找矿方向研究. 地质论评, 63(5): 1255~1269.
- 邵龙义, 鲁静, Jones T, Gayer R, 尚璐君, 梁志军, 张鹏飞. 2006. 桂中晚二叠世碳酸盐岩型煤系高有机硫煤的矿物学和地球化学研究. 煤炭学报, 31(6): 770~775.
- 孙玉壮, 赵存良, 李彦恒, 王金喜. 2014. 煤中某些伴生金属元素的综合利用指标探讨. 煤炭学报, 39(4): 744~748.
- 王前裕. 1997. 浅谈 509 煤型铀矿床的开采特点. 铀矿冶, 16(2): 78~83.
- 吴兆剑, 韩效忠, 胡航. 2018. 开鲁盆地陆家堡凹陷绍根地区早白垩世裂陷期后沉积构造演化与铀矿化特征. 沉积学报, 36(1): 20~32.
- 殷栋法, 韩效忠, 黄澎涛, 司马献章, 俞初安, 周宇, 吴兆剑, 胡航, 陈路路. 2019. 准噶尔盆地东部喀木斯特地区砂岩型铀矿目的层岩石学特征及其意义. 煤田地质与勘探, 47(1): 32~39.
- 张字龙, 韩效忠, 李胜祥, 姚春玲, 赵永安. 2010. 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. 古地理学报, 12(6): 749~758.
- 赵平, 谭克龙, 韩效忠, 林中月, 孙红军, 谢志清, 黄勇, 刘亚然, 孙杰. 2021. 新形势下我国能源与生态安全保障研究. 中国煤炭地质, 33(1): 1~7.
- 周贤青, 秦勇, 陆鹿. 2019. 中国煤型铀地质—地球化学研究进展. 煤田地质与勘探, 47(4): 45~53.
- Cai Yuqi, Zhang Jindai, Li Ziying, Guo Qingyin, Song Jiye, Fan Honghai, Liu Wusheng, Qi Fucheng, Zhang Minglin. 2015&. Outline of uranium resources characteristics and metallogenetic regularity in China. *Acta Geologica Sinica*, 89(6): 1051~1069.
- Chen Junqiang, Zeng Wei, Wang Jiaying, Ma Liang, Yang Jun. 2021&. Analysis of supply and demand situation of uranium resources in the world and China. *North China Geology*, 44(2): 25~34.
- Cheng Yinhang, Wang Shaoyi, Jin Ruoshi, Li Jianguo, Ao Cong, Teng Xueming. 2019. Global Miocene tectonics and regional sandstone-style uranium Mineralization. *Ore Geology Reviews*, 106: 238~250.
- Cheng Yinhang, Wang Shaoyi, Zhang Tianfu, Teng Xueming, Ao Cong, Jin Ruoshi, Li Hongliang. 2020. Regional sandstone-type uranium mineralization rooted in Oligo - Miocene tectonic inversion in the Songliao Basin, NE China. *Gondwana Research*, 88: 88~105.
- Dai Shifeng, Ren Deyi, Sun Yuzhuang, Tang Yuegang. 2004&. Concentration and the sequential chemical extraction procedures of U and Th in the Paleozoic coals from the Ordos Basin. *Journal of China Coal Society*, 29(Sup.): 56~60.
- Guo Hongwei. 2014&. Studies on characteristics and regularity of metallogenesis of Bayanwula uranium deposits, Inner Mongolia. Dissertation Supervisor: Chen Yuelong. Beijing: A Dissertation Submitted to China University of Geosciences for Doctoral Degree; 1~50.
- Han Xiaozhong, Wu Zhaojian, Ji Hui, Jiang Zhe, Guo Yanyou, Lin Zhongxiang, Hu Hang, Yin Dongfa. 2021. Constraints of tectonic uplift and denudation on sandstone-type uranium mineralization in Meso—Cenozoic basins in northern China: A review. *Ore Geology Reviews*, DOI: 10.1016/j.oregeorev. 2021. 104528.
- Han Xiaozhong, Wu Zhaojian, Lin Zhongxiang, Jiang Zhe, Hu Hang, Yin Dongfa, Ji Hui, Li Zinan. 2020&. Constraints of sedimentary facies of the targeting layers on sandstone-type uranium mineralization in major uranium-producing Basins in Northern China: A Brief Discussion. *Geotectonica et Metallogenesis*, 44(4): 697~709.
- Han Xiaozhong, Wu Zhaojian, Sima Xianzhang, Yu Reng'an, Li Jianguo, Hu Hang, Jiang Zhe. 2018&. Metallogenic model of uranium with source supply from the south and the north in Manite depression of Erlian basin, Inner Mongolia. *Coal Geology & Exploration*, 46(6): 1~10.
- He Hong, Xing Wanli. 2020&. Analysis of the evolution characteristics of global natural uranium resources trade pattern from 2000 to 2017. *China Mining Magazine*, 29(1): 16~22.
- Huang Bingxiang, Zhao Xinglong, Zhang Quan. 2016&. Framework of the theory and technology for simultaneous mining of coal and its associated resources. *Journal of China University of Mining & Technology*, 45(4): 653~662.
- Huang Wenhui, Tang Xiuyi. 2002&. Mobility and concentration of trace elements during coal combustion. *Coal Geology of China*, 14(z1): 75~87.
- IAEA. 2016. Uranium 2016: Resources, production and demand. nuclear energy agency organisation for economic co-operation and development: 202~212.
- IAEA. 2018. Uranium 2018: Resources, production and demand. nuclear energy agency organisation for economic co-operation and development: 180~189.
- Jiang Zhe, Han Xiaozhong, Hu Hang, Wu Zhaojian, Li Zinan, Lai Qiang, Guo Peng. 2020&. Geological characteristics and ore-forming process of the Engeriyin large sandstone-type uranium deposit in the Manite depression, Erlian Basin. *Coal Geology & Exploration*, 44(4): 742~753.
- Jiao Yangquan, Wu Liqun, Rong Hui. 2018&. Model of inner and outer reductive media within uranium reservoir sandstone of sandstone-type uranium deposits and its ore-controlling mechanism: Case studies in Daying and Qianjiadian uranium deposits. *Earth Science*, 43(2): 459~474.
- Jin Ruoshi, Cheng Yinhang, Li Jianguo, Sima Xianzhang, Miao Peisen, Wang Shaoyi, Ao Cong, Li Hongliang, Li Yangfeng, Zhang Tianfu. 2017&. Late Mesozoic continental basin "Red and Black beds" coupling formation constraints on the sandstone uranium mineralization in northern China. *Geology in China*, 44(2): 205~223.
- Kang Shihu, Yang Jianxin, Liu Wusheng, Zhao Xingqi, Qiao Peng, Du

- Pengfei, Lv Yonghua. 2017&. Mineralization characteristics and potential of paleo-valley type uranium deposit in central Erlian Basin, Inner Mongolia. *Uranium Geology*, 33(4) : 206~214.
- Ketris M P, Yudovich Y E. 2009. Estimations of Clarkes for Carbonaceous biolithes: World averages for trace element contents in black shales and coals. *International Journal of Coal Geology*, 78 (2) : 135~148.
- Lin Shuangxing, Zhang Shucheng, Zhang Tiebing, Quan Xiaohui. 2019&. Research direction of uranium exploration theory and technology. *World Nuclear Geoscience*, 36(4) : 187~192.
- Lin Zhongxiang. 2019&. Study on sandstone type uranium deposit prospecting target identification technology. *Coal Geology of China*, 31(8) : 49~53.
- Liu Wusheng, Jia Lichen. 2011#. Mineralization of uranium-containing coal-type deposit in Danadi area. *Acta Mineralogica Sinica*, (S1) : 271~272.
- Liu Zhixun, Yue laiqun, Ma Teng, Han Xiaozhong. 2015#. Research of Energy Resources Situation and the Work Deployment of the Energy Geological Survey in China (2015). Beijing: Geological Publishing House; 202 ~ 222.
- Lu Xinwei, Wang Fengling, Jia Xiaodan, Wang Lingqing. 2007&. Evaluation of environmental radioactivity for fly ash of Baoji thermal power station in farmland. *Journal of Agro-environment Science*, 26 (1) : 273~276.
- Qi Fucheng, Zhang Zilong, Li Zhixing, Wang Zhiming, He Zhongbo, Wang Wenquan. 2011&. Unconventional uranium resources in China. *Uranium Geology*, 27(4) : 193~199.
- Qin Mingkuan, He Zhongbo, Liu Zhangyue, Guo Qiang, Song Jiye, Xu Qiang. 2017&. Study on metallogenic environments and prospective direction of sandstone type uranium deposits in Junggar Basin. *Geological Review*, 63(5) : 1255~1269.
- Shao Longyi, Lu Jing, Jones T, Gayer R, Shang Lujun, Liang Zhijun, Zhang Pengfei. 2006&. Mineralogy and geochemistry of the high-organic sulphur coals from the carbonate coal measures of the Late Permian in central Guangxi. *Journal of China Coal Society*, 31(6) : 770~775.
- Sun Yuzhuang, Zhao Cunliang, Li Yanheng, Wang Jinxi. 2014&. Minimum mining grade of the selected trace elements in Chinese coal. *Journal of China Coal Society*, 39(4) : 744~748.
- Wang Qian. 1997&. Characteristic of mining uranium-bearing coal deposit in mine No. 509. *Uranium Mining and Metallurgy*, 16(2) : 78~83.
- Wu Zhaojian, Han Xiaozhong, Hu Hang. 2018&. Sedimentary tectonic evolution and uranium mineralization of post Late Cretaceous in Shaogen area of Lujiaopu Sag, Kailu Basin. *Acta Sedimentologica Sinica*, 36(1) : 20~32.
- Wu Zhaojian, Han Xiaozhong, Ji Hui, Cai Yifeng, Xue Lie., Sun Sajun. 2021. Mesozoic—Cenozoic tectonic events of Eastern Junggar Basin, NW China and their Significance for uranium mineralization: Insights from seismic profiling and AFT dating analysis. *Ore Geology Reviews*, 139: 104488.
- Yin Dongfa, Han Xiaozhong, Huang Pengtao, Sima Xianzhang, Yu Reng'an, Zhou Yu, Wu Zhaojian, Hu Hang, Chen Lulu. 2019&. Lithology characteristics and meaning of the target layer of sandstone-type uranium deposits in Kamusite area of the eastern Junggar basin. *Coal Geology & Exploration*, 47(1) : 32~39.
- Zhang Pingchuan, , YuChangqing, Zeng Xiangzhi, Tan Shunja, Lu Chao. 2022b. Ore-controlling structures of sandstone-hosted uranium deposit in the southwestern Ordos Basin: Revealed from seismic and gravity data. *Ore Geology Reviews*, 140: 104590.
- Zhang Zilong, Han Xiaozhong, Li Shengxiang, Yao Chunling, Zhao Yongan. 2010&. Sedimentary facies of the lower part of Middle Jurassic Zhiluo Formation in northeastern Ordos Basin and its controls on uranium mineralization. *Journal of Plaeogeography (Chinese Edition)*, 2(6) : 749~758.
- Zhao Ping, Tan Kelong, Han Xiaozhong, Lin Zhongyue, Sun Hongjun, Xie Zhiqing, Huang Yong, Liu Yaran, Sun Jie. 2021&. Research for energy and ecological security in China under new situation. *Coal Geology of China*, 33(1) : 1~7.
- Zhou Xianqing, Qin Yong, Lu Lu. 2019&. Advances on geological—geochemical research of coal-type uranium in China. *Coal Geology & Exploration*, 47(4) : 45~53.

Co-exploration of coal and uranium and related policy suggestions

HAN Xiaozhong, LIN Zhongxiang, WU Zhaojian, JIANG Zhe, JI Hui, WANG Xingjun, YIN Dongfa

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

Abstract: China's uranium resources are highly dependent on foreign countries and the supply security deserves attention, which indicates that China must increase its domestic investment in uranium resources exploration. At present, uranium in China is mainly produced from sandstone type uranium deposits in Mesozoic—Cenozoic basins in north China, which may account for an increasing proportion in the future. Due to the close relationship between sandstone-type uranium deposit and coal measure strata, the radioactive anomaly information found in coalfield exploration is an important clue for sandstone-type uranium deposit prospecting. For example, the discovery of Zaohuohao and Nalinggou large sandstone type uranium deposit in Ordos Basin is closely related to coal exploration, and the discovery of Daying super large sandstone-type uranium deposit is a typical example of coal—uranium cooperative exploration. Inspired by this, China Geological Survey (CCS) has implemented the investigation project of sandstone-type uranium deposits in north China, and discovered a series of large sandstone type uranium deposits and a number of prospective areas verified by drilling. However, the CCS is only responsible

for non-profile geological surveys, and its survey accuracy is low. These uranium deposits discovered by the CGS will require more work from companies if they are to be developed. China's current policy and departmental interest conflicts restrict the entry of social capital and seriously affect the uranium prospecting process. Against this background, two suggestions are made as follows. The first suggestion is to formulate relevant supporting policies at the national level to liberalize uranium exploration rights and allow non-nuclear enterprises to carry out uranium exploration, focusing on promoting and deepening the achievements of "co-exploration of coal and uranium" and speeding up the process of uranium resource exploration. The second suggestion is to continuously promote the cooperative exploration of "coal—uranium or oil—uranium" to improve the research level of multi-energy comprehensive exploration and save exploration funds, and formulate the basic principles and exploration standards of co-exploration, so as to make the exploration more orderly, efficiently and economically.

Keywords: sandstone type uranium deposit; co-exploration of coal and uranium; countermeasures and suggestions; uranium mining rights; Meso—Cenozoic basin

Acknowledgements: This research was sponsored by scientific research project of China National Administration of Coal Geology (No. ZMKJ-2022-J02-2), the National Key Research and Development Program of China (No. 2018YFC0604204).

First author: HAN Xiaozhong, male, born in 1973, doctor, professor, mainly engaged in structural geology and ore deposit geology; Email: geohxz@163. com

Corresponding author: LIN Zhongxiang, male, born in 1971, doctor, professor level senior engineer, mainly engaged in hydrogeology and mining policy research; Email: lzx226100@sina. com

Manuscript received on: 2021-11-26; Accepted on: 2022-01-25; Network published on: 2022-02-20

Doi: 10. 16509/j. georeview. 2022. 02. 041

Edited by: LIU Zhiqiang