

中国铀地球化学块体与远景区划分

徐善法, 王学求*, 张必敏, 王 玮, 迟清华, 周 建, 严桃桃

自然资源部地球化学探测重点实验室, 中国地质科学院地球物理地球化学勘查研究所, 河北廊坊 065000;
联合国教科文组织全球尺度地球化学国际研究中心, 河北廊坊 065000

摘 要: 本文利用中国不同尺度水系沉积物地球化学填图数据, 以 $10\text{ km} \times 10\text{ km}$ 的网格为基础, 按 1:100 万比例尺进行了数据计算。地球化学数据统计显示, 以秦岭—大别山为界, 中国南北地区铀含量值存在明显差异。以铀含量中位数(累计频率 50%)作为背景值, 全国背景值为 2.3×10^{-6} 、南方为 2.9×10^{-6} 、北方为 2.1×10^{-6} 。考虑南北地区铀表生风化和富集或贫化程度差异, 以累计频率 85%作为异常下限, 对应南方地区含量值 4.8×10^{-6} 、北方地区含量值 3.0×10^{-6} 做为地球化学异常下限, 共圈出面积大于 1000 km^2 , 且具有明显异常浓集中心的地球化学块体共 79 处。在结合前人研究成果的基础上, 对铀地球化学块体及异常特征、矿床分布、地质特征进行研究, 最终圈定出铀矿找矿远景区 33 处, 并以四个主要铀矿床类型分别对 33 个远景区进行了适当的讨论。

关键词: 铀矿; 地球化学块体; 远景区

中图分类号: P595; P632 文献标志码: A doi: 10.3975/cagsb.2020.082502

China's Uranium Geochemical Blocks: Implications for Delineation of Uranium Prospective Areas

XU Shan-fa, WANG Xue-qiu*, ZHANG Bi-min, WANG Wei, CHI Qing-hua, ZHOU Jian, YAN Tao-tao

Key Laboratory of Geochemical Exploration, Ministry of Natural Resources, Institute of Geophysical and Geochemical Exploration, Chinese Academy of Geological Sciences, Langfang, Hebei 065000;
UNESCO International Centre on Global-scale Geochemistry, Langfang, Hebei 065000

Abstract: In this study, the authors collected geochemical data from stream sediment surveys of different scales and calculated the data based on a grid of $10\text{ km} \times 10\text{ km}$ at the scale of 1:1 million in China. The statistic data show that geochemical background values are different in North China and South China separated by the boundary line of Qinling–Dabie mountains. Median values of uranium in whole China, South and North China are $2.3\text{ }\mu\text{g/g}$, $2.9\text{ }\mu\text{g/g}$ and $2.1\text{ }\mu\text{g/g}$ respectively. A total of 79 geochemical blocks with an area more than 1000 km^2 were delineated by a threshold value of $4.8\text{ }\mu\text{g/g}$ for South China and $3.0\text{ }\mu\text{g/g}$ for North China based on cumulative frequency of 85%. Among the 79 geochemical blocks, 33 uranium prospective areas were delineated for four types of major uranium deposits in combination with the data of uranium metallogeny and geology obtained by other researchers.

Key words: uranium; geochemical block; prospective area

铀矿资源是重要的能源矿产和战略资源, 其重要性不言而喻。但铀矿资源在世界上的分布极不平衡, 主要集中于澳大利亚、哈萨克斯坦、加拿大、俄罗斯、南非、尼日尔、巴西、中国、纳米比亚和

乌克兰等 10 国, 这 10 国的铀资源储量约占世界铀资源储量的 87%(朱鹏飞等, 2018)。我国铀资源相对丰富, 在全国 23 个省(直辖市、自治区)发现了铀矿资源, 特别是江西、内蒙古、新疆、广东、湖南、

本文由国家重点研发计划项目第九课题(编号: 2016YFC0600609)和中国地质调查局地质调查项目“化学地球基准与调查评价”(编号: DD20190450)联合资助。

收稿日期: 2020-04-26; 改回日期: 2020-08-12; 网络首发日期: 2020-08-26。责任编辑: 张改侠。

第一作者简介: 徐善法, 男, 1963 年生。博士, 教授级高级工程师。主要从事应用地球化学和地球探测与信息处理工作。通讯地址: 065000, 河北省廊坊市金光道 84 号。E-mail: xushanfa@igge.cn。

*通讯作者: 王学求, 男, 1963 年生。博士, 研究员。长期从事勘查地球化学研究。通讯地址: 065000, 河北省廊坊市金光道 84 号。E-mail: wangxueqiu@igge.cn。

广西、河北等省(自治区),已发现的铀资源总量约占全国总量的 95%。张金带(2012)根据我国 75 个铀矿床的地质资料,在铀矿床类型划分基础上,结合铀矿床的含矿建造、成矿时代、成矿作用、矿化特征以及铀矿床的产出地质背景,厘定了这 75 个矿床的矿床类型,我国铀矿床的主要类型为砂岩型(20 个)、花岗岩型(19 个)、火山岩型(16 个)、碳硅泥岩型(18 个)、伟晶岩型(1 个)、碱性岩型(1 个)。这说明我国铀矿床的主要类型为砂岩型、花岗岩型、火山岩型和碳硅泥岩型,这四类矿床占比达 97.3%。

我国幅员辽阔,地质条件复杂,如何更快速地圈定进一步工作的靶区,是地球化学工作者首先考虑的问题,而地球化学块体方法的出台,为快速圈定地球化学有利远景区提供了新的思路和技术。地球化学块体(geochemical block)的概念由 Doe(1991)提出,将其解释为“具有某种或某些元素高含量的大岩块,能够为矿床的形成提供物质源”。谢学锦院士提出这些地球化学异常模式是具有某一种或某几种元素高含量大岩块的地表显示。将面积大于 1000 km² 的地球化学异常定义为地球化学块体(Xie, 1995),并以华南钨元素为例,给出了一个地球化学块体和它的内部结构研究的范例(谢学锦, 2002)。王学求把地球化学块体定义为地壳上具有金属高含量的巨大金属异常块体,这个巨大的金属异常块体在地表平面上表现为具有一系列套合的地球化学模式,这种套合应该是从局部异常到地球化学省或者地球化学域,在垂向上还具有一定的深度,简单的说地球化学块体是具有较大规模立体异常的地壳物质体(王学求, 2000; 王学求等, 2007)。地球的不均一性使得元素在地壳中的空间分布是不均一的,从而决定了在地壳中存在大型或巨型的元素矿(集区),而这种不均一性在地表是可以由地球化学块体表现出来的(刘大文和谢学锦, 2002)。王学求等(1999)开展了中国东部覆盖区地球化学块体的圈定与评价。刘大文用地球化学块体理论和方法在全国锡矿资源潜力评价(刘大文和谢学锦, 2005)和山东金资源潜力评价(刘大文等, 2002)中进行了有益的试验。迟清华(2003)利用中国东部不同构造单元出露地壳及不同类型岩石的 14 种成矿元素丰度研究,说明在水系沉积物地

球化学块体划分和研究中的积极意义。随后,地球化学块体理论被地球化学工作者不断用于不同地区的地球化学研究工作中(李通国等, 2003; 刘拓等, 2003; 周晓东等, 2007; 师淑娟等, 2010; 李堃等, 2013; 张必敏, 2020; 周建, 2020)。通过地球化学块体的研究,可计算出该块体内的可利用金属量,对于研究程度较高且探明一定储量的地区,还可以通过计算成矿率来计算该地区某一类矿床的金属成矿潜力,从而达到成矿预测的目的(刘大文, 2002; 王学求, 2003)。这一过程就是通过套合地球化学模式将地球化学块体逐级划分缩小为更小的地球化学块体,不断的浓缩成矿信息,最终将成矿信息集中到面积最小而含矿率最高的区域,这一区域可作为有利的地球化学远景区(周晓东, 2007)。这些地球化学块体的应用都仅限于贵金属和有色金属。王学求(2003)提出了利用地球化学块体定量预测砂岩型铀矿的计算方法,并对吐哈盆地砂岩型铀矿潜在资源量进行了预测。

本文拟通过所收集的全国各种比例尺水系沉积物、汇水盆地沉积物地球化学数据,从地球化学角度,通过对地球化学块体的编制和解剖,圈定出全国铀矿成矿远景区。

1 数据来源及处理方法

1.1 数据来源

本文主要收集了全国区域化探 1:20 万水系沉积物数据、全国地球化学基准值汇水域沉积物数据、中蒙边界和东天山 1:100 万汇水域沉积物地球化学调查数据。

由于所收集数据的比例尺不同,研究前把区域化探 1:20 万水系沉积物数据按每个 1:25000 图幅(大约 1 个平均值/100 km²,相当于 1:100 万比例尺)计算出一个平均值,把计算得到的平均值组成新的数据集。这样就和中蒙边界 1:100 万地球化学填图数据和东天山超低密度地球化学调查数据具有相同比例尺,而中国基准值数据则是填补了平原(盆地)等没有数据的空白。同时计算了所收集的四种数据的统计参数(表 1),从表 1 可看出四种数据的中位数和平均值变化不大,可以认为四种数据基本上不存在系统误差。

表 1 收集的四种数据参数统计表
Table 1 The parameters statistical table of four data collected

地区	数据 /个	最小值 /10 ⁻⁶	下四分位数 /10 ⁻⁶	中位数 /10 ⁻⁶	上四分位数 /10 ⁻⁶	最大值 /10 ⁻⁶	平均值 /10 ⁻⁶	标准差
东天山	1 666	0.9	1.8	2.1	2.6	12.8	2.3	1.0
中蒙边界	2 571	0.6	1.6	2.0	2.5	335.5	2.7	7.1
区域化探计算	61 548	0.2	1.8	2.3	3.2	335.5	2.8	2.7
全国基准	3 382	0.1	2.0	2.5	3.2	48.5	2.9	2.0

表 2 中国铀元素南北参数统计表
Table 2 Statistical parameters of uranium elements in North and South China

地区	最小值 / 10^{-6}	2.50% / 10^{-6}	5% / 10^{-6}	15% / 10^{-6}	25% / 10^{-6}	35% / 10^{-6}	50% / 10^{-6}	65% / 10^{-6}	75% / 10^{-6}	85% / 10^{-6}	95% / 10^{-6}	97.50% / 10^{-6}	最大值 / 10^{-6}	平均值	标准差
全国	0.1	1.0	1.2	1.6	1.8	2	2.3	2.7	3.1	3.8	5.8	8.2	335.5	2.8	2.9
南部	0.1	1.3	1.5	1.9	2.2	2.5	2.9	3.4	3.9	4.8	7.4	10.5	139.6	3.5	2.9
北部	0.1	0.9	1.1	1.5	1.7	1.8	2.1	2.4	2.6	3.0	4.2	5.6	335.5	2.3	2.8

1.2 数据处理

所使用软件为多元地学信息系统(GeoExpl)专业软件,所有地球化学图底图均采用 MapGIS6.7 版本制作,底图投影参数采用等角割圆锥投影方式投影,采用 IUUG1975/西安 80 椭球参数,中央经线采用 105 度经线,原点纬线为 14 度。在 GeoExpl 中对原始数据进行网格化处理,网格单元间距 D_x 、 D_y 均为 10 km,对采样数据进行网格化处理,计算模型采用指数加权模型,其中数据搜索模式采用圆域搜索,半径为网格单元间距的 2.5 倍即 25 km。

1.3 数据特征分析

表 1 给出了中国水系沉积物和汇水域沉积物铀含量参数。以秦岭—大别山为界,中国南北方铀含量值存在明显差异。以铀含量中位数(累计频率 50%)作为背景值,全国背景值为 2.3×10^{-6} 、南方为 2.9×10^{-6} 、北方为 2.1×10^{-6} ,南方相对全国富集系数为 1.26,北方相对全国富集系数为 0.91;以累计频率 75%作为高背景值,全国铀背景值为 3.1×10^{-6} 、南方为 3.9×10^{-6} 、北方为 2.6×10^{-6} ;以累计频率 85%作为异常下限,全国为 3.8×10^{-6} 、南部地区含量值 4.8×10^{-6} 、北方地区含量值为 3.0×10^{-6} 。除了地质背景以外,南北地区不同地理景观气候环境和降雨量的诸多差异,造成铀元素风化、富集或贫化程度差异。华南造山带花岗岩区形成的水系沉积物铀元素含量明显偏高,这是由于在湿润和酸性条件下铀从岩石中析出并迁移至土壤中富集,形成南方高地质背景的现象。而在北方地区,铀含量基本处于背景-低背景范围,这可能是由于干旱半干旱的北方地区在碱性条件,铀不容易从岩石中迁移至土壤中富集的缘故。因此,在研究中以秦岭—大别山大致位置为界,把中国分为南北两部分,分别进行地球化学特征参数的统计与研究是合理的(表 2)。

2 地球化学块体特征

中国南北地区铀含量值差别较大,以秦岭—大别山为界,以累计频率 85%作为异常下限,对应北方地区含量值 3.0×10^{-6} 、南部地区含量值 4.8×10^{-6} ,共圈出地球化学块体 79 处(图 1),各块体面积均大于 1000 km^2 ,均属于地球化学省,其中有 30 个面积

为 10 000~100 000 km^2 ,属于地球化学巨省,3 个面积超过 100 000 km^2 ,属于地球化学域。

图 1 是铀元素地球化学异常图,图中的数字是铀元素地球化学异常块体编号,块体参数统计见表 3。块体存在多层套合关系。块体面积最大的为 74 号块体,面积达 472 899 km^2 ,最大值最大的是 2 号块体,为 335.5×10^{-6} ,平均值最大的是 60 号块体,为 18.5×10^{-6} ,中位数和几何均值最大的均为 53 号块体,分别 7.3×10^{-6} 和 7.8×10^{-6} ,离差最大的是 60 号块体,达到 38.3×10^{-6} 。

79 个块体中有 11 个块体内已发现 23 个中型以上铀矿床。南方发现的铀矿床大多落在异常块体内,而北方发现的铀矿床大多数在落在累计频率 75%含量线圈定的高值区内,而不在 85%含量线圈定的块体内部。这可能与两方面因素有关:一是北方气候干燥、雨量较少,铀风化较弱,再加上水系不发育,铀的含量较低,异常不发育;二是北方相对勘查程度较低,特别是北方干旱盆地勘查空白区较多,不排除随着勘查程度加大,异常内发现新矿床的可能性。

3 铀矿远景区划分

3.1 铀矿远景区划分

远景区优选主要依据两条标准:(1)地球化学块体具有明显的异常浓集中心和多层异常套合,即有外带(85%)、中带(95%)和内带(97.5%)三层套合关系或多个地球化学块体集中出现;(2)虽然没有地球化学异常块体(85%),但具有铀高背景区(75%),区内已发现具有工业价值的矿床,同时具有成矿的地质条件(黄净白和黄世杰,2005;蔡煜琦等,2015);

根据上面所设条件,将全国 79 个地球化学块体划分成 33 个铀矿找矿远景区(图 2),各成矿区的统计参数见表 3。

3.2 远景区地球化学特征分析

根据上述圈定结果,计算了 33 个远景区地球化学参数(表 4)。表中 K_1 表示分南北两部分计算的不同富集系数,南部采用 2.8×10^{-6} ,北部采用 2.1×10^{-6} 作为平均值分别计算。 K_2 表示用全国用 2.3×10^{-6} 作为统一平均值来计算。

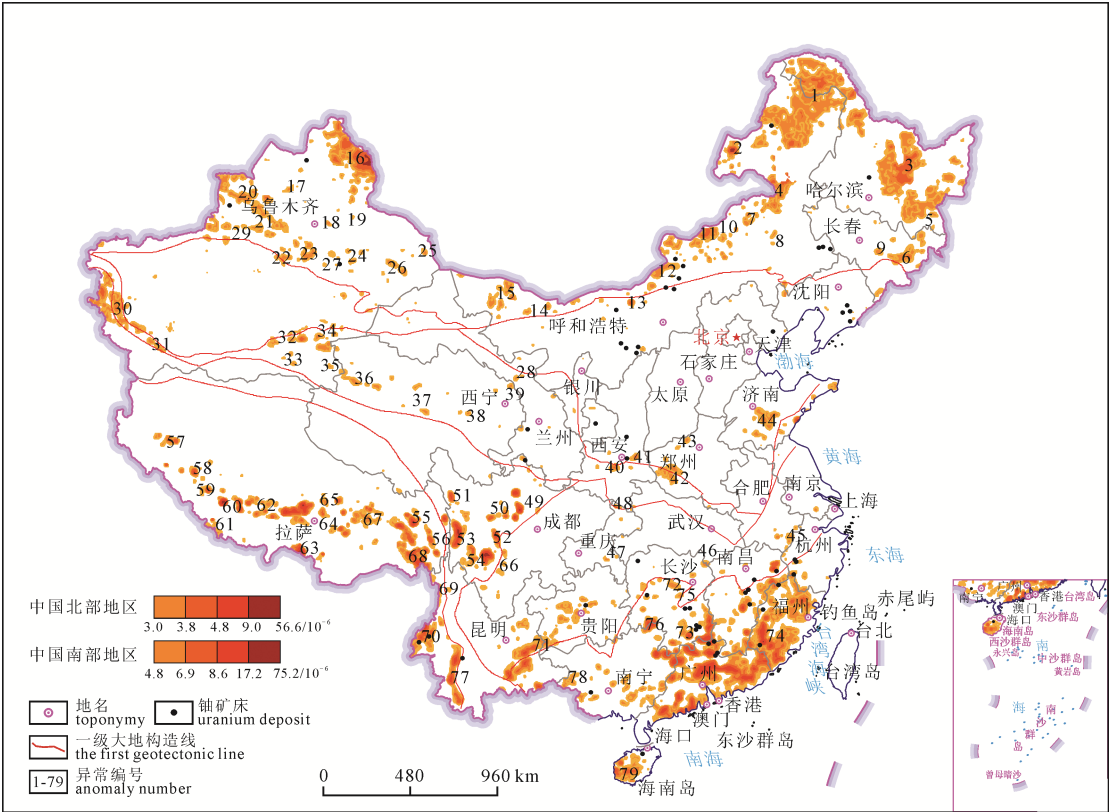


图 1 中国铀元素地球化学异常块体图
Fig. 1 The uranium geochemical blocks in China

表 3 铀元素地球化学块体参数统计
Table 3 Parameters for uranium geochemical blocks in China

项目	面积/km ²	样品数	最大值/ 10 ⁻⁶	最小值/ 10 ⁻⁶	平均值/ 10 ⁻⁶	中位数/ 10 ⁻⁶	几何均值/ 10 ⁻⁶	离差/ 10 ⁻⁶	可利用金属总量 /万吨	套合
U1	186 468	1 988	18.7	1.3	3.6	3.3	3.4	1.4	180 136.7	三层
U2	11 756	308	335.5	0.7	6.0	2.7	3.0	27.5	18 955.5	三层
U3	103 491	880	13.3	1.4	3.8	3.4	3.6	1.5	107 343.0	三层
U4	22 889	393	20.5	1.2	3.7	3.2	3.3	2.2	22 741.3	三层
U5	33 139	296	7.2	2.2	3.7	3.5	3.6	0.9	33 312.3	三层
U6	20 297	221	7.3	1.9	3.3	3.1	3.2	1.1	18 217.1	三层
U7	4 626	179	28.2	0.8	3.5	2.1	2.6	4.0	4 373.1	三层
U8	7 190	82	8.4	1.4	2.9	2.8	2.8	0.8	5 638.0	二层
U9	2 292	26	4.7	2.0	3.1	3.2	3.1	0.6	1 944.9	二层
U10	18 670	399	23.5	1.1	3.7	2.8	3.1	2.9	18 615.8	三层
U11	11 974	338	31.3	0.7	3.1	2.6	2.7	2.7	10 171.0	三层
U12	12 794	1 728	42.4	0.8	3.0	2.8	2.9	1.7	10 507.0	三层
U13	1 609	48	38.2	0.7	4.8	2.1	2.6	8.8	2 099.0	三层
U14	6 416	85	11.2	0.8	3.1	2.8	2.9	1.4	5 375.2	二层
U15	21 241	205	19.0	1.3	3.1	2.8	2.9	1.5	17 863.7	三层
U16	65 052	1 141	58.3	1.0	4.1	3.0	3.4	3.7	71 701.1	三层
U17	1 181	4	3.9	2.9	3.4	3.4	3.4	0.4	1 081.8	二层
U18	3 629	49	5.4	1.5	2.9	2.8	2.8	0.7	2 862.5	二层
U19	2 423	35	4.2	1.8	2.9	2.9	2.8	0.6	1 886.6	一层
U20	49 413	382	9.8	1.3	3.2	2.9	3.1	1.1	42 841.2	三层
U21	17 412	163	14.1	1.5	3.2	2.9	3.0	1.3	14 952.7	三层
U22	18 724	169	7.0	1.6	3.0	2.9	2.9	0.8	15 368.5	二层
U23	5 212	77	7.4	1.4	3.0	2.7	2.9	1.1	4 222.8	二层
U24	3 470	31	7.3	2.1	3.2	2.8	3.0	1.1	2 991.8	二层
U25	2 866	33	18.4	1.2	3.3	2.7	2.8	2.9	2 540.6	三层
U26	6 379	93	12.8	0.9	3.4	3.1	3.1	1.8	5 899.5	三层

续表 3

项目	面积/km ²	样品数	最大值/ 10 ⁻⁶	最小值/ 10 ⁻⁶	平均值/ 10 ⁻⁶	中位数/ 10 ⁻⁶	几何均值/ 10 ⁻⁶	离差/ 10 ⁻⁶	可利用金属总量 /万吨	套合
U27	2 849	65	7.2	1.7	3.0	2.7	2.9	1.0	2 296.2	二层
U28	2 930	23	4.5	1.8	3.0	2.8	2.9	0.6	2 376.1	二层
U29	2 121	11	5.6	2.3	3.3	2.9	3.2	1.1	1 903.8	二层
U30	41 176	320	11.8	1.0	3.6	3.2	3.3	1.5	39 476.1	三层
U31	4 184	23	5.7	1.9	3.4	3.2	3.3	0.8	3 789.3	三层
U32	11 217	67	23.7	1.5	3.6	2.7	3.1	3.1	10 949.6	三层
U33	3 652	33	8.2	2.0	3.2	3.0	3.0	1.1	3 141.8	二层
U34	18 082	155	11.7	1.6	3.1	2.9	3.0	0.9	14 945.1	三层
U35	2 213	12	4.2	2.3	3.0	2.9	2.9	0.6	1 786.7	二层
U36	10 462	87	6.1	1.6	3.1	3.0	3.0	0.7	8 688.8	三层
U37	4 082	39	4.6	2.1	3.0	2.9	2.9	0.6	3 297.8	二层
U38	5 841	60	3.8	2.1	2.8	2.7	2.8	0.4	4 415.7	三层
U39	3 597	36	4.6	2.0	2.9	2.8	2.8	0.6	2 811.7	二层
U40	15 861	114	11.0	1.9	2.9	2.6	2.8	1.2	12 470.0	三层
U41	3 940	35	16.5	1.5	3.4	2.5	3.0	2.6	3 621.6	三层
U42	11 664	108	9.7	1.6	3.5	3.0	3.3	1.4	11 089.6	三层
U43	5 280	32	4.3	2.3	3.0	2.9	2.9	0.4	4 206.1	二层
U44	29 088	272	6.7	1.7	3.1	2.9	3.0	0.9	24 449.0	三层
U45	12 019	113	24.0	2.2	5.7	5.0	5.1	3.3	18 599.7	三层
U46	2 196	20	9.3	3.7	5.8	5.3	5.6	1.7	3 439.5	二层
U47	5 102	47	5.9	2.7	4.5	4.4	4.5	0.6	6 249.5	二层
U48	1 867	20	8.4	3.1	5.1	4.8	4.9	1.4	2 578.2	二层
U49	3 210	32	59.3	2.6	10.6	6.1	7.1	12.9	9 212.8	三层
U50	5 581	50	17.3	1.6	6.3	5.0	5.5	3.6	9 544.6	三层
U51	6 324	62	21.6	2.3	6.1	5.1	5.3	3.7	10 332.1	三层
U52	3 710	35	30.9	1.6	7.7	5.3	5.9	6.7	7 681.8	三层
U53	8 351	77	61.8	2.7	10.6	7.3	7.8	10.1	23 881.5	三层
U54	19 881	193	54.1	2.0	7.0	4.6	5.6	7.0	37 436.5	三层
U55	5 958	53	34.9	1.8	7.7	5.0	6.1	6.3	12 465.5	三层
U56	5 736	53	22.6	2.8	6.6	5.0	5.8	4.0	10 286.7	三层
U57	4 129	30	10.8	2.9	6.2	5.9	5.8	2.2	6 926.1	三层
U58	3 661	33	17.4	1.5	6.6	5.5	5.8	3.5	6 501.5	三层
U59	2 245	17	23.3	3.4	7.7	6.3	7.0	4.6	4 694.3	三层
U60	2 503	21	115.9	1.6	18.5	2.6	4.7	38.3	12 515.0	三层
U61	4 443	26	17.2	1.2	5.6	4.9	5.0	3.0	6 768.3	二层
U62	37 450	340	82.1	1.2	7.0	5.1	5.7	6.9	71 044.2	三层
U63	3 776	22	53.4	2.0	11.1	6.1	6.8	13.9	11 359.0	三层
U64	2 577	26	15.3	2.2	6.0	4.7	5.2	3.4	4 159.9	三层
U65	2 583	28	16.0	2.2	5.9	4.8	5.2	3.3	4 095.4	二层
U66	4 222	39	17.9	2.6	5.7	5.1	5.2	2.8	6 440.5	二层
U67	66 935	512	36.2	1.9	6.3	5.4	5.6	3.7	114 362.9	三层
U68	25 752	199	36.1	2.4	7.5	6.2	6.6	4.7	52 448.4	三层
U69	3 848	30	11.0	2.6	6.8	7.0	6.5	2.0	7 033.6	三层
U70	17 578	139	23.8	3.5	7.2	6.4	6.7	3.1	34 185.5	三层
U71	86 333	755	16.9	2.3	5.4	4.9	5.1	1.8	125 529.3	三层
U72	15 129	140	10.2	2.2	5.1	4.7	4.9	1.6	20 838.9	三层
U73	8 275	77	19.3	2.7	5.6	4.9	5.2	2.8	12 506.2	三层
U74	472 899	3 006	139.0	1.8	6.3	5.4	5.7	4.0	806 112.8	三层
U75	1 747	17	8.2	3.3	4.6	4.2	4.4	1.3	2 164.4	二层
U76	7 999	64	15.9	3.0	6.9	6.1	6.3	3.2	14 987.1	三层
U77	12 750	112	15.6	3.1	7.7	7.2	7.3	2.6	26 513.7	三层
U78	23 149	167	9.2	3.0	5.0	4.9	5.0	0.9	31 484.6	二层
U79	27 761	203	17.0	2.5	5.9	5.5	5.6	2.3	44 446.5	三层

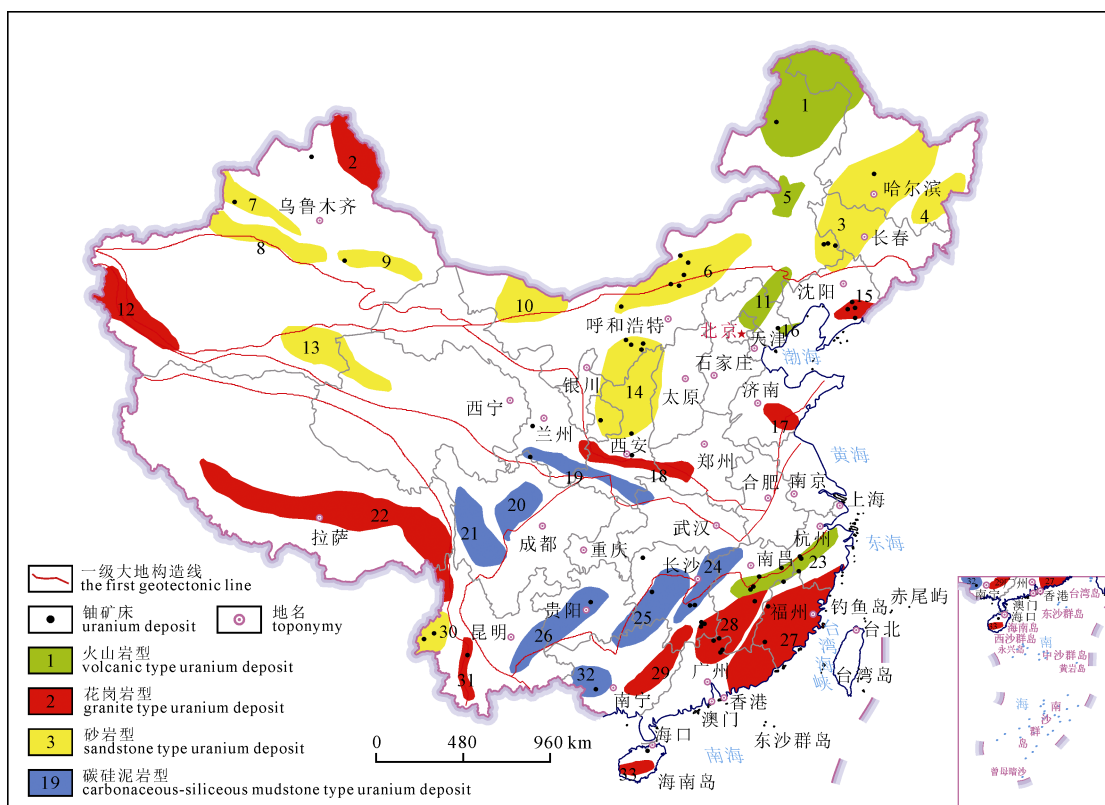


图 2 基于地球化学特征的中国铀矿远景区划分示意图

Fig. 2 Schematic diagram of uranium metallogenic prospect of China based on geochemical characteristics

33 个远景区面积最大的三个远景区是冈底斯铀成矿区、额尔古纳铀远景区、鄂尔多斯盆地铀远景区, 分别为 $233\,994\text{ km}^2$ 、 $201\,809\text{ km}^2$ 、 $162\,539\text{ km}^2$; 面积最小的三个远景区分别为临沧—勐海铀远景区、琼海—乐东铀远景区、青龙—兴城铀远景区, 分别为 $18\,483\text{ km}^2$ 、 $10\,748\text{ km}^2$ 、 $9\,221\text{ km}^2$ 。

成矿可利用金属量最大的三个远景区为冈底斯成矿区、额尔古纳铀远景区、松辽盆地铀远景区, 分别为 $307\,573 \times 10^4\text{ t}$ 、 $177\,925 \times 10^4\text{ t}$ 、 $134\,159 \times 10^4\text{ t}$; 平均值最大的三个远景区为琼海—乐东铀远景区、临沧—勐海铀远景区、华南南部铀远景区, 分别为 6.7×10^{-6} 、 6.3×10^{-6} 、 6.1×10^{-6} ; 平均值最小的三个远景区为二连—测老庙盆地铀远景区、青龙—兴城铀远景区、沽源—红山子铀远景区, 平均值分别为 1.9×10^{-6} 、 1.9×10^{-6} 、 1.8×10^{-6} 。

对于富集系数, 按如下规则来进行比较研究: $K \geq 1.5$ 为强富集, $1.5 > K \geq 1.3$ 为富集, $1.3 > K \geq 1.1$ 为弱富集, $1.1 > K > 0.9$ 为背景, $0.9 \geq K > 0.7$ 弱贫乏, $0.7 \geq K > 0.5$ 贫乏。

分南部和北部不同的平均值来计算出的富集系数(K_1)结果是: 强富集的远景区有琼海—乐东铀远景区、临沧—勐海铀远景区、华南南部铀远景区、腾冲—盈江铀远景区、松辽盆地远景区、阿勒泰铀远景区、桃山—诸广铀远景区、敦化—密山铀远景

区、弓长岭—八河川铀远景区、贵阳—红河铀远景区、额尔古纳铀远景区、郴州—钦州铀远景区、崇左铀远景区、阿尔山铀远景区共 14 个; 富集的远景区有莱芜铀远景区、赣杭铀远景区、西昆仑铀远景区、雪峰山—九万大山铀远景区、伊犁盆地铀远景区、昌都铀远景区、冈底斯铀远景区共 7 个。弱富集的远景区有幕阜山—衡山铀远景区、柴达木盆地铀远景区、巴音戈壁盆地远景区、柴达木盆地西北缘铀远景区、四川盆地西北缘铀远景区、吐哈盆地铀远景区共 6 个; 背景远景区有鄂尔多斯盆地、二连—测老庙盆地铀远景区、青龙—兴城铀远景区、南秦岭铀远景区、沽源—红山子铀远景区共 5 个; 弱贫化的远景区有北秦岭铀远景区共 1 个。

以全国铀含量作为标准所计算出的富集系数(K_2)结果为: 强富集的远景区有琼海—乐东铀远景区、临沧—勐海铀远景区、华南南部铀远景区、腾冲—盈江铀远景区、桃山—诸广铀远景区、贵阳—红河铀远景区、郴州—钦州铀远景区、崇左铀远景区、松辽盆地远景区、阿勒泰铀远景区、赣杭铀远景区、雪峰山—九万大山铀远景区、昌都铀远景区、冈底斯成矿区、敦化—密山铀远景区、弓长岭—八河川铀远景区、幕阜山—衡山铀远景区共 17 个; 富集的远景区有额尔古纳铀远景区、阿尔山铀远景区、莱芜铀远景区、四川盆地西北缘铀远景区、西昆仑铀远景区共 5 个; 弱富集的远景区有伊犁盆地铀远景

表 4 铀成矿远景区地球化学数据统计表
Table 4 Statistical table of geochemical data of uranium metallogenic prospects

远景区名称	远景区 编号	面积 /km ²	样品数	最大值 /10 ⁻⁶	最小值 /10 ⁻⁶	中位数 /10 ⁻⁶	平均值 /10 ⁻⁶	几何均值 /10 ⁻⁶	标准差 /10 ⁻⁶	成矿可利用 金属量/(10 ⁴ t)	已知矿床	所在地区	富集系数 (K1)	富集系数 (全国)(K2)
额尔古纳铀远景区	1	201 809	2 191	18.7	0.9	3.1	3.3	3.0	1.4	177 925	额尔古纳铀矿	北部	1.6	1.4
阿勒泰铀远景区	2	58 208	1 063	58.3	1.0	3.0	4.1	3.3	3.9	64 412		北部	2.0	1.8
松辽盆地远景区	3	122 183	474	13.3	0.8	3.6	4.1	3.7	1.8	134 159	建兴铀矿	北部	2.0	1.8
敦化—密山铀远景区	4	45 295	360	7.2	0.8	3.3	3.5	3.3	1.0	42 604		北部	1.7	1.5
阿尔山铀远景区	5	19 558	372	20.5	1.1	3.7	3.2	3.3	2.3	19 448		北部	1.5	1.4
二连—测老盆地铀远景区	6	116 921	2 323	42.4	0.2	2.3	1.9	2.0	2.0	71 097	苏崩铀矿、川井铀矿等	北部	0.9	0.8
伊犁盆地铀远景区	7	34 725	341	9.8	1.1	3.0	2.8	2.9	1.1	28 305	伊犁铀矿	北部	1.3	1.2
柴达木盆地西北缘铀远景区	8	60 436	558	14.1	0.4	2.6	2.4	2.4	1.2	42 820		北部	1.1	1.0
吐哈盆地铀远景区	9	38 928	538	12.8	0.9	2.5	2.2	2.3	1.2	26 425	十红滩铀矿	北部	1.1	1.0
巴音戈壁盆地远景区	10	54 639	628	19.0	0.7	2.2	2.5	2.3	1.2	36 955	塔木素铀矿	北部	1.2	1.1
沽源—红山子铀远景区	11	42 786	428	4.9	0.4	1.8	1.8	1.8	0.5	21 138	460 铀矿、534 铀矿	北部	0.9	0.8
西昆仑铀远景区	12	64 826	573	11.8	1.0	2.6	2.9	2.7	1.4	51 465		北部	1.4	1.3
柴达木盆地铀远景区	13	87 286	630	23.7	0.5	2.3	2.5	2.4	1.3	59 464		北部	1.2	1.1
鄂尔多斯盆地铀远景区	14	162 539	55	7.1	0.7	2.3	2.2	2.0	1.0	96 209	东胜铀矿、大营铀矿等	北部	1.0	1.0
青龙—兴城铀远景区	15	9 221	59	4.2	1.0	1.7	1.9	1.9	0.6	4 785	青龙铀矿	北部	0.9	0.8
弓长岭—八河川铀远景区	16	18 562	9	5.3	2.5	3.3	3.4	3.3	0.9	17 161	本溪铀矿、连山关铀矿	北部	1.6	1.5
莱芜铀远景区	17	19 407	206	6.7	1.6	2.8	3.0	2.9	1.0	15 844		北部	1.4	1.3
北秦岭铀远景区	18	42 578	413	11.0	1.6	2.7	2.4	2.5	1.1	30 705	蓝田铀矿	南部	0.8	1.0
南秦岭铀远景区	19	53 419	539	8.0	0.1	2.3	2.4	2.3	0.8	34 630	若尔盖铀矿	南部	0.9	1.0
四川盆地西北缘铀远景区	20	46 140	457	59.3	1.1	4.4	3.0	3.4	5.2	54 453		南部	1.1	1.3
昌都铀远景区	21	68 603	654	61.8	1.2	5.5	3.7	4.3	6.0	101 992		南部	1.3	1.6
冈底斯铀成矿区	22	233 994	2 109	115.9	1.2	4.9	3.5	3.9	5.8	307 573		南部	1.3	1.5
赣杭铀远景区	23	54 803	513	15.5	1.6	3.5	3.9	3.6	1.7	57 749	赣州铀矿、上饶铀矿	南部	1.4	1.7
幕阜山—衡山铀远景区	24	53 617	500	9.3	1.4	3.2	3.4	3.3	1.1	49 288	大浦街铀矿、衡阳铀矿	南部	1.2	1.5
雪峰山—九万大山铀远景区	25	84 550	770	15.9	1.4	3.3	3.8	3.4	1.9	86 014	岔头铀矿	南部	1.4	1.7
贵阳—红河铀远景区	26	79 780	728	16.9	1.8	4.8	4.5	4.5	1.8	103 220	白马洞铀矿	南部	1.6	1.9
华南山部铀远景区	27	149 247	1 312	139.6	1.8	5.4	6.1	5.5	4.6	24 712		南部	2.2	2.7
桃山—诸广铀远景区	28	81 783	754	23.2	1.5	3.7	5.3	4.3	4.0	117 991	郴州铀矿、韶关铀矿	南部	1.9	2.3
郴州—钦州铀远景区	29	46 720	408	31.7	1.3	3.2	4.3	3.7	3.5	53 965		南部	1.5	1.9
腾冲—盈江铀远景区	30	26 178	198	23.8	1.4	5.5	6.0	5.3	3.2	42 379	腾冲铀矿、盈江铀矿	南部	2.1	2.6
临沧—勐海铀远景区	31	18 483	160	15.6	1.8	6.1	6.3	5.5	3.1	31 402	大寨含铀锆铁矿	南部	2.3	2.7
崇左铀远景区	32	25 952	218	8.0	2.0	4.4	4.3	4.1	1.2	30 256	大新铀矿	南部	1.5	1.9
琼海—乐东铀远景区	33	10 748	87	15.9	2.8	6.4	6.7	6.3	2.3	19 354		南部	2.4	2.9

区、柴达木盆地铀远景区、巴音戈壁盆地远景区共 3 个;背景的远景区有南秦岭铀远景区、北秦岭铀远景区、柴达木盆地西北缘铀远景区、吐哈盆地铀远景、鄂尔多斯盆地铀远景区共 5 个;弱贫化的远景区有二连一测老庙盆地铀远景区、青龙—兴城铀远景区、沽源—红山子铀远景区共 3 个。

从上面结果也发现,富集系数较低的远景区大部分为砂岩型远景区,且位于北部盆地或干旱半干旱地区。

4 远景区潜在铀矿类型讨论

根据远景区内的已知矿床类型和地质特征,并参考黄净白和黄世杰(2005)及蔡煜琦等(2015)的研究结果,将 33 个远景区带分属四大成矿类型:砂岩型、花岗岩型、火山岩型和碳硅泥岩型。上述 33 个远景区中,1、5、11、16 和 23 号远景区与火山岩型铀矿有关,2、12、15、17、18、22、27、28、29、31、33 号与花岗岩型铀矿有关,19、20、21、24、25、26、32 号与碳硅泥岩型铀矿有关,3、4、6、7、8、9、10、13、14 和 30 号与砂岩型铀矿有关。除 11、14、15、16 和 19 号远景区地球化学异常较弱,其余 28 个远景区都有明显的地球化学异常且具有多层地球化学块体。

4.1 花岗岩型铀矿远景区

花岗岩型铀矿床与花岗岩体关系密切,主要产于花岗岩体内或内外接触带上,矿体形态主要受断裂破碎带、围岩破碎带控制,多呈似层状、透镜体状、不规则状等。矿化类型包括碱交代岩型、硅质脉型、碎裂蚀变岩型等。虽然这类矿床产出的地质部位和围岩性质不同,但它们均具有相同的(或相近的)成矿过程、成矿时代和成矿机制。

我国花岗岩型铀矿主要分布在南方地区,在西北地区的龙首山、北秦岭也有少量分布。华南富铀花岗岩多为壳源重熔型花岗岩,部分为壳幔混熔型花岗岩。基底岩石的类型和含铀性对富铀花岗岩的形成有重要影响,陆源碎屑岩和含铀碳硅泥岩系地层的熔融,有利于形成富铀岩体。花岗岩型铀矿床是我国最重要的矿床类型,占总储量的 38%以上。

27、28、29 号远景区位于华南活动带,华南成矿省是中国最重要的铀成矿区。华南活动是华夏陆块和扬子陆块多次离合增生形成的、以前寒武系陆壳为基底的古生代褶皱带。远景区内分布有从晋宁、加里东、到燕山期的多期花岗岩及燕山期陆相火山岩,并发育有不同期次的海相含铀层,组成多期次成群的富铀体,在印支期、燕山期复式花岗岩体内铀含量可高达 $(10\sim 20)\times 10^{-6}$ 。而长期活动的深断裂带与富铀体、成矿热流体的耦合产生大量铀矿床。

27、28、29 号远景区为花岗岩型铀远景区,铀富集系数分别为 2.7、2.3 和 1.9,属于强富集。

22 号远景区主要沿着冈底斯成矿带分布。该异常可能与混合岩化、花岗岩化后期碱性交代导致的铀富集有关。该区断裂发育,混合岩化、花岗岩化的深变质作用明显,广泛分布有花岗岩、混合岩、片麻岩等。

12 号远景区主要分布于昆仑山西部,花岗岩分布广泛。该异常可能与多期次的岩浆岩活动导致的铀富集有关。该远景区西部连接塔吉克斯坦中帕米尔铀预测区(刘明义等,2016),在该预测区内,岩浆岩中有较好的铀、钍异常,异常范围与中酸性岩浆岩分布相吻合,而该岩浆岩形成的异常延伸至我国境内。因此,该远景区与塔吉克斯坦中帕米尔铀预测区为同一远景区,应该是寻找铀矿很有前景的铀远景区。

31 号为临沧—勐海远景区,远景区内只有 77 号块体,面积为 $12\,750\text{ km}^2$,平均值为 7.7×10^{-6} ,可利用资源量为 26 513.7 万吨。铀异常与花岗岩一样呈南北向分布,异常强度大,平均值高,可能与花岗岩化后期碱性交代导致的铀富集有关,已发现的铀矿为大寨含铀锆铁矿。

4.2 火山岩型铀矿远景区

火山岩型铀矿床是指在成因上、时间上和空间上与火山岩或次火山岩密切相关的一类矿床。矿床除产于火山岩内之外,还包括产于火山岩附近的下古生界浅变质岩和中生界陆相砂砾岩中的铀矿床。

火山岩型铀矿床在世界范围内分布广泛,目前至少有 17 个国家已发现铀矿床或矿点,包括前苏联、加拿大、美国、澳大利亚、意大利、南斯拉夫等国。储量较大的铀矿床主要分布于环太平洋带。

火山岩型铀矿床是我国重要的铀矿床类型之一,占已有总储量的 20%左右,主要分布在我国东南沿海一带,其中赣—杭火山岩成矿带是我国的主要成矿带。

23 号远景区赣杭铀远景区位于浙江—江西一带,受华南高铀花岗岩的影响,铀矿化一般产在铀的高背景场上。远景区面积达 $54\,803\text{ km}^2$,平均值为 3.9×10^{-6} ,可利用资源量为 57 749 万吨,相对于全国铀平均值,23 号远景富集系数为 1.7,为强富集。

11、16 号远景区位于华北陆块北缘,西部火山岩带总体受 NNE 向太行—大兴安岭火山岩带控制,成矿受中生代多旋回火山活动晚期酸性次火山岩体控制;中部青龙—兴城成矿带铀成矿受火山盆地基底含铀混合花岗岩体及盆缘 EW 向深断裂控制,成矿带呈 EW 向展布;东段弓长岭—八河川成矿带成矿受太古代—早元古代复式花岗岩控制,晚元古代

以后成矿带被地台型盖层覆盖, 中生代陆块上升, 盖层被剥蚀, 古老矿床再次暴露出来, 此成矿带为一古残留成矿带。16 号远景区已发现 460 大型铀钼矿及 534 中型铀钼矿。

1 号远景区为额尔古纳超大型铀矿成矿带位于远景区。在大地构造位置上, 处于华北地台与西伯利亚地台相夹持的兴蒙—鄂霍茨克古生代地槽系中的克鲁伦—额尔古纳前寒武纪中间地块内。基底由古老的变质岩和花岗岩组成。异常区所处的构造位置对形成富铀的大陆裂陷火山杂岩建造和铀的成矿均极为有利。变质岩地层主要由中元古界下里菲群(佳疙瘩群)的斜长角闪片麻岩、斜长角闪岩以及晚元古界上里菲群(额尔古纳河群)石英砂岩、石英云母片岩等中浅变质岩组成。经历了里菲期、加里东期、海西期等多期花岗岩化作用的强烈改造。中生代火山岩浆来源于富集型的地幔, 建造属于大陆伸展裂陷式火山岩, 包括钙碱性的中基性、中酸性火山岩浆和偏碱性的酸性岩浆两个岩浆系列。从其成矿专属性看, 该区的铀成矿主要与偏碱性的酸性火山岩浆系列相关。

5 号远景区在大地构造上位于天山—兴蒙造山带东段, 兴安地块中南部。区内出露地层主要为侏罗系, 且侏罗系中酸性岩火山岩和火山碎屑岩分布面积比较大, 另外还有奥陶系、志留系、泥盆系、新近系及第四纪松散堆积物, 总体上古生代地层零星出露。区内侵入岩比较发育, 占研究区总面积的 50% 左右。岩石类型以中-酸性的侵入岩为主。区内共有海西晚期、燕山早期二期岩浆侵入, 尤以燕山早期中-酸性侵入岩分布面积大, 呈巨大的岩基产出, 受控于区域构造, 岩浆岩带总体呈北东向展布。另外, 玄武岩呈长条状分布在边境地区中南部。

4.3 砂岩型铀矿远景区

砂岩型铀矿是一种赋存于沉积盆地中的矿产, 是富含 U^{6+} 的地下水在砂岩中运移至层间氧化带边缘, 以还原作用或者吸附作用等方式沉淀 U^{4+} 富集而形成的矿体。一般来说砂岩型铀矿属于后生矿床, 其成矿作用晚于围岩, 并且矿体和围岩往往是在不同地质作用下形成的。

我国砂岩型铀矿主要分布于中新生代的沉积盆地中, 受太平洋板块和印度板块对亚洲大陆的碰撞、俯冲作用的影响, 我国砂岩型铀矿在容矿层位、矿床类型(成矿作用)和矿化年龄的空间分布上有着明显的差异和变化规律。这些差异源自于每个构造域中新生代构造演化的自身特点, 而中国东、西部的砂岩型铀矿床分别归属于西太平洋和新天山两大成矿体系。中部构造域的中新生代盆地及其中产出的砂岩型铀矿床则同时受到印度板块和太平洋板块

作用的影响, 兼具两大成矿体系的特征(陈祖伊等, 2010)。

6、7、8、9 和 14 号远景区位于北方中新生代沉积盆地内, 这也是我国十年内砂岩型铀矿取得较大突破的地区(张金带, 2008)。在这一地区, 铀矿化年龄跨度大, 新的铀矿化年龄不足 2 Ma, 但老的铀矿化年龄则超过 100 Ma, 从西到东, 铀矿化年龄具有西部偏新、东部偏老的趋势; 含矿层位则为西部偏老、东部偏新; 西部地区铀成矿主要以中下侏罗统为主, 而中东部则以下白垩统、上白垩统、古近系为主(陈祖伊等, 2010)。这种规律与古气候演化有密切关系(陈戴生等, 2011)。

7 号和 9 号远景区分别是北天山成矿带和南天山成矿带, 是中国山间盆地和山前盆地主要铀成矿单元。区内发育一系列山间盆地(如伊犁盆地、吐哈盆地、库米什盆地等)及山前盆地(如准噶尔盆地的南缘和塔里木盆地北缘), 盆地内部铀成矿作用广泛, 类型多样, 含铀煤型、其砂岩型、含铀地沥青型均有发育, 但仅在部分盆地稳定的低倾角斜坡带形成可地浸砂岩型铀矿床。成矿特点是: 砂岩型铀成矿以山间盆地为主(如伊犁盆地、吐哈盆地)。其二, 成矿类型以层间氧化带砂岩型和含铀煤型为主。目的层以侏罗系为主, 部分盆地铀成矿和油气二次还原活动有关(如乌恰盆地); 成矿期均属新生代。其三是铀矿床基本上分布在蚀源区铀源丰富的盆缘斜坡带上, 斜坡带长期缓慢掀斜, 为含铀地下水活动创造有利条件。而上覆代表干旱气候相的新生代红层又为含铀含氧水下渗成矿创造了有利环境。

8 号远景区位于柴达木盆地, 柴达木盆地是在元古宙海槽基础上经晋宁运动克拉通化, 晚古生代海西运动加积增生后发展起来的大型中、新生代压扭性盆地, 介于阿尔金山、昆仑山和祁连山之间, 四周为高大山系围绕。大地构造位置属于柴达木准地台, 第三纪早期, 喜马拉雅运动使阿尔金山、昆仑山和祁连山继续抬升, 盆地则处于沉降阶段, 接受周围山地物源的大面积供给。20 世纪 60—80 年代, 在此盆地内发现 3 个铀矿点、2 个矿化点和 107 个异常点, 但由于其规模较小, 品位较低, 加之认识有限, 没有再开展进一步的工作(张玉龙和董光国, 2007)。远景区由 32~36 号地球化学块体组成, 块体面积最大的为 34 号, 达 18 082 km², 32 和 36 号块体的面积均大于 10 000 km², 所有块体铀含量平均值均大于 3.0×10^{-6} 。

14 号远景区位于鄂尔多斯盆地, 盆地位于中国东部滨太平洋构造域与西部古特提斯—喜马拉雅构造域之间, 太古宇及元古界变质岩系组成盆地结晶基底, 基底岩系由于构造而发生一系列变质作用、

混合作用与褶皱作用,并形成太古宇麻粒岩相、角闪岩相变质岩、混合花岗岩和古元古界角闪岩和绿片岩。盆地地台沉积盖层由中元古界、古生界变质岩系和中生界三叠系碎屑岩系组成,盆地沉积盖层主体是侏罗系和白垩系地层。盆地边缘断裂及褶皱相对发育,内部则地层平缓,构造较简单。盆地赋矿层位为中侏罗统直罗组和延安组。已发现的铀矿床、矿化点及异常点均分布于盆地的边缘,主要位于鄂尔多斯盆地的北部、东南部和西南部。远景区内发现有东胜砂岩型铀矿床、大营特大型铀矿床等。

6号远景区位于二连一测老庙盆地,该盆地是我国主要产铀盆地之一,位于内蒙古中北部边缘,是在兴—蒙海西期褶皱基底上发育起来的大型中新生代断—拗型裂谷盆地;盆地由5个拗陷(马尼特、乌尼特、乌兰察布、川井和腾格尔拗陷)和1个隆起(苏尼特隆起)组成,各拗陷及隆起又分成多个次级凹陷和凸起,分割性强,俗称“碎盆”。盆地中的主要含矿目的层为赛汉组,其次是二连组和腾格尔组,其他层位目前尚未发现有潜力的工业铀矿化。区内已经发现赛罕高毕铀矿床、苏崩铀矿床和川井铀矿床。

10号远景区位于巴音戈壁盆地,巴音戈壁盆地处于塔里木板块、哈萨克斯坦板块、西伯利亚板块和华北板块等四大板块在古生代时期陆—陆碰撞的结合部位,相间出现的隆起和拗陷(凹陷)是由非均匀性的构造运动形成的。巴音戈壁铀矿床位于巴音戈壁盆地南西部因格井拗陷的因格井凹陷中,沉积盖层由中下侏罗统、下白垩统巴音戈壁组下段和上段、上白垩统乌兰苏海组及第四系组成,其中下白垩统是盆地盖层的沉积主体,巴音戈壁组上段为含矿层位。远景区内有14、15号地球化学块体,15号块体面积达 $21\,241\text{ km}^2$,平均值为 3.1×10^{-6} ,可利用资源量为17 863.7万吨,地球化学异常有三层套合。14号块体面积为 $6\,416\text{ km}^2$,平均值为 3.1×10^{-6} ,可利用资源量为5 375.27万吨,地球化学异常有二层套合。

3号远景区位于松辽盆地。松辽盆地就是产生在大型拗陷带内的一个拗陷区,盆地形状近似菱形,西临大兴安岭,北与小兴安岭为界,东部为张广才岭,南接康平—法库丘陵地带。盆地中间是嫩江、松花江、辽河水系流经的平原沼泽区,地面海拔 $120\sim 300\text{ m}$,长约 750 km ,宽 $330\sim 370\text{ km}$,主轴沿北北东方向展布,面积约 26万 km^2 ,是当今世界上最大的典型陆相沉积盆地之一。盆地周围主要出露古生代和前古生代的变质岩和火山岩。盆地内部的新生代地层下面,广泛分布着白垩纪地层。目前,松辽盆地是寻找砂岩型铀矿的重要的远景区。

30号远景区腾冲—盈江远景区位于滇西地区,滇西地区属印支褶皱为主的多旋回地区,由于受印

支板块的挤压,晚期形成深断裂—岩浆岩—变质带紧密排列的不同性质的地质块体,各地质块体经受了早期加里东旋回以来的历次构造运动,特别是喜山运动,褶皱系受到到了剧烈的挤压,使滇西原有统一的地槽褶皱特征,又成性质各异、时代不同的多旋回褶皱系,并具有多旋回的成矿作用,与中酸性岩有关的矿产也成带分布。已发现腾冲铀矿床和盈江铀矿床。

4.4 碳硅泥岩型铀矿远景区

碳硅泥岩型铀矿床是指产于碳酸盐、硅质、泥质、细碎屑岩或它们的过渡性岩石中的铀矿床的总称。碳硅泥岩型铀矿床在我国分布较为广泛。时间上,从震旦纪—二叠纪都发现有该类矿床;空间上,在南北方均有发现,但主要沿扬子地块边缘展布,主要有南秦岭成矿带,江南成矿带和华南成矿区,是我国四大工业铀矿床类型之一,其铀资源量曾占到全国铀资源总量的16%。

富含有机质、黄铁矿、磷质的泥质、硅质、碳酸盐岩以及它们之间的过渡岩石是该类矿床矿化的有利岩性,这些岩石以含铀较高,其中的铀主要呈分散状、吸附状存在,易于浸出。常见的岩石类型有:硅质灰岩、硅质泥质白云岩、含破硅岩、硅质板岩、含磷碳板岩等。岩性单一的巨厚岩层,铀含量一般较低。富铀地段的岩性变化很大,容易形成层间构造,为构造氧化带的形成提供了空间条件,对于铀的淋积成矿有着密切的成因联系。

该类矿床铀主要来自铀源层以及附近含铀地质体(花岗岩、中酸性火山岩等)。此外,铀源亦可来自岩浆期后热液、地下热水等自深部带入,或从矿体下部有关地质体浸取运移而获得。

20、21、24、25、26和32号远景区位于扬子陆块的周边,黑色岩系广泛出露。黑色岩系中铀含量普遍较高,经过后期改造后,有可能形成铀矿(化)。黑色岩系是铀矿形成的矿源层。矿床类型为碳硅泥岩型铀矿,目前发现了有大浦街铀矿、衡阳铀矿、广西大新铀矿、贵州省开阳县白马洞碳硅泥岩型铀—钼—汞矿床和湖南岔头铀矿等。

19号远景区位于南秦岭,在大地构造位置上则位于华北、扬子两大古陆板块以及特提斯大洋板块的接壤区,地质构造复杂,特别是区域构造较为发育,区内仅见少量加里东末期的辉绿岩脉、华力西期花岗闪长岩株、印支期英安斑岩脉以及燕山期陆相火山岩。远景区内主要铀矿有若尔盖铀矿等。

32号远景区位于广西西南部,区域位于华南板块南华活动带右江褶皱系西大明山凸开始,至大新凹断结束,那岭—棒屯褶断地垒的北端,辉绿岩脉沿断裂呈北西向零星分布。远景区黑色岩系广泛出

露。黑色岩系中铀含量普遍较高, 经过后期改造后, 有可能形成铀矿(化)。主要矿床类型为碳硅泥岩型, 黑色岩系是铀矿形成的矿源层。目前发现了广西大新铀矿及多个中小型铀矿床, 具有较好的找矿远景。

5 结论

(1)水系沉积物或汇水域沉积物采样数据显示, 以秦岭—大别山为界, 中国南北地区铀含量值存在明显差异。以铀含量中位数(累计频率 50%)作为背景值, 全国背景值为 2.3×10^{-6} 、南方为 2.9×10^{-6} 、北方为 2.1×10^{-6} ; 以累计频率 85%作为异常下限, 全国为 3.8×10^{-6} 、南方地区含量值 4.8×10^{-6} 、北方地区含量值为 3.0×10^{-6} 。因此, 在研究中以秦岭—大别山一线为界, 把中国分为南北两部分, 分别进行地球化学特征参数的统计与研究是合理的, 更便于真实的远景区预测。

(2)北方地区和南方地区都以累计频率 85%对应的含量值做为异常下限, 北方地区铀异常下限值 3.0×10^{-6} , 南方地区铀异常下限值 4.8×10^{-6} , 全国圈出面积大于 1000 km² 地球化学块体 79 处, 其中有 30 个面积为 10 000~100 000 km², 属于地球化学巨省, 有 3 个面积超过 100 000 km², 属于地球化学域。

(3)根据铀地球化学块体空间分布和异常特征, 结合全国铀矿床分布和地质特征, 将全国划分为 33 个铀矿找矿远景区。33 个远景区与四种铀矿成矿类型有关, 其中 1、5、11、16 和 23 号远景区与火山岩型铀矿有关, 2、12、15、17、18、22、27、28、29、31、33 号与花岗岩型铀矿有关, 19、20、21、24、25、26、32 号与碳硅泥岩型铀矿有关, 3、4、6、7、8、9、10、13、14 和 30 号与砂岩型铀矿有关。这些远景区有的已经发现中型以上矿床, 有的还需要进一步工作, 对今后找矿部署具有一定参考价值。

Acknowledgements:

This study was supported by National Key Research & Development Program of China (No. 2016YFC0600609), and China Geological Survey (No. DD20190450).

参考文献:

- 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[J]. 地质学报, 89(6): 1051-1069.
- 陈戴生, 刘武生, 贾立城. 2011. 我国中生代古气候演化及其对盆地砂岩型铀矿的控制作用[J]. 铀矿地质, 27(6): 321-326.
- 陈祖伊, 陈戴生, 古抗衡, 王亚婧. 2010. 中国砂岩型铀矿容矿层位、矿化类型和矿化年龄的区域分布规律[J]. 铀矿地质, 26(6): 321-330.
- 迟清华. 2003. 岩石化学元素丰度在地球化学块体研究中的

- 意义[J]. 物探与化探, 27(6): 428-444.
- 黄净白, 黄世杰. 2005. 中国铀资源区域成矿特征[J]. 铀矿地质, 21(3): 129-138.
- 李堃, 刘凯, 汤朝阳, 段其发. 2013. 湘西黔东地区 Zn 地球化学块体特征及锌资源潜力估算[J]. 中国地质, 40(4): 1270-1277.
- 李通国, 李文胜, 刘建宏, 赵彦庆, 白云来. 2003. 矿床地球化学预测方法——以甘肃省地球化学块体为例[J]. 中国地质, 30(2): 192-198.
- 刘大文, 谢学锦, 严光生, 连长云, 王全明. 2002. 地球化学块体的方法技术在山东金资源潜力预测中的应用[J]. 地球学报, 23(2): 169-174.
- 刘大文, 谢学锦. 2002. 地球化学块体——地球不均一性的地表显示[J]. 矿床地质, 21(增刊): 1168-1172.
- 刘大文, 谢学锦. 2005. 基于地球化学块体概念的中国锡资源潜力评价[J]. 中国地质, 32(1): 25-32.
- 刘大文. 2002. 地球化学块体的概念及其研究意义[J]. 地球化学, 31(6): 539-548.
- 刘明义, 孟广路, 范堡程, 何子鑫. 2016. 塔吉克斯坦铀成矿区地质特征及成矿预测[J]. 铀矿地质, 32(1): 31-35.
- 刘拓, 王庆明, 郑启平. 2003. 新疆金地球化学块体内资源潜力预测及找矿方向探讨[J]. 新疆地质, 21(3): 298-302.
- 师淑娟, 宫进忠, 张洁. 2010. 河北省铅锌矿源层与地球化学块体[J]. 矿床地质, 29(2): 276-281.
- 王学求, 程志中, 刘大文. 1999. 中国东部覆盖区地球化学块体的圈定与评价. 走向 21 世纪的矿产勘查地球化学[M]/谢学锦. 北京: 地质出版社: 223-233.
- 王学求, 申伍军, 张必敏, 聂兰仕, 迟清华, 徐善法. 2007. 地球化学块体与大型矿集区的关系——以东天山为例[J]. 地学前缘, 14(5): 116-123.
- 王学求. 2000. 巨型矿床与大型矿集区勘查地球化学[J]. 矿床地质, 19: 76-87.
- 王学求. 2003. 大型矿床地球化学定量评价模型和方法[J]. 地学前缘, 10(1): 257-261.
- 谢学锦. 1995. 用新观念与新技术寻找巨型矿床[J]. 科学中国人, 3(5): 14-16.
- 张必敏, 王学求, 徐善法, 姚文生, 迟清华, 刘汉粮, 韩志轩, 柳青青, 严桃桃, 窦备, 鲁岳鑫. 2020. 穿透性地球化学勘查技术在隐伏砂岩型铀矿调查中的应用研究[J]. 地球学报, 41(6): 770-784.
- 张金带, 李子颖, 蔡煜琦, 郭庆银, 李友良, 韩长青. 2012. 全国铀矿资源潜力评价工作进展与主要成果[J]. 铀矿地质, 28(6): 321-326.
- 张金带. 2008. 中国铀资源的潜力与前景[J]. 中国核工业, 18-21.
- 张玉龙, 董光国. 2007. 柴达木盆地砂岩型铀矿成矿条件及找矿前景[J]. 甘肃地质, 16(3): 56-65.
- 周建, 徐善法, 聂兰仕, 刘东盛, 韩志轩, 柳青青, 张必敏, 刘汉粮, 迟清华. 2020. 内蒙古自治区大型金矿地球化学标志与预测[J]. 地球学报, 41(6): 818-826.
- 周晓东, 伍玲, 曹全欣. 2007. 地球化学填图与地球化学块体的谱系分析-编号系统及谱系树图的自动绘制[J]. 地质通报, 26(7): 892-898.
- 朱鹏飞, 蔡煜琦, 郭庆银, 刘武生, 李建红, 张明林, 漆富成, 张宇龙, 贾立城, 徐浩. 2018. 中国铀矿资源成矿地质特征与资源潜力分析[J]. 地学前缘, 25(3): 148-158.

References:

- CAI Yu-qi, ZHANG Jin-dai, LI Zi-ying, GUO Qing-yin, SONG Ji-ye, FAN Hong-hai, LIU Wu-sheng, QI Fu-cheng, ZHANG

- Ming-lin. 2015. Outline of uranium resources characteristics and metallogenetic regularity in China[J]. *Acta Geologica Sinica*, 89(6): 1051-1069(in Chinese with English abstract).
- CHEN Dai-sheng, LIU Wu-sheng, JIA Li-cheng. 2011. Paleoclimate evolution in China and its control on the metallization of sandstone type uranium deposit of Meso-Cenozoic basins[J]. *Uranium Geology*, 27(6): 321-326(in Chinese with English abstract).
- CHEN Zu-yi, CHEN Dai-sheng, GU Kang-heng, WANG Ya-jian. 2010. The regional distribution regularities of ore-hosting horizon, deposit type and mineralization age of China's sandstone-hosted uranium deposits[J]. *Uranium Geology*, 26(06): 321-330(in Chinese with English abstract).
- CHI Qing-hua. 2003. The significance of elements abundances of blocks in the study of geochemical blocks[J]. *Geophysical & Geochemical Exploration*, 27(6): 428-444(in Chinese with English abstract).
- DOE B R. 1991. Source rock and the genesis of metallic mineral deposits[J]. *Global Tectonics and Metallogeny*, 4(1-2): 13-19.
- HUANG Jing-bai, HUANG Shi-jie. 2005. Regional metallogenetic characteristics of China's uranium resources[J]. *Uranium Geology*, 21(3): 129-138(in Chinese with English abstract).
- LI Kun, LIU Kai, TANG Chao-yang, DUAN Qi-fa. 2013. Characteristics of zinc geochemical blocks and assessment of zinc resource potential in western Hunan and eastern Guizhou Province[J]. *Geology in China*, 40(4): 1270-1277(in Chinese).
- LI Tong-guo, LI Wen-sheng, LIU Jian-hong, ZHAO Yan-qing, BEI Yun-lai. 2003. Geochemical prognosis method of mineral deposits: A case study of the geochemical block in Gansu[J]. *Geology in China*, 30(2): 192-198(in Chinese with English abstract).
- LIU Da-wen, XIE Xue-jing, YANG Guang-sheng, LIAN Chang-yun, WANG Quan-ming. 2002. The application of geochemical blocks methods to gold resources assessment in Shandong province[J]. *Geology in China*, 29(3): 225-233(in Chinese with English abstract).
- LIU Da-wen, XIE Xue-jing. 2002. Geochemical block-Development of concept and methodology[J]. *Geology in China*, 29(3): 225-233(in Chinese with English abstract).
- LIU Da-wen, XIE Xue-jing. 2005. Evaluation of China's resources potential based on the geochemical block concept[J]. *Geology in China*, 32(1): 25-32(in Chinese with English abstract).
- LIU Da-wen. 2002. Development and significance of geochemical block[J]. *Geochimica*, 31(6): 539-548(in Chinese with English abstract).
- LIU Ming-yi, MENG Guang-lu, FAN Bao-cheng, MA Hai-zhou. 2016. Geological features and prospect of uranium metallogenetic area in Tajikistan[J]. *Uranium Geology*, 32(1): 31-35(in Chinese with English abstract).
- LIU Tuo, WANG Qing-ming, ZHENG Qi-ping. 2003. Prediction of resource potential and discussion about prospecting of gold mineral resources by geochemical blocks theory in Xinjiang[J]. *Xinjiang Geology*, 21(3): 298-302(in Chinese with English abstract).
- SHI Shu-Juan, GONG Jin-Zhong, ZHANG Jie. 2010. Lead-zinc source beds and geochemical blocks in Hebei Province[J]. *Mineral Deposits*, 29(2): 276-281(in Chinese with English abstract).
- WANG Xue-qiu, CHEN Zhi-zhong, LIU Da-wen. 1999. Delineation and evaluation of geochemical blocks in coverage area of eastern China. *Mineral exploration geochemistry towards the 21st century*[M]. Beijing: Geological Publishing House: 223-233(in Chinese).
- WANG Xue-qiu, SHEN Wu-jun, ZHANG Bi-min, NIE Lan-shi, CHI Qing-hua, XU Shan-fa. 2007. Relationship of geochemical blocks and ore districts: examples from Eastern Tianshan metallogenetic belt, Xinjiang, China[J]. *Earth Science Frontiers*, 14(5): 116-123(in Chinese with English abstract).
- WANG Xue-qiu. 2000. Exploration geochemistry for giant ore deposits or world-class camps in concealed terrains[J]. *Mineral Deposits*, 19: 76-87(in Chinese with English abstract).
- WANG Xue-qiu. 2003. A Geochemical quantitative assessment model and approach for large ore deposits[J]. *Earth Science Frontiers*, 10(1): 257-261(in Chinese with English abstract).
- XIE Xue-jing. 1995. With new ideas and new technology to find giant deposits[J]. *Scientific Chinese*, 3(5): 14-16(in Chinese).
- ZHANG Bi-min, WANG Xue-qiu, XU Shan-fa, YAO Wen-sheng, CHI Qing-hua, LIU Han-liang, HAN Zhi-xuan, LIU Qing-qing, YAN Tao-tao, DOU Bei, LU Yue-xin. 2020. The Research and Application of Deep-penetrating Geochemical Exploration Technology in the Survey of Concealed Sandstone-type Uranium Deposits[J]. *Acta Geoscientica Sinica*, 41(6): 770-784(in Chinese with English abstract).
- ZHANG Jin-dai, LI Zi-ying, CAI Yu-qi, GUO Qing-jin, LI You-liang, HAN Chang-qing. 2012. The main advance and achievements in the potential evaluation of uranium resource in China[J]. *Uranium Geology*, 28(6): 321-326(in Chinese with English abstract).
- ZHANG Jin-dai. 2008. Potential and prospect of uranium resources in China[J]. *China Nuclear Industry*: 18-21(in Chinese with English abstract).
- ZHANG Yu-long, DONG Guang-guo. 2007. Discuss on metallogenetic prospects of hydrogenic uranium deposit in Qaidam basin[J]. *Gansu Geology*, 16(3): 56-65(in Chinese with English abstract).
- ZHOU Jian, XU Shan-fa, NIE Lan-shi, LIU Dong-sheng, HAN Zhi-xuan, LIU Qing-qing, ZHANG Bi-min, LIU Han-liang, CHI Qing-hua. 2020. The Geochemical Indicator and Prognosis of Large Gold Ore Districts in Inner Mongolia[J]. *Acta Geoscientica Sinica*, 41(6): 818-826(in Chinese with English abstract).
- ZHOU Xiao-dong, WU Ling, CAO Quan-xin. 2007. Geochemical mapping and structure of geochemical blocks—Coding system and family tree diagram computer drawing[J]. *Geological Bulletin of China*, 26(7): 892-898(in Chinese with English abstract).
- ZHU Peng-fei, CAI Yu-qi, GUO Qing-yin, LIU Wu-sheng, LI Jian-hong, ZHANG Ming-lin, QI Fu-cheng, ZHANG Zi-long, JIA Li-cheng, XU Hao. 2018. Metallogenetic and geological characterization and resource potential assessment of uranium resources in China[J]. *Earth Science Frontiers*, 25(3): 148-158(in Chinese with English abstract).