

The Geotectonic Types of the Continent Uranium Region and Their Brief Evaluate

Zhenkai Yao¹, Hongye Huang¹, Xiang Liu², Yong Xu¹

¹Research Institute No. 230, CNNC, Changsha Hunan

²Hunan Nuclear Industry Geology Bureau, Changsha Hunan

Email: yaozhenkai123@163.com

Received: Apr. 21st, 2020; accepted: May 6th, 2020; published: May 13th, 2020

Abstract

About 72 continental uranium regions with a uranium resource of more than 20,000 t are formed in different mineralogentic epoches and occur in different tectonic layers. Based on the geotectonic ore-controlling point of view, this paper proposes the classification of geotectonic types in continental uranium mining area, which is divided into 5 categories, 15 sub-categories and 27 subclasses. The classification is based on the different attributes of the geotectonic strata in the mining area, the sub-categories are based on the time of uranium mineralization in the uranium mining area, the subclasses are divided according to the local tectonics and the main ore-bearing rock types in the mining area, and the main geotectonic types in the uranium mining area are briefly evaluated. This division is convenient and applicable in the evaluation of uranium mining area, and has certain reference significance.

Keywords

Continent, Uranium Region, Geotectonic Type, Activated Region, Brief Evaluate

大陆铀成矿区大地构造类型及其简要评价

姚振凯¹, 黄宏业¹, 刘翔², 徐勇¹

¹核工业二三〇研究所, 湖南 长沙

²湖南省核工业地质局, 湖南 长沙

Email: yaozhenkai123@163.com

收稿日期: 2020年4月21日; 录用日期: 2020年5月6日; 发布日期: 2020年5月13日

摘要

铀资源量大于2万t的主要大陆铀成矿区约72处,形成于不同成矿时代,产于不同大地构造层内。本文以铀成矿区为载体,依据大地构造控矿观点,提出大陆铀成矿区大地构造类型划分,分出5大类15亚类27小类。大类划分是按成矿区大地构造层的属性不同,亚类划分是按铀成矿区的铀成矿时代差别,小类划分是按成矿区的局部构造及含矿主岩类别的区分,并对铀成矿区主要大地构造类型作简要评价。这种划分在进行铀成矿区评价时较为方便适用,有一定的参考意义。

关键词

大陆, 铀成矿区, 大地构造类型, 活化区, 简要评价

Copyright © 2020 by author(s) and Hans Publishers Inc.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY 4.0).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



Open Access

1. 引言

大陆铀成矿区的大地构造类型划分,早已引起各国学者的重视,并进行了不同研究和划分。前人的分类基本上含盖原有的全球主要铀成矿区,大都强调活化构造作用对铀成矿的重要意义,并从活化构造成矿角度对铀成矿区大地构造类型作了划分。但前人多以铀矿床为载体和从矿床特征角度出发,而对铀成矿区的大地构造性质和演化及成矿评价论述较少。本文以铀成矿区为载体,依据活化构造成矿理论,在前人成果基础上结合笔者研究,提出大陆铀成矿区的大地构造类型划分,并对各主要大地构造类型铀成矿区作简要评价。

2. 前人对铀成矿区大地构造类型的分类

从已出版铀矿专著中,获知前人曾有多多个大陆铀成矿区大地构造类型划分方案。如前苏联学者 Ю.М. Шувалов и др. (1980) [1]划分出 3 大类 12 小类的铀成矿区大地构造类型,后又在 1984 年的专著中改为 3 大类 7 小类[2]。В.И. Величкин (1983) [3] 对内生成矿作用铀成矿区,划分出 4 大类 11 小类大地构造类型。俄罗斯学者 В. Е. Бойцов, А. А. Верчеба (2008) [4]划分出 3 大类 20 小类铀成矿区大地构造类型(表 1)。

尚未见从板块构造角度对铀成矿区的大地构造类型划分的专著。但笔者认为,板块构造理论对全球大地构与成矿关系研究作了重大贡献,只是板块构造登上大陆,特别是大陆铀成矿学研究还远远不足。笔者从 A. H. G. Mitchell, M. S. Garson (1986)《矿床与全球构造》[5]专著中,似乎可大致理出从板块构造角度对铀成矿区大地构造类型的划分,分为 4 大类 11 小类。大类划分是据大地构造环境,小类划分是按局部构造及其含矿主岩类别进行划分(表 2)。从表 2 看出,许多现有铀成矿区的大地构造类型尚未列入其分类,显然从板块构造角度研究铀成矿区大地构造类型,还有待进一步加强综合研究。

以上 5 种铀成矿区大地构造类型划分方案,都是依托铀矿床类型及其矿化特征,并以大地构造单元为基础,划分出不同的大类铀成矿区。亚类或小类的划分则各家持各不相同的原则或依据,有的按次级构造和含矿主岩类别划分,有的按铀成矿构造期或成矿时代划分。甚至还有对各亚类划分采用不相同原则,即对此亚类采用次级成矿构造划分,而对另亚类则采用铀成矿构造期划分。笔者认为,对同一类级别分类采用不相同的原则是不可取的。前 4 种分类是从传统大地构造观点和构造-岩浆活化构造观点划

分，都强调活化构造对铀成矿的重要意义[5]。前人的5种分类，均无量化概念，在对比成矿研究和进行铀成矿评价中显示出不足。

Table 1. The geotectonic types of the continent uranium region of the older

表 1. 前人对铀成矿区大地构造类型的分类

Ю.М. Шувалов и др. (1980)	В.И.Величкин (1983)	Ю.М.Шувалов и др. (1984)	В.Е.Бойцов, А.А.Верчеба (2008)
I 古地台和年青地台盖层 中新生活化区： 1 含铀磷块岩成矿区 2 含铀黑色页岩成矿区 3 磨拉石层水成成矿区 4 含煤地层水成成矿区 5 盖层间氧化带水成 成矿区 6 近地表钙结岩成矿区	I 古老地台含铀区： 1 后克拉通洼地成矿区 2 原始地槽带成矿区 3 原始活化成矿区	I 新老地台盖层及其中生代活化 区： 1 可渗透陆源碳酸盐岩 区 2 造山期杂色陆源层岩 区	I 古地台基底铀矿化区： 1 后克拉通及边缘古砾岩 成矿区 2 钠长岩成矿区 3 镁交代岩成矿区 4 塌陷角砾岩筒成矿区 5 白岗岩成矿区 6 中生代构造-岩浆活化 成矿区
II 显生宙活动带及显生宙活化区： 1 活化中间地块热液和 水成成矿区 2 中生代活化的古地台 成矿区	II 里菲 - 显生宙褶皱带 含铀区： 1 早里菲期成矿区 2 晚里菲期成矿区 3 加里东期成矿区 4 海西期成矿区 5 阿尔卑斯期成矿区	II 显生宙活动带及显生宙活化区： 1 活化中间地块及周围 冒地槽热液成矿区 2 早期稳定经中生代活化的古地台 热液成矿区	II 褶皱带铀矿化区： 1 石墨化构造带成矿区 2 脉状铀矿成矿区 3 黑色页岩成矿区 4 花岗岩地块成矿区 5 含铀磷灰岩成矿区 6 黄铁细晶岩成矿区 7 火山构造成矿区
III 古地台及地盾前寒武纪活化 区： 1 克拉通及边缘拗陷古砾 岩区 2 基底早期活化带 3 强花岗岩化的白岗岩区 4 古地台地堑台向斜 和冒地槽拗陷区	III 中生代构造 - 岩浆活 化含铀区： 1 活化地盾成矿区 2 活化地台成矿区 3 活化褶皱带成矿区	III 古地台及其前寒武 纪活化区： 1 克拉通及边缘拗陷古 砾岩区 2 古地台基底强花岗岩 化的白岗岩区 3 古地台地裂台向斜及 冒地槽拗陷区	III 古地台和年青地台盖层铀矿化 区： 1 砂岩成矿区 2 陆源和碳酸盐岩成矿区 3 含煤岩系成矿区 4 上叠陆源盆地成矿区 5 古河谷沉积成矿区 6 含鱼残骸泥岩成矿区 7 钙结岩成矿区

Table 2. The geotectonic types of the continent uranium region according to the plate tectonics

表 2. 板块构造观点划分铀成矿区大地构造类型 (据 A. H. G. Mitchell, M. S. Garson (1986)资料)

大类	小类	实例
1 大陆热点、裂谷、 拗拉槽中铀成矿区	1 大陆非造山的热点花岗岩有关铀成矿区	美国博坎山
	2 大陆裂谷内层控碳酸盐岩铜-铀成矿区	扎伊尔申科罗布韦
	3 被动大陆边缘盆地含铀磷块岩成矿区	阿拉伯 - 北非
2 被动大陆边缘盆地和成因 不明的大陆内部盆地铀成矿区	4 被动大陆边缘盆地含铀黑色页岩成矿区	瑞典南部
	5 成因不明的大陆盆地不整合脉型铀成矿区	加拿大阿萨巴斯卡
	6 成因不明的大陆盆地石英-卵石砾岩成矿区	南非威特沃特斯兰
	7 外弧花岗岩成矿区	苏格兰南部高地
3 与俯冲有关的构造环境 铀成矿区	8 弧后挤压克拉通盆地砂岩成矿区	美国怀俄明
	9 前陆冲断层带花岗岩成矿区	纳米比亚罗辛
4 与碰撞有关的构造环境 铀成矿区	10 前陆盆地砂岩成矿区	巴基斯坦-印度
	11 前陆和后陆的山间盆地花岗岩成矿区	法国中央地块

进入 21 世纪二十年来, 由于全世界铀矿找矿获得较大进展, 铀成矿区数量和类型随之有所增加。我国新发现产砂岩铀矿床群的伊盟、二连、松辽及巴丹吉林等铀成矿区。在世界其它各国也先后发现了一些新的铀成矿区及新的铀成矿区大地构造类型[6]。如在蒙古新增赛音山达砂岩型铀成矿区, 在俄罗斯东欧地台伏尔加台背斜新发现年青表生泥炭型铀成矿区, 在南美新增中安第斯山火山岩铀成矿区。在澳大利亚新增伊尔岗钙结岩型铀成矿区、弗洛姆砂岩型铀成矿区等等。产于古地台褶皱基底在白岗岩型罗辛铀成矿区, 在长达数十年内只有独生子式的纳米比亚罗辛特大型矿床, 只在 21 世纪头十年找矿获得重大突破, 在罗辛矿床南部新发现罗辛南(胡萨)超大型铀矿床及郎格-赫因利奇大型钙结岩铀矿床, 号称 21 世纪头十年世界铀矿找矿的最重大突破[7], 一跃成为新的大型大地构造类型铀成矿区。又如古地台褶皱基底的塌陷火山角砾杂岩型澳大利亚阿得雷德铀成矿区, 在 21 世纪前也只有唯一的一处奥林匹克坝特大型矿床, 在经过数十年的找矿后在奥林匹克坝矿床西北新发现普罗米特山等类似矿床, 成为新类型铀成矿区。随着今后铀矿找矿的不断进展和人们认识的加深, 相信还会有更多新的铀成矿区及新的铀成矿区大地构造类型的发现, 需要对大地构造铀成矿学[8]进行及时的必要充实。

3. 本文对铀成矿区的大地构造类型划分

3.1. 铀成矿区含义和命名

铀成矿区术语应用较为广泛, 有时也比较混乱, 尤其对英语 province 俄语 ПРОВИНЦИЯ 一词, 在字典中都同译为区、省、域。而在成矿学应用中相应地译为成矿区、成矿省、成矿域。对同一等级区用不同词义表达, 或不同等级区用同一词表述。各学者使用过程中对此术语也不统一, 各人理解差异较大。有的用于大面积的地盾、地台区, 有的用于小范围的向斜、背斜区。因此, 本文从大地构造成矿角度, 认为有必要先给铀成矿区(带)含义定为最小一级的基本大地构造成矿单元或区域构造成矿单元, 并在前端加以构造区名称进行冠名, 以反映成矿区规模和大致边界范围。当成矿单元不呈带状形态产出时称之为铀成矿区, 如伊犁铀成矿区, 伊盟铀成矿区, 阿萨巴斯卡铀成矿区等。当呈带状形态分布时称其为铀成矿带, 如中克兹尔库姆铀成矿带、武夷山铀成矿带等。由此可见, 本文所称的成矿区与矿床学通常用的成矿区术语有所不同, 成矿范围较大, 而且是强调以大地构造或区域构造单元进行命名。

铀成矿区依大地构造单元级别划分, 归属为三级大地构造成矿单元。更大级别的大地构造成矿单元叫铀成矿省, 属二级大地构造铀成矿单元, 多限于在同一大陆洲范围内, 并冠以大地构造单元名称。如天山铀成矿省在亚洲内, 科迪勒拉铀成矿省位于北美洲内, 波罗的地盾铀成矿省位于欧洲等。最大级别的大地构造成矿单元称洲际铀成矿带或洲际铀成矿域, 属一级大地构造铀成矿单元, 如亚欧东西向铀成矿带[9], 科迪勒拉-安第斯山铀成矿带, 阿拉伯-非洲铀成矿域等。

3.2. 铀成矿区大地构造类型划分原则

对铀成矿区大地构造类型划分, 必须采用统一的分类原则。本文采用的下列 3 条主要原则: ① 公用原则, 即要便于产学研中使用, 简洁明了, 层次分明原则。② 多数学者所采用的统一分级划分的原则。本文分类采用三级划分, 不同级别划分原则有所不同, 但同级别划分原则是相同的。大类划分是按成矿区大地构造性质的不同属性及其与活化构造关系, 亚类划分是按成矿区活化成矿时代的差异, 小类划分是按局部铀成矿构造和含矿主岩类别的不同。③ 笔者首次探索提出的量化标准原则, 即矿床数量及铀资源数量标准原则。尽管这是动态性原则, 目的是便于在成矿学对比和铀成矿评价中进行类比。本文采用铀成矿区量化最低标准是 3 处矿床以上, 铀资源量大于 2×10^4 t (含已采资源量), 而不取决铀矿床类型, 也不设矿床类型数量的标准。如果在某构造区内只形成单个独立矿床, 尽管其铀资源量很大, 依然为矿床, 甚至不宜称矿田, 更不能称其为铀成矿区。或者虽有多处铀矿床, 而铀资源总量未达 2×10^4 t, 本文

也未列入铀成矿区范畴, 只作矿田看待。如美国阿利桑那州有 8 处塌陷角砾岩筒型铀矿床, 但铀资源总量只有 1.2×10^4 t [10], 故未列入铀成矿区之列。小型铀成矿区铀资源量为 $(2\sim 5) \times 10^4$ t, 中型铀成矿区为 $5\sim 20 \times 10^4$ t。大型铀成矿区为 $(20\sim 50) \times 10^4$ t, 如俄罗斯维季姆和额尔古纳, 澳大利亚派因-克里克, 尼日尔阿加德兹等大型铀成矿区等。当成矿区铀资源量 $> 50 \times 10^4$ t 时, 归为超大型铀成矿区, 如哈萨克斯坦楚-萨雷苏, 加拿大阿萨巴斯卡, 纳米比亚罗辛及捷克波希米亚等超大型铀成矿区等。

3.3. 铀成矿区大地构造类型划分方案

铀是一种地球化学性质较为活泼的重金属元素, 铀成矿作用可在不同时代的大地构造环境中产生, 形成多种不同含矿主岩类型的铀成矿区[11]。因此, 本文提出的铀成矿区大地构造类型划分方案较为庞大。

本文依活化构造成矿理论[8], 提出铀成矿区大地构造类型划分方案, 分为 5 大类 15 亚类 27 种小类(表 3)。分类采用三级划分, 大类划分是按成矿区大地构造性质的不同属性及其与活化构造成矿关系, 分为地盾活化区、古地台活化区和古地台未活化区, 年青地台活化区和中间地块活化区等 5 大类型铀成矿区。各大类内的亚类划分, 是按成矿区活化成矿时代的差异, 分成若干亚类。如古、中、新元古代, 早、晚古生代, 中、新生代等, 共划分出 15 个亚类。迄今尚未发现太古宙的铀成矿区。各亚类内再按局部铀成矿构造和含矿主岩类别的不同, 分成若干小类。如古石英卵石砾岩、石墨片岩、钠长岩、火山角砾岩、白岗岩、钾交代岩、花岗岩、火山岩、黑色页岩、碳酸盐岩、砂岩、钙结岩等等。同一种含矿主岩可出现在不同时代或不同成矿构造区内, 当一个铀成矿区有多种含矿主岩时, 以占铀资源量最多的主岩类别确定归属, 共分为 27 个小类。这种分级划分方案似乎有些繁杂, 但较适合在产学研中使用, 并可为今后新发现的类型留有补充空间。

同一大地构造类型的铀成矿区, 可在世界各地出现多处地质矿化特征相似的铀成矿区, 如古地台活化古石英卵石砾岩铀成矿区, 有南非维特瓦特斯兰成矿区及加拿大布兰德河成矿区等。又如中间地块活化砂岩铀成矿区, 有美国科罗拉多、俄罗斯维季姆铀及我国松辽铀成矿区等。

Table 3. The geotectonic types of the continent uranium region

表 3. 铀成矿区大地构造类型

大 类	亚 类	小 类	实 例	
1 地盾活化区	1 地 Pt ₁ 活化	1 断褶带碱交代岩型	乌克兰基洛夫格勒等	
		2 不整合面上部砂岩型	加拿大阿萨巴斯卡	
	2 Pt ₂ 活化	3 不整合面富含碳质片岩型	俄东部古塔尔	
		4 断褶带钾交代岩型	俄东部阿尔丹	
	2 古地台活化区	4 Pt ₁ 活化	5 盆地古石英-卵石砾岩型	南非维特瓦特斯兰
		5 Pt ₂ 活化	6 不整合面下石墨片岩型	北澳派因-克里克
			7 塌陷赤铁矿火山角砾杂岩型	南澳阿得雷德
3 未活化古地台区	6 Pt ₃ 活化	8 断褶带白岗岩型	纳米比亚罗辛	
		9 裂谷带碳酸盐岩型	中非加丹加	
	7 Mz 活化	10 断块隆起砂岩型	华北伊盟隆起	
		11 盆地热叠砂岩型	尼日尔阿加德兹	
3 未活化古地台区	8 Kz 活化	12 隆起区钙结岩型	西澳伊尔岗	
		13 台背斜泥炭型	伏尔加	
	9 未活化	14 台向斜煤岩型	莫斯科郊外	

Continued

4 年青地台活化区	10 Mz 活化	15 隆起区花岗岩型	华南南岭
		16 隆起区火山岩型	华东赣杭 NE 构造带
		17 隆起区砂岩型	乌中部中克兹尔库姆
	11 Kz 活化	18 盆地砂岩型	哈东南楚萨雷苏
		19 盆地碳酸盐岩型	乌东部费尔干纳
5 中间地块活化区	12 Pz ₁ 活化	20 滨海含鱼骨残骸泥岩型	西哈曼基什拉克
	13 Pz ₂ 活化	21 断块隆起碱交代岩型	北哈科克塔切夫
		22 断隆区碳硅质板岩和砂岩	捷克波希米亚
		23 断块隆起花岗岩型	法国中央
	14 Mz 活化	24 洼地火山岩型	俄东额尔古纳
	15 Kz 活化	25 盆地砂岩型	美国科罗拉多等
		26 盆地煤-砂岩型	中哈边境伊犁
		27 古河谷砂岩型	俄东部维季姆

根据笔者所了解到的 2019 年前文献资料和网上调查及自身研究, 全球大陆可划分出 72 个主要铀成矿区, 分布于全球六大洲大陆, 其中绝大部分铀成矿区的形成, 均与不同时代的活化成矿作用有着密切的时空和成因联系。本文对铀成矿区大地构造类型的划分, 采用分级别序列表示, 第一级别序列为大类顺序, 第二级别序列为亚类顺序, 第三级别序列为小类顺序, 各级别序列内均标有铀成矿区实例(表 3)。

4. 铀成矿区大地构造类型简要成矿评价

本文对各类型的大地构造铀成矿区进行简要评价时, 首先考虑的是活化构造成矿区和未活化构造成矿区的差别, 并从铀成矿演化时代的四维空间评价角度, 以及针对铀成矿区可能存在的前地槽、地槽、地台和活化等 4 种大地构造层, 或相应的 4 个大地构造阶段的成矿演化作用, 再结合成矿区内铀资源的量化标准, 便于进行铀成矿学对比和铀成矿评价, 对所划分的主要的大陆铀成矿区大地构造类型分别进行简要成矿评价。

4.1. 地盾活化铀成矿区成矿评价

众所周知, 地盾属古地台的一部分, 是其太古宙前地槽结晶基底和地槽褶皱基底一直缓慢隆升, 并大面积出露地表的地区。在古地台阶段沉积保存程度不一, 或未能接受沉积, 或有过沉积而已被剥蚀未能保存, 导致前地槽和地槽构造层普遍明显, 有些地盾保存有地台构造层, 而活化构造层只是小范围的局部分布, 形成 3~4 层结构的大地构造剖面特点。由于地盾内分布着大型铀成矿区较多, 两种基底富含铀, 大地构造剖面结构较为复杂特殊, 本文特从古地台中划出作为单独的大地构造类型铀成矿区看待。全球已知地盾约 8 处, 其中 6 处较大的有加拿大、乌克兰、波罗的、印度、南美和阿尔丹等地盾, 较小的是西伯利亚古塔尔和阿纳尔巴特地盾。对于非洲和澳大利亚地盾存在不同看法, 本文将其看作为古陆块, 归属为古地台区。除阿纳尔巴特地盾内尚未发现铀成矿区及其活化构造还不清楚外, 其余 7 处地盾均各有 1~3 处铀成矿分布, 而且都与活化构造成矿密切相关[12], 只是产生活化成矿时代和大地构造剖面结构有所不同, 形成铀资源量有所区别。乌克兰基洛夫格勒古元古代活化碱交代岩型铀成矿区, 古地台构造层不明显, 活化构造层也不发育, 在前地槽和地槽构造层内产有铀资源量达 28×10^4 t。加拿大

阿萨巴斯卡铀成矿区, 中元古代古地台构造层砂岩厚度保存近半, 地槽构造层的石墨片岩富铀, 活化构造层不发育, 虽近年在地槽基底层内发现富大铀矿床, 但多数铀资源量仍赋存于地台构造层砂岩内, 形成不整合面型成矿区铀资源量达 101×10^4 t。俄罗斯阿尔丹中生代活化钾交代岩型铀成矿区, 铀资源量达 90×10^4 t, 以及古塔尔中元古代活化富碳质片岩型等 4 种地盾活化类型铀成矿区(表 3)。类似于乌克兰基洛夫格勒铀成矿区的, 还有南美圣弗郎西斯科地盾活化铀成矿区, 由此可见地盾活化铀成矿区的重要性。

该大类铀成矿区评价通常是太古宙前地槽结晶基底和古元古代褶皱基底, 以及含矿主岩铀质量分数及成熟度都较高, 特别是两种基底铀质量分数越高越有利于成矿。现发现的此类铀成矿区两种基底和含矿主岩都是富铀的, 如果基底和含矿主岩不富铀, 或许难以形成铀成矿区。基底大多经历了多阶段的强烈花岗岩化、片麻岩化、混合岩化, 以及多期次断裂活化作用, 钾钠交代岩发育, 含铀量高, 为尔后铀活化成矿提供初始成矿铀源。如乌克兰太古宙前地槽结晶基底出露面积大范围广, 花岗岩类的铀质量分数达 6.7×10^{-6} , 在托科夫花岗岩铀质量分数甚至达到 100×10^{-6} [13]。在加拿大地盾阿萨巴斯卡盆地之下太古宙结晶基底的花岗岩铀质量分数为 $(3.2 \sim 15) \times 10^{-6}$, 富铀的辉绿岩铀质量分数达 300×10^{-6} 。

地盾的前地槽结晶基底通过后来的多期次构造运动改造, 常形成由深大断裂制约的断块隆起构造区。在铀含量高的花岗岩类和变质岩类区的深大断裂两侧, 有利形成各种内生铀矿床。有的地盾活化区因活化铀成矿作用产生早, 如乌克兰地盾和波罗的地盾, 在古元古代就产生活化铀成矿作用, 而且一直延续至新生代, 产生的铀活化成矿时代跨度最大, 最早的有古元古代主成矿年龄为 1800~1750 Ma, 最晚的有新生代古河谷砂岩型铀成矿年龄, 活化铀成矿作用延续达 1700 Ma。乌克兰地盾中部在古元古代花岗岩基底内产有新康士达琴诺夫超大型铀矿床, 在太古宙前地槽结晶基底花岗岩类内的深大断裂旁侧产有米丘林、谢维林等超大型铀矿床, 以及在古元古代地槽褶皱基底的铁质石英岩深大断裂带内产有黄水、五一和克里沃罗克等大型铀矿床。这些大型和超大型铀矿床的含矿主岩均属碱交代岩型, 都看作是深熔前地槽和地槽构造层内的富铀花岗岩类及富铀的变质岩类的成矿机理。含矿主岩成岩年龄为 3500~2400 Ma, 而主成矿年龄为 1800~1750 Ma, 矿岩时差最大约达 1500 Ma。后又由于这些富铀岩类和铀矿床出露地表, 经后期的地质构造作用和表生成矿作用, 再形成表生后成铀矿床。在乌克兰地盾中东部形成众多的新生代古河道砂岩型铀矿床, 成为一种以内生作用铀成矿为主, 并有表生后成铀矿化叠加的重要大型铀成矿区。而大陆现今地槽褶皱区内未发现铀成矿区分布。

4.2. 古地台活化铀成矿区成矿评价

全球古地台共有 15 处, 并非所有古地台内都有铀成矿区分布。当前只有非洲、东欧、西伯利亚、中朝、印度、澳洲、北美、南美等 8 处古地台内有铀成矿区分布[4], 而且绝大多数都与古地台后活化成矿作用密切有关。古地台活化铀成矿区内, 有多种活化时代亚类和多种局部构造及多种含矿主岩小类的铀成矿区, 活化成矿时间跨度大, 含矿主岩类别多, 占有铀资源量比重大, 形成大型或超大型铀成矿区多。现已发现古中新元古宙、中新代等 5 个不同活化时代亚类, 及不同局部构造和不同含矿主岩的 8 种小类的大型和特大型铀成矿区。著名的南澳阿得雷德(高勒)赤铁矿火山角砾杂岩铀成矿区资源量—— 98×10^4 t, 纳米比亚罗辛白岗岩型成矿区—— 66×10^4 t, 尼日尔阿加德兹砂岩铀成矿区—— 47.5×10^4 t, 北澳派因-克里克不整合面石墨片岩铀成矿区—— 37×10^4 t, 南非维特瓦尔斯古石英-卵石砾岩铀成矿区—— 32×10^4 t, 以及新兴的我国伊盟隆起砂岩铀成矿区等是其例, 可见其重要意义非同一般。

古地台活化铀成矿区的评价, 还包括其各大地构造层的含铀性及含矿岩性评价。在前地槽结晶基底及地槽褶皱基底的岩层厚, 分布范围广及其富铀性, 对形成铀成矿区具有重要意义。如在西澳大利亚伊尔岗钙结岩铀成矿区, 太古宙前地槽结晶基底内的富铀花岗岩内, 形成近代超大型钙结岩铀矿床。除成矿有利的其它因素外, 足见其花岗岩结晶基底富铀性, 可能远远超过乌克兰地盾中部前地槽结晶基底的

花岗岩富铀程度，只是尚未见具体含铀量数值的报导。在澳大利亚早元古代派因-克里克地槽褶皱基底卡希尔组的石墨片岩，铀质量分数达 130×10^{-6} ，在前地槽结晶基底的花岗岩铀质量分数达 12.5×10^{-6} 。这种区域性的富铀前地槽结晶基底和地槽褶皱基底，在其后漫长的大地构造演化中，常有花岗岩类侵入，火山岩喷发，线性断裂和韧性剪切带发育，极为有利形成多种工业铀矿床。在古地台的地台构造层和活化构造层内的含铀砾岩、砂岩、和碳酸盐岩(含钙结岩)的岩性，除其本身具有不同的含铀性外，更为重要的是为尔后活化阶段铀成矿提供了有利成矿的岩性环境，在断裂构造叠加作用下又提供了有利的储矿空间，这种有利成矿的岩性因素也应给以足够份量的评价。

需要特别强调指出，产于古地台区内不同大地构造层内的工业矿床的铀成矿作用，并非属同大地构造阶段沉积成矿作用所形成，而是在古地台活化阶段晚期形成，就连钙结岩中的工业铀矿化也是属先成岩后成矿，存在明显的矿岩时差。矿体多受穿切前地槽结晶基底和地槽褶皱基底及地台层的断裂控制，工业铀矿石年龄也与古地台活化阶段合拍，并具有成岩后成矿的矿化特点。古地台活化成矿区铀成矿作用与构造-岩浆活化的密切关系，放在年青地台活化区成矿作用中一并论述。

4.3. 未活化古地台铀成矿区成矿评价

该铀成矿区包含的亚类和小类的铀成矿区少之又少，而且只发现小型的铀成矿区，所占铀资源量比重也不大。目前只在东欧古地台伏尔加台背斜中富碳泥层内发现 19 处中小型年青表生铀矿床，在莫斯科台向斜煤层内产有 7 处小型煤岩铀矿床，构成泥炭型和煤岩型两种小类铀成矿区。这种成群产出的年青表生泥炭型铀矿床，由于矿体埋深浅，采冶成本低，又不存在环境保护问题，可按全成矿区集中统一计算铀储量，采用移动式采冶设备装置，仍有较好的经济效益，成为新的找矿方向之一[14]，故而不宜忽视。

4.4. 年青地台活化铀成矿区成矿评价

年青地台活化铀成矿区，因形成的地质时代比古地台晚，产生活化的地质时代随之变晚，主要在中新生代产生活化，并伴有多种类型的大型铀成矿区形成。如盆地内的砂岩型和碳酸盐岩型，隆起区的砂岩型、花岗岩型和火山岩型，滨海含鱼骨残骸泥岩型铀成矿区等等。上述类型铀成矿区占有铀资源比重也大，特别是砂岩铀成矿区产有许多超大型铀矿床，采用地浸法采铀，开发成本低廉，经济效益显著，正受到世界铀矿业界的极大关注。

由于地台阶段总体上是少有强烈的构造-岩浆活动，多为脉动性的弱构造运动，沉积环境相对稳定，延续时间较长。形成浅海相和陆相沉积发育，沉积厚度大，分布范围广，沉积物分选性较好，具多韵律性特点，有利形成泥炭质层和砂岩层中铀的预富集。如中亚图兰地台在地台阶段形成富铀砂岩层，为其后活化阶段楚-萨雷苏和锡尔达林盆地叠加成矿，提供了极为有利岩性环境和成矿场所，在有利的构造-地球化学成矿环境下，形成一批外生后成的超大型和大型层间氧化带砂岩铀成矿区[15]。如在哈萨克斯坦楚-萨雷苏砂岩铀成矿区铀资源量超 60×10^4 t，在乌兹别克斯坦中克兹尔库姆砂岩铀成矿区—— 30×10^4 t 等。

也有不少年青地台和古地台活化区内，构造-岩浆活化作用明显，甚至强烈发育。笔者认为活化阶段的构造-岩浆活化，不同于地槽阶段构造-岩浆活化，两者不宜混淆。活化阶段构造-岩浆作用发育，或是使先成断裂活化，或是新形成不同方向的断块断裂广布，产生隆起与断陷并存，或形成年轻的活化造山带。如天山造山带和科迪勒拉-安第斯造山带，属重叠在先前的地槽褶皱造山带之上形成的活化造山带。活化造山带继承或改造先前各大地构造阶段形成的铀矿床或铀源层，或新形成铀矿床，产生不同大地构造阶段形成的铀矿床并存的铀矿床组合。

按地台活化区构造-岩浆活化作用方式和特点，可分成 4 种类活化区：① 侵入-构造活化区，有大

规模的酸性花岗岩体侵入,形成复式花岗岩类岩体,以形成花岗岩型、碱交代岩型等矿床为主。如我国南岭铀成矿带、苗儿山-越城岭铀成矿区等。② 火山-构造活化区,火山喷发岩广泛分布,以形成火山岩型铀矿床为主。如我国赣杭 NE 向构造铀成矿带。③ 侵入+火山-构造活化区,侵入岩浆和火山岩浆活化都强烈,有大型花岗岩类岩体侵入及强烈中酸性火山岩喷发,形成火山岩型和花岗岩型铀矿床为主[16][17],如我国武夷山铀成矿带。④ 无或弱岩浆-构造活化区,岩浆活化不明显或缺失,形成砂岩型铀矿床为主,还有含鱼残骸泥岩型铀矿床等。如哈萨克斯坦楚-萨雷苏、我国伊盟铀成矿区及哈萨克斯坦曼基什拉克铀成矿区等。

4.5. 中间地块活化铀成矿区成矿评价

有些学者把中间地块列入地槽褶皱带范畴,因而把中间地块内的一些铀成矿区,列入地槽褶皱带成矿区论述。笔者支持俄罗斯 A. Д.Щеглов [18]院士观点,把中间地块单独划分出来,一些中间地块虽受其周边地槽构造运动的影响,产生反射活化作用,但在大地构造和铀成矿演化方面与地槽褶皱带相比仍存在更多的不同,甚至有质的差别,而是更偏向于小地台特点。

中间地块活化铀成矿区大地构造剖面结构,与地台活化区相似,可能由前地槽、地槽、地台和活化等 4 个大地构造层组成,具有相对应的不同大地构造阶段形成的有利铀成矿因素,先后相互叠加成矿较为普遍,形成的铀成矿区较多,占有铀资源数量比重也大,工业意义重大。

最具代表性的中间地块活化铀成矿区,是捷克波希米亚中间地块活化铀成矿区[19],产有一批超大型铀矿床,其铀资源量达 70×10^4 t,成为一个超大型铀成矿区。该成矿区太古宙-古元古代前地槽结晶基底富铀,花岗岩铀质量分数为 $(5\sim 15) \times 10^{-6}$,中元古代-早古生代地槽褶皱基底碳硅质片岩铀质量分数为 5.7×10^{-6} ,晚古生代接受地台沉积,后经受海西期地槽回返构造运动产生反射活化作用,及其后的中生代多次活化构造作用成矿叠加,形成砂岩型、黑色页岩型和花岗岩型等超大型工业铀矿床。在哈萨克斯坦肯-楚-别中间地块活化铀成矿区内,形成与海西期火山岩和花岗岩有关的铀矿石年龄,保存于海西地槽构造层内。同时又有中生代活化阶段改造叠加的铀成矿作用及活化阶段的铀矿石年龄,致使不同大地构造阶段的铀矿化产于同一矿床内,即所谓的“多代同堂”矿床[8]。与之相类似的中间地块活化铀成矿区数量,在全世界不是个位数,据笔者统计数量不下二十处。如亚欧东西向构造铀成矿带[19]和阿尔卑斯及北美科迪勒拉活化造山铀成矿带内,均分布有类似中间地块活化铀成矿区分布。

4.6. 活化构造铀成矿区成矿评价补述

综上所述地盾、地台、中间地块和已固结先前的地槽区,在其形成之后的漫长的元古代至中生代地质时期中,可能经历了不同时期的各种构造-岩浆活化作用,可形成不同地质时代和不同类型的构造-岩浆活化区及不同类型铀矿床。铀成矿作用是产生在强烈的构造-岩浆活化之后紧随的相对宁静期,同时又有多次活化成矿作用产生,导致有多个铀成矿时代年龄值。活化铀成矿的时代越早,主要铀成矿作用时代随之较早,整个铀成矿作用延续时间就越长。以地盾古元古代活化铀成矿区,及古地台元古宙活化铀成矿区的铀成矿时代最早,主成矿时代多为元古代,铀成矿作用延续时间至中生代,主成矿期后的延续时间最长可达 1500 Ma,说明是活化阶段的早期成矿。年青地台和部分中间地块中生代活化铀成矿区,铀成矿时代偏晚,铀成矿延续时间也就随之偏短,主成矿期后的延续时间相对也较短,通常为 30~50 Ma,说明属活化阶段中晚期成矿,华东南的一些活化铀成矿区是其例[11]。整体而言,活化构造铀成矿区是分布较为广泛的大地构造成矿区之一,形成的铀矿床类型多,铀成矿时间跨度长[20],占有铀资源量规模大,工业意义最为重要。

活化构造铀成矿区内,除上述各类型铀成矿区外,还有非常规铀资源的低铀品位黑色页岩和磷块岩

铀成矿区。如波罗的地盾活化区内的瑞典、芬兰及我国年青地台活化区的雪峰山黑色页岩成矿区，及非洲大陆北缘受阿尔卑斯构造运动产生活化的滨地中海含铀磷块岩成矿区，产有数量众多的低品位铀矿床。在芬兰维纳恩黑色页岩铀成矿区内，铀资源量达 $130 \times 10^4 \text{ t}$ [7]。在非洲大陆北缘活化成矿区，含铀磷块岩内的铀资源量也很大。只因上述两类铀成矿区的矿床，矿石工艺技术问题尚未获得工业性解决，或因矿石铀品位低开发成本高而不化算，至今未能得到开发利用，仅作为潜在铀资源储备。

5. 结语

(1) 铀成矿区大地构造类型划分，是以大地构造单元属性及与活化构造关系为基础，划分出 5 个大类。依铀成矿时代分出 15 个亚类，按成矿局部构造和含矿主岩划分为 27 个小类。铀成矿区属基本的大地构造成矿单元列为三级，二级大地构造成矿单元是铀成矿省，最大一级的大地构造铀成矿单元是洲际铀成矿带(域)。

(2) 铀成矿区大地构造类型的划分，采用统一分类原则，特别是相同级别类型采用相同原则划分，并引入量化标准，便于进行铀成矿对比研究和铀成矿评价，还有利于发现新的铀成矿区大地构造类型。

(3) 绝大多数铀成矿区的成矿作用，与活化构造有密切的时空和成因联系。以古地台含地盾、中间地块及年青地台活化构造区，形成的铀成矿区分布最广，数量最多，规模最大，工业意义最为重要。

(4) 铀成矿区可形成于除太古宙外的任何地质时代的多种不同岩性。以元古宙和中生代活化铀成矿区分布最广。古生代活化铀成区分布相对较少，而未活化的各种大地构造铀成矿区分布更少，成矿规模总体也较小。

基金项目

受中国核工业地质局铀矿勘查项目(项目名称:湘南地区铀矿资源调查评价与勘查,项目编号:201916)资助。

参考文献

- [1] Ю.М.Шувалов и др. (1980) Металлогения урана котинетальных блоков Земной коры. ИздаТельство “Недра”, 20-195.
- [2] Ю.М.Шувалов и др. (1984) Промышленные типы урановых месиорождений и методика их поысков Москва. 13-25.
- [3] Величкин, В.И. (1983) Особенности металлогении ураноносных областей. Энергоатом Издат, Москва, 125-195.
- [4] Бойцов, В.Е. andВерчеба, А.А. (2008) Геолого-промышленные типы месиорождений урана. Универстет книжный дом, Москва, 29-279.
- [5] A.H.G.Mitchell, M.S.Garson. 矿床与全球构造[M]. 北京: 地质出版社, 1986: 21-198.
- [6] 姚振凯, 黄宏业, 刘翔. 新世纪陆壳新增铀成矿区及其简要特征[J]. 中南铀矿地质, 2019, 23(2): 60-64.
- [7] Liu, X.D. (2018) New Uranium Deposits and Innovation Technologies for Uranium Exploration. East China University of Technology, Fuzhou, 4-64.
- [8] 陈国达, 杨心宜. 活化构造成矿学[M]. 长沙: 湖南教育出版社, 2003: 171-246+602-643.
- [9] 姚振凯, 刘翔, 郑大瑜. 亚欧东西向活化构造铀成矿带划分依据及铀成矿域分布[J]. 铀矿地质, 2014, 30(4): 193-199.
- [10] Dahlkamp, F.J. (1991) Uranium Ore Deposits. Springer, Berlin, Heidelberg, New York, 324-330.
- [11] 姚振凯. 我国铀矿床的大地构造类型及其主要特征[J]. 大地构造与成矿学, 1983, 7(2): 117-125.
- [12] Л.В. Григорьева. (1986) Докембрийская тестоно-магматическая активизация. Недрa, Ленинград, 33-112.
- [13] 赵凤民. 欧亚大陆铀区域成矿模式[M]. 北京: 核工业北京地质研究院, 2016: 27-30+80-94+138-149.
- [14] 姚振凯, 范立亭, 黄宏业. 俄罗斯铀矿地质工作新进展[J]. 世界核地质科学, 2017, 34(4): 194-199.

- [15] И.Г.Печенкин. (2003) Металлогения Туранской плиты. Москва, ВИМС, 14-45.
<https://doi.org/10.1093/combul/45.6.14>
- [16] Yao, Z.K., Liu, Y.H., Zhu, R.B., Yang, S.H. and Li, D.P. (1989) Uranium Metallogenesis in Southeast China. Metallogenesis of Uranium Deposits. IAEA, Vienna, 345-356.
- [17] 黄净白, 黄世杰, 张金带, 等. 中国铀成矿带概论[M]. 北京: 中国核工业地质局, 2005: 75-83+215-244.
- [18] А.Д.Щеглов. (1971) Металлогения срединных массивов. Изд. нера, Москва, 20-48+72-78.
- [19] 姚振凯, 范立亭, 黄宏业, 等. 亚欧大陆东西向活化构造带中间地块铀成矿特征[J]. 世界核地质科学, 2019, 36(1): 1-9.
- [20] 姚振凯. 中国地洼区层控铀矿床地质和分布规律[J]. 矿床地质, 1982, 1(1): 83-88.