

放射性水文地质学

A.H.托卡列夫
A.B.謝尔巴科夫 著

地质出版社

放射性水文地质学

A. H. 托卡列夫

A. B. 謝尔巴科夫 著

沈照理 王恒純 譯

地质出版社

1960·北京

А. Н. ТОКАРЕВ, А. В. ЩЕРБАКОВ

РАДИОГИДРОГЕОЛОГИЯ

ГОСГЕОЛТЕХИЗДАТ

МОСКВА 1956

本書是作者根据本人研究天然水放射性多年工作的成果及很多有关苏联放射性水文地質的研究資料編写而成的。書中詳細地闡明了放射性水的形成条件，它們在放射性元素矿床生存中的作用以及它們的調查研究方法。

本書可以作为从事放射性元素矿床普查与勘探的地質人員及水文地質人員方法指南書，也可以作为地質学院、矿业学院及綜合大学地質专业及水文地質工程地質专业师生的教学参考書。

全書由北京地質学院水文地質教研室 沈照理、王恒純 翻譯，其中第二篇第二章一小部分由張介濤翻譯。

放射性水文地質学

著 者 А. Н. 托卡列夫 А. В. 謝尔巴科夫

譯 者 沈 照 理 王 恒 純

出版者 地 質 出 版 社

北京西四羊市大街地質部內

北京市書刊出版業營業登記證出字第050号

发 行 者 新 華 書 店 科 技 发 行 所

經 售 者 各 地 新 華 書 店

印 刷 者 北 京 西 四 印 刷 厂

印数(京)1—7500册

1960年4月北京第1版

开本850×1168^{1/2}

1960年4月第1次印刷

字数205,000

印张7³/₄ 插頁11

定价(10) 1.50 元

目 录

序言	7
----------	---

第 一 篇

放射性水文地质学原理

第一章 天然水富集放射性元素的条件	9
关于放射性元素的一般知识	9
放射性元素的物理化学性质	10
放射性元素的地球化学性质	14
放射性元素在岩石中的含量及存在形式	16
具正常分散含量放射性元素的岩石	17
具增高分散含量放射性元素的岩石	21
具放射性元素矿石集中的岩石	21
只具锕次生集中的岩石	24
放射性元素的原始迁移	25
形成放射性水的水文地质条件	27
区域气候的意义	27
成层岩石圈水文地质动力分带的意义	28
地质构造的开启程度	33
岩石及地下水的物理性质	36
岩石的射气性能	36
吸附作用	39
水的温度动态	41
地下水的化学成分及电化学性质	43
水的盐类成分	43
水的气体成分	55
地下水的电化学性质	57
地下水的变质作用	64

第二章 天然放射性水的类型及其形成	67
天然水中放射性元素的含量及放射性水	
的分类原则	67
氡水	74
风化壳氡水	75
构造裂隙氡水	77
射气聚集氡水	79
镭水	80
地表水池的镭水	81
富集分散状铀的沉积岩及变质岩的铀水及铀镭水	84
铀氡水及铀氢镭水	85
热液铀矿床氧化带的水	85
沉积铀矿床氧化带的水	89
氢镭水	91
第三章 铀矿床形成及破坏的水文地质条件	95
概述	95
铀集中形成的基本因素	98
铀为热水溶液的富集	98
铀为热水溶液的迁移	101
铀集中的沉淀	103
铀集中破坏的基本因素	106
关于水文地质带与地球化学带相互关系的一般概念	106
普遍性或区域性因素	107
地方性或局部性因素	113

第 二 篇

放射性水文地质调查方法

第一章 一般问题	118
放射性水文地质调查的依据及找矿方法	118
水中氡的含量	121
水中镭的含量	122
水中铀的含量	124
放射性水文地质调查的阶段及专门任务	126
找矿-勘探放射性水文地质调查	126

	5
找矿-測量放射性水文地質調查	127
找矿-勘探放射性水文地質調查	128
开采矿床时的放射性水文地質調查	130
第二章 野外放射性水文地質調查的組織及进行	132
科学資料的准备	132
工作設計書的編制及批准	133
野外队的組織	133
野外放射性水文地質調查	134
天然泉及湿地的研究	134
井、探井及矿井的研究	146
鑽孔的研究	147
鑽进时的观测	147
鑽孔的抽水取样	152
自流鑽孔的取样	163
地表水流及水池的研究	165
水流取样	165
水池取样	167
第三章 放射性水文地質資料解釋問題的方法指示	170
总則	170
不同水文地質帶中放射性水文地質資料的解釋特点	171
放射性水文地質取样資料的解釋	175
航空放射性地質調查資料的水文地質解釋	197
用放射性水文地質方法普查鈾集中的基本要求	199
第四章 水及气体的放射性測定方法	202
水中氫含量的測定	202
气体中氫含量的測定	205
水中鎂含量的測定	206
水的伽瑪—活动性的測定	208
水中鈾含量的測定	209
第五章 放射性水資源計算法	213
地下放射性水資源的确定	213
天然資源的确定	214
开采資源的确定	217
永久儲量的确定	220

总儲量的确定	223
地下水开采资源的分类	224
地表放射性水儲量的确定	224
第六章 室内工作	227
图表資料的編制	227
放射性水文地质图	227
放射性水文地质分区	230
水的化学分析及放射性化学分析結果的图表表示法	234
报告原文	235
附图 1 — 8	244—248
参考文献	238

“与鈷相反，鈷能滲入液体、自然水，并存在于溶液中，然而可以想到它在每一种自然水中都以极稀薄的状态存在。任一种自然水都是放射性的，而且由于上面提到的易溶的自然鈷化合物在生物界分布甚广，因此研究水的放射性时不仅要研究鐳和氡，而且要研究鈷……”。

В. И. 維爾納德斯基

序 言

1896年发现某些元素的放射性蜕变现象后开始了对自然形成物：岩石、矿物及水的放射性的系统研究。

1902—1904年間在某些矿泉水中发现有鐳射气——氡存在，并且这种具有高含量氡的水就获得了放射性水的名称。以后这个术语不仅用于具高含量氡的水，而且具有其他放射性元素高含量的水亦用它了。富集氡的水对人体有良好的作用，因此不管在苏联领土上，还是在外国，对许多医疗矿泉均组织了调查研究。

本世纪卅年代，在一系列油田的高矿化水中发现有鐳及其同位素 $MbThI$ 及 ThX 的大量存在，有时其浓度很大而有工业意义；因此为了区别于具高含量鐳射气的水——氡水，这种具高含量鐳的水被列为放射性水的特殊一组，称为含鐳水或鐳水。1930—1940年間在苏联领土上进行的大量调查与研究证实，不仅油田水具高含量的鐳，而且在苏联领土上分布很广的所有的氯化鈉—鈣型高矿化水也都是如此。

直到不久以前进行水的放射性的研究还仅仅是为了矿泉医学的目的（矿泉氡水）或者是为了鐳工业对放射性水的利用（鐳水）。自然水中鈷——最重要的放射性元素系列中的元素（Родональчик）——的含量未进行研究（个别的例外），这是因为测定微量鈷的方法未研究好。

近年来，借助較灵敏的分析方法，在最主要的鈾矿区研究了地下水的放射性化学成分，这些研究指出了按地下水的放射性化学成分寻找鈾矿床的可能性。根据这些研究的成果，可以指出天然水富集放射性元素的条件，提出放射性水分类及分区的方案，拟訂放射性水文地質的研究方法，定出主要的放射性水文地質标志及討論有关鈾矿床形成及破坏的水文地質条件的問題。

本書是根據作者們研究天然水放射性多年工作的資料并利用了許多有关苏联領土的放射性水文地質研究的著作而編著的。放射性元素的矿物学及地球化学的知識取自 В.И. 維尔納德斯基，А.Е. 費爾斯曼，Д.И. 謝尔巴科夫，А.Г. 別捷赫琴，В.Г. 米尔科夫，А.А. 薩烏科夫，В.В. 謝尔宾納等的著作。

“放射性水文地質学”一書是闡明放射性水形成条件，它們在放射性元素矿床生存中的作用以及它們的研究方法的初試。它可以作为从事普查与勘探放射性元素矿床的工程技術人員的方法指南，也可以作为矿业——地質高等学校学生学习“放射性水文地質学”課程的教學参考書。

第一篇（“放射性水文地質学原理”）第一章及第二章由 А.Н. 托卡列夫編写，第三章由 А.В. 謝尔巴科夫編写；第二篇（“放射性水文地質調查方法”）主要由 А.В. 謝尔巴科夫編写。А.Н. 托卡列夫参加了第三章的編写。第三章“放射性水文地質取样資料的解釋”一节由 А.И. 格爾曼諾夫編写，第六章“放射性水文地質分区”一节由 А.А. 馬加維也夫編写。

作者們对本書科学編輯 Д.И. 謝戈列夫教授及地質矿物科学博士 В.В. 謝尔宾納在审閱手稿时所提供的寶貴意見表示深切的感謝。对一切批評意見作者們都将十分感激。意見可寄至国立地質保矿科技書籍出版社。

第一篇

放射性水文地质学原理

第一章 天然水富集放射性元素的条件

关于放射性元素的一般知识

天然水富集放射性元素的条件及天然放射性水的形成条件是各式各样的,且十分复杂。各种类型放射性水的分布,成分及成因决定于一系列复杂的地质、水文地质及物理化学条件。这些问题只有研究了放射性元素在地下水中的迁移作用及放射性元素在岩石中集中与分散条件以后才能阐明。

现在已很清楚地查明,地下水对放射性元素的迁移有着十分重大的作用。一方面地下水影响着岩石中放射性元素的含量,而另一方面地下水中放射性元素的含量本身决定于岩石及矿石中放射性元素的存在形式与集中程度。在岩石中的与在其周围的水中放射性元素含量之间存在着动态的平衡,这个平衡当地下水运动时常常由于放射性蜕变或由于地下水与岩石间的某些作用:溶滤,溶解,氧化,吸附,沉淀,射气等作用而被破坏。

放射性水是岩石圈各式各样的天然水中成因上十分有趣而又复杂的一组。放射性元素由岩石转入地下水的各种不同的条件,种类繁多的放射性元素迁移,集中及分散作用形成了各种类型的放射性水。

在地壳上部热动力带(风化带),地下水对放射性元素的迁移起着决定性的作用。正是地下水的活动首先决定着放射性元素

自岩石及矿石中提出及它们的分散，同样决定着放射性元素一切次生集中的形成。在有一些物理化学条件下地下水决定着放射性元素矿床聚集的形成，而在另一些条件下则使已存在的放射性矿床遭受强烈的破坏。在一定的水文化学条件下，放射性元素在地下水中可以集中达很大的数值，因而具有工业意义或作为找矿标志。

所有这些都决定着研究各种类型放射性水形成及分布的基本规律的重要性。

自然水富集放射性元素的条件及各种类型放射性水的形成条件决定于下述基本因素：

- (1) 放射性元素的物理化学性质；
- (2) 岩石中放射性元素的含量及存在形式；
- (3) 水文地质条件；
- (4) 地下水的化学成分；
- (5) 岩石及地下水的物理性质。

放射性元素的物理化学性质

某些元素自行蜕变并放出一定能量的性质称为放射性。原子序数大于83（这是铋的原子序数，见表1）的所有化学元素都是放射性的。但是有些较轻的元素（钾，钍及镭）亦具有弱放射性。现在知道的放射性元素已达数百，但是除铀，钍及镭以外，其他的都是极少量的。

放射性元素的原子是不稳定的、并渐渐被破坏，形成了性质与母元素不同的新的原子，新的化学元素。放射性蜕变的理论基础是每一原子蜕变时不取决于其他原子。任何放射性蜕变时会放出被称为 α -射线， β -射线或 γ -射线的某些射线（放出质点），它们对物质具有各种不同的作用：物理的、化学的及生物的。它们与物质相互作用的结果能产生二次射线—— γ -射线及二次 β -射线与 γ -射线。

α -射线是带正电荷的、以 $1.4 \times 10^8 - 2.06 \times 10^8$ 公里/秒速度

运动着的氢原子流。每一 α -质点带二单位电荷,并具有氢原子四倍的质量。 α -质点在空气中的行程等于2.5—9公分,在固体及液体中大大减小。 α -质点在运动时使空气十分强烈地离子化,每 α -质点在自身的路途上形成离子达 1.16×10^5 对。

β -射线是第一单位电荷,质量为氢原子的 $1/1840$ 的快速运动着的电子流。 β -质点的速度等于 $1 \times 10^8 - 3 \times 10^8$ 公里/秒。 β -射线较 α -射线具有更大的穿透能力,但其离子化能力较小。在自身的路途上形成 $1 \times 10^3 - 2.7 \times 10^3$ 对离子。

γ -射线象钢琴射线,是波长很短(达 1.5×10^{-11} 公分)的电磁振动。 γ -射线具有最大的穿透能力(它们能穿入金属达数十公分)及最小的离子化能力。

α -, β -, γ -射线的吸收按下列规则进行

$$I = I_0 e^{-\mu x},$$

式中 I_0 ——开始的辐射强度;

I ——穿入厚为 x 的层以后的辐射强度;

μ ——该物质中的吸收系数。

放射性辐射使气体离子化的性能,即由中性分子分裂出电子的性能是它们最重要的性质,就是这种性质被利用来测定放射性元素的数量。

因此,元素原子蜕变时会放出 α -或 β -质点,它们的数量与进行蜕变的原子的数量相符。但是放射性转变不仅可以以放射性放射的方式,而且亦可以由原子核夺取外层电子(K-夺取)的方式来完成的;无论是第一种还是第二种作用,都引起了原子核总电荷的改变。

大家知道,元素在门捷列夫周期系中的位置决定了元素的原子序数;因此,元素的物理化学性质亦决定于以单位电荷来表示的核的电荷值。核放出带电质点后,其总电荷有了改变,元素在周期系中亦占据了另一位置:它变成了具有新的物理化学性质的别的元素了。这样,阐明了放射性现象的实质后可得出结论:一元素通过蜕变方式可以转变成另一元素,这个元素又可变成下一

元素，如此轉變下去，直到得到了不能變化的元素為止。該元素全部變化的總和稱為放射系列或族。

放射性轉變服從下述的轉移規則。

1. 放出 α -質点后元素在周期系中向左移二位置。同時原子量減少4。

2. 放出 β -質点后元素在周期系中向右移一位置。原子量不變。

3. “K-奪取”時元素在周期系中向左移一位置，原子量不變。

這些規則可確定所有放射性元素的相互關係及把它們分布在周期系中。原來，原子量及放射性性質不同的元素系列具有相同的核電荷，因此，在元素周期系中佔據了同一位置。這種現象稱為同位素。它不僅是放射性元素具有，同樣非放射性元素亦具有。

現在全部已知的放射性元素及其同位素（包括超鈾的）綜合為四族：

(1) 放射性鈾族，該族的方程式為： $A = 4n$ ，式中 A ——元素的質量數（同位素的原子量）及 n ——整數；

(2) 放射性錒族： $A = 4n + 1$ ；

(3) 放射性釷族： $A = 4n + 2$ ；

(4) 放射性錒族： $A = 4n + 3$ 。

由表2可知，這些放射性族的元素彼此間的連系非常複雜，亦很多，而且常常有著幾個首要元素（родоначальные элементы）。

現在已知的放射性元素很多，在自然水中發現的遠非全部；有些元素因為在水中的量太少，所採用的測定方法無效而未被發現，另外有一些則根本未探討出測定它們的方法。

水中含量最多的是釷系列的元素：釷（U），鐳（Ra）及錒（Rn）；自這系列的其他元素中發現釷變化的短命產物（короткоживущие продукты）：鐳A（RaA），鐳B（RaB），鐳C（RaC），鐳D（RaD）及鐳E（RaE）在天然水中亦有少量存

1. 鉀 族

放射性衰變示意图

III	Cm	96					
IV	Am	95					
V	Pu	94					
VI	Np	93					
VI	U	92	$U^{238}U$ (III I) $4.5 \cdot 10^9$ 年				
V	Pa	91	$Pa^{231}U$ (III I) 1.4 分	$Pa^{234}U$ (III I) 99.6% β 1.16 分	$U^{234}U$ (III II) $2.3 \cdot 10^5$ 年		
IV	Th	90	$Th^{232}Th$ (III X) $1.4 \cdot 10^{10}$ 年	$Th^{230}Th$ (III I) $83 \cdot 10^3$ 年			
III	Ac	89					
II	Ra	88		$Ra^{226}Ra$ (III I) 1590 年			
I	Fr	87					
0	Em	86		$Em^{227}Em$ (III I) $1.8 \cdot 10^5$ 年			
VII	At	85					
VI	Po	84		$Po^{210}Po$ (III A) 138 分	$At^{210}At$ (III I) $8.3 \cdot 10^{-8}$ 年		
V	Bi	83		$Bi^{214}Bi$ (III C) 19.7 分	$Po^{214}Po$ (III C) $1.6 \cdot 10^{-4}$ 年		
IV	Pb	82		$Pb^{214}Pb$ (III B) 26.8 分	$Po^{214}Po$ (III D) $1.6 \cdot 10^{-4}$ 年	$Pb^{210}Pb$ (III E) 5.0 年	$Po^{210}Po$ (III F) 138 分
III	Tl	81		$Tl^{210}Tl$ (III C) 1.32 分		$Tl^{210}Tl$ (III E) 4.23 分	

及沸点为 1140° 的銀色易被氧化的金屬。

鐳亦是放射性元素，当它蛻变时轉变成氡。鐳的半蛻期等于1590年。鐳在天然水中的含量以每升所含的克数表示。

釷X及新釷I是鐳的同位素，并且是釷蛻变的产物。它們的物理及化学性質与鐳的性質相似。ThX及MaThI在天然水中含量以每公升所含的平衡釷的克数表示。ThX的半蛻期等于3.64日，MaThI的为6.7年。

氡是鐳的蛻变产物，是比重为0.00996克/公分³，熔点为 -71° 及沸点为 -61.8° 的惰性气体。 0° 时它的溶解度为100份的水能溶解它51份。氡的原子序数为86，原子量为222.0，它位于元素周期系的零族，是氦、氖、氩及氙的相似物。当氡自身蛻变时形成蛻变的短命产物：RaA, RaB, RaC等。氡的半蛻期等于3.8日。

一般采用居里——与一克鐳呈放射性平衡的氡的量——作为測量氡量的基本单位。作为更小的单位的有：毫居里 $=1 \times 10^{-3}$ 居里，微居里 $=1 \times 10^{-6}$ 居里，毫微居里 $=1 \times 10^{-9}$ 居里，埃曼(эман) $=1 \times 10^{-10}$ 居里以及誘导的单位——馬海单位(махе)。氡在水中的含量用每升所含的埃曼数偶而用每公升所含的馬海单位(M.E.)数測定。

上述单位相互之間的关系如下：

$$1 \text{ 居里/升} = 1 \times 10^{10} \text{ 埃曼/升} = 2.75 \times 10^9 \text{ M.E.}$$

$$1 \text{ 埃曼/升} = 1 \cdot 10^{-10} \text{ 居里/升} = 0.275 \text{ M.E.}$$

$$1 \text{ M.E.} = 3.64 \times 10^{-10} \text{ 居里/升} = 3.64 \text{ 埃曼/升.}$$

放射性元素的地球化学性質

鈾是最重要的放射性元素系列的首要元素。鈾的地球化学基本特点决定于它在元素周期系中的位置：

1. 鈾的原子量为238.07，說明鈾原子核的質量很大，这一点决定了鈾原子的不稳定性，即其放射性蛻变。

2. 地壳內原子序数及原子量高的元素比輕的元素更为稀有，但是原子序数为偶数的鈾(92)却比邻近非偶数的元素分布更

广。

3. 元素周期系的族数愈高，则元素的酸性表现愈明显，但是原子序数及原子量愈大，则其碱性表现愈明显。

4. 由于铀位于周期系第六族（铀系列），它具有分布在数层上的六个价电子。这指出铀位于不同氧化程度（3，4，5，6）的可能性，这就使元素的地球化学复杂化了，因为它的各种不同价数的离子在自然界中的方式各不相同，并且能参与氧化-还原反应。

5. 丢失了全部价电子后铀形成了离子，其外层有八个电子，即形成了按惰性气体原子模型构成的，且属于亲石元素的离子。这就决定了：

（1）铀在酸性矽酸盐类岩石中的存在；

（2）在自然界中铀以氧化物的形式存在，而不是以硫化物，硒化物，砷化物及锑化物的形式存在，这是因为它們强烈水解的结果；

（3）与氧有很高的共同性，这决定着氧化物的稳定性及在自然界中无铀的自然金属；

（4）六价铀离子的极化性弱，这决定了它的化合物很多是溶解度弱的。

假如在化学中有六价，四价及三价的铀的化合物，那么在自然化合物中只见它的四价及六价化合物。四价的是高温铀矿物或在强还原环境中形成的它的表生化合物（поверхностные соединения）。大多数表生形成物是六价铀的化合物。

铀的六价及四价自然化合物是：二氧化物 UO_2 ，倍半氧化物 U_2O_5 及三氧化物 UO_3 。在无过剩的游离氧的深部作用条件下二氧化铀——2167°时熔化的黑立方体结晶——是稳定的。应该指出在晶质铀矿（ UO_2 ）中有某些量过剩的氧存在，这部分氧在矿物中由于铀的放射性蜕变而形成。随着温度的降低亦可能发生 U^{4+} 至 U^{6+} 的内生氧化作用。

与黑色的 UO_2 及黑绿色的 U_3O_8 不同，三氧化铀在并不太高的

溫度（达600°）及大气压力下形成，具有黄色的特征。研究了一系列的鈾的氧化物以后，知道它們独有的特点：可以不破坏結晶格架地溶解大量的成分相似的鈾的氧化物。

鐳的地球化学特性几乎沒有研究过。在自然界中鐳以极分散的状态存在而不形成矿物。看样子， $RaSO_4$ 型的鐳化合物（鐳重晶石等）在自然条件下是存在的，但是它們都是不长久的且只呈現很分散的状态。

放射性元素在岩石中的含量及存在形式

所有地下水，由于与它們在其中循环着的岩石相互作用的結果，都富集了放射性元素。因此放射性元素在岩石中的绝对含量，分布及存在形式是决定放射性元素在地下水中的积聚条件的基本因素。只有具相对高含量放射性元素的岩石能形成放射性水。

全部岩石按其中放射性元素的含量可分为二大組：

（1）具放射性元素正常分散含量的岩石；

（2）放射性元素浓度高的岩石，其中有：

①放射性元素浓度高的，但为分散的含量的岩石，

②具有鈾及鐳的矿石集中（рудная концентрация）的岩石，

③只具有鐳次生集中（вторичная концентрация）的岩石。

元素的“矿石集中”，“分散状态”概念我們是指成因上的、地球化学的意义，并不把它与百分、工业、标准含量連系起来。因此对元素的矿石集中我們指的是在矿物学上具一定形式的元素聚集，而对元素的分散含量（状态）指的是該元素或以离子形式（作为副矿物的类質同象混合物），或以位于造岩矿物結晶格架以外的鈾化合物的半显微質点的形式，比較均匀地分在全部岩石体中。当然，这一情况并不排斥元素分布的某些不均匀性及窝状分布的可能性。矿石集中的元素常具后生性質，且与围岩具較显著的接触，而分散状态的元素常具同生或同生-后生性質。