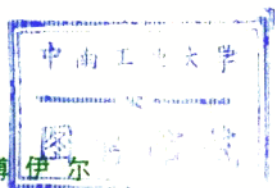


663390

高等学校教学参考书

铀和钍矿床的 地球化学普查

[加] R.W.博伊尔



教 学 参 考 书

铀和钍矿床的地球化学普查

〔加〕 R. W. Boyle 著

朱文泉 周镭庭 于铭强 傅祥林 译

原 子 能 出 版 社

内 容 提 要

加拿大地质调查局R. W. Boyle在三十余年钍、铀矿床化探研究的基础上,综合已有文献资料编写了本书。全书共十章,分别论述钍和铀的普通化学和地球化学、伴生元素、原生晕和次生晕、化探普查选区,各种方法的原理和应用实例以及分析方法。有关找矿方法的章节所附的实例,可用来说明它们的适用性、局限性和成效。全书共附参考文献约1500篇,从中可查索到1980年底以前国外公开发表的有关钍、铀矿床化探的出版物。本书可作为有关地质专业的大专院校以及从事钍、铀矿床化探工作的同志们的参考。

geochemical prospecting for thorium and uranium deposits
R. W. Boyle
ELSEVIER SCIENTIFIC PUBLISHING COMPANY, 1982

教学参考书

钍和铀矿床的地球化学普查

[加]R. W. Boyle 著

朱文泉 周镛庭 于铭强 傅祥林

原子能出版社出版

(北京2108信箱)

重庆印制一厂印刷

(重庆市中区枇杷山后街70号)

新华书店总店科技发行所发行·新华书店经售

☆

开本 850×1168 1/32·印张16.75·字数 445千字

1988年6月北京第一版·1988年6月北京第一次印刷

印数 1—1000

统一书号, 15175·878 定价, 2.75元

ISBN 7-5022-0023-1/TL·6

前 言

写作本书的目的，是为了选择适用于寻找各类型钍、铀矿床的不同的地球化学方法进行分析。希望这里所提供的资料 and 看法，能对方法的应用和研究起促进作用，特别是对那些迄今为止较少受人注意的方法。

第一章扼要地论述了钍和铀的普通化学和地球化学，接着的一章介绍这两种元素的矿床，重点是指示元素、矿床周围钍和铀的原生晕和次生分散晕的性质。下面的七章是本书的主要部分，论述钍和铀的化探普查、选区，如何以岩石（岩石化学测量）、疏松物质（土壤化学测量）、天然水和底沉积（水化学测量）、生物物质（生物地球化学测量）、气体（气体化学测量）和其他为基础，在所选定的地区内进行普查、放射性测量和地球化学测量。最后一章很短，综述探测和测定钍和铀的物理和化学方法。

所有用于分析的地球化学方法都适用于普查钍和铀，特别是在那些由于覆盖、水、深度淋滤等引起射线衰减、放射性测量无法使用的地方。综合运用地质图象识别、分析地球化学测量和放射性测量方法，能够增加发现铀和(或)钍矿体的机会。

致 谢

钍、铀矿床化探部分的很多内容取材于野外讲习班的一系列教材。该讲习班是在1975年9—10月期间，由国际原子能机构在奥地利的穆尔巴赫和福斯陶地区主办的(Smith et al., 1976)。多数材料在1965年之前就已编纂，但由于六十年代后期钍、铀矿床普查活动的普遍低落而没有发表。本专著在原编纂和研究的基础上，增补了最新研究成果。后一项工作的很多部分，是作者以及他在加拿大地质调查局的同事们直到1980年末还在继续进行的。

作者感谢国际原子能机构已故的J. Cameron 博士和联合国开发计划署/国际原子能机构的A. Y. Smith，他们让我有机会在奥地利为来自世界各地21个国家的22名学生授课。作者在加拿大地质调查局和私人公司的一些同事们阅读并讨论了手稿的各个章节，还用其他方法进行了协助，对此谨表衷心的感谢。作者还特别感谢S. Abbey, S. B. Ballantyne, R. T. Bell, G. R. Bernius, D. R. Boyle, E. M. Cameron, J. M. Carson, B. W. Charbonneau, W. B. Coker, A. G. Darnley, C. C. Durham, W. Dyck, K. L. Ford, R. G. Garrett, C. F. Gleeson, W. D. Goodfellow, R. L. Grasty, G. E. M. Hall, E. H. W. Hornbrook, I. R. Jonasson, P. G. Killeen, P. J. Lavergne, J. Lee, J. J. Lynch, Y. T. Maurice, K. A. Richardson, V. Ruzicka, B. W. Smee, M. Tauchid 和L. P. Tremblay。插图是由加拿大地质调查局R. F. Daugherty领导完成的。本书所引证的很多钍、铀分析结果，是渥太华Bondar—Clegg and Co., Ltd 实验室、渥太华加拿大原子能有限公司、加拿大地质调查局地球化学处和分析化学处完成的。上述各实验室的分析人员进行了辛勤的工作；地质调查局的J. J. Lynch, G. E. M. Hall和S. Abbey以及原来在

Bondar-Clegg and Co. Ltd工作的E. G. Beals对赋存于钍、铀矿床中或与其共生的、难分析的无机和有机物质的分析工作，提出了宝贵的意见，对此致以诚挚的谢意。

我要特别感谢加拿大地质调查局的A. H. Lang博士和H. R. Steacy先生。自从1950年我开始从事钍和铀的地球化学工作以来，他们多年来就这二个元素为我提供了很多资料。我还要感谢从事矿山地质和勘探的许多地质人员，他们人数众多，无法在此一一列举姓名。他们允许我在世界很多地方参观他们的矿床，利用他们的化探成果，同他们讨论地质问题。我希望本专著有助于他们的钍、铀矿床普查工作。

手稿、表格和插图的编辑、参考文献、打字和校对是一项繁琐而艰巨的工作。我把它分配给了很多人，他们理应得到我的最诚挚的感谢。我特别感谢加拿大地质调查局文字处理中心的J. Legere小姐和D. Busby小姐和其他人员。她们打印了最后审定的手稿。感谢Mary Ann Blondin夫人编排并打印了参考文献。最后我要谢谢我的夫人Marguerite。她多年来协助我在野外工作并收集本书资料，她对众多的参考文献进行了检查、通读、修正，并对最后清稿提出很多改进性的意见。

这种类型的书籍是已有文献中的化探数据和地质资料同个人的研究资料 and 思想相结合，加以综合提高的产物。就我而言，我已工作了三十余年。因此，我以深切感激的心情，对那些钍、铀矿床文献的作者们和普查方法的研究者们致以谢意。我致力于尽可能全面地总结1980年底以前就这个题目发表的文献。遗憾的是篇幅有限，很多文献的综述只能省略。好在这些文献都能从所附的参考文献中查找到，或从该文献所列的会议文集以及其他出版物中得到。

目 录

前言

第一章	钍和铀的普通化学和地球化学.....	(1)
第二章	钍和铀矿床以及它们的指示元素.....	(46)
第三章	钍和铀的地球化学普查——选区和放射性 测量.....	(145)
第四章	钍和铀的地球化学普查——岩石化学测量.....	(201)
第五章	钍和铀的地球化学普查——土壤化学测量.....	(287)
第六章	钍和铀的地球化学普查——水化学测量.....	(310)
第七章	钍和铀的地球化学普查——生物地球化学 测量.....	(354)
第八章	钍和铀的地球化学普查——气体化学测量.....	(373)
第九章	钍和铀的地球化学普查——其他方法.....	(393)
第十章	钍和铀测定的样品取样步骤和分析方法.....	(406)

第一章 钍和铀的普通化学 和地球化学

概 述

有关钍和铀的化学及地球化学的文献甚多,除了金外,可能比周期表中任何两种元素的文献都多。出现这一情况的原因是所有技术先进的国家均非常重视核原料,他们既重视它的建设性的作用,也注重其危害的效果。已经出版了许多全面论述钍、铀化学的论文,其中包括如下作者的论文: Dounce和Flagg(1949); Katz 和 Rabinowitch (1951); Gmelin (1955,1979); Katz和Seaborg(1957); Wilhelm (1958); Grainger(1958); Hyde (1960); Grindler(1962); Cunningham(1964); Cotton 和 Wilkinson (1966); Cordfunke (1969) 和 Bagnall (1972, 1975)。许多作者全面描述了钍、铀及其同位素地球化学的不同方面,这些作者是:Raukama和Sahama(1959); Rankama(1954, 1963); Goldschmidt(1958); Adams等(1959); Aswathanarayana(1961); Dybek (1962); Hostetler 和 Garrels (1962); Vinogradov (1963); Shcherbina(1972); Wedepohl (1974); Kuznetsov 等 (1975); Grandstaff(1976); Kochenov等(1977); Langmuir (1978); Yermolayev和Garanin (1978)。下述作者系统地论述了钍和铀的矿物学: Soboleva和Ludovkina (1957); Volberth (1958); Frondel (1958); Heinrich(1958); Walenta (1965); Frondel等(1967); Elevatorski(1978a)和Steacy, Kaima及Morton (参阅Kimberley, 1978)。

钍和铀属锕系元素,是强正电性金属。钍是ⅡB族的最后一位元素; 铀则是ⅢB族的最后一位元素(表8)。由于4f和5f壳层在锕系(La-Lu)和锕系(Ac-Lw)中分别相继填满,因此这两个系

的许多相应元素之间有一定的密切的化学关系。在钍和铀之间这种关系显著，而钍和铀之间却不显著。

钍和铀在性质上都是明显亲氧的。前者主要生成氧化物、硅酸盐、磷酸盐；后者生成氧化物、络合含水氧化物和氢氧化物、硅酸盐、磷酸盐、钒酸盐、钼酸盐、碳酸盐、硫酸盐、硫酸盐-碳酸盐、砷酸盐、透石膏和黄碲矿。在自然环境下尚未见到天然的金属钍和铀，也未发现它们的硫化物、硒化物和碲化物。这两种元素都是亲生物的，在不同的生物体中均有发现，在某些条件下还能在有机化合物中富集，例如在腐殖质、煤、石油、沥青及碳铀钍矿中。

钍有两种正氧化价态：3价和4价。3价态较少见，且在水溶液中不稳定。铀有四种正氧化价态：3、4、5、6价。后三种在水溶液中较稳定。在自然环境下，钍通常以4价氧化态存在，铀则为4价和6价。钍和铀均能形成离子键合程度显著的化合物。但还有很多化合物具有共价键或呈半金属化合物，特别是铀。在自然界中，具有立方对称和萤石结构的结晶化合物特别稳定，例如 UO_2 （晶质铀矿）和 ThO_2 （方钍石）。几乎所有在氧化条件下生成的铀络合次生（表生）氧化物、硅酸盐、碳酸盐、硫酸盐、磷酸盐、砷酸盐、钼酸盐、钒酸盐和透石膏都含有分子水或羟基，这就是说，这些成分是稳定其结构所必需的。在次生（表生）铀矿物中，具有似云母结构的那些铀矿物（钒钾铀矿和钙铀云母）特别稳定。在普通含钍矿物中，Ce-Th正磷酸盐、独居石，甚至在氧化条件下也具有特别稳定的结构。

钍

普通化学

原子序数为90的钍(Th)是锕系中的第二个元素。在自然界中钍有6个同位素，其中丰度最大和寿命最长的是 ^{232}Th ，该同位素是天然放射性钍衰变系列(4n)中的第一位元素，经过一系

表 1 钍衰变系列(4n)

放射性元素	核 素	原子序数	衰变类型 (辐射)	半 衰 期
钍	^{232}Th	90	α	1.39×10^{10} 年
新钍 1	^{228}Pa	89	β^-	6.7 年
新钍 2	^{228}Ac	89	β^-	6.13 时
射钍	^{228}Th	90	α	1.91 年
钍 X	^{224}Ra	88	α	3.64 天
钍射气	^{220}Rn	86	α	55.3 秒
钍 A	^{216}Po	84	α, β^-	0.158 秒
钍 B	^{212}Pb	82	β^-	10.64 时
钍 C	^{212}Bi	83	β^-, α	60.5 分
64% β^- 钍 C'	^{212}Po	84	α	3.04×10^{-7} 秒
36% α 钍 C''	^{208}Tl	81	β^-	3.1 分
钍 D	^{208}Pb	82	稳定	

列衰变而最后产生 ^{208}Pb (表1, 图1)。该衰变系列中的某些中间同位素(特别是 ^{208}Tl), 对地球化学普查有意义(见以后的论述)。 ^{232}Th 同位素能吸收慢中子而变成 ^{233}U , 而后者在慢中子作用下能裂变, 因此 ^{232}Th 在增殖反应堆中可作为核燃料使用。

钍仅有一个在地球化学普查中有重要意义的主要氧化态, $\text{Th}(\text{IV})$ 。在化学上, 钍在某些方面类似锆和铪, 在许多方面类似于某些稀土元素, 特别是铈。在高温条件下钍和铀的化学性质也有些类似。在矿物中, 由于离子半径和其他重要因素存在互代性, Th 通常能广泛地取代 Zr (在锆矿物中); 在大多数稀土矿物中 Th 能取代 Y 、 Ce 和其他镧系元素; 在某些铀矿物中, 铀能被钍取代。在自然界中 $\text{Th}(\text{IV})$ 互变的一般循环示于图2。

在 $\text{pH} > 3$ 的条件下, 钍 $\text{Th}(\text{IV})$ 与水发生广泛作用(水解), 水解产物首先是单分子的和齐聚的化合物, 然后是胶状的聚合络合物。在这方面, 钍的化学特性类似于硅、钛、锆和铪。

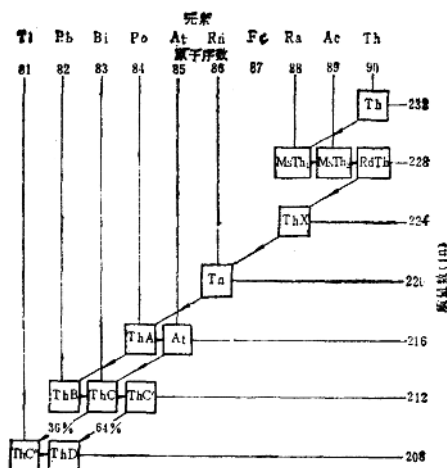


图1 钍系列(4n)的简明衰变图

斜线箭头表示 α 衰变, 水平线箭头表示(阴电子) β 衰变。

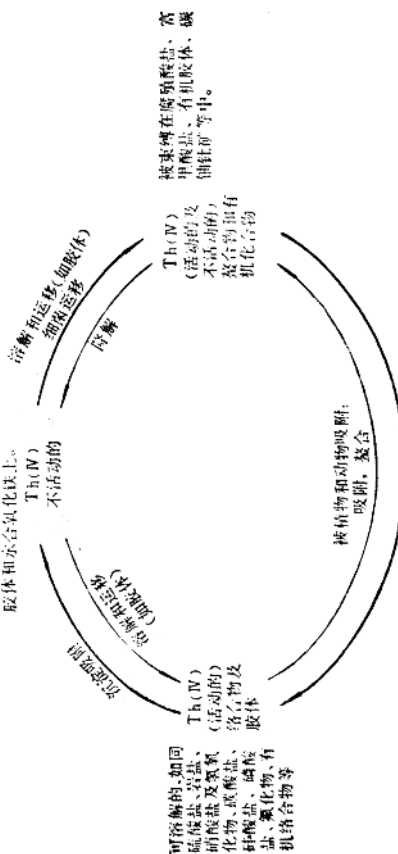
钍系的所有元素的质量数都等于 $4n$, n 为整数

二氧化钍比Ⅳ族前面几个元素(Si、Ge、Sn、Pb、Ti、Zr、Hf)的氧化物碱性更强; 它的盐类较少水解, 而且钍不形成简单的氧化离子(不象铀那样), 这一特点说明在自然界中不存在此种化合物。水化的氧化物, 或称为氢氧化物 $[\text{Th}(\text{OH})_4]_n$, 易于在强酸中溶解, 水化的正盐 $\text{Th}(\text{SO}_4)_2 \cdot 8\text{H}_2\text{O}$ 能从溶液中沉淀出来。向正盐溶液中加入碱, 能沉淀出碱式盐(例如 $\text{ThOSO}_4 \cdot \text{H}_2\text{O}$), 与碱、碱土金属和其他离子一起, 很容易形成各种复盐。

在水中, 氢氧化钍太不易溶, 而且具有明显的胶体特性。溶胶 $(\text{ThO}_2 \cdot n\text{H}_2\text{O})$ 显示出具有螺旋状的纤维形态, 带有正电荷。这种氢氧化物能强烈吸收二氧化碳而形成不溶解的含氧碳酸钍 (ThOCO_3) 。碳酸钠和其他碳酸盐溶液也能够从钍溶液中沉淀出这种化合物。

常见的可溶性钍盐有硝酸盐、硫酸盐和氯化物。属于这种盐

被束缚在方柱石和斜长石矿物中
在晶质铀矿、锆石、独居石、钍铀矿、褐
帘石等中作为U、Zr、Ce等的置换离子
被束缚。
作为被吸附的离子或络合物固定在粘土
胶体和含水氧化铁上。



细菌和化学降解

$Th(IV) \rightleftharpoons Th(III)$ 反应是可能的, 但在自然界中不会发生,
因为Th(III)在含水环境中是不稳定的

图2 自然界中Th(IV)互变的循环

类的还有 $\text{Na}_6(\text{Th}(\text{CO}_3)_6)$ 类型的可溶碳酸复盐, 当在钍溶液中加入过量的碱金属碳酸盐时, 便会形成这种碳酸复盐。四氟化物极不易溶于水。各种磷酸盐、络酸盐和钼酸盐也不溶于水。四氟化钍在高温(500°C 以上)条件下具有明显的挥发性, 钍的氢硼化合物 $[\text{Th}(\text{BH}_4)_4]$ 是一种高挥发性物质。已知有钍的卤氧化物(ThOCl_2)和羟基卤化物($\text{Th}(\text{OH})_2\text{Cl}_2$), 而且卤化物与碱金属能形成不同的复盐。草酸钍在水中能少量溶解, 醋酸盐、碱式醋酸盐和酒石酸盐是不溶解的或仅能轻微溶解, 它们都能形成可溶的络合物。如上所述, 氯化物和其他可溶盐类在水介质中都受到彻底的水解。

高电荷 $\text{Th}(\text{IV})$ 离子能与溶液中存在的阴离子形成络离子。其中对钍的地球化学有意义的是各种氯化物络离子, 如 $[\text{ThCl}]^{3+}$ 、 $[\text{ThCl}_2]^{2+}$ 、 $[\text{ThCl}_3]^+$ 和 $[\text{ThCl}_4]^0$; 还有氟化物络离子, 如 $[\text{ThF}]^{3+}$ 、 $[\text{ThF}_2]^{2+}$ 、 $[\text{ThF}_3]^+$ 和 $[\text{ThF}_4]^{0-}$; 硝酸盐络离子, 如 $[\text{Th}(\text{NO}_3)_2]^{2+}$; 硫酸盐络离子, 如 $[\text{ThSO}_4]^{2+}$ 、 $[\text{Th}(\text{SO}_4)_2]^0$ 、 $[\text{Th}(\text{HSO}_4 \cdot \text{SO}_4)]^+$ 及 $[\text{ThO}(\text{SO}_4)_2]^{2-}$; 碳酸盐络离子, 如 $[\text{Th}(\text{CO}_3)_3]^{2-}$ 、 $[\text{Th}(\text{CO}_3)_6]^{4-}$ 及 $[\text{Th}(\text{CO}_3)_4(\text{OH})_2]^{0-}$ 。此外, 还有一些氢氧化物络离子, 如 $[\text{Th}(\text{OH}_4)]^0$ 、 $[\text{Th}(\text{OH})]^{3+}$ 、 $[\text{Th}(\text{OH}_2)]^{2+}$, 硅酸盐络合物, 许多磷酸盐络合物, 各种柠檬酸盐、草酸盐、酒石酸盐和乙酸盐的络合物以及钍的一系列螯合及其他有机络合物。所有这些络合物都使钍较易溶解, 并在某些天然条件下运移。有关上述各种络合物的稳定性知道得还很少, 在pH值低于5的条件下硫酸盐和氟化物的络离子比较稳定, 当pH值在5和8之间时, 磷酸盐络合物具有最大的稳定性。 $[\text{Th}(\text{OH})_4]^0$ 和其他氢氧化物络合物以及包括碳酸盐在内的络离子在pH大于7的条件下都是稳定的。各种天然有机(腐殖)络合物; 包括天然柠檬酸、草酸、腐殖有机酸等其他类似络合物在pH4和8之间具有广泛的和较明显的稳定性。一般来说, 钍的络合物比铀的络合物更稳定, 但也有某些例外, 例如钍的碳酸盐络合物。

已知有各种形式的钍的胶体化合物, 其中对地球化学最有意

义的是氢氧化物和硅酸盐；前者通常带有正电荷，但在一定条件下可能带负电荷，后者基本上是带负电荷的胶体。

普通地球化学

最常见的原生（内生）钍矿物是方钍石、钍晶质铀矿和钍石（表2）。还已知其他少数原生矿物和较少见的矿物。钍也是大量含铀和含锆矿物以及稀土矿物（如钛铀矿、钍钛铀矿、锆石、独居石和褐帘石）的次要成分。钍的次生（表生）矿物甚少，最常见的一种是羟钍石。

钍在地壳中的平均丰度约为8ppm，铀在地壳中的平均丰度约为2ppm。Th/U值通常在3和4之间。钍在普通岩浆岩、沉积岩和变质岩中的含量列于表5中。很早就确认，岩浆岩中的钍含量有随硅含量增大而增加的趋向，而且还随分异指数增大而增高。在某些同源岩浆岩中，这种趋向则相反。在沉积岩中没有明显的趋向，但有例外的情况，即某些页岩和其他铝土含量高的泥质岩具有增高的钍含量，在砂岩和其他砂屑岩石中，钍含量随稳定矿物（如黑云母、独居石、褐帘石和锆石）的增多而增高。某些同源岩浆岩的钍含量随钠或钾的含量或总的碱金属的含量增高而增高。在某些矿床中常与钍（和铀）伴生的元素，如Zr、Hf、稀土、Nb和Ta，在岩浆岩中也有类似的趋向，尽管它们与这两种放射性元素的相关关系仅属一般。某些同源岩浆岩的Th/U值随硅含量和总碱金属含量增高而趋向降低，但是在其他岩石中该比值却增高或相对稳定不变。在金伯利岩中，Th和U，特别是Th，与超基性岩和铁镁质岩石相比具有增高的含量，Th/U值常常变化不定，其异常值可高达30或更高。总碱金属含量增高（从而Th和U含量也增高）的岩浆岩常具有这样的特点，即易提取的Th和U（在碳酸钠和弱酸溶液中）的量增大，特别是当这种岩石是岩浆后期或其它时期蚀变的则更是如此。许多富碱金属的岩浆岩（通常为岩株、岩床或岩墙）显著富钍，比大多数碱性花岗岩和正长岩的正常值高得多；这些岩石具有很低的钙含量。在分异花岗岩类中有这样的趋向，深成岩体的年代越晚，其钍含量越高，

在淡色花岗岩、白岗岩和碱性岩变种中钍含量最高，在某些喷发岩中也可见到类似特点。许多花岗岩体和正长岩体显示出其钍含量的固有变化。在花岗岩、花岗闪长岩和正长岩基、岩株、岩床及岩墙中有显著的区域性变化。已有的变质岩数据表明，随着变质程度的提高，(由绿片岩至麻粒岩相)，其钍含量降低。同样明显地是，随着变质程度的提高，Th/U比值降低。然而，在某些地质条件下，Th/U比值有明显增高或者说有不规则的变化。花岗岩化作用最能使钍运移，而最后富集于伟晶岩和某些矿脉中，这一特点在后面还将详述。

在正常岩浆岩中，大多数钍存在于副矿物中，特别是在钍石、独居石、褐帘石、锆石、榍石、锐钛矿、金红石和钙钛矿中。其他一些矿物具有痕量和低含量钍，这些矿物是萤石、磷灰石、绿帘石、赤铁矿、石英、长石和云母（主要在包体中）。此外，钍还能以吸附相存在，或赋存于细小的矿物颗粒中，例如沿颗粒边缘，微裂隙和岩石中的其他间断处分布的钍石。在沉积岩和变质岩中，钍的分布状况与前面所述的岩浆岩的类似。在某些沉积岩中，含钍的稳定矿物，如独居石、锆石和榍石，可能具有很高的钍丰度。粘土矿物和褐铁矿、锰土及其他胶体矿物也可能含相当多的钍。

土壤中的钍含量变化甚大，从0.1ppm至50ppm。平均值低，约为5ppm。残积土的钍含量基本上取决于母岩的类型，由花岗岩类、碱性岩、片岩和片麻岩形成的土壤钍含量最高。在基性岩和碳酸盐岩上发育的土壤具有最低的钍含量。在冰碛物上发育的土壤中，基岩有某些影响，但具体情况较为复杂，通常需要进行实地研究。在碱性岩和碳酸岩上及在含钍伟晶岩和矿脉附近发育的某些土壤、粘土、红土和矾土中有特别高的钍含量。在土壤中，相当多的钍存在于耐蚀矿物中，如锆石、独居石、褐帘石、榍石、方钍石和钍石。某些钍存在于不同的次生矿物中，如斜锆石和羟钍石。其余的钍大多存在于粘土组分和褐铁矿、锰土及铝矾土络合物中。在土壤发育形成期间，Th/U比值有增高的趋向，

这主要是因为这两种元素在风化时具有不同的活动性。

土壤中钍的水化学性质在很大程度上取决于水解，胶体和吸附反应。还原作用并不重要，因为钍在自然界中仅以一种氧化态 $[\text{Th}(\text{IV})]$ 存在。在大多数土壤的 pH 值为 5—8 的条件下，部分可溶性钍盐要受到水解，并形成带正电的氢氧化物胶体或凝胶。胶体中的水分解出后形成氧化物 ThO_2 。还有一种情况是，以离子、胶体氢氧化物和硅酸盐形式存在的大量钍能被其他物质吸附或共沉淀。这些物质有：粘土矿物、硅铝凝胶、含水铁氧化物、含水铝氧化物、含水二氧化钛（钛的氢氧化物）、含水氧化锆（锆的氢氧化物）、钒的氢氧化物和土壤中的腐殖物质。在土壤的腐殖质（A）层中，大部分钍以含钍的腐殖酸盐形式存在，其特性尚不清楚。

大多数天然陆地水中的钍含量很低，约为 0.005—0.5 ppb。淋滤富钍层的地下水和地表水的钍含量通常要高一个数量级，特别是当水中富含硫酸盐、氟化物、硝酸盐、磷酸盐、碳酸盐或腐殖物质时。在这种情况下，pH 值低于 3 的水可能含有高达 100 ppb 的钍。含有碱性碳酸盐的水，在 pH 值为 8—10 的条件下，其钍含量可能达到 70 ppb 或更高。海水或洋水的钍含量尚未确定，但其值可能为 0.0005 ppb。

我的研究表明，陆地水中的钍可能大都以下列形式存在：碳酸盐络离子 $[\text{Th}(\text{CO}_3)_6]^{6-}$ ；可溶解的硫酸盐或它的络合物；硝酸盐络合物、氟化物或磷酸盐；各种水解产物，例如 $[\text{Th}_6(\text{OH})_{14}]^{10+}$ ；正胶体 $(\text{ThO}_2 \cdot n\text{H}_2\text{O})$ ；可溶的或胶体的腐殖酸盐或其他有机络合物；含水的铁氧化物和锰氧化物的被吸附部分或组成部分以及其他类型的悬浮物。就悬浮物而言，随其成分不同，钍含量可达 10 ppm 或更高。Dement'yev 和 Syromyatnikov (1965) 指出，地下水的钍含量是变化的，在低盐度、低硬度、低 pH 值和高有机物质含量的水中，钍的含量通常最高。他们认为，钍主要以胶体悬浮物和络阴离子（包括各种土壤酸）的形式迁移。Herman (1978) 指出，在怀俄明州温德河组的地下水中，在 pH 值低于 4.5 时，占

表 2 含钍和含铀矿物

氧化物, (Th (IV), U (IV))	钍含量 (最高百分数)	铀含量 (最高百分数)
晶质铀矿		
水沥青铀矿 (铀黑)		
钍铀铁矿		
方钍石		
方铀矿		
褐钇铈矿		
黄钇钼矿		
烧绿石/细晶石		
贝塔石		
钍铀烧绿石		
钍铀钍矿		
钍铀钙钍矿		
黑稀金矿		
复稀金矿		
钍稀金矿		
易解石		
钍钇矿		
钍钇矿		
钍钇铀矿		
	($U^{4+}_{1-x}U^{6+x}_xO_{2+x}$)	88.1
	$UO_2 \cdot nH_2O$	88.1
	$(Fe^{2+}, La, U, Ca)_6(Th, Fe^{3+})_{18}(O, OH)_{36}$	4.4
	$(Th, U)O_2$	44.6
	$(Ce, Th)O_2$	4.5
	$(Y, Ce, Fe, U)(Nb, Ta, Ti)_4O_4$	7.2
	$(Y, U, Th, Ce)(Ta, Nb, Ti)_4O_4$	1.1
	$(Na, Ca, Ce, U)_2(Nb, Ta, Ti)_2(O, OH, F)_7$	17.1
	$(Ca, Na, U)_2(Nb, Ta, Ti)_2O_6(OH)$	24.5
	$(Y, Na, Ca, U)_{1-2}(Nb, Ta, Ti)_2(O, OH)_7$	10.9
	$(Ca, Th, U, Ce)Zr(Ti, Nb)_2O_7$	1.4
	$(Ce, Th, Na, Ca)_2(Ti, Nb)_2O_6$	0.17
	$(Y, Ca, Ce, U, Th)(Nb, Ta, Ti)_2O_6$	12.45
	$(Y, Ca, Ce, U, Th)(Ti, Nb, Ta)_2O_6$	12.4
	$(Y, U)(Ti, Nb, Ta)_2(O, OH)_6$	10.7
	$(Ce, Y, Ca, Fe, Th)(Ti, Nb)_2(O, OH)_6$	12.4
	$(Y, Ce, U, Ca, Pb)(Nb, Ti, Ta, Sn)_2O_6$	16.6
	$(Y, U, Fe)(Ta, Nb)_4O_4$	4.8
	$(U, Fe, Y, Ca)(Nb, Ta)_4O_4$	19.3