

# 碲的地球化学与碲资源研究现状

符亚洲<sup>1</sup>, 黄粟诚<sup>1, 2</sup>, 李嘉荣<sup>1, 2</sup>, 张健<sup>1</sup>

1. 中国科学院地球化学研究所, 矿床地球化学国家重点实验室, 贵阳 550081; 2. 中国科学院大学, 北京 100049

**摘要:**碲是战略性关键矿产。碲独特的地球化学性质,使碲元素及其同位素有望为多种地球化学和宇宙化学过程提供重要信息。本文综述了碲的物理和化学性质、碲矿物学、各储库碲含量、陆地和海洋碲资源以及碲同位素地球化学等方面的研究现状。地壳中碲丰度很低,但碲矿物数量多,主要为自然碲、碲化物、碲硫(硒)化物、碲氧化物和含氧盐。碲在大洋结核和结壳、陆地富碲矿床及富有机质沉积物中含量较高。浅成低温热液矿床、造山型金矿、火山成因块状硫化物矿床等热液成因矿床和岩浆铜镍铂族硫化物矿床是重要的陆地富碲矿床类型。大洋结核和结壳中的碲达到了碲矿床的富集程度,且蕴含的碲资源量远超过陆地碲资源量。与球粒陨石相比,地球物质也存在显著的碲同位素分馏,碲同位素地球化学在陆地和海洋碲资源研究中已得到初步应用。

**关键词:**碲;碲化物;富钴结壳;多金属结核;富碲矿床;碲同位素

中图分类号:P578.1<sup>+</sup>5 文章编号:1007-2802(2023)04-0741-14 doi:10.19658/j.issn.1007-2802.2023.42.089

## Status of researches on the geochemistry of tellurium and tellurium resources

FU Ya-zhou<sup>1</sup>, HUANG Su-cheng<sup>1, 2</sup>, LI Jia-rong<sup>1, 2</sup>, ZHANG Jian<sup>1</sup>

1. State Key Laboratory of Ore Deposit Geochemistry, Institute of Geochemistry, Chinese Academy of Sciences, Guiyang 550081, China;

2. University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China

**Abstract:** Tellurium is a strategic critical metal resource. Tellurium and its isotopes are expected to provide salient information for a variety of geochemical and cosmochemical processes due to its unique geochemical properties. In this paper, we have systematically reviewed the status of researches on Tellurium physical and chemical properties, Te mineralogy, Te concentrations in different reservoirs, terrestrial and marine Te resources, and Te isotopic geochemistry. Te abundance in the earth's crust is very low, but Te minerals in the crust are abundant. Te minerals mainly include native tellurium, tellurides, tellurium sulfide (selenium) compounds, Te oxides and Te oxysalts. Marine Fe-Mn nodules and crusts, terrestrial Te-rich ore deposits and organic-rich sediments generally have relatively high Te contents. Foremost land-based Te-rich ore deposits include the magmatic Cu-Ni-PGE sulfide deposits and hydrothermal deposits such as epithermal deposits, orogenic gold deposits, VMS deposits, etc. The marine Fe-Mn nodules and crusts have relatively high Te contents evidently reaching up to the enrichment degree of the Te deposit with the amount of contained Te resource far exceeding to the quantity of terrestrial Te resource. Compared with chondrites, there is also significant Te isotopic fractionation in materials of the Earth. Te isotopic geochemistry has been preliminarily applied in researches of terrestrial and marine Te resources.

**Key words:** tellurium; telluride; Co-rich ferromanganese crust; polymetallic nodule; tellurium-rich ore deposit; tellurium isotope

收稿编号:2023-199,2023-6-1收到,2023-7-11改回

基金项目:国家自然科学基金资助项目(92162108,92262304);崂山实验室科技创新项目(LSKJ202203602);自然资源部海洋地质与成矿作用重点实验室开放基金资助项目(MGM202101)

第一作者简介:符亚洲(1978—),男,博士,副研究员,研究方向:海底铁锰与关键金属成矿作用. E-mail: fuyazhou@mail.gyig.ac.cn.

## 0 前言

1782年,矿物学家从金矿中提取到新元素碲(Te),直到1798年才被命名为tellurium(拉丁语 *tellus*,意为地球)(Emsley, 2011)。碲在地壳中丰度很低,仅有  $0.36 \times 10^{-9} \sim 10 \times 10^{-9}$  (Parker, 1967; Levinson, 1974; Govett, 1983; McDonough and Sun, 1995),在岩石中极为分散、成矿条件苛刻、难以形成独立矿床,是8种稀散元素之一(涂光炽等, 2004)。目前全球碲消费主要应用于薄膜太阳能电池、红外探测材料、半导体温差致冷及高效热电材料等新兴产业(姜含璐和代涛, 2016; U. S. Geological Survey, 2023)。碲作为一种全球稀缺战略资源,是当前国际矿床学领域重点关注的关键金属元素之一(毛景文等, 2019; 侯增谦等, 2020)。

碲是一种中等挥发性元素,对氧化还原条件敏感,同时具有亲硫性和亲氧性,但在球粒陨石中又表现出亲铜和亲铁属性。这些独特的地球化学性质使得碲在地球和行星物质中的分布和同位素组成有望可以为许多地球化学和宇宙化学过程提供重要信息(Goldfarb et al., 2017; Fehr et al., 2018; Missen et al., 2020)。但碲元素因其在自然界中的低含量及地球化学行为的复杂性,使人们对碲在不同储库物质中的含量范围、同位素组成及其地球化学循环尚不够清楚。随着碲元素日益增长的经济重要性和相关的碲资源与环境问题,以及碲在太阳系和地球系统中的多种地质和地球化学作用过程,与元素碲相关的科学研究逐渐引起了人们的广泛关注和高度兴趣。本文概述了碲的物理和化学性质、碲矿物、不同储库中碲含量、陆地富碲矿床、海底多金属结核和富钴结壳中的碲资源以及碲同位素地球化学等方面的研究现状和存在问题,并提出研究展望,这有助于深入认识碲的地球化学行为,并为碲矿产资源的勘查开发提供理论支持,对于指导以后的研究工作具有重要意义。

## 1 碲的物理和化学性质

Te位于元素周期表第五周期第VI主族,原子序数为52,原子量127.6,电子构型为  $[Kr] 4d^{10}5s^25p^4$ 。从 $^{120}\text{Te}$ 到 $^{130}\text{Te}$ ,Te有8种稳定的同位素: $^{120}\text{Te}$  (丰度0.09%)、 $^{122}\text{Te}$  (2.55%)、 $^{123}\text{Te}$  (0.89%)、 $^{124}\text{Te}$  (4.74%)、 $^{125}\text{Te}$  (7.07%)、 $^{126}\text{Te}$  (18.84%)、 $^{128}\text{Te}$  (31.74%)和 $^{130}\text{Te}$  (34.08%)(Emsley, 2011)。

自然Te以晶态和非晶态存在,两者在18℃时

的比重分别为6.24和6.0~6.2。在硫族元素中,Te的熔点和沸点最高,分别为449.5℃和988℃。但在多金属体系中,Te与Ag、As、Au、Bi、Hg、Sb、Se、Sn和Tl一起称为“低熔点亲铜金属”,可在500~600℃的变质和热液温度下形成熔体,且主要取决于压力(Frost et al., 2002; Tooth et al., 2011)。碲导热性较差,不溶于 $\text{H}_2\text{O}$ 和 $\text{CS}_2$ ,可溶于 $\text{HNO}_3$ 、 $\text{H}_2\text{SO}_4$ 和KOH等溶液。碲燃烧可生成 $\text{TeO}_2$ ,高温下可与卤族元素反应,生成碲的卤化物(王瑞江等, 2015)。

自然界中碲具有-2、-1、0、+2、+4和+6的可变价态。虽然通常认为Te的化学性质与S和Se相似,但它们在许多方面具有本质上的不同(刘英俊等, 1984)。碲位于金属和非金属之间的边界,其显著的金属性质和较大的共价半径(0.138 nm)导致其与S和Se的地球化学行为不同(Grundler et al., 2013; Keith et al., 2018)。Te在不同氧化态下的离子半径均大于S和Se,因此,在Se、Te的化合物中,Se比Te更频繁地出现S的类质同像替代。与S和Se化合物相比,Te化合物通常表现出更多的共价键或金属键。就其水化学而言,Te与Se相似,与S和Po差异较大(Chivers and Laitinen, 2015)。Te在水溶液中主要以4种形式存在:-II、+II、+IV和+VI。Te水溶液氧化还原反应动力学缓慢,+IV和+VI可以共存于同一溶液中(Grundler et al., 2013)。

实验研究和矿物稳定性计算表明,Te在中性至碱性、低盐度、高温和高氧逸度条件的热液流体中具有高度可溶性,在更还原的条件下Te溶解度显著降低并导致Te沉淀(Cook et al., 2009; Grundler et al., 2013)。

## 2 碲矿物学

在自然界,碲可以以类质同像、吸附状态及独立矿物形式存在(涂光炽等, 2004)。碲在地壳中较为分散,可与Cu、Zn、W、Sn、Mo、Au、Ag、Pb、U、Fe、Pt等元素伴生,最常见的为呈嵌晶或分泌物赋存在硫化物中,在硫的浓度明显降低的场合下,才较稀少地形成自己的独立矿物(王瑞江等, 2015)。

尽管碲在地壳中丰度很低,但它形成的矿物数量却非常多,截至2020年,国际矿物学协会(IMA)认可了180多种Te矿物(Christy, 2015; Pasero, 2020)。自然界中,碲矿物主要为自然碲、碲化物、碲硫(硒)化物、碲氧化物以及碲的含氧盐等(钱汉东等, 2000)。

自然碲、碲化物、碲硫(硒)化物等属于原生碲矿物,构成Te矿物的大部分。而次生碲矿物主要包

括碲氧化物、亚碲酸盐和碲酸盐。在富碲矿床中常见的独立碲矿物多属于原生碲矿物,比如自然碲(Te)、碲铋矿( $\text{Bi}_2\text{Te}_3$ )、辉碲铋矿( $\text{Bi}_2\text{Te}_2\text{S}$ )、碲金矿( $\text{AuTe}_2$ )、碲银矿( $\text{Ag}_2\text{Te}$ )、碲金银矿( $\text{Ag}_3\text{AuTe}_2$ )、硒碲铋矿( $\text{Bi}_2\text{Te}_2\text{Se}$ )、碲铅矿( $\text{PbTe}$ )、碲汞矿( $\text{HgTe}$ )、碲镍矿( $\text{NiTe}_2$ )及碲铂矿( $\text{PtTe}_2$ )等(刘英俊等,1984;涂光焯等,2004)。Te在碲化物中参与多种形式的金属间化学键结合(Helmy et al.,2007;Bindi and Biagioni,2018),如在碲银矿中形成的Te-Ag键,在碲金矿中形成的Te-Au键和Te-Te键。由于Te与Cu、Ag、Pt等许多金属的鲍林电负性差异较小,金属-Te键具有较强的共价键性质;而非金属O的电负性更高,允许 $\text{Te}^{4+}$ 和 $\text{Te}^{6+}$ 与O形成离子键。原生碲矿物是在缺氧条件下由热液流体或硅酸盐熔体在地壳深处形成(Ciobanu et al.,2006),而次生碲矿物则主要是在近地表环境氧化条件下由原生碲矿物风化形成(Christy et al.,2016)。

### 3 不同储库中的碲

碲的宇宙丰度比其他任何原子序数大于40的元素都要高(Anders and Ebihara,1982),在太阳系中要丰富得多(基于C1球粒陨石中Te为 $2.28 \times 10^{-6} \sim 2.32 \times 10^{-6}$ )(Anders and Grevesse,1989;Lodders,2010)。然而,Te却是地壳中最不富集的元素之一(McDonough and Sun,1995),与贵金属Au和Pt的丰度相当(Wedepohl,1995;Emsley,2011)。地壳中Te的极度耗竭可能是由于其在高压下具有强烈的亲铁性质,导致许多原始Te被隔离在地核中,少量的Te在地核形成之后以后增薄层物质的形式到达地球外层,在地质时间尺度上分化为现今Te的不均匀分布特征(Rose-Weston et al.,2009;Wang and Becker,2013)。

近些年,前人测试了包括球粒陨石、页岩、玄武岩、橄榄岩、沉积物、大气、河流、海水、大洋富钴结壳、多金属结核、陆地富碲矿床在内的多种地质物质中碲的含量(浓度),涵盖了较大的含量(浓度)变化范围,见下文所述(Hein et al.,2003;Fehr et al.,2005,2006;Baturin,2007;Lorand and Alard,2010;Schirmer et al.,2014;Belzile and Chen,2015;Parnell et al.,2015,2016,2018;Fu and Wen,2020)。由于Te在大洋多金属结核、富钴结壳和陆地富碲矿床中高度富集,将在下节详细介绍。

#### 3.1 陨石

球粒陨石中Te的含量变化范围较大,其中碳质

球粒陨石为 $0.91 \times 10^{-6} \sim 2.55 \times 10^{-6}$ ,普通球粒陨石为 $0.262 \times 10^{-6} \sim 0.643 \times 10^{-6}$ ,顽辉石球粒陨石为 $0.148 \times 10^{-6} \sim 2.98 \times 10^{-6}$ (Fehr et al.,2005;Hellmann et al.,2021)。硫化物相是Te在球粒陨石中的重要载体(Fehr et al.,2006;Kadlag and Becker,2016)。Te在碳质球粒陨石中主要表现为亲铜行为,在普通球粒陨石中表现出亲铜和亲铁的复杂行为,而Te在顽辉石球粒陨石中主要为亲铁行为(Fehr et al.,2006;Kadlag and Becker,2016)。因此,随着球粒陨石的氧化性降低,Te的行为越来越亲铁(Fehr et al.,2018)。铁陨石中Te含量为 $0.061 \times 10^{-6} \sim 12.2 \times 10^{-6}$ ,铁陨石中Te的含量按IA>IC>IIA类型顺序递减,反映了这些铁陨石中挥发性元素的亏损情况;Canyon Diablo和Toluca的陨硫铁包裹体中Te含量明显更高,反映了单个硫化物包裹体中微量元素含量的变化(Fehr et al.,2005)。

#### 3.2 橄榄岩

法国阿列日比利牛斯橄榄岩中碲的含量范围为 $<1 \times 10^{-9} \sim 11 \times 10^{-9}$ ,反映了地幔样品Te的低含量(Terashima,2001;Lorand and Alard,2010)。相关副矿物Cu-Fe-Ni硫化物原位分析结果表明Te大部分不在硫化物中,而可能与从Cu-Ni硫化物熔体中分离出的Pt-Pd碲化物有关(Lorand and Alard,2010)。超镁铁质岩石中Te的低含量,可能是Te不适合典型超镁铁质矿物(橄榄石、辉石、斜长石等)的晶格。

#### 3.3 玄武岩

洋中脊玄武岩中Te含量低于 $10 \times 10^{-9}$ (Yi et al.,2000;Lorand and Alard,2010;Lissner et al.,2014;Yierpan et al.,2019)。沿雷克雅内斯海岭向冰岛方向,海底玄武岩玻璃中Te含量逐渐增加( $2.61 \times 10^{-9} \sim 14.5 \times 10^{-9}$ ),这既可能是向冰岛方向的地幔熔融增强,也可能是冰岛地幔柱与雷克雅内斯海岭相互作用导致地幔源中Te含量的增加(Yierpan et al.,2021)。

#### 3.4 红层沉积

红层中具有相对较高的Te含量。采自美国、澳大利亚、苏格兰和加拿大的几个中元古代序列的红层沉积物富集碲,平均 $1 \times 10^{-6} \sim 10 \times 10^{-6}$ ,通常含有微米级的碲化物矿物颗粒。碲化物是在受氧化还原控制的成岩作用中形成。碲的富集可能反映了太古代和古元古代高Te岩石的侵蚀作用。中元古代的高度大陆性限制了Te等微量元素向海洋的输送,从而使Te在大陆上积累(Parnell et al.,2016,2018)。

### 3.5 页岩、泥岩和煤

页岩中 Te 的含量具有较大的变化范围,泥盆系俄亥俄页岩 SDO-1 中 Te 为  $0.12 \times 10^{-6}$ ,犹他州绿河页岩 SGR-1 为  $0.2 \times 10^{-6} \sim 0.23 \times 10^{-6}$  (Hall and Pelchat, 1997; Fehr et al., 2018)。大西洋缅因湾海相泥岩 Mag-1 中 Te 为  $0.05 \times 10^{-6} \sim 0.07 \times 10^{-6}$  (Wang et al., 2015; Fehr et al., 2018)。Te 富集于富含有机质的沉积岩中,如黑色页岩和煤 (Belzile and Chen, 2015)。不列颠群岛 Gwna 群的新元古代黑色页岩中 Te 含量高达  $30 \times 10^{-6}$  (Armstrong et al., 2018)。在苏格兰 Brora 的含黄铁矿煤中 Te 为  $2 \times 10^{-6}$  (Bullcock et al., 2017)。Te 对有机物的亲和力反映了其在化学性质上与硫的相似性。

### 3.6 古油藏

英格兰中部两个生物降解古油藏中黄铁矿的 Te 含量为  $0.05 \times 10^{-6} \sim 0.34 \times 10^{-6}$ ,烃源岩中 Te 的富集可能与烃源岩生成的原油有关,Te 随原油运移,主要富集在硫化物中,硫化物的沉淀与古油藏微生物活动有关 (Parnell et al., 2015)。

### 3.7 土壤和沉积物

土壤和沉积物中的 Te 含量根据地点和污染源的不同有差异,通常远离污染源 Te 为  $10^{-9}$  级别,但在日本的一些工业区土壤中 Te 比正常土壤高出 160 倍 (Asami, 2001)。美国犹他州帕克城土壤样品 GXR-2 中 Te 为  $0.69 \times 10^{-6} \sim 0.75 \times 10^{-6}$ ,日本日立矿山溪流沉积物 JSD-2 中 Te 为  $0.77 \times 10^{-6} \sim 0.8 \times 10^{-6}$  (Terashima, 2001; Fehr et al., 2018)。在氧化条件下,土壤中的 Te 主要与 Fe 的氢氧化物相关。EX-AFS 分析表明,土壤中 Fe 的氢氧化物吸附 Te(IV) 和 Te(VI) 形成内层配合物 (Harada and Takahashi, 2008)。

### 3.8 火山和热液喷发物

火山是地球环境中 Te 的来源之一,其中挥发形式的  $\text{Te}[\text{H}_2\text{Te}(g)]$  通过喷发、静态脱气或热液活动释放。火山硫中 Te 含量为  $10 \times 10^{-6} \sim 1000 \times 10^{-6}$  (Yu et al., 2019),俄罗斯堪察加半岛阿瓦查火山的高温 ( $600^\circ\text{C}$ ) 喷气孔中,Te 含量高达  $15.9 \times 10^{-6}$  (Okrugin et al., 2017)。海底黑烟囱块状硫化物中 Te 含量通常高出平均地壳水平四个数量级 (Yu et al., 2019)。

### 3.9 大气

气溶胶和空气颗粒物中 Te 浓度普遍低于  $\text{ng}/\text{m}^3$  水平,在富 Te 地区,由于挥发物的释放,空气中 Te 浓度局部较高 (Chiou and Manuel, 1986; Belzile and Chen, 2015)。

### 3.10 河流和湖泊

前人测试了河流和湖泊中的 Te 浓度,河流湖泊系统中总 Te 的浓度范围从低于常用分析方法的检测限到几  $\text{ng}/\text{L}$ 。例如,闽江为  $2.8 \text{ ng}/\text{L}$  (An and Zhang, 1983),亚马逊河为  $0.13 \text{ ng}/\text{L}$ ,奥里诺科河为  $0.28 \text{ ng}/\text{L}$ ,密西西比河为  $0.53 \text{ ng}/\text{L}$  (Yoon et al., 1990);日本琵琶湖中 Te 为  $36 \sim 43 \text{ ng}/\text{L}$  (Fujino et al., 1997)。

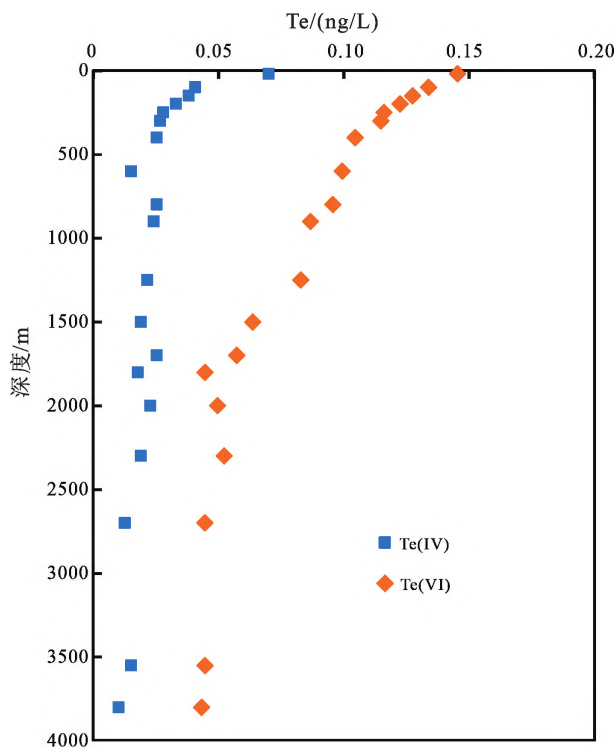
### 3.11 海水

开放海洋中溶解碲的浓度明显低于河流和湖泊中的浓度,海水中碲的浓度范围为  $0.051 \sim 0.166 \text{ ng}/\text{L}$  (Lee and Edmond, 1985)。前人估算的碲在海洋中的滞留时间相对较短,约为 107 年 (Hein et al., 2000),远小于海水千年尺度的混合时间 (Whitfield and Turner, 1987)。海水中溶解的 Te 主要以 +4 和 +6 价的形式存在,主要为  $\text{TeO}(\text{OH})_2^-$  和  $\text{TeO}(\text{OH})_3^-$  的形式,其中 +6 价的 Te 占主导地位,海水中 Te(VI) 的浓度比 Te(IV) 高 2~3.5 倍 (Lee and Edmond, 1985; Byrne, 2002; Hein et al., 2003) (图 1)。碲在海洋中呈典型的清扫型元素分布特征,可以被海水中的颗粒清扫,海底多金属结核和富钴结壳是海洋中 Te 主要的汇,它们与水柱中的 Fe-Mn 氧化物胶体一起,可能控制着全球海洋中 Te 的浓度和氧化还原状态 (Lee and Edmond, 1985; Hein et al., 2003)。南大西洋东部安哥拉和巴拿马海盆的表层水域 (1000~2000 m) 测量到较高的 Te(VI) (Belzile and Chen, 2015)。太平洋 (0~4000 m) 和大西洋 (0~5000 m) 海水剖面中,Te(VI) 和 Te(IV) 浓度随水深逐渐降低 (Yoon et al., 1990)。中国大连、珠海和福州等沿海城市海域中 Te 浓度分别为  $32 \sim 39$ 、 $10.3 \sim 37$  和  $30.1 \sim 47 \text{ ng}/\text{L}$ ,具有比远洋更高的 Te 浓度 (Huang and Hu, 2008; Xiong and Hu, 2010);在荷兰 Scheldt 河口,Te 浓度从河口的淡水部分向海洋逐渐降低 (van der Sloot et al., 1985)。

## 4 陆地富碲矿床与大洋碲资源

### 4.1 陆地富碲矿床

热液成因和岩浆成因的矿床是最重要的富碲矿床类型,其中大部分富碲矿床属于热液矿床,包括以下几种矿床类型:浅成低温热液矿床、造山型金矿、火山成因块状硫化物矿床 (VMS)、斑岩型矿床、矽卡岩型矿床、铁氧化物-铜-金矿床 (IOCG)、与侵入岩有关的金矿床和卡林-类卡林型金矿床等。此外,一些岩浆型富碲矿床如岩浆铜镍铂族硫化物矿床也具有较高的碲储量 (Goldfarb et al.,



数据引自 Lee 和 Edmond(1985)

图1 大西洋海水剖面中 Te(IV) 和 Te(VI) 浓度变化  
Fig. 1 The variation of Te(IV) and Te(VI) contents in seawaters at various depths in the Atlantic Ocean

2017; 刘家军等, 2020)。

浅成低温热液金矿床拥有着最大规模、最高品位的碲资源。浅成低温热液矿床通常与碱性火山岩、次火山岩相关, 尽管它们的空间分布有限, 但具有重要的经济意义 (du Bray, 2017)。富碲的浅成低温热液矿床往往含有大量的碲化物, 这些碲化物常与硫化物、砷化物等共生, 并可以携带一定比例的贵金属 (金和银), 以及铅 (碲铅矿)、铋 (辉碲铋矿) 和汞 (碲汞矿) 等重金属 (Dill, 2010)。典型矿床有: 美国科罗拉多的 Cripple Creek 金矿床 (Fornadel et al., 2017; Keith et al., 2020)、斐济 Emperor 金矿床 (Pals et al., 2003; Fornadel et al., 2019)、山东归来庄金矿床 (邱检生等, 1994) 和四川大水沟碲金矿床等 (陈毓川等, 1996)。

虽然许多造山型金矿床含有相对较少的碲化物, 但仍有少数矿床赋存有大量与金共生的碲化物。其中最著名的西澳太古代伊尔甘克拉通东部金矿省 Sunrise Dam 世界级造山型金矿床中, 碲矿物有碲金矿、碲银矿、碲金银矿、碲镍矿、辉碲铋矿、氯碲铅矿等 (Sung et al., 2007, 2009)。同属于该金矿省的一些造山型金矿的富碲矿化的成因机制仍具争议, 比如巨型 Golden Mile 矿床 (Mueller et al.,

2020), 成因模式除了造山型之外 (Goldfarb et al., 2005; Groves et al., 2016), 还有岩浆-热液型 (Gauthier et al., 2007; Mueller et al., 2020) 和类浅成低温热液型的认识 (Shackleton et al., 2003)。

火山成因的块状硫化物矿床中有一些富碲的矿床, 碲通常以碲矿物形式富集在硫化物矿物中。乌拉尔地区是世界上著名的块状硫化物矿带之一, 发育有 Uchalinsk、Uchaly 和 Molodezn 等富碲 VMS 矿床 (Vikentev, 2016)。在 Uchalinsk 矿床中, 碲矿物有自然碲、辉碲铋矿、碲铋矿、碲金银矿、硒碲铋矿等, 矿石中 Te 含量为  $20 \times 10^{-6} \sim 150 \times 10^{-6}$ , 硫化物矿物中 Te 含量较高, 特别是闪锌矿中 Te 可达  $1.367 \times 10^{-6}$  (Vikentev, 2016)。而挪威 Kisgruva 元古代火山成因块状硫化物矿床中碲矿物主要为碲银矿及少量碲铅矿和碲铋矿, 矿石中碲含量为  $12 \times 10^{-6} \sim 27 \times 10^{-6}$ , 其中黄铁矿和黄铜矿中 Te 较富集 (可达  $81 \times 10^{-6}$ )。此外, 风化作用导致地表积累了富集碲酸盐的风化壳沉积物, Te 含量为  $3.9 \times 10^{-6} \sim 62 \times 10^{-6}$  (Bullock et al., 2018)。

斑岩-矽卡岩型矿床是全球铜和金的重要来源, 工业上通常在精炼铜的阳极泥和金矿石中回收碲, 因此, 斑岩-矽卡岩型矿床是碲不可或缺的来源之一 (Sillitoe, 2010; Schulz et al., 2017; Keith et al., 2018)。长江中下游地区是我国重要的铁铜金多金属成矿带, 产出多个斑岩-矽卡岩型矿床, 如鸡冠咀、鸡笼山、城门山、新桥、木瓜岭等, 这些铁、铜、金矿床中具有相对较高的碲含量 (谢桂青等, 2020; 周涛发等, 2020; Li et al., 2023)。美国阿拉斯加州 Pebble 巨型斑岩铜钼金银矿床中, 约有 2.5% ~ 3.0% 的金以碲金矿和碲金银矿两种碲化物形式存在 (Gregory et al., 2013)。美国内华达州 Fortient、西班牙 Río Narcea (Cepedal et al., 2006) 和韩国 Geodo (Kim et al., 2012) 等富金矽卡岩型矿床中, 均富集 Te。

澳大利亚奥林匹克坝的铁氧化物-铜-金矿床是最不寻常的富碲矿床。该矿床的矿石中 Te 平均含量  $2.5 \times 10^{-6}$ , 意味着在 9576 百万 t 的矿石中就含有约 2.4 万 t 的碲 (Ehrig et al., 2012)。该矿床中碲主要以碲化物 (碲金矿、碲金银矿、碲银矿、碲铋银矿、碲铅矿、碲汞矿、碲铋矿、硒碲铋矿、碲镍矿) 和自然碲的形式存在。

在少数卡林-类卡林型金矿床中发现有碲化物的产出, 以及金矿石中碲富集的现象, 这些矿床中黄铁矿普遍富含 Te, 平均为  $573 \times 10^{-6}$ , 富 Te 黄铁矿是从还原流体中析出的 (Keith et al., 2018)。如美



国内华达州 Getchell 卡林型金矿区矿石中存在少量碲化物,但具有较高的碲含量: $200 \times 10^{-6}$  (Schulz et al., 2017); 伊朗西北的 Zarshuran 类卡林型金矿床中存在碲汞矿,并且在碲矿物中发现有较高的碲含量,但缺少金的碲化物矿物 (Asadi et al., 2000); 西秦岭寨上类卡林型金矿床中存在碲汞矿、碲镍矿、碲金矿、碲金银矿和板碲金银矿等 (刘新会等, 2011)。

与侵入岩有关的金矿床中碲含量相对较高,常见碲金矿、碲铅矿和碲铋矿等碲化物矿物,这些碲化物主要赋存于石英和黄铁矿中或其裂隙内。典型的矿床有:瑞典北部的 Björkdal 矿床、河北东坪金矿床及河北中山沟金矿床等 (Roberts et al., 2006; Cook et al., 2009; 甄世民等, 2023)。河北东坪金矿床中碲矿物在整个矿床中普遍存在,主要为碲金矿和碲铅矿,其次为碲金银矿,而针碲金银矿、白碲金银矿和自然碲产出较少;碲化物通常与自然金一起出现,且矿石中碲含量与金含量大致相当,Te 平均含量为  $6.71 \times 10^{-6}$ ;较深部的矿石中碲品位通常较高 (Cook et al., 2009)。

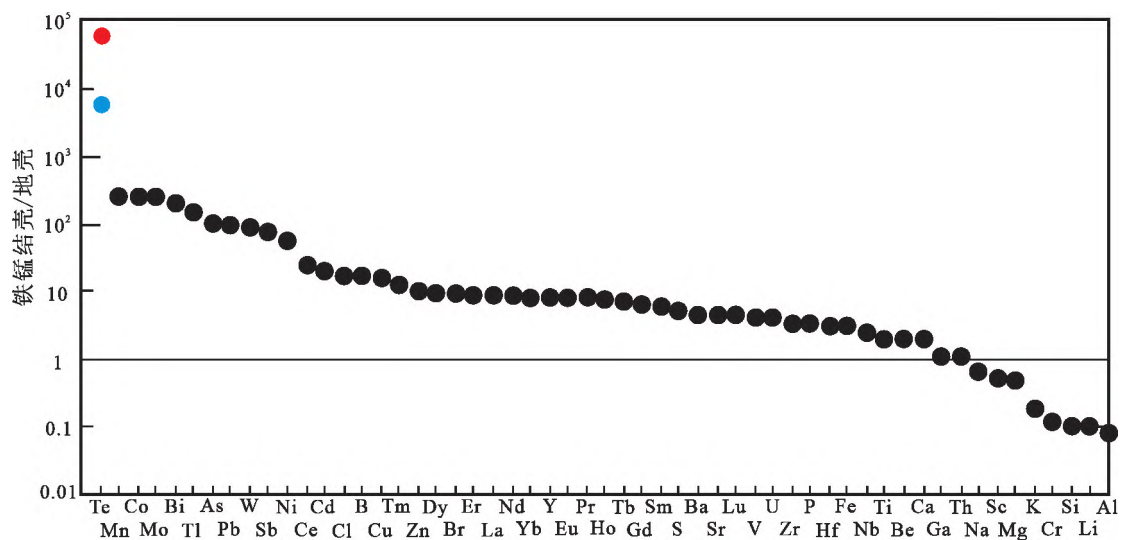
在岩浆型富碲矿床中,碲通常与铂族元素一起富集 (Keith et al., 2018)。俄罗斯的 Norilsk 含铂族金属铜-镍硫化物矿床、南非 Bushveld 岩浆型 Cu-Ni-PGE 硫化物矿床和加拿大 Sudbury 超大型镍-铜-铂族元素矿床均富集碲 (Kingston, 1966; Dare et al., 2014; Subbotin et al., 2019)。在铜镍铂族硫化物矿床中往往含有少量的碲化物,该类型矿床中主要的硫化物矿物为磁黄铁矿、镍黄铁矿和黄铜矿,

部分碲可能赋存在这些硫化物矿物中 (Holwell et al., 2017)。

#### 4.2 大洋多金属结核和富钴结壳中的碲资源

广泛分布于全球海洋的多金属结核和富钴结壳是已被发现和认识的重要海底金属矿产资源,其生长速率低,具有低密度、高孔隙度的特点,是吸附性较强并以铁锰氧化物/氢氧化物矿物为主的聚集体,可以从海水中捕获大量有用金属元素,如 Te、Co、Ni、REE 等 (Hein et al., 2000)。海洋结核和结壳中,Te 高度富集,特别是水成型结核和结壳,Te 含量普遍超过  $30 \times 10^{-6}$ ,有的甚至高达  $205 \times 10^{-6}$ ,是地壳 Te 丰度的上万倍,是结壳中富集系数最高的元素 (图 2; Lakin et al., 1963; McDonough and Sun, 1995; Hein et al., 2003; Baturin, 2007; Fu and Wen, 2020)。

水成型结核和结壳具有较高的 Te 含量,明显高于水成-成岩型结核、成岩型结核及热液型结核和结壳。太平洋 CCZ 水成-成岩型结核 Te 含量为  $2.13 \times 10^{-6} \sim 8.33 \times 10^{-6}$  (Fu and Wen, 2020); 秘鲁海盆成岩型结核的 Te 含量为  $1.7 \times 10^{-6}$  (Hein and Koschinsky, 2014); 波罗的海浅水快速生长的铁锰结核 Te 含量为  $0.44 \times 10^{-6} \sim 0.58 \times 10^{-6}$ ; 日本海大和隆起的热液铁锰结壳中  $Te < 0.3 \times 10^{-6}$ ; 马里亚纳、雅浦和汤加火山弧、夏威夷和加拉帕戈斯扩张带等热液活动区的结壳样品中 Te 含量为  $0.06 \times 10^{-6} \sim 1 \times 10^{-6}$  (Baturin, 2007)。中、西太平洋水成型结核中 Te 含量为  $26.9 \times 10^{-6} \sim 57.1 \times 10^{-6}$  (Fu and Wen, 2020), 水



据 Hein 等 (2003)。图中两个 Te 值分别基于地壳平均值为  $1 \times 10^{-9}$  (红色圆点) 和  $10 \times 10^{-9}$  (蓝色圆点) 计算

图 2 铁锰结壳中元素富集与地壳丰度的关系

Fig. 2 Diagram showing the relationship between contents of various elements in Fe-Mn crusts and their mean abundances in the Earth's crust

成结壳中 Te 含量为  $3 \times 10^{-6} \sim 205 \times 10^{-6}$ 。大陆边缘海铁锰结核和结壳的 Te 含量低于远洋结核和结壳,是碎屑相稀释的结果(Guan et al., 2017; Conrad et al., 2017)。在厚层水成铁锰结壳中,上部正常壳层 Te 含量为  $30.7 \times 10^{-6} \sim 64.7 \times 10^{-6}$ ,而下部磷酸盐化壳层 Te 含量明显较高,可达  $69.3 \times 10^{-6} \sim 81.4 \times 10^{-6}$ (Fu and Wen, 2020)。

据估算,太平洋 CCZ 锰结核的 Te 资源量约为 8 万 t(Hein et al., 2020),而富钴结壳比锰结核更富集 Te。张富元等(2015)对三大洋富钴结壳资源量进行了计算,结果显示太平洋、大西洋和印度洋海山干结壳资源量分别为  $513.244 \times 10^8 \sim 1026.488 \times 10^8$  t、 $116.503 \times 10^8 \sim 233.006 \times 10^8$  t 和  $81.485 \times 10^8 \sim 162.969 \times 10^8$  t。根据太平洋和大西洋结壳的 Te 平均含量为  $50 \times 10^{-6}$ ,印度洋结壳的 Te 平均含量为  $39 \times 10^{-6}$ (Hein et al., 2003, 2009),我们估算太平洋、大西洋和印度洋结壳中 Te 金属量分别为  $2.566 \times 10^6 \sim 5.132 \times 10^6$ 、 $0.583 \times 10^6 \sim 1.165 \times 10^6$  和  $0.317 \times 10^6 \sim 0.636 \times 10^6$  t。CCZ 锰结核和三大洋富钴结壳蕴含的 Te 资源量总和远远超过估算的陆地碲资源量(3.2 万 t)(U. S. Geological Survey, 2023)。与陆地矿床中的碲含量相比,海底结核和结壳中的 Te 达到了碲矿床的富集程度。因此,可以认为全球 Te 的大规模成矿主要发生在海底铁锰资源的成矿过程中,大洋结核和结壳是非常巨大的 Te 潜在资源宝库。

关于大洋结核和结壳中 Te 的赋存状态和富集机制,由于长期欠缺深入研究,仅有的几项研究也存在较大争议。Li 等(2005)认为,海洋锰铁氧化物中高度富集的 Te 可能与地外尘埃粒子的输入有关。Hein 等(2003)通过元素相关关系研究表明,铁锰结壳中的 Te 通常与锰相矿物、碳氟磷灰石(CFA)和残渣相有关。Koschinsky 和 Hein(2003)通过对水成铁锰结壳进行逐级淋滤实验,认为大多数的 Te 与 FeOOH 相关而小于 10% 的 Te 与 MnO<sub>2</sub> 相关。因此,Hein 等(2003)认为,Te 在铁锰结壳中的高度富集可能是海水中 Te(IV) 优先被 FeOOH 吸附,随后被氧化为 Te(VI) 的结果。然而,Baturin(2007)研究认为在水成锰铁结壳中,Te 同时可以与锰相和铁相矿物结合。Halbach 和 Marbler(2009)对铁锰结壳中 Te 的元素相关性研究结果显示,Te 与 Mn 呈弱正相关,与 Fe 无明显相关性。Fu 和 Wen(2020)对不同成因类型结核和结壳分别进行元素相关性分析,发现在水成型结核和结壳中,Te 与 Mn 明显正相关,在水成-成岩型结核中,Te 与 Fe 明显正相关,在磷酸盐化结壳壳层中,Te 与 Mn 和 Fe 均正相关。很显

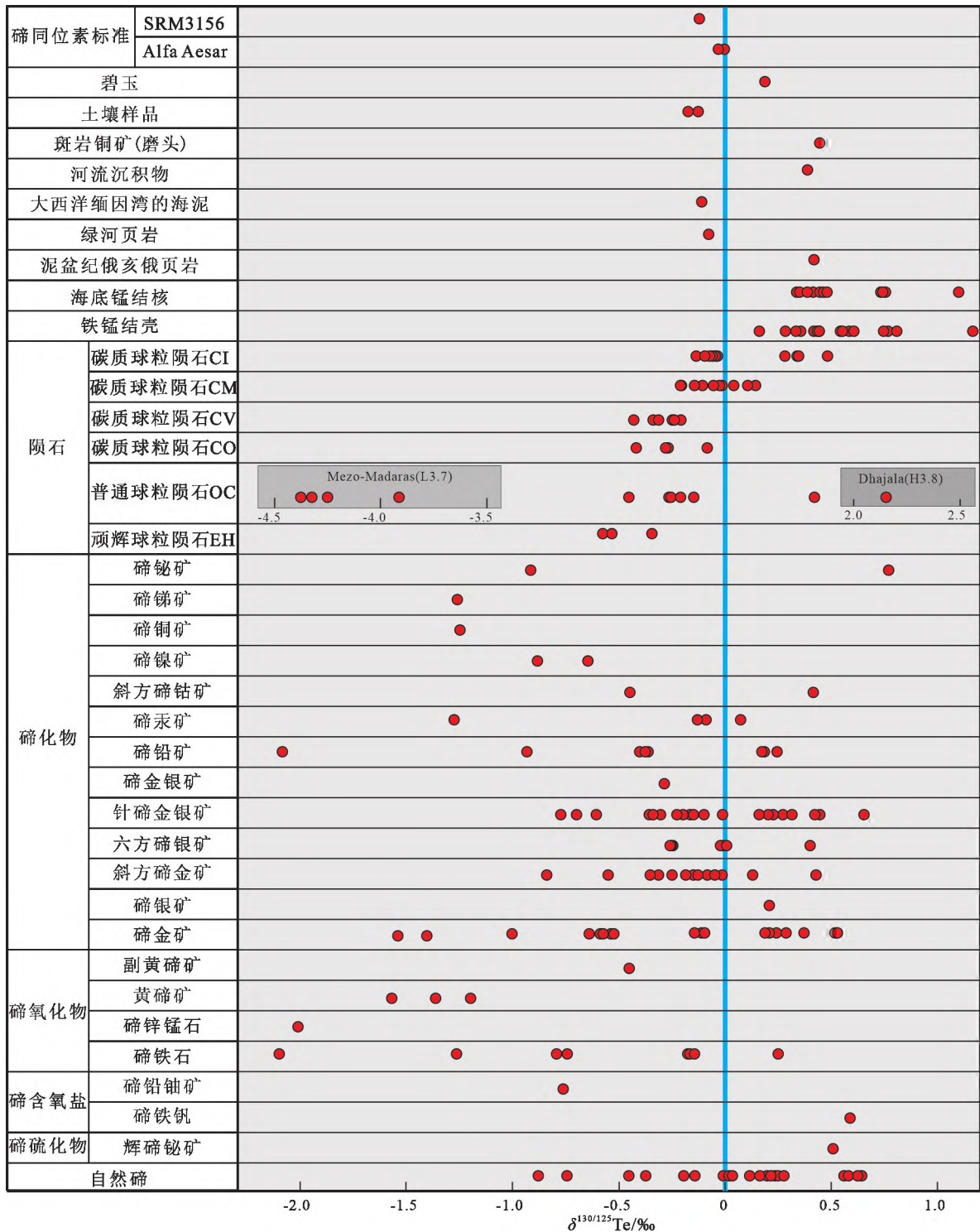
然,这些研究结果与 Hein 等(2003)提出的模型认识不一致。Kashiwabara 等(2014)通过同步辐射 XANES 和 EXAFS 对太平洋两块水成铁锰结壳进行了研究,同时开展了吸附-共沉淀实验,研究结果显示 Te 在天然铁锰结壳样品中的化学态为 Te(VI),Te 主要与水铁矿结合,为共沉淀物;Te(IV)在吸附和共沉淀反应中在  $\delta$ -MnO<sub>2</sub> 上被氧化,而在水铁矿上没有被氧化;Te(IV)和 Te(VI)通过内层络合被吸附在水铁矿和  $\delta$ -MnO<sub>2</sub> 上,只有 Te(VI)可以通过共沉淀进入水铁矿结构中。

大洋结核和结壳中富集的碲不仅是重要的潜在矿产资源,也可能成为反演氧化还原环境的指示剂。大多数岩石和沉积物样品的 Te/Se 平均值都接近块状硅酸盐地球(BSE)的平均值 0.14(Wang and Becker, 2013),但在大洋结核和结壳中,Te 明显比 Se 富集,特别是氧化条件下形成的水成结核和结壳。Te/Se 分馏程度与形成环境氧化还原条件呈明显的正相关关系,Te/Se 值可能成为氧化还原环境的潜在指标(Schirmer et al., 2014)。

## 5 碲同位素地球化学及应用

碲有 38 种已知同位素和 17 种核异构体,但仅有 8 种稳定同位素。最早的 Te 稳定同位素研究分析了 6 个来自不同热液矿床中的含碲样品(Smithers and Krouse, 1968; Smith et al., 1978)。然而,由于当时负热电离质谱仪(NTIMS)存在较大的分析不确定性,研究结果不太理想(Lee and Halliday, 1995)。近年来,国际上有几个研究小组利用多接收电感耦合等离子体质谱仪(MC-ICP-MS)测试了陨石、页岩、碲矿物、锰结核、铁锰结壳、海洋和水系沉积物、土壤等物质的 Te 稳定同位素组成(Fehr et al., 2004, 2005, 2006, 2009, 2018; Fornadel, 2014; Fornadel et al., 2014, 2017, 2019; Fukami et al., 2018, 2022; Hellmann et al., 2020, 2021)(图 3),并将 Te 同位素地球化学应用到陆地和海洋碲资源研究中(Fornadel, 2014; Fornadel et al., 2014, 2017, 2019; Fukami et al., 2022)。

非传统稳定同位素分馏数据可以提供关于太阳系形成与演化的重要信息,但目前 Te 稳定同位素分馏的研究还比较少。碲在非平衡型普通球粒陨石中呈现较大的同位素分馏, $\delta^{130/125}\text{Te}$  变化为 6.3‰,与其它一些中、高度挥发性元素 Ag、Rb 和 Cd 等类似(Fehr et al., 2018)。在普通球粒陨石中观测到的 Te 同位素分馏可能是由母体热变质过程中的蒸发和凝聚引起的,也可能是在星云中或与陨



数据来源: Fehr 等 (2004, 2005, 2006, 2009, 2018); Fornadel (2014); Fornadel 等 (2014, 2017, 2019); Fukami 等 (2018, 2022); Hellmann 等 (2020, 2021)

图 3 自然界不同物质中 Te 同位素组成变化范围

Fig. 3 Variation ranges of Te isotopic compositions in different natural materials

石球粒形成有关 (Fehr et al., 2018)。Te 稳定同位素组成在不同碳质球粒陨石之间以及顽辉石球粒陨石与碳质球粒陨石之间存在较小的变化, 表明存在两种或两种以上 Te 同位素组分的混合, 反映了早

期太阳系 Te 同位素的可能分馏 (Fehr et al., 2018; Hellmann et al., 2021)。与球粒陨石相比, 地球物质也存在显著的 Te 同位素分馏 (Fornadel, 2014; Fornadel et al., 2014b, 2017; Fehr et al., 2018) (图 3)。



其中,陆地沉积物样品的  $\delta^{130/125}\text{Te}$  变化范围为  $-0.15\text{‰} \sim 0.45\text{‰}$ ,海洋样品变化范围为  $0.17\text{‰} \sim 1.17\text{‰}$ ,矿床中碲矿物 Te 同位素组成变化范围较大 ( $-2.1\text{‰} \sim 0.77\text{‰}$ )。值得注意的是,样品采集地点的不同,碲化物矿物中 Te 同位素组成变化可能与热液成矿类型有关 (Fornadel, 2014; Fornadel et al., 2014, 2017)。目前,关于 Te 同位素分馏机理的研究还处在初步探索阶段。少量研究显示,碲同位素可能在非生物和生物氧化还原过程、液-液萃取过程、蒸发和冷凝过程等发生同位素的质量分馏或非质量分馏 (Smithers and Krouse, 1968; Baesman et al., 2007; Moynier et al., 2008; Fehr et al., 2018; Fornadel et al., 2019)。

与碱性火成岩有关的斐济 Emperor 金矿床中针碲金银矿、白碲金银矿和自然碲样品的  $\delta^{130/125}\text{Te}$  变化范围为  $-0.47\text{‰} \sim 0.66\text{‰}$  (Fornadel et al., 2019)。科罗拉多 Cripple Creek、Boulder County 和 La Plata 金矿床与 Emperor 金矿床地质背景相似, Cripple Creek:  $\delta^{130/125}\text{Te}$  为  $-0.53\text{‰} \sim 0.44\text{‰}$ , Boulder County:  $\delta^{130/125}\text{Te}$  为  $-0.25\text{‰} \sim 0.16\text{‰}$ , La Plata:  $\delta^{130/125}\text{Te}$  为  $-0.78\text{‰} \sim 0.17\text{‰}$ , 这些浅成热液体系中控制同位素组成变化的主要因素可能是与矿床成因相关的碱性火成岩源岩的 Te 同位素组成不同所致 (Fornadel et al., 2014, 2017)。相比之下,澳大利亚 Kalgoorlie 巨型造山带 Golden Mile 金矿床的样品  $\delta^{130/125}\text{Te}$  范围为  $-1.00\text{‰} \sim 0.51\text{‰}$ , 则更多地受到矿液变质性质和/或热液流体运移过程中较程度的水岩相互作用的影响 (Fornadel et al., 2017)。据此推测, Emperor 矿床内部轻、重同位素组成的分带主要受成矿流体中同位素瑞利分馏控制 (Fornadel et al., 2019)。

西北太平洋水深 1000~5500 m 的 Takuyo-Daigo 和 Takuyo-Daisan 两个海山上铁锰结壳表层样品的 Te 含量和  $\delta^{130/125}\text{Te}$  分别为  $18.0 \times 10^{-6} \sim 59.9 \times 10^{-6}$ 、 $0.17\text{‰} \sim 1.17\text{‰}$  和  $2.7 \times 10^{-6} \sim 24.0 \times 10^{-6}$ 、 $0.29\text{‰} \sim 0.56\text{‰}$ 。在较浅水层,结壳表层 Te 含量随深度的增加而急剧下降,但在深水层,Te 含量下降的趋势较为平缓。Te 同位素组成表现为在浅水层随水深增加而变轻,在深水层随水深增加而变重。这些变化趋势反映了碲含量和同位素组成与水深之间的不同相关性。Te 含量和同位素组成随水深的变化可能与 Fe 共沉淀和 Mn 氧化作用有关,这些过程也可能与周围海水溶解氧浓度的变化有关。因此,铁锰结壳中的 Te 同位素组成可能是古海洋最低含氧带变化的潜在指标 (Fukami et al., 2022)。铁锰结壳样品和锰结核标样的 Te 同位素组成可能反映了输

入海洋的 Te 同位素组成的变化,另一方面,Te 与铁锰结壳和结核结合的过程可能产生同位素分馏 (Fehr et al., 2018)。

## 6 碲的供应及工业应用

目前,全球 Te 产业仍处于起步阶段。世界上只有两个地区可以从原生矿提取碲,分别是中国四川大水沟和马家沟浅成热液脉状碲金矿床和瑞典的 Kankberg 类浅成热液矿床 (Goldfarb et al., 2017)。而目前 90% 的 Te 都是作为铜电解精炼的副产物从铜阳极泥中回收,其余的来自铅精炼厂的撇渣以及冶炼铋、铜和铅锌矿时产生的烟道粉尘和气体 (Green, 2009; Kyle et al., 2011; Makuei and Senanayake, 2018)。因此,碲的供应与铜矿开采行业有着最紧密的联系。中国是精炼碲的主要生产国,2022 年约占全球产量的 53%。

据统计,目前碲在全球消费中的最集中用途是碲化镉太阳能电池板 (占 40%)、热电生产 (30%)、冶金 (15%)、橡胶应用 (5%) 和其它产业 (10%) (U. S. Geological Survey, 2023)。2022 年 6 月,中国政府发布了《“十四五”可再生能源发展规划》,提出到 2030 年风电和太阳能发电总装机容量达到 12 亿千瓦,占能源消费比重达到 25% 的目标。该提议可能会增加太阳能行业对碲化镉薄膜太阳能电池板的需求。大多数 Te 的工业应用都使用碲化物,如生产碲化镉薄膜太阳能电池、生产碲化铋用于冷却和发电的热电装置 (Amatya and Ram, 2012; Woodhouse et al., 2013)。在冶金方面 Te 可作为钢的合金添加剂,以改善加工特性;作为铜的合金添加剂,可提高可加工性而不降低导电性;在铅合金中可提高抗振动和抗疲劳性;在铸铁中有助于控制冷却深度;在可锻铸铁中可作为碳化物的稳定剂。Te 在化学工业中用作硫化剂和橡胶加工中的促进剂,并作为生产合成纤维的催化剂。Te 的其它用途包括光感受器、爆破帽,以及玻璃和陶瓷生产中的颜料等 (Emsley, 2011)。

## 7 问题和展望

碲是一种战略稀缺元素,是当代高科技和绿色科技的重要材料。碲是全球稀缺性资源,中国、美国和日本等均将碲列为关键矿产。碲具有中等挥发性,对氧化还原条件敏感,同时具有亲硫性和亲氧性,但在球粒陨石中又表现出亲铜和亲铁行为。这些独特的地球化学性质,使碲元素及其同位素组成有望可以为多种地球化学和宇宙化学过程提供

重要信息。近些年,国内外学者围绕碲的地球化学性质、碲矿物学、不同储库中 Te 的含量和同位素组成、陆地富碲矿床和海洋碲资源开展了一系列研究,取得了许多重要成果。但由于该领域的研究尚处于起步探索阶段,目前还存在不足有待进一步完善。

(1)由于自然界中碲的含量较低,目前所获得的测试数据相对较少,使人们对碲在不同储库物质中的含量范围、同位素组成以及地球化学循环等方面的认识不够清楚。因此,在 Te 含量和同位素测试方面需要进一步提高分析测试水平,争取获得更多高质量的实验数据。比如在实验过程中,用到高浓度的 HCl 时可能形成挥发性 Te 物质,应需谨慎;由于大部分样品 Te 含量低,在 Te 同位素分离纯化和质谱分析中,对样品分离与纯化方法、同位素分析过程中的基体效应和仪器质量歧视效应等的校正方法应提出更高要求。

(2)在陆地富碲矿床中,碲矿物的富集和结晶过程表现出多期多阶段的成矿特点,蕴含了丰富的成因信息。目前对这些矿床中碲矿物学研究还比较薄弱,特别是对碲化物的精细矿物学研究。可以使用先进的分析仪器如高分辨透射电镜(HRTEM)、纳米二次离子质谱(Nano-SIMS)、同步辐射装置(SRF)等开展碲矿物的微区原位分析,查明碲矿物的类型和矿物共生关系,揭示碲的赋存状态及碲矿物的结晶过程。

(3)包括大洋铁锰结壳、多金属结核、黑色页岩、红层等在内的多种沉积物,具有相对较高的 Te 含量,但是 Te 在其中的赋存状态仍不清楚,也制约了对 Te 富集机制的认识。因此,需要加强开展微观尺度下碲的赋存状态和富集机制的研究。

(4)在陆地富碲矿床和深海碲资源研究中,因碲地球化学行为的复杂性,对一些关键问题的认识还存在许多分歧,如碲的来源、碲的迁移形式、碲的赋存状态和富集机制等。碲同位素作为新兴的地球化学示踪手段,以后可能会被用来揭示成矿物质来源,探讨成矿物理化学条件和成矿过程。然而,目前还无法准确评估陆地富碲矿床和海洋结壳和结壳中 Te 的物质来源;现有的数据还不能够用来分辨不同储库中碲同位素组成的差异;对这些矿床中 Te 同位素组成的变化以及控制其组成的地球化学条件还知之甚少;对于碲同位素在不同过程中的分馏机理仍缺乏理论分析和实验研究。这些因素使得 Te 同位素还不能像其它一些相对成熟的非传统同位素体系(如 Fe、Cu、Zn 等)一样,用来揭示富碲

矿床中含 Te 矿物同位素组成变化及铁锰结壳(结核)记录的 Te 同位素组成变化的原因。因此,现阶段仍需要积累大量的同位素数据并开展同位素分馏机理相关的理论和实验研究。

#### 参考文献 (References):

- Amatya R, Ram R J. 2012. Trend for thermoelectric materials and their earth abundance. *Journal of Electronic Materials*, 41(6): 1011-1019
- An J R, Zhang Q. 1983. An analytical method of ultra-trace tellurium for samples of sea- and environmental-water. *International Journal of Environmental Analytical Chemistry*, 14(1): 73-80
- Anders E, Ebihara M. 1982. Solar-system abundances of the elements. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 46(11): 2363-2380
- Anders E, Grevesse N. 1989. Abundances of the elements: Meteoritic and solar. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 53(1): 197-214
- Armstrong J G T, Parnell J, Bullock L A, Perez M, Boyce A J, Feldmann J. 2018. Tellurium, selenium and cobalt enrichment in Neoproterozoic black shales, Gwna Group, UK: Deep marine trace element enrichment during the second great oxygenation event. *Terra Nova*, 30(3): 244-253
- Asadi H H, Voncken J H L, Kühnel R A, Hale M. 2000. Petrography, mineralogy and geochemistry of the Zarshuran Carlin-like gold deposit, northwest Iran. *Mineralium Deposita*, 35(7): 656-671
- Asami T. 2001. The harmful metal pollution of Japanese soil to show by the data. Tokyo: Agune Gijutsu Center, 288-297
- Baerman S M, Bullen T D, Dewald J, Zhang D H, Curran S, Islam F S, Beveridge T J, Oremland R S. 2007. Formation of tellurium nanocrystals during anaerobic growth of bacteria that use Te oxyanions as respiratory electron acceptors. *Applied and Environmental Microbiology*, 73(7): 2135-2143
- Baturin G N. 2007. Tellurium and thallium in ferromanganese crusts and phosphates on oceanic seamounts. *Doklady Earth Sciences*, 413(2): 331-335
- Belzile N, Chen Y W. 2015. Tellurium in the environment: A critical review focused on natural waters, soils, sediments and airborne particles. *Applied Geochemistry*, 63: 83-92
- Bindi L, Biagioni C. 2018. A crystallographic excursion in the extraordinary world of minerals: The case of Cu- and Ag-rich sulfosalts. *Acta Crystallographica Section B Structural Science, Crystal Engineering and Materials*, 74(6): 527-538
- Bullock L, Parnell J, Perez M, Feldmann J. 2017. Tellurium enrichment in Jurassic coal, Brora, Scotland. *Minerals*, 7(12): 231
- Bullock L A, Perez M, Armstrong J G, Parnell J, Still J, Feldmann J. 2018. Selenium and tellurium resources in Kisgruva Proterozoic volcanogenic massive sulphide deposit (Norway). *Ore Geology Reviews*, 99: 411-424
- Byrne R H. 2002. Inorganic speciation of dissolved elements in seawater: The influence of pH on concentration ratios. *Geochemical Transactions*, 3(1): 11
- Cepedal A, Fuertes-Fuente M, Martín-Izard A, González-Nistal S, Rodríguez-Pevida L. 2006. Tellurides, selenides and Bi-mineral as-

- semblages from the Río Narcea Gold Belt, Asturias, Spain: Genetic implications in Cu-Au and Au skarns. *Mineralogy and Petrology*, 87(3-4): 277-304
- Chiou K Y, Manuel O K. 1986. Tellurium and selenium in aerosols. *Environmental Science & Technology*, 20(10): 987-991
- Chivers T, Laitinen R S. 2015. Tellurium: A maverick among the chalcogens. *Chemical Society Reviews*, 44(7): 1725-1739
- Christy A G. 2015. Causes of anomalous mineralogical diversity in the periodic table. *Mineralogical Magazine*, 79(1): 33-50
- Christy A G, Mills S J, Kampf A R, Housley R M, Thorne B, Marty J. 2016. The relationship between mineral composition, crystal structure and paragenetic sequence: The case of secondary Te mineralization at the Bird Nest drift, Otto Mountain, California, USA. *Mineralogical Magazine*, 80(2): 291-310
- Ciobanu C L, Cook N J, Spry P G. 2006. Preface-special issue: Telluride and selenide minerals in gold deposits-how and why? *Mineralogy and Petrology*, 87(3-4): 163-169
- Conrad T, Hein J R, Paytan A, Clague D A. 2017. Formation of Fe-Mn crusts within a continental margin environment. *Ore Geology Reviews*, 87: 25-40
- Cook N J, Ciobanu C L, Mao J W. 2009. Textural control on gold distribution in As-free pyrite from the Dongping, Huangtuliang and Hougou gold deposits, North China Craton (Hebei Province, China). *Chemical Geology*, 264(1-4): 101-121
- Dare S A S, Barnes S J, Prichard H M, Fisher P C. 2014. Mineralogy and geochemistry of Cu-rich ores from the McCreedy East Ni-Cu-PGE deposit (Sudbury, Canada): Implications for the behavior of platinum group and chalcophile elements at the end of crystallization of a sulfide liquid. *Economic Geology*, 109(2): 343-366
- Dill H G. 2010. The "chessboard" classification scheme of mineral deposits: Mineralogy and geology from aluminum to zirconium. *Earth-Science Reviews*, 100(1-4): 1-420
- du Bray E A. 2017. Geochemical characteristics of igneous rocks associated with epithermal mineral deposits-A review. *Ore Geology Reviews*, 80: 767-783
- Ehrig K, McPhie J, Kamenetsky V. 2012. Geology and mineralogical zonation of the Olympic Dam Iron Oxide Cu-U-Au-Ag deposit, South Australia. In: Hedenquist J W, Harris M, Camus F, eds. *Geology and Genesis of Major Copper Deposits and Districts of the World: A Tribute to Richard H. Sillitoe*. Tulsa: Society of Economic Geologists, 237-267
- Emsley J. 2011. *Nature's building blocks: An A-Z guide to the elements*. 2nd ed. Oxford: Oxford University Press
- Fehr M A, Rehkämper M, Halliday A N. 2004. Application of MC-ICPMS to the precise determination of tellurium isotope compositions in chondrites, iron meteorites and sulfides. *International Journal of Mass Spectrometry*, 232(1): 83-94
- Fehr M A, Rehkämper M, Halliday A N, Wiechert U, Hattendorf B, Günther D, Ono S, Eigenbrode J L, Rumble III D. 2005. Tellurium isotopic composition of the early solar system-A search for effects resulting from stellar nucleosynthesis,  $^{126}\text{Sn}$  decay, and mass-independent fractionation. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 69(21): 5099-5112
- Fehr M A, Rehkämper M, Halliday A N, Schönbächler M, Hattendorf B, Günther D. 2006. Search for nucleosynthetic and radiogenic tellurium isotope anomalies in carbonaceous chondrites. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 70(13): 3436-3448
- Fehr M A, Rehkämper M, Halliday A N, Hattendorf B, Günther D. 2009. Tellurium isotope compositions of calcium-aluminum-rich inclusions. *Meteoritics & Planetary Science*, 44(7): 971-984
- Fehr M A, Hammond S J, Parkinson I J. 2018. Tellurium stable isotope fractionation in chondritic meteorites and some terrestrial samples. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 222: 17-33
- Fornadel A P. 2014. Stable tellurium isotope variability in ore-forming systems: A theoretical and experimental approach. Doctoral Thesis. Iowa: Iowa State University
- Fornadel A P, Spry P G, Jackson S E, Mathur R M, Chapman J B, Girard I. 2014. Methods for the determination of stable Te isotopes of minerals in the system Au-Ag-Te by MC-ICP-MS. *Journal of Analytical Atomic Spectrometry*, 29(4): 623-637
- Fornadel A P, Spry P G, Haghnegahdar M A, Schauble E A, Jackson S E, Mills S J. 2017. Stable Te isotope fractionation in tellurium-bearing minerals from precious metal hydrothermal ore deposits. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 2012: 215-230
- Fornadel A P, Spry P G, Jackson S E. 2019. Geological controls on the stable tellurium isotope variation in tellurides and native tellurium from epithermal and orogenic gold deposits: Application to the Emperor gold-telluride deposit, Fiji. *Ore Geology Reviews*, 113: 103076
- Frost B R, Mavrogenes J A, Tomkins A G. 2002. Partial melting of sulfide ore deposits during medium-and high-grade metamorphism. *The Canadian Mineralogist*, 40(1): 1-18
- Fu Y Z, Wen H J. 2020. Variabilities and enrichment mechanisms of the dispersed elements in marine Fe-Mn deposits from the Pacific Ocean. *Ore Geology Reviews*, 121: 103470
- Fujino O, Hara K, Ikejima S, Goda S. 1997. Determination of tellurium in lake water by ICP-MS. *Bunseki Kagaku*, 46(11): 857-862
- Fukami Y, Kimura J I, Suzuki K. 2018. Precise isotope analysis of tellurium by inductively coupled plasma mass spectrometry using a double spike method. *Journal of Analytical Atomic Spectrometry*, 33(7): 1233-1242
- Fukami Y, Kashiwabara T, Amakawa H, Shibuya T, Usui A, Suzuki K. 2022. Tellurium stable isotope composition in the surface layer of ferromanganese crusts from two seamounts in the Northwest Pacific Ocean. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 318: 279-291
- Gauthier L, Hagemann S, Robert F. 2007. The geological setting of the Golden Mile gold deposit. In: Kalgoorlie W A, Bierlein F P, Knox-Robinson C M, eds. *Kalgoorlie 2007, Old Ground, New Knowledge, Abstracts*. Record: Geoscience Australia, 14: 181-185
- Goldfarb R J, Baker T, Dubé B, Groves D I, Hart C J R, Gosselin P. 2005. Distribution, character, and genesis of gold deposits in metamorphic terran. In: Hedenquist J W, Thompson J F H, Goldfarb R J, Richards J P, eds. *One Hundredth Anniversary Volume*. Littleton: Society of Economic Geologists, 407-450
- Goldfarb R J, Berger B R, George M W, Seal II R R. 2017. *Tellurium*. Reston: U. S. Geological Survey

- Govett G J S. 1983. Rock geochemistry in mineral exploration. New York: Elsevier
- Green M A. 2009. Estimates of Te and in prices from direct mining of known ores. *Progress in Photovoltaics: Research and Applications*, 17(5): 347–359
- Gregory M J, Lang J R, Gilbert S, Hoal K O. 2013. Geometallurgy of the Pebble porphyry copper-gold-molybdenum deposit, Alaska; Implications for gold distribution and paragenesis. *Economic Geology*, 108(3): 463–482
- Groves D I, Goldfarb R J, Santosh M. 2016. The conjunction of factors that lead to formation of giant gold provinces and deposits in non-arc settings. *Geoscience Frontiers*, 7(3): 303–314
- Grundler P V, Brugger J, Etschmann B E, Helm L, Liu W H, Spry P G, Tian Y, Testemale D, Pring A. 2013. Speciation of aqueous tellurium(IV) in hydrothermal solutions and vapors, and the role of oxidized tellurium species in Te transport and gold deposition. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 120: 298–325
- Guan Y, Sun X M, Ren Y Z, Jiang X D. 2017. Mineralogy, geochemistry and genesis of the polymetallic crusts and nodules from the South China Sea. *Ore Geology Reviews*, 89: 206–227
- Halbach P, Marbler H. 2009. Marine ferromanganese crusts: Contents, distribution and enrichment of strategic minor and trace elements. BGR-Report, Hannover, Project No: 211–4500042565, 1–73
- Hall G E M, Pelchat J C. 1997. Determination of As, Bi, Sb, Se and Te in fifty five reference materials by hydride generation ICP-MS. *Geostandards Newsletter*, 21(1): 85–91
- Harada T, Takahashi Y. 2008. Origin of the difference in the distribution behavior of tellurium and selenium in a soil-water system. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 72(5): 1281–1294
- Hein J R, Koschinsky A, Bau M, Manheim F T, Kang J K, Roberts L. 2000. Cobalt-rich ferromanganese crusts in the Pacific. In: Cronan D S, ed. *Handbook of Marine Mineral Deposits*. Boca Raton: CRC Press, 239–279
- Hein J R, Koschinsky A, Halliday A N. 2003. Global occurrence of tellurium-rich ferromanganese crusts and a model for the enrichment of tellurium. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 67(6): 1117–1127
- Hein J R, Conrad T A, Dunham R E. 2009. Seamount characteristics and mine-site model applied to exploration- and mining-lease-block selection for cobalt-rich ferromanganese crusts. *Marine Georesources & Geotechnology*, 27(2): 160–176
- Hein J R, Koschinsky A. 2014. Deep-ocean ferromanganese crusts and nodules. *Treatise on Geochemistry (Second Edition)*, 13: 273–291
- Hein J R, Koschinsky A, Kuhn T. 2020. Deep-ocean polymetallic nodules as a resource for critical materials. *Nature Reviews Earth & Environment*, 1(3): 158–169
- Hellmann J L, Hopp T, Burkhardt C, Kleine T. 2020. Origin of volatile element depletion among carbonaceous chondrites. *Earth Planet. Sci. Lett.*, 549: 116508
- Hellmann J L, Hopp T, Burkhardt C, Becker H, Fischer-Güdde M, Kleine T. 2021. Tellurium isotope cosmochemistry: Implications for volatile fractionation in chondrite parent bodies and origin of the late veneer. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 309: 313–328
- Helmy H M, Ballhaus C, Berndt J, Bockrath C, Wohlgemuth-Ueberwasser C. 2007. Formation of Pt, Pd and Ni tellurides; Experiments in sulfide-telluride systems. *Contributions to Mineralogy and Petrology*, 153(5): 577–591
- Holwell D A, Adeyemi Z, Ward L A, Smith D J, Graham S D, McDonald I, Smith J W. 2017. Low temperature alteration of magmatic Ni-Cu-PGE sulfides as a source for hydrothermal Ni and PGE ores: A quantitative approach using automated mineralogy. *Ore Geology Reviews*, 91: 718–740
- Huang C Z, Hu B. 2008. Speciation of inorganic tellurium from seawater by ICP-MS following magnetic SPE separation and preconcentration. *Journal of Separation Science*, 31(4): 760–767
- Kadlag Y, Becker H. 2016.  $^{187}\text{Re}$ – $^{187}\text{Os}$  systematics, highly siderophile element, S-Se-Te abundances in the components of unequilibrated L chondrites. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 172: 225–246
- Kashiwabara T, Oishi Y, Sakaguchi A, Sugiyama T, Usui A, Takahashi Y. 2014. Chemical processes for the extreme enrichment of tellurium into marine ferromanganese oxides. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 131: 150–163
- Keith M, Smith D J, Jenkin G R T, Holwell D A, Dye M D. 2018. A review of Te and Se systematics in hydrothermal pyrite from precious metal deposits: Insights into ore-forming processes. *Ore Geology Reviews*, 96: 269–282
- Keith M, Smith D J, Doyle K, Holwell D A, Jenkin G R T, Barry T L, Becker J, Rampe J. 2020. Pyrite chemistry: A new window into Au-Te-ore-forming processes in alkaline epithermal districts, Cripple Creek, Colorado. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 274: 172–191
- Kim E J, Park M E, White N C. 2012. Skarn gold mineralization at the Geodo mine, South Korea. *Economic Geology*, 107(3): 537–551
- Kingston G A. 1966. The occurrence of platinum bismuthotellurides in the Merensky Reef at Rustenburg platinum mine in the western Bushveld. *Mineralogical Magazine and Journal of the Mineralogical Society*, 35(274): 815–834
- Koschinsky A, Hein J R. 2003. Uptake of elements from seawater by ferromanganese crusts: Solid-phase associations and seawater speciation. *Marine Geology*, 198(3–4): 331–351
- Kyle J H, Breuer P L, Bunney K G, Pleyzier R, May P M. 2011. Review of trace toxic elements (Pb, Cd, Hg, As, Sb, Bi, Se, Te) and their deportment in gold processing. Part 1: Mineralogy, aqueous chemistry and toxicity. *Hydrometallurgy*, 107(3–4): 91–100
- Lakin H W, Thompson C E, Davidson D F. 1963. Tellurium content of marine manganese oxides and other manganese oxides. *Science*, 142(3599): 1568–1569
- Lee D C, Halliday A N. 1995. Precise determinations of the isotopic compositions and atomic weights of molybdenum, tellurium, tin and tungsten using ICP magnetic sector multiple collector mass spectrometry. *International Journal of Mass Spectrometry and Ion Processes*, 146–147: 35–46
- Lee D S, Edmond J M. 1985. Tellurium species in seawater. *Nature*, 313(6005): 782–785
- Levinson A A. 1974. *Introduction to exploration geochemistry*. Calgary: Applied Publishing
- Li X H, Xie G Q, Gleeson S A, Mao J W, Ye Z C, Jin Y L. 2023. Pal-

- ladium, platinum, selenium and tellurium enrichment in the Jiguanzui-Taohuazui Cu-Au Deposit, Edong Ore District: Distribution and comparison with Cu-Mo deposits. *Ore Geology Reviews*, 154: 105335
- Li Y H, Wang Y M, Song H B, Yue G L. 2005. Extreme enrichment of tellurium in deep-sea sediments. *Acta Geologica Sinica-English Edition*, 79(4): 547-551
- Lissner M, König S, Luguet A, le Roux P J, Schuth S, Heuser A, le Roex A P. 2014. Selenium and tellurium systematics in MORBs from the southern Mid-Atlantic Ridge (47-50 °S). *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 144: 379-402
- Lodders K. 2010. Solar system abundances of the elements. In: Goswami A, Reddy B E, eds. *Principles and Perspectives in Cosmochemistry*. Berlin, Heidelberg: Springer
- Lorand J P, Alard O. 2010. Determination of selenium and tellurium concentrations in Pyrenean peridotites (Ariege, France): New insight into S/Se/Te systematics of the upper in mantle samples. *Chemical Geology*, 278(1-2): 120-130
- Makuei F M, Senanayake G. 2018. Extraction of tellurium from lead and copper bearing feed materials and interim metallurgical products-A short review. *Minerals Engineering*, 115: 79-87
- McDonough W F, Sun S S. 1995. The composition of the Earth. *Chemical Geology*, 120(3-4): 223-253
- Missen O P, Ram R, Mills S J, Etschmann B, Reith F, Shuster J, Smith D J, Brugger J. 2020. Love is in the Earth: A review of tellurium (bio) geochemistry in surface environments. *Earth-Science Reviews*, 204: 103150
- Moynier F, Fujii T, Telouk P, Albarede F. 2008. Isotope separation of Te in chemical exchange system with Dicyclohexano-18-crown-6. *Journal of Nuclear Science and Technology*, 45(S6): 10-14
- Mueller A G, Hagemann S G, Brugger J, Xing Y L, Roberts M P. 2020. Early Fimiston and late Oroya Au-Te ore, Paringa South mine, Golden Mile, Kalgoorlie; 4. Mineralogical and thermodynamic constraints on gold deposition by magmatic fluids at 420-300 °C and 300 MPa. *Mineralium Deposita*, 55(4): 767-796
- Okrugin V, Favero M, Liu A, Etschmann B, Plutachina E, Mills S, Tomkins A G, Lukasheva M, Kozlov V, Moskaleva S, Chubarov M, Brugger J. 2017. Smoking gun for thallium geochemistry in volcanic arcs: Nataliyamalikit, TII, a new thallium mineral from an active fumarole at Avacha Volcano, Kamchatka Peninsula, Russia. *American Mineralogist*, 102(8): 1736-1746
- Pals D W, Spry P G, Chryssoulis S. 2003. Invisible gold and tellurium in arsenic-rich pyrite from the Emperor gold deposit, Fiji: Implications for gold distribution and deposition. *Economic Geology*, 98(3): 479-493
- Parker R L. 1967. Composition of the Earth's crust. In: Fleischer M, eds. *Data of Geochemistry, Sixth Edition*, Geological Survey Professional Paper 440 - D. <http://pubs.er.usgs.gov/publication/pp440D>
- Parnell J, Bellis D, Feldmann J, Bata T. 2015. Selenium and tellurium enrichment in palaeo-oil reservoirs. *Journal of Geochemical Exploration*, 148: 169-173
- Parnell J, Spinks S, Bellis D. 2016. Low-temperature concentration of tellurium and gold in continental red bed successions. *Terra Nova*, 28(3): 221-227
- Parnell J, Spinks S, Brolly C. 2018. Tellurium and selenium in Mesoproterozoic red beds. *Precambrian Research*, 305: 145-150
- Pasero M. 2020. The new IMA list of minerals. <http://cnmc.units.it/>
- Roberts S, Palmer M R, Waller L. 2006. Sm-Nd and REE characteristics of tourmaline and scheelite from the Björkdal gold deposit, northern Sweden: Evidence of an intrusion-related gold deposit? *Economic Geology*, 101(7): 1415-1425
- Rose-Weston L, Brennan J M, Fei Y W, Secco R A, Frost D J. 2009. Effect of pressure, temperature, and oxygen fugacity on the metal-silicate partitioning of Te, Se, and S: Implications for earth differentiation. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 73(15): 4598-4615
- Schirmer T, Koschinsky A, Bau M. 2014. The ratio of tellurium and selenium in geological material as a possible paleo-redox proxy. *Chemical Geology*, 376: 44-51
- Schulz K J, DeYoung J H Jr, Seal II R R, Bradley D C. 2017. Critical mineral resources of the United States-Economic and environmental geology and prospects for future supply. Reston: U. S. Geological Survey
- Shackleton J M, Spry P G, Bateman R. 2003. Telluride mineralogy of the Golden Mile deposit, Kalgoorlie, Western Australia. *The Canadian Mineralogist*, 41(6): 1503-1524
- Sillitoe R H. 2010. Porphyry copper systems. *Economic Geology*, 105(1): 3-41
- Smith C L, Rosman K J R, De Laeter J R. 1978. The isotopic composition of tellurium. *International Journal of Mass Spectrometry and Ion Physics*, 28(1): 7-17
- Smithers R M, Krouse H R. 1968. Tellurium isotope fractionation study. *Canadian Journal of Chemistry*, 46(4): 583-591
- Subbotin V V, Vymazalová A, Laufek F, Savchenko Y E, Stanley C J, Gabov D A, Plášil J. 2019. Mitrofanovite, Pt<sub>3</sub>Te<sub>4</sub>, a new mineral from the East Chuarvy deposit, Fedorovo-Pana intrusion, Kola Peninsula, Russia. *Mineralogical Magazine*, 83(4): 523-530
- Sung Y H, Ciobanu C L, Pring A, Brügger J, Skinner W, Cook N J, Nugus M. 2007. Tellurides from Sunrise Dam gold deposit, Yilgarn Craton, Western Australia: A new occurrence of nagyágite. *Mineralogy and Petrology*, 91(3): 249-270
- Sung Y H, Brugger J, Ciobanu C L, Pring A, Skinner W, Nugus M. 2009. Invisible gold in arsenian pyrite and arsenopyrite from a multistage Archean gold deposit: Sunrise Dam, Eastern Goldfields Province, Western Australia. *Mineralium Deposita*, 44(7): 765-791
- Terashima S. 2001. Determination of indium and tellurium in fifty nine geological reference materials by solvent extraction and graphite furnace atomic absorption spectrometry. *Geostandards Newsletter*, 25(1): 127-132
- Tooth B, Ciobanu C L, Green L, O'Neill B, Brugger J. 2011. Bi-melt formation and gold scavenging from hydrothermal fluids: An experimental study. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 75(19): 5423-5443
- U. S. Geological Survey. 2023. Mineral commodity summaries 2023. Reston: U. S. Geological Survey, 164-165



- van der Sloot H A, Hoede D, Wijkstra J, Duinker J C, Nolting R F. 1985. Anionic species of V, As, Se, Mo, Sb, Te and W in the Scheldt and Rhine estuaries and the Southern Bight (North Sea). *Estuarine, Coastal and Shelf Science*, 21(5): 633-651
- Vikentev I. 2016. Selenium, tellurium and precious metal mineralogy in Uchalinsk copper-zinc-pyritic district, the Urals. *IOP Conference Series; Materials Science and Engineering*, 123: 012027
- Wang Z C, Becker H. 2013. Ratios of S, Se and Te in the silicate Earth require a volatile-rich late veneer. *Nature*, 499(7458): 328-331
- Wang Z C, Becker H, Wombacher F. 2015. Mass fractions of S, Cu, Se, Mo, Ag, Cd, In, Te, Ba, Sm, W, Tl and Bi in geological reference materials and selected carbonaceous chondrites determined by isotope dilution ICP-MS. *Geostandards and Geoanalytical Research*, 39(2): 185-208
- Wedepohl K H. 1995. The composition of the continental crust. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 59(7): 1217-1232
- Whitfield M, Turner D R. 1987. The role of particles in regulating the composition of seawater. In: Stumm W, ed. *Aquatic Surface Chemistry*. New York: John Wiley & Sons, 457-493
- Woodhouse M, Goodrich A, Margolis R, James T, Dhery R, Gessert T, Barnes T, Eggert R, Albin D. 2013. Perspectives on the pathways for cadmium telluride photovoltaic module manufacturers to address expected increases in the price for tellurium. *Solar Energy Materials and Solar Cells*, 115: 199-212
- Xiong C M, Hu B. 2010. Headspace trapping of the hydrides on a Pd (II)-coated graphite adsorptive bar as a microextraction method for ETV-ICP-MS determination of Se, Te and Bi in seawater and human hair samples. *Talanta*, 81(1-2): 578-585
- Yi W, Halliday A N, Alt J C, Lee D C, Rehkämper M, Garcia M O, Langmuir C H, Su Y J. 2000. Cadmium, indium, tin, tellurium, and sulfur in oceanic basalts: Implications for chalcophile element fractionation in the Earth. *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*, 105(B8): 18927-18948
- Yierpan A, König S, Labidi J, Schoenberg R. 2019. Selenium isotope and S-Se-Te elemental systematics along the Pacific-Antarctic ridge: Role of mantle processes. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 249: 199-224
- Yierpan A, Redlinger J, König S. 2021. Selenium and tellurium in Reykjanes Ridge and Icelandic basalts: Evidence for degassing-induced Se isotope fractionation. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 313: 155-172
- Yoon B M, Shim S C, Pyun H C, Lee D S. 1990. Hydride generation atomic absorption determination of tellurium species in environmental samples with *in situ* concentration in a graphite furnace. *Analytical Sciences*, 6(4): 561-566
- Yu M Z, Chen X G, Garbe-Schönberg D, Ye Y, Chen C T A. 2019. Volatile chalcophile elements in native sulfur from a submarine hydrothermal system at Kueishantao, Offshore NE Taiwan. *Minerals*, 9(4): 245
- 陈毓川, 毛景文, 骆耀南, 魏家秀, 曹志敏, 银剑钊, 周剑雄, 杨百川. 1996. 四川大水沟碲(金)矿床地质和地球化学. 北京: 原子能出版社
- 侯增谦, 陈骏, 翟明国. 2020. 战略性关键矿产研究现状与科学前沿. *科学通报*, 65(33): 3651-3652
- 姜含璐, 代涛. 2016. 中国未来碲供需形势分析与对策建议. *中国矿业*, 25(10): 7-10
- 刘家军, 翟德高, 王大钊, 高桑, 尹超, 柳振江, 王建平, 王银宏, 张方方. 2020. Au-(Ag)-Te-Se成矿系统与成矿作用. *地学前缘*, 27(2): 79-98
- 刘新会, 冯明伸, 刘家军, 刘民武, 张永文. 2011. 西秦岭塞上特大型金矿床碲化物与金矿物共生关系研究. *黄金科学技术*, 19(4): 6-12
- 刘英俊, 曹励明, 李兆麟, 王鹤年, 储同庆, 张景荣. 1984. 元素地球化学. 北京: 科学出版社
- 毛景文, 杨宗喜, 谢桂青, 袁顺达, 周振华. 2019. 关键矿产-国际动向与思考. *矿床地质*, 38(4): 689-698
- 钱江东, 陈武, 谢家东, 黄瑾. 2000. 碲矿物综述. *高校地质学报*, 6(2): 178-187
- 邱检生, 王德滋, 任启江, 牛树桂, 朱锡元. 1994. 我国首例碲金型浅成低温热液金矿床-山东平邑归来庄金矿床. *地质与勘探*, (1): 7-12
- 涂光炽, 高振敏, 胡瑞忠, 张乾, 李朝阳, 赵振华, 张宝贵. 2004. 分散元素地球化学及成矿机制. 北京: 地质出版社
- 王瑞江, 王登红, 李建康, 孙艳, 李德先, 等. 2015. 稀有稀土稀散矿产资源及其开发利用. 北京: 地质出版社
- 谢桂青, 李新昊, 韩颖霄, 朱乔乔, 李伟, 叶晖, 宋世伟. 2020. 氧化性富金斑岩-矽卡岩矿床中碲、硒、铊富集机制的研究进展. *矿床地质*, 39(4): 559-567
- 张富元, 章伟艳, 任向文, 张霄宇, 朱克超. 2015. 全球三大洋海山钴结壳资源量估算. *海洋学报*, 37(1): 88-105
- 甄世民, 查钟健, 王大钊, 刘家军, 庞振山, 程志中, 薛建玲, 王江, 白海军, 李阳, 陈超. 2023. 河北张宣地区中山沟金矿成矿流体特征及其对侵入岩型碲金矿床的限定. *中国地质*, 50(2): 605-621
- 周涛发, 范裕, 陈静, 肖鑫, 张舒. 2020. 长江中下游成矿带关键金属矿产研究现状与进展. *科学通报*, 65(33): 3665-3677

(本文责任编辑:龚超颖;英文审校:张兴春)

季风演化的重要机制;(2)轨道尺度上建立了我国东部陆架第四纪高分辨率地层标准层序,阐明了浅水陆架区冰期-间冰期沉积环境演化模式及机制;(3)千年尺度上揭示了亚北极太平洋海冰变化历史,阐明了海冰-环流-东亚季风相互作用及其对亚北极太平洋生物泵的影响机制。



**张鑫**,1981年生,中国科学院海洋研究所研究员、博士生导师。担任国家自然科学基金委创新研究群体核心骨干,《热带海洋学报》编委、《大气与环境光学学报》青年编委、中国海洋学会海洋化学分会常务委员。主要从事深海原位探测技术研发与科学应用研究;主持国家自然科学基金的优秀青年科学基金项目、国家自然科学基金-重大研究计划重点支持项目等科研项目。发表文章80余篇,申请专利80余项,授权40余项,软件著作权8项。主要成果包括:(1)研制了以世界首台耐高温原位拉曼光谱探针和深海多通道拉曼光谱仪为代表的系列深海装备,构建了深海原位定量探测和长期实验体系;(2)首次在南海发现裸露在海底的可燃冰;在深海热液区发现自然状态下存在超临界二氧化碳和气态水;发现全球深海沉积物中甲烷被低估20倍;发现全球深海热液低温溢流区气体通量是高温集中喷发区的10~100倍。曾获“万人计划”科技创新领军人才、科技部创新人才推进计划-中青年科技创新领军人才、中国科学院青年科学家奖、侯德封岩石地球化学青年科学家奖、曾呈奎海洋科技奖(青年科技奖)、“泰山学者”青年专家等称号。



**符亚洲**,1978年生,博士,中国科学院地球化学研究所项目研究员。美国耶鲁大学访问学者。现任中国矿物岩石地球化学学会海洋地球化学专业委员会委员。主持国家自然科学基金重大研究计划培育项目、国家自然科学基金面上项目、中国大洋协会“十一五”项目、中国科学院“西部之光”项目和贵州省科学基金等科研项目。在大洋铁锰成矿作用与关键金属富集机制、富钴结壳年代学与古海洋记录等研究领域取得一系列成果。在国内外学术期刊发表论文40余篇,曾获国家海洋局海洋创新成果奖二等奖。主要学术成果包括:(1)建立了富钴结壳的Os同位素地层年代学框架并揭示了富钴结壳记录的海水Os、Sr、Mg同位素演化信息;(2)研究了富钴结壳和多金属结核中Co、Ni、Te、Pt和REY等元素变化规律、赋存状态及富集机制;(3)开展了古今海陆锰矿成矿作用对比并揭示了其成矿异同。



**卢渊**,1984年生,中国海洋大学副教授、硕士生导师。现任中国光学工程学会LIBS专业委员会常委、亚洲LIBS学会青年委员。主要从事激光诱导击穿光谱技术(LIBS)的海洋应用研究,先后主持国家自然科学基金、国家重点研发计划子课题、山东省自然科学基金等科研项目。主要成果包括:(1)国内最早开始显微LIBS技术的应用研究,建立了面向生源碳酸钙分析的方法学体系;(2)提出相对自吸收校正的概念,显著提升了LIBS定量分析的精度。先后以第一作者或通讯作者发表SCI论文20余篇,授权专利近10项,SCI他引901次,i10指数25。



**刘建国**,1978年生,中国科学院南海海洋研究所研究员,博士生导师。主要从事海洋地质与矿物学方面的研究,入选中国科学院青年创新促进会会员。以第一/通讯作者身份发表学术论文近30篇。现为中国矿物岩石地球化学学会海洋地球化学专业委员会委员和中国海洋湖沼学会地质学分会理事。