

<https://doi.org/10.3799/dqkx.2021.002>



## 富碲化物金矿床中碲的成矿作用研究进展

胡新露, 姚书振, 何谋恂, 俎波, 曾丽平, 丁振举

中国地质大学资源学院, 湖北武汉 430074

**摘要:** 碲(Te)属于稀散元素,是我国的战略关键矿产资源之一,富碲化物金矿床是碲元素的重要载体.将富碲化物金矿床划分为3种成因类型,分别为造山型金矿床、浅成中-低温热液型金矿床以及与碱性岩浆岩有关的金矿床.富碲化物金矿床可以形成于岛弧、大陆边缘、弧后盆地、绿岩带等多种构造环境,常受区域性断裂构造控制,其围岩专属性不强,矿床中存在大量碲化物,与自然金和硫化物伴生产出.成矿作用常可划分为3个阶段:石英-黄铁矿阶段、石英-多金属硫化物-碲化物阶段、石英-碳酸盐阶段,其中金和碲主要在第二阶段发生沉淀富集.成矿流体一般为中-低温、中-低盐度,呈弱酸性-中性,具有较高的 $f_{Te}$ .富碲化物金矿床中的碲主要来源于地幔、岩浆热液和赋矿围岩.碲在流体中可以呈碲氯络合物、碲硫络合物、碲氢络合物等形式迁移,也可呈气态迁移.引起碲发生沉淀的因素主要为温度或/和压力的变化、水岩反应、流体混合、流体不混溶(沸腾)、含碲气体的冷凝以及多因素的叠加.在碲的成矿作用研究中,应重视碲化物结构和成分的微区原位分析、碲同位素分析以及热力学分析.

**关键词:** 富碲化物金矿床;碲化物;稀散元素;成矿作用;研究进展;矿床地质.

中图分类号: P611

文章编号: 1000-2383(2021)11-3807-11

收稿日期: 2020-12-09

## An Overview of Advances in Tellurium Mineralization in Telluride-Rich Gold Deposits

Hu Xinlu, Yao Shuzhen, He Mouchun, Zu Bo, Zeng Liping, Ding Zhenju

School of Earth Resources, China University of Geosciences, Wuhan 430074, China

**Abstract:** Tellurium (Te) belongs to dispersed elements, and is one of the strategic key mineral resources in China. Telluride-rich gold deposits are important carriers of tellurium. In this study, telluride-rich gold deposits are divided into three genetic types: orogenic gold deposits, epithermal gold deposits, and alkaline magmatic rock-related gold deposits. Telluride-rich gold deposits are developed in island arc, continental margin, back-arc basin, greenstone belt and other tectonic environments, usually restricted by regional faults. The wall rocks show a lot of varieties. Different types of tellurides coexist with natural gold and sulfides. The Au-Te mineralization process can be usually divided into three stages: quartz-pyrite stage, quartz-polymetallic sulfide-telluride stage, and quartz-carbonate stage. Gold and tellurium are mainly enriched in the second stage. The ore-forming fluids are characterized by medium-low temperature, medium-low salinity, weakly acidic to neutral, with high  $f_{Te}$ . Tellurium is mainly originated from the mantle, magmatic hydrothermal solutions, and host rocks. Tellurium can migrate in the form of Te-Cl, Te-S, and Te-H complexes in fluids as well as vapors. Precipitation of telluride can be resulted from the change of temperature or / and pressure, water-rock reaction, fluid mixing, fluid immiscibility (boiling), condensation of Te-bearing gases, and the superposition of multiple factors. In-situ micro-analysis of the structure and composition of tellurides, Te isotopic analysis, and thermodynamic analysis are prospective ways to study the mineralization of tellurium.

**基金项目:** 国家自然科学基金项目(Nos.42072091,41602070);中央高校基本科研业务费专项资金资助项目(No.CUG160831).

**作者简介:** 胡新露(1987-),男,副教授,从事矿床学和矿田构造学研究. ORCID:0000-0003-2068-5783. E-mail: huxinlu00@foxmail.com

**引用格式:** 胡新露,姚书振,何谋恂,等,2021.富碲化物金矿床中碲的成矿作用研究进展.地球科学,46(11):3807-3817.

**Key words:** telluride-rich gold deposit; telluride; dispersed element; metallogenesis; research progress; mineral deposit.

## 0 引言

碲(Te)广泛应用于太阳能、电子、冶金等高科技领域,是我国的战略关键矿产资源之一(毛景文等,2019;翟明国等,2019)。碲在地壳中的平均丰度很低( $n \times 10^{-10}$ ),通常难以形成工业富集。目前世界上仅在我国四川省大水沟发现一例独立碲矿床,工业上需要的商业级碲主要作为伴生组分从金属矿床中综合回收。近年来,越来越多的研究表明,很多金矿床中都伴生有金及其他金属元素的碲化物,只是由于大部分矿床的碲含量低、碲化物颗粒细小而不易被发现(刘家军等,2011;蒋少涌等,2019;李建威等,2019)。因此碲的地球化学性质可能比传统认识的要活跃得多,它可以发生超常富集,形成具有经济价值的矿床或矿体。

富碲化物金矿床,又称碲金矿床或碲化物型金矿床(张招崇和李兆鼎,1994;Cook *et al.*,2009),是碲元素最重要的来源之一(涂光炽,2000;胡瑞忠等,2014)。在这类矿床中,碲化物与自然金密切共生,在金富集的部位碲化物的含量往往较高。迄今为止,人们对富碲化物金矿床的成矿地质背景、矿床地质特征、成矿流体特征、成矿物理化学条件、同位素地球化学等方面进行了不同程度的研究,但关注更多的是金的成矿作用,而对碲的成矿作用尚缺乏系统深入的总结和研究。本文综述了碲元素的地球化学性质、富碲化物金矿床的成因类型和地质特征、碲的来源、迁移形式和沉淀机制,探讨了现代分析测试技术在富碲化物金矿床中的应用,以期深化碲的成矿作用研究,为碲矿资源的勘探提供理论支撑。

## 1 碲的地球化学性质

碲在元素周期表中位于第五周期第ⅥA族(氧亚族)S-Se-Te系列,原子序数为52,原子量为127.60。碲的离子半径(0.211 nm)、晶格能系数(0.95)、离子电位(0.95 eV)等均与硫较为相似,因而经常与硫构成类质同象系列(刘家军等,2011)。碲的电负性为2.01,在自然界中可以呈现-2、-1、0、+2、+4和+6六个价态(Fornadel *et al.*,2017)。在不同的物理化学条件下,碲可以

分别表现出亲硫性和亲氧性。当碲与金属元素结合时,主要呈-2价;当与氧结合时,主要呈+4或+6价。自然界中的碲存在8种同位素,分别为 $^{120}\text{Te}$ (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%)。

自然界已发现一百余种含碲矿物,包括自然元素(自然碲和碲硒矿)、碲化物(碲与Cu、Pb、Bi、Pt、Pd、Au、Ni、Hg、Sb、Ag等金属元素结合)、碲酸盐(碲与氧结合)和亚碲酸盐矿物(硫、硒部分取代碲)。其中,Bi和Au(Ag)的碲化物矿物种类最多,且最具工业价值,碲与铋结合可形成独立碲矿床(如大水沟碲矿床),碲与金(银)结合可形成富碲化物金(银)矿床(涂光炽,2000;涂光炽等,2004)。

## 2 富碲化物金矿床的成因类型

传统上一般认为富碲化物金矿床与碱性、偏碱性侵入岩和火山杂岩具有密切的时空和成因联系,可能属于浅成低温热液型金矿床的一个亚类(张招崇和李兆鼎,1994,1997)。随着该类矿床在国内外不断被报道以及相关研究工作的深入,很多学者从不同的角度对其类型进行了进一步划分。罗镇宽等(1999)根据赋矿围岩的类型和矿化特征,将富碲化物金矿床划分为4种类型,分别为太古宙花岗-绿岩地体中的含金石英脉型矿床、元古宙火山岩中的蚀变构造岩型金矿床、中-新生代火山岩中的浅成低温热液金银矿床以及与花岗岩有关的金矿床。陈翠华等(1999)从矿物学的角度,将富碲化物金矿床划分为3种类型:(1)金全部以自然金的形式存在,与铋、镍、铅、银的碲化物共生;(2)部分以自然金的形式存在,另一部分呈金的碲化物,与其他金属的碲化物相伴生;(3)所有的金都以金的碲化物形式存在。其中第1类最常见,第2类次之,第3类较少见。

按照目前常用的金矿床分类方案,可以将富碲化物金矿床大致划分为3种成因类型:(1)造山型金矿床,主要产于前寒武系变基性火山-绿岩带中,传统上被称为石英脉性金矿床和蚀变岩型金矿床,如我国小秦岭地区的上宫金矿、杨砦峪金矿、镰子沟金矿以及澳大利亚Golden Mile金矿等(罗镇宽等,1999;Bi *et al.*,2011;王雷等,2016);(2)浅成

中-低温热液型金矿床,矿体主要产于中-新生代火山岩中,具有低温蚀变矿物组合和中-低成矿温度,如黑龙江省三道湾子金矿、山东省归来庄金矿、斐济 Emperor 金矿等(Cooke and McPhail, 2001; Pals and Spry, 2003; 李碧乐和张晗, 2010; Xu *et al.*, 2014; 翟德高, 2014; 于学峰等, 2019); (3) 与碱性岩浆岩有关的金矿床,主要赋存于碱性-偏碱性杂岩体中,成矿作用与赋矿岩体可能具有成因联系,如河北省东坪金矿、美国 Cripple Creek 金矿等(Kelley *et al.*, 1998; 张佩华, 2000)。

### 3 富碲化物金矿床的地质特征

富碲化物金矿床产出的地质构造背景多种多样,可以出现于岛弧、大陆边缘、弧后盆地、绿岩带等多种构造环境之中。世界范围内的富碲化物金矿床主要分布于环太平洋成矿带(如斐济 Emperor 金矿、美国 Cripple Creek 金矿、鲁西归来庄金矿等)、特提斯成矿带(如外喀尔巴阡与美格拉德佐尔;涂光炽, 2000)及古老克拉通周缘,常常受深大断裂带控制。我国的富碲化物金矿床主要分布于华北克拉通周缘,特别是小秦岭-熊耳山地区(如上宫金矿、杨砦峪金矿、祁雨沟金矿等)及河北省(如东坪金矿、金厂峪金矿、水泉沟金矿等)、山东省的部分地区(如归来庄金矿、金青顶金矿等)。

富碲化物金矿床的围岩专属性不强,主要为:(1)火山岩,如斐济 Emperor 金矿的赋矿围岩为玄武岩、粗面岩、二长岩、正长岩、凝灰岩和角砾岩(Fornadel *et al.*, 2019),黑龙江省三道湾子金矿床的赋矿围岩为安山岩、粗面安山岩、粗面岩、玄武质粗面安山岩和安山质角砾岩等(翟德高, 2014),河南省上宫金矿床的赋矿围岩为中元古代熊耳群中-基性火山岩(胡新露等, 2013b)。(2)侵入岩,如山东省归来庄金矿床主要赋存于由正长斑岩、二长斑岩及二长-闪长玢岩等组成的杂岩体中(于学峰等, 2019),河北省东坪金矿床赋存于水泉沟杂岩体中,由二长岩、石英二长岩、角闪二长岩和闪长岩组成(Cook *et al.*, 2009)。(3)古老变质岩,如澳大利亚 Golden Mile 金矿床赋存于太古宙绿片岩相变质岩中(Mueller and Muhling, 2020),河南省杨砦峪金矿床产于太古宙太华群深变质岩系中。

富碲化物金矿床的产出一般受区域性断裂构造控制。产于火山岩、次火山岩中的矿体常常受破

火山口构造控制,矿化一般产于破火山口边缘的断裂中以及一些岩脉的两侧。与侵入体有关的矿床,其矿体主要受岩体的内外接触带及矿区的其他断裂构造控制。富碲化物金矿床的矿体多呈脉状、透镜状产出,沿走向和倾向常出现膨胀狭缩、分支复合现象。矿石主要为浸染状、脉状、角砾状,矿化多分布在同期或早期的火山岩、侵入岩或绿片岩中。

富碲化物金矿床存在大量碲化物与自然金和硫化物伴生产出。硫化物一般以黄铁矿为主,其次为黄铜矿、方铅矿、闪锌矿等。常见的碲化物包括金银碲化物(如碲金矿、碲银矿、碲金银矿、针碲金银矿和斜方碲金矿等)、碲铅矿、碲镍矿、碲铋矿、碲铅铋矿、辉碲铋矿、碲汞矿等,常常与自然金相伴生。金主要以独立的金银系列矿物存在,少量以金的碲化物形式存在。碲主要以碲化物、自然碲及显微-超显微包裹体的形式存在。脉石矿物主要为石英,常呈石英脉的形式出现,其次为方解石、绢云母、粘土矿物等。围岩蚀变类型主要包括硅化、黄铁矿化、绢云母化、泥化、碳酸盐化等。

富碲化物金矿床的矿物生成顺序具有一定的规律,成矿作用常常可以划分为3个主要阶段:石英-黄铁矿阶段、石英-多金属硫化物-碲化物阶段、石英-碳酸盐阶段,如我国小秦岭地区的金矿床(胡新露等, 2013a)、黑龙江省三道湾子金矿床(翟德高, 2014)、河北省东坪金矿床(张佩华, 2000)、澳大利亚 Golden Mile 金矿床(Mueller and Muhling, 2020)等。其中石英-多金属硫化物-碲化物阶段是金和碲的主成矿阶段。

流体包裹体显微测温结果表明,富碲化物金矿床成矿流体的温度、压力和盐度变化范围较大,但大多表现出中-低温(170~350 °C)、中-低盐度(0.35%~15.00% wt. NaCl eqv.)的特征(Afifi *et al.*, 1988; 张招崇和李兆鼐, 1994; 涂光炽等, 2004)。成矿流体呈弱酸性-中性(pH 值为 4.5~7.0),一般具有较高的 $f_{Te_2}$ 、较低的 $f_{S_2}$ 和 $f_{O_2}$ ,流体演化过程中常发生沸腾和混合作用。金属组分一般来源于深部岩浆活动,而H-O-C-S可以来源于岩浆也可来源于围岩地层。张招崇和李兆鼐(1997)认为,富碲化物型金矿床的形成需具备3个条件:高Te地球化学背景场;酸性环境(有利于Te活化和迁移);低温、高 $f_{Te_2}$ 和 $f_{Te_2/S_2}$ 比值(有利于碲化物沉淀)。

## 4 碲的来源

关于碲的来源主要有以下几种观点:

**地幔来源:**认为岩石圈地幔的上涌或地幔交代作用可以产生大量富碲的流体或岩浆,这些流体或岩浆沿深大断裂将碲搬运至地壳浅部,并在有利构造中沉淀富集(Harris *et al.*, 2013). 如大水沟碲矿床、东坪金矿床、归来庄金矿床、松里沟金矿床等(Mao *et al.*, 2002; Li *et al.*, 2018; Wang *et al.*, 2020).

**岩浆热液来源:**对于与火山-次火山岩有关的矿床,很多学者认为碲来源于岩浆. 例如希腊 Kassiteres-Sappes 地区的多中心斑岩-热液系统具有 Au-Ag-Te-Bi-Mo 的成矿元素组合,指示成矿流体来源于岩浆,碲来源于英安斑岩和流纹斑岩(Voudouris *et al.*, 2006). 希腊 Perama Hill Au-Ag-Te-Se 矿床中的 Te 被认为是来源于斑岩岩浆热液的脱气作用(Voudouris *et al.*, 2011).

**围岩来源:**赋存于古老绿片岩中的伴生碲矿床,很多学者认为其围岩可能是碲的矿源层. 如河北水泉沟碲金矿田中太古界桑干群变质岩的 Te 含量为  $0.5 \times 10^{-6} \sim 1.2 \times 10^{-6}$ ,小秦岭-熊耳山地区的熊耳群和太华群地层中 Te 含量为  $0.8 \times 10^{-7} \sim 1.5 \times 10^{-7}$ ,其较高的 Te 背景值可能为这些

地区富碲化物金矿床的形成提供了物质基础(张招崇和李兆鼎,1997;任富根等,2000). 澳大利亚 Golden Mile 矿床中碲化物的矿物学研究也表明,碲可能是在深源流体流经围岩的过程中捕获富集的(Mueller and Muhling, 2020).

## 5 碲的迁移形式

碲的迁移形式与碲的化学性质、流体的成分及热力学条件等因素有关. 在不同的热力学条件下,碲的主要迁移形式是不同的. 国内外学者通过实验模拟、热力学计算、流体包裹体成分分析及矿物共生组合分析等手段来推测流体中碲的迁移形式,认为碲可以与 Cl、S、H 等形成络合物在流体中迁移,还可呈气态形式迁移.

**碲氢络合物:**Zhang and Spry (1994) 通过热力学计算表明,在浅成中低温热液矿床的 Te-H-O 体系中,在还原性、酸性到中性的 pH 值条件下,碲主要以  $H_2Te(aq)$  和  $HTe^-$  的形式存在,而在相对氧化条件下,碲主要以  $H_3TeO_3^+$ 、 $H_2TeO_3$  和  $HTeO_3^-$  的形式存在(图 1). 而且随着流体温度升高,  $H_2TeO_3$  稳定的 pH 值范围更大(图 1; Grundler *et al.*, 2013). 王玉婷(2011) 通过热力学计算,认为大水沟碲矿床中的碲主要以氢化物的形式迁移.

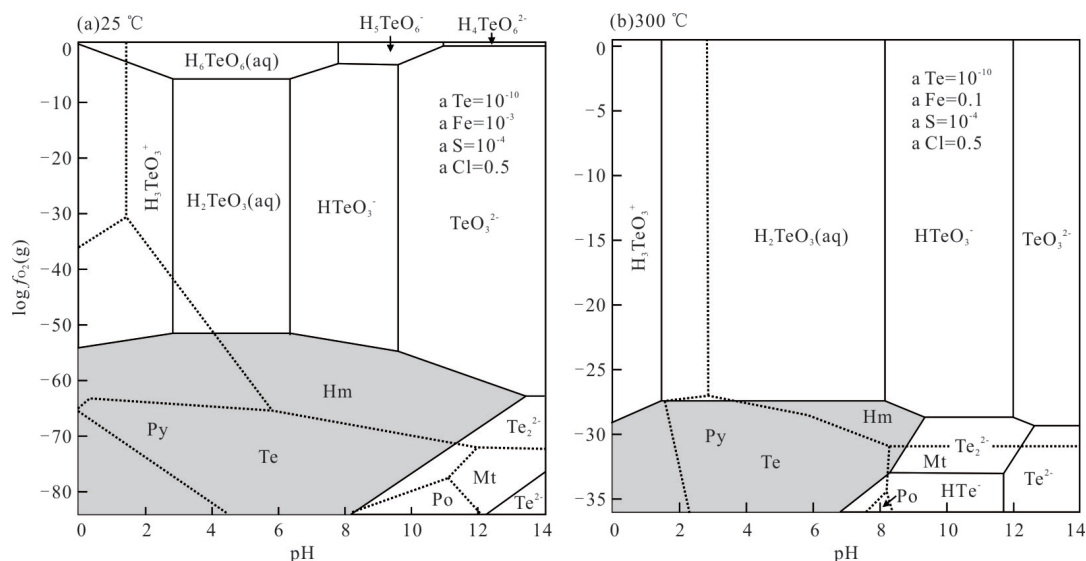


图 1 在 25 °C 和 300 °C 条件下,自然碲和水溶液中碲化物的 pH-氧逸度稳定范围

Fig. 1 Solubility of native tellurium and predominance fields of aqueous Te species as a function of pH and oxygen fugacity at 25 and 300 °C

据 Grundler *et al.* (2013). 矿物代号:Py. 黄铁矿;Po. 磁黄铁矿;Mt. 磁铁矿;Hm. 赤铁矿

**碲氯络合物:**陈毓川等(1996)认为氯离子在溶液中可以与重金属结合形成氯基络合物,从而运载  $\text{Au}^+$ 、 $\text{Cu}^{3+}$ 、 $\text{Te}^+$ 、 $\text{Bi}^+$  等元素.实验表明,Te 能与 Cl 结合形成  $\text{TeCl}_2$ 、 $\text{TeCl}_4$  等络合物,且具有低沸点、高挥发性的特点.在酸性、强氧化性和高氯离子活度的溶液中,  $\text{Te}^{4+}$  可以呈氯络合物形式迁移.例如河北水泉沟金矿田中的碲、金被认为是以氯络合物形式迁移的(张招崇和李兆鼎,1997).

**碲硫络合物:**硫的化学性质活泼,可以与绝大多数非金属元素化合.大多数热液成因的硫化物矿床中都有不同程度的碲富集,表明碲具有明显的亲硫性.热力学实验表明,碲能以  $[\text{TeS}_3]^{2-}$ 、 $[\text{AuTeS}_3]^-$  等形式存在于碱金属硫化物溶液中(阮林森,2013).广东关田黄铁矿矿床中的碲被认为是以  $[\text{TeS}_3]^{2-}$  和  $[\text{AuTeS}_3]^-$  的形式迁移的(黄富荣,1998).

**碲的气态运移:**实验表明,当温度达  $300\text{ }^\circ\text{C}$  时,碲化物在热液流体中的溶解度非常低(不到  $10 \times 10^{-9}$ ),因此在高温条件下碲可能是以气态形式运移的(McPhail, 1995; Pokrovski *et al.*, 2013).部分学者认为富碲化物金矿床中的 Te 在相分离的过程中可能以  $\text{Te}_2(\text{g})$  和  $\text{H}_2\text{Te}(\text{g})$  的形式进入气相,如美国的 Cripple Creek 金矿床(Keith *et al.*, 2020).

## 6 碲的沉淀机制

引起碲沉淀的机制主要有以下几种:温度或/和压力的变化、水岩反应、流体混合、流体不混溶(沸腾)、含碲气体的冷凝以及多因素的叠加.

**水岩反应:**对富 Te 矿床的流体包裹体成分分析表明,富含 Te 的流体可以是强氧化性的,也可以是强还原性的(Grundler *et al.*, 2013).氧化性的流体在演化过程中通过水岩反应可以形成还原流体,从而降低流体中的 Te 氧化价态,促使 Te 与 Au 结合形成碲化物而沉淀(Grundler *et al.*, 2013).而在还原性的流体中碲主要以  $\text{Te}_2^{2-}$  的形式存在(Bruggner *et al.*, 2012),通过相关的水岩反应可以使碲氧化,从而与 Au 结合形成碲化物而沉淀(Evans *et al.*, 2006; 王玉婷,2011).

**流体混合:**当不同性质的流体发生混合时,流体的温度、盐度及其他物理化学参数会发生相应改变,从而导致碲在流体中的溶解度发生变化而沉淀.例如,张佩华(2000)通过对东坪金矿的流体包裹体研究,认为深部富  $\text{Te}_2$ 、 $\text{CO}_2$  的高温流体与区域建造

水的混合,导致了 Te 的沉淀富集.

**流体不混溶(沸腾):**流体不混溶(沸腾)作用会导致相分离,促使气体发生逃逸,从而改变成矿流体的成分和物理化学参数,使成矿物质发生过饱和而沉淀.例如,Ahmad *et al.*(1987)通过矿物学和地球化学研究,认为斐济 Emperor 金矿床中碲化物的沉淀主要与成矿流体的沸腾和冷却有关.

**含碲气体的冷凝:**部分深源碱性岩浆的脱气作用可以产生  $\text{Te}_2(\text{g})$  和  $\text{H}_2\text{Te}(\text{g})$  等含碲气体(Zhai *et al.*, 2018; 刘家军等,2020),这些气体通过冷凝作用进入成矿流体,可导致碲的沉淀.例如Cooke and McPhail(2001)对菲律宾 Acupan 金矿床进行了热力学模拟,认为  $\text{Te}_2(\text{g})$  和  $\text{H}_2\text{Te}(\text{g})$  等气体来源于碱性岩浆脱气,它们冷凝之后混入到含金属的卤水中,导致了金、银碲化物的沉淀.

**多因素叠加:**Shackleton *et al.*(2003)对澳大利亚 Golden Mile 金碲矿床进行了研究,认为单一成矿机制不能大规模成矿,富碲矿床的形成是多种成矿机制叠加复合的结果,如流体的相分离、水岩反应、流体温度下降、流体混合等等.阮林森(2013)对大水沟碲矿床的成因进行了分析,认为构造裂隙脉动式的挤压和引张导致了周期性的流体沸腾、浓缩和流体混合作用,这些综合因素共同导致了碲的沉淀富集.Zhai *et al.*(2018)对三道湾子金矿床的流体包裹体和成矿物理化学条件进行了研究,认为岩浆脱气、水岩反应、流体混合的共同作用导致了 Au、Te 的沉淀富集.

## 7 碲金共(伴)生成因

碲和金在地壳中的丰度均为  $10^{-10} \sim 10^{-9}$  级,然而在热液金矿床中,碲与金常常密切伴生,在富碲化物金矿床中,它们更是同时发生超常富集,因此部分学者认为金和碲可能具有相同的来源,并且同时以含水络合物的形式迁移和沉淀(罗镇宽等,1999).相关实验也证实碲在酸性-中性及还原环境中可以与金、银形成  $\text{Ag}(\text{HTe})^{2-}$  和  $\text{Au}(\text{HTe})^{2-}$  络合物(Tombros *et al.*, 2007).然而以下证据表明,成矿流体中的碲和金可能具有不同的迁移形式和/或来源:

(1)与碲氯络合物、碲硫络合物、碲氢络合物以及金硫络合物( $\text{Au}(\text{HS})_2^-$  和  $\text{Au}(\text{HS})^0$ )相比,碲金(银)络合物在卤水中的溶解度要低得多,因而不太可能作为碲或金(银)的主要迁移形式.

(2) 金和碲发生沉淀富集所需的物理化学条件具有较大差异, 在大多数富碲化物金矿床主成矿阶段的温度、氧逸度和 pH 条件下, 碲在流体中的理论溶解度很低(张佩华, 2000)。

(3) 大部分载金硫化物(如黄铁矿)的 Te/Au 比值很低, 而碲金矿物一般并不是金的主要载体, 暗示碲可能不足以有效地搬运金。

(4) 碲化物的形成常常晚于自然金开始而早于自然金结束, 碲往往只在矿床的局部空间发生富集, 表明金和碲可能具有不同的迁移沉淀过程。

因此尽管碲和金共(伴)生的现象在矿床中十分普遍, 但目前并没有十分合理的解释。考虑到上地幔中金和碲的丰度要远远高于地壳, 大多数富碲化物金矿床中的金和碲可能与上地幔源区有某种联系, 只是它们的迁移形式和富集过程有所不同。Keith *et al.* (2020) 对美国 Cripple Creek 金矿中的 Au-Te 共生分异机理进行了研究, 认为流体沸腾作用是导致低品位矿石中 Au 和 Te 发生分离的主要原因, 而在较高的氧逸度条件下, 高品位矿石中的 Au 和 Te 同时发生沉淀。

## 8 碲的成矿作用研究方向

近年来, 随着成矿理论的进展以及现代分析测试技术水平的提高, 一些学者开始将一些新的方法应用于碲的成矿作用研究。

(1) 碲化物结构和成分的微区原位分析。矿床中碲化物矿物的种类较多, 其生成顺序、产出状态及形成的物理化学条件也不尽相同, 因而蕴含着丰富的矿床成因信息。通过对碲化物矿物显微结构的精细观察, 可以查明碲化物矿物的类型、生成顺序及其与金属硫化物和脉石矿物之间的共/伴生关系, 揭示碲的赋存状态以及碲化物在热液活动中的结晶过程。在大多数富碲化物金矿床中, 碲化物矿物的种类多、颗粒细小、结构复杂。利用光学显微镜、电子探针(EMPA)、环境扫描电子显微镜(SEM)和透射电镜(TEM)等技术, 可以准确厘定碲化物的类型、结构及碲的赋存状态(Hu *et al.*, 2018; 谢惠丽等, 2020)。例如, Pals and Spry (2003) 利用这些技术对斐济 Emperor 金矿床中碲的赋存状态开展了研究, 认为碲主要以碲化物、自然碲以及显微-超显微包裹体的形式存在。

对不同时间形成的碲化物开展微量元素微区分析, 可以反演成矿流体的成分特征及演化规律

(范宏瑞等, 2018)。目前, 激光剥蚀电感耦合等离子体质谱(LA-ICP-MS)技术已经成熟, 可以对碲化物或硫化物中的微量元素进行准确的原位分析(郭伟等, 2020)。通过 LA-ICP-MS 或纳米二次离子质谱(NanoSIMS)元素线扫描、面扫描分析, 可以直观地揭示碲化物和硫化物中的元素组合及其空间分布规律。例如, Cook *et al.* (2009) 利用 LA-ICP-MS 对东坪金矿床中不同结构的黄铁矿进行了原位分析, 表明碲和其他低熔点亲铜元素(如铋)对控制黄铁矿中金的分布和富集起到了重要作用。Mueller and Muhling (2020) 对澳大利亚 Golden Mile 金矿中碲化物和硫化物的类型和成分进行分析, 探讨了成矿流体的来源和演化。

(2) 碲同位素分析。早期的碲同位素分析主要采用阳离子或阴离子热电离质谱仪(P-TIMS 或 N-TIMS), 如今更多使用多接收电感耦合等离子体质谱仪(MC-ICP-MS)进行碲同位素分析(Fehr *et al.*, 2004)。一些研究者对陨石、各类沉积物、热液矿床中的含碲矿物的碲同位素进行了分析(Fehr *et al.*, 2004; Fornadel *et al.*, 2014, 2019), 表明不同储库的碲同位素存在一定差异, 而且碲同位素的分馏还受到氧化还原条件的影响, 因此有望使用碲同位素来示踪成矿物质来源, 反演成矿物理化学条件和成矿过程(陈加杰等, 2020)。例如 Fornadel *et al.* (2014, 2017, 2019) 应用 MC-ICP-MS 对多个富碲化物金矿床中的自然碲和碲化物矿物进行了碲同位素测试, 结果表明各矿床中矿石样品的  $\delta^{130/125}\text{Te}$  变化范围为  $-1.58\text{‰} \sim +0.66\text{‰}$ , 且同一矿床中不同样品的  $\delta^{130/125}\text{Te}$  也变化较大, 他们认为碲同位素值可能受围岩中的碲同位素含量、流体性质、水岩反应程度等因素的制约。

(3) 热力学分析。通过流体包裹体显微测温以及其他地质温度计和压力计, 可以获得成矿流体的温度和压力。结合激光拉曼、气相色谱和离子色谱分析等手段, 可以查明成矿流体的离子浓度( $\text{K}^+$ 、 $\text{Na}^+$ 、 $\text{Ca}^{2+}$ 、 $\text{Mg}^{2+}$ 等)和气相成分( $\text{H}_2\text{O}$ 、 $\text{CO}_2$ 、 $\text{CH}_4$ 等)组成。在此基础上, 根据富碲化物金矿床中碲化物、硫化物、氧化物和硅酸盐矿物的共生组合和生成顺序, 利用相平衡关系和相应的热力学数据, 可以计算得到成矿流体的其他物理化学参数, 如 pH、氧逸度、硫逸度、碲逸度等。通过构建 pH-氧逸度及硫逸度-碲逸度等物理化学相图, 可以限定碲化物与其他矿物稳定共生的物理化学条件, 分析引起碲络合

物活度变化的关键热力学参数,解释引起碲化物沉淀的地质过程和机制.例如,胡新露等(2013b)对河南省上宫金矿床成矿流体的热力学参数进行了定量计算,认为该矿床的成矿流体为中温、中低压、低盐度、酸性、还原性的含碲流体,成矿温度降低、pH 升高、氧逸度降低、HS<sup>-</sup>活度减小等因素共同导致了金的沉淀.Zhai *et al.*(2018)通过构建物理化学相图,认为围岩的硫化作用(使流体的 HS<sup>-</sup>活度减小)和含 H<sub>2</sub>Te 气体的冷凝(使流体的 HTe<sup>-</sup>活度增加)是导致金银碲化物沉淀的主要因素.

近几十年来,根据碲化物及相关矿物的热力学参数来确定热液体系的相平衡关系及物理化学条件的研究方法不断得到应用和发展,逐渐积累了较丰富的碲化物热力学数据(Afifi *et al.*, 1988; McPhail, 1995; Simon and Essene, 1996; Zimmer *et al.*, 2016),但一些数据的精度和自洽性还有待检验.

## 9 结论

富碲化物金矿床是碲元素的最重要的载体之一,人们对其地质特征、成矿流体特征、矿物学特征、同位素地球化学等方面已取得了一些共识,但在一些关键问题上还存在许多分歧,如矿床中碲的来源、碲在成矿流体中的迁移形式、成矿热力学条件以及诱发碲元素超常富集的关键因素等.

富碲化物金矿床主要有 3 种成因类型:造山型金矿床、浅成中-低温热液型金矿床以及与碱性岩浆岩有关的金矿床.富碲化物金矿床中的碲主要来源于地幔、岩浆热液和赋矿围岩.碲在流体中可以呈碲氯络合物、碲硫络合物、碲氢络合物等形式迁移,也可呈气态迁移.引起碲发生沉淀的因素主要为温度或/和压力的变化、水岩反应、流体混合、流体不混溶(沸腾)、含碲气体的冷凝以及多因素的叠加.

富碲化物金矿床中的金和碲可能均与上地幔源区有某种联系,但它们的迁移形式和富集机制可能有所不同.在碲的成矿作用研究中,应重视碲化物结构和成分的微区原位分析、碲同位素分析以及根据碲化物和其他矿物的共生组合关系构建物理化学相图进行热力学分析.

致谢:本文是在前人工作基础上的总结研究,由于作者学识和文章篇幅所限,无法逐一引用和列举前人成果,谨向所有从事相关研究的作者致以衷

心感谢,不足之处敬请各位同行批评指正.感谢两位匿名审稿人和编委所提的建设性意见!

## References

- Afifi, A. M., Kelly, W. C., Essene, E. J., 1988. Phase Relations among Tellurides, Sulfides, and Oxides; I, Thermochemical Data and Calculated Equilibria. *Economic Geology*, 83(2): 377–394. <https://doi.org/10.2113/gsecongeo.83.2.377>
- Ahmad, M., Solomon, M., Walshe, J. L., 1987. Mineralogical and Geochemical Studies of the Emperor Gold Telluride Deposit, Fiji. *Economic Geology*, 82(2): 345–370. <https://doi.org/10.2113/gsecongeo.82.2.345>
- Bi, S. J., Li, J. W., Zhou, M. F., et al., 2011. Gold Distribution in As-Deficient Pyrite and Telluride Mineralogy of the Yangzhaiyu Gold Deposit, Xiaolinling District, Southern North China Craton. *Mineralium Deposita*, 46(8): 925–941. <https://doi.org/10.1007/s00126-011-0359-2>
- Brugger, J., Etschmann, B. E., Grundler, P. V., et al., 2012. XAS Evidence for the Stability of Polytellurides in Hydrothermal Fluids up to 599 °C, 800 Bar. *American Mineralogist*, 97(8/9): 1519–1522. <https://doi.org/10.2138/am.2012.4167>
- Chen, C.H., Cao, Z.M., Hou, X.P., et al., 1999. The Distributive Law and Main Minerogenic Conditions of Gold-Telluride Deposits in the World. *Journal of Chengdu University of Technology (Science & Technology Edition)*, 26(3): 241–248 (in Chinese with English abstract).
- Chen, J.J., Leng, C.B., Xu, D.R., et al., 2020. Analytical Techniques for Tellurium Stable Isotopes and Their Geological Applications: A Review. *Acta Geologica Sinica*, 94(5): 1655–1663 (in Chinese with English abstract).
- Chen, Y.C., Mao, J.W., Luo, Y.N., 1996. Geology and Geochemistry of the Dashuigou Te (Au) Deposit in Dashuigou, Sichuan Province. Atomic Energy Press, Beijing, 1–106 (in Chinese).
- 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(1/2/3/4): 101–121.
- Cooke, D. R., McPhail, D. C., 2001. Epithermal Au-Ag-Te Mineralization, Acupan, Baguio District, Philippines: Numerical Simulations of Mineral Deposition. *Economic Geology*, 96(1): 109–131. <https://doi.org/10.2113/gsecongeo.96.1.109>
- Evans, K. A., Phillips, G. N., Powell, R., 2006. Rock-

- Buffering of Auriferous Fluids in Altered Rocks Associated with the Golden Mile-Style Mineralization, Kalgoorlie Gold Field, Western Australia. *Economic Geology*, 101(4): 805–818.
- Fan, H.R., Li, X. H., Zuo, Y.B., et al., 2018. In-Situ LA-(MC)-ICPMS and (Nano) SIMS Trace Elements and Sulfur Isotope Analyses on Sulfides and Application to Confine Metallogenic Process of Ore Deposit. *Acta Petrologica Sinica*, 34(12): 3479–3496 (in Chinese with English abstract).
- 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.
- Fornadel, A. P., Spry, P. G., Haghnegahdar, M. A., et al., 2017. Stable Te Isotope Fractionation in Tellurium-Bearing Minerals from Precious Metal Hydrothermal Ore Deposits. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 202: 215–230. <https://doi.org/10.1016/j.gca.2016.12.025>
- 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. <https://doi.org/10.1016/j.oregeorev.2019.103076>
- Fornadel, A. P., Spry, P. G., Jackson, S. E., et al., 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. <https://doi.org/10.1039/C3JA50237F>
- Grundler, P.V., Brugger, J., Etschmann, B.E., et al., 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. <https://doi.org/10.1016/j.gca.2013.06.009>
- Guo, W., Lin, X., Hu, S.H., 2020. Advances in LA-ICP-MS Analysis for Individual Fluid Inclusions and Applications. *Earth Science*, 45(4): 1362–1374 (in Chinese with English abstract).
- Harris, C. R., Pettke, T., Heinrich, C. A., et al., 2013. Tethyan Mantle Metasomatism Creates Subduction Geochemical Signatures in Non-Arc Cu-Au-Te Mineralizing Magmas, Apuseni Mountains (Romania). *Earth and Planetary Science Letters*, 366: 122–136. <https://doi.org/10.1016/j.epsl.2013.01.035>
- Hu, R.Z., Wen, H.J., Su, W.C., et al., 2014. Some Advances in Ore Deposit Geochemistry in Last Decade. *Bulletin of Mineralogy, Petrology and Geochemistry*, 33(2): 127–144 (in Chinese with English abstract).
- Hu, X. L., Gong, Y. J., Zeng, G. P., et al., 2018. Multi-stage Pyrite in the Getang Sediment-Hosted Disseminated Gold Deposit, Southwestern Guizhou Province, China: Insights from Textures and In Situ Chemical and Sulfur Isotopic Analyses. *Ore Geology Reviews*, 99: 1–16. <https://doi.org/10.1016/j.oregeorev.2018.05.020>
- Hu, X.L., He, M.C., Yao, S. Z., 2013a. New Understanding of the Source of Ore-Forming Material and Fluid in the Shanggong Gold Deposit, East Qinling. *Acta Geologica Sinica*, 87(1): 91–100 (in Chinese with English abstract).
- Hu, X.L., Yao, S.Z., He, M. C., et al., 2013b. Metallogenic Thermodynamic Conditions and Ore-Forming Mechanism of Shanggong Gold Deposit, Henan Province. *Journal of Central South University (Science and Technology)*, 44(12): 4962–4971 (in Chinese with English abstract).
- Huang, F.R., 1998. Concentration and Geochemical Behaviour of Tellurium in Guantian Pyrite Deposit. *Acta Geoscientia Sinica*, 19(1): 50–58 (in Chinese with English abstract).
- Jiang, S. Y., Wen, H.J., Xu, C., et al., 2019. Earth Sphere Cycling and Enrichment Mechanism of Critical Metals: Major Scientific Issues for Future Research. *Bulletin of National Natural Science Foundation of China*, 33(2): 112–118 (in Chinese with English abstract).
- Keith, M., Smith, D. J., Doyle, K., et al., 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. <https://doi.org/10.1016/j.gca.2020.01.056>
- Kelley, K. D., Romberger, S. B., Beatty, D. W., et al., 1998. Geochemical and Geochronological Constraints on the Genesis of Au-Te Deposits at Cripple Creek, Colorado. *Economic Geology*, 93(7): 981–1012. <https://doi.org/10.2113/gsecongeo.93.7.981>
- Li, B.L., Zhang, H., 2010. Some Advances in the Research of Epithermal Gold Deposits. *Acta Mineralogica Sinica*, 30(1): 90–97 (in Chinese with English abstract).
- Li, J. W., Zhao, X.F., Deng, X.D., et al., 2019. An Overview of the Advance on the Study of China's Ore Deposits during the Last Seventy Years. *Science in China (Series D: Earth Sciences)*, 49(11): 1720–1771 (in Chinese).
- Li, L., Li, S.R., Santosh, M., et al., 2018. Early Jurassic De-



- cratonic Gold Metallogenesis in the Eastern North China Craton: Constraints from S-Pb-C-D-O Isotopic Systematics and Pyrite Rb-Sr Geochronology of the Guilaizhuang Te-Au Deposit. *Ore Geology Reviews*, 92: 558–568. <https://doi.org/10.1016/j.oregeorev.2017.12.009>
- Liu, J.J., Zhai, D.G., Liu, X.H., et al., 2011. Super-Enrichment of Selenium and Tellurium in Gold Deposits: An Overview. *Acta Mineralogica Sinica*, 31(S1): 267–269 (in Chinese).
- Liu, J.J., Zhai, D.G., Wang, D.Z., et al., 2020. Classification and Mineralization of the Au-(Ag)-Te-Se Deposits. *Earth Science Frontiers*, 27(2): 79–98 (in Chinese with English abstract).
- Luo, Z.K., Guan, K., Wang, M.Z., et al., 1999. The Features of Telluride in Some Gold Deposits, China. *Gold Geology*, (3): 69–75 (in Chinese with English abstract).
- Mao, J. W., Wang, Y. T., Ding, T. P., et al., 2002. Dashuigou Tellurium Deposit in Sichuan Province, China: S, C, O, and H Isotope Data and Their Implications on Hydrothermal Mineralization. *Resource Geology*, 52(1): 15–23. <https://doi.org/10.1111/j.1751-3928.2002.tb00113.x>
- Mao, J.W., Yuan, S.D., Xie, G.Q., et al., 2019. New Advances on Metallogenic Studies and Exploration on Critical Minerals of China in 21st Century. *Mineral Deposits*, 38(5): 935–969 (in Chinese with English abstract).
- McPhail, D.C., 1995. Thermodynamic Properties of Aqueous Tellurium Species between 25°C and 250°C. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 59(5): 851–866. [https://doi.org/10.1016/0016-7037\(94\)00353-X](https://doi.org/10.1016/0016-7037(94)00353-X)
- Mueller, A. G., Muhling, J. R., 2020. Early Pyrite and Late Telluride Mineralization in Vanadium-Rich Gold Ore from the Oroya Shoot, Paringa South Mine, Golden Mile, Kalgoorlie: 3. Ore Mineralogy, Pb-Te (Au-Ag) Melt Inclusions, and Stable Isotope Constraints on Fluid Sources. *Mineralium Deposita*, 55(4): 733–766. <https://doi.org/10.1007/s00126-019-00876-6>
- Pals, D. W., Spry, P. G., 2003. Telluride Mineralogy of the Low-Sulfidation Epithermal Emperor Gold Deposit, Vatukoula, Fiji. *Mineralogy and Petrology*, 79(3/4): 285–307. <https://doi.org/10.1007/s00710-003-0013-5>
- Pokrovski, G. S., Borisova, A. Y., Bychkov, A. Y., 2013. Speciation and Transport of Metals and Metalloids in Geological Vapors. *Reviews in Mineralogy and Geochemistry*, 76(1): 165–218. <https://doi.org/10.2138/rmg.2013.76.6>
- Ren, F.G., Li, S.B., Zhao, J.N., et al., 2000. Exploring Gold Deposits in the Volcanic Rocks of the Xiong'er Group Using Tellurium (Selenium) Geochemical Information. *Bulletin of Mineralogy, Petrology and Geochemistry*, 19(4): 401–402 (in Chinese).
- Ruan, L. S., 2013. The Metallogenic Regularity of Dashuigou Tellurium Deposit, Shimian, Sichuan Province and the Origination of Prospecting (Dissertation). China University of Geosciences, Wuhan (in Chinese with English abstract).
- 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. <https://doi.org/10.2113/gscanmin.41.6.1503>
- Simon, G., Essene, E. J., 1996. Phase Relations among Selenides, Sulfides, Tellurides, and Oxides; I, Thermodynamic Properties and Calculated Equilibria. *Economic Geology*, 91(7): 1183–1208. <https://doi.org/10.2113/gsecongeo.91.7.1183>
- Tombros, S., Seymour, K.S.T., Williams-Jones, A.E., et al., 2007. The Genesis of Epithermal Au-Ag-Te Mineralization, Panormos Bay, Tinos Island, Cyclades, Greece. *Economic Geology*, 102: 1269–1294. <https://doi.org/10.2113/gsecongeo.102.7.1269>
- Tu, G.C., 2000. A Preliminary Discussion on the Mineralization of Tellurium. *Bulletin of Mineralogy, Petrology and Geochemistry*, 19(4): 211–214 (in Chinese).
- Tu, G.C., Gao, Z.M., Hu, R.Z., et al., 2004. The Geochemistry and Metallogenic Mechanism of Dispersed Elements. Geological Publishing House, Beijing, 1–288 (in Chinese).
- Voudouris, P. C., Melfos, V., Spry, P. G., et al., 2011. Mineralogy and Geochemical Environment of Formation of the Perama Hill High-Sulfidation Epithermal Au-Ag-Te-Se Deposit, Petrotta Graben, NE Greece. *Mineralogy and Petrology*, 103(1–4): 79–100. <https://doi.org/10.1007/s00710-011-0160-z>
- Voudouris, P., Tarkian, M., Arikas, K., 2006. Mineralogy of Telluride-Bearing Epithermal Ores in the Kassiteres-Sappes Area, Western Thrace, Greece. *Mineralogy and Petrology*, 87(1/2): 31–52. <https://doi.org/10.1007/s00710-005-0119-z>
- Wang, L., Liu, J.J., Zhu, W.B., et al., 2016. Mineral Association and Mechanism of Mineral Precipitation of Lianzigou Gold-Telluride Deposit in Xiaoqinling Gold Orefield, Shaanxi Province. *Mineral Deposits*, 35(3): 456–474 (in Chinese with English abstract).
- Wang, P., Jian, W., Mao, J. W., et al., 2020. Geochronology and Fluid Source Constraints of the Songligou Gold-Telluride Deposit, Western Henan Province, China:

- Analysis of Genetic Implications. *Resource Geology*, 70 (2): 169–187. <https://doi.org/10.1111/rge.12228>
- Wang, Y. T., 2011. On the Geochemical Process of Mineralization of Tellurium Deposit in Dashiugou of Shimian County in Sichuan Province (Dissertation). Chengdu University of Technology, Chengdu (in Chinese with English abstract).
- Xie, H. L., Jiao, Y. Q., Liu, Z. Y., et al., 2020. Occurrence and Enrichment Mechanism of Uranium Ore Minerals from Sandstone-Type Uranium Deposit, Northern Ordos Basin. *Earth Science*, 45(5): 1531–1543 (in Chinese with English abstract).
- Xu, W. G., Fan, H. R., Hu, F. F., et al., 2014. Gold Mineralization in the Guilaizhuang Deposit, Southwestern Shandong Province, China: Insights from Phase Relations among Sulfides, Tellurides, Selenides and Oxides. *Ore Geology Reviews*, 56: 276–291. <https://doi.org/10.1016/j.oregeorev.2013.06.010>
- Yu, X. F., Li, D. P., Li, Z. S., et al., 2019. Research on Geochemical Process of Te-Au Elements in Guilaizhuang Gold Deposit of Western Shandong. *Mineral Deposits*, 38 (2): 277–290 (in Chinese with English abstract).
- Zhai, D. G., 2014. Geological and Geochemical Characteristics and Ore Genesis of the Sadaowanzi Gold-Telluride Deposit in Heilongjiang Province, NE China (Dissertation). China University of Geosciences, Beijing (in Chinese with English abstract).
- Zhai, D. G., Williams-Jones, A. E., Liu, J. J., et al., 2018. Mineralogical, Fluid Inclusion, and Multiple Isotope (H-O-S-Pb) Constraints on the Genesis of the Sandaowanzi Epithermal Au-Ag-Te Deposit, NE China. *Economic Geology*, 113(6): 1359–1382. <https://doi.org/10.5382/econgeo.2018.4595>
- Zhai, M. G., Wu, F. Y., Hu, R. Z., et al., 2019. Critical Metal Mineral Resources: Current Research Status and Scientific Issues. *Bulletin of National Natural Science Foundation of China*, 33(2): 106–111 (in Chinese with English abstract).
- Zhang, P. H., 2000. Geochemistry of Tellurium in the Dongping-Type Gold Deposits in Northern China (Dissertation). Guangzhou Institute of Geochemistry, Chinese Academy of Sciences, Guangzhou (in Chinese with English abstract).
- Zhang, X. M., Spry, P. G., 1994. Petrological, Mineralogical, Fluid Inclusion, and Stable Isotope Studies of the Gies Gold-Silver Telluride Deposit, Judith Mountains, Montana. *Economic Geology*, 89(3): 602–627. <https://doi.org/10.2113/gsecongeo.89.3.602>
- Zhang, Z. C., Li, Z. N., 1994. A Type of Important Gold Deposit—Tellurides. *Journal of Precious Metallic Geology*, 3(1): 59–64 (in Chinese with English abstract).
- Zhang, Z. C., Li, Z. N., 1997. Physicochemical Conditions for the Formation of Telluride-Rich Gold Deposits as Exemplified by the Shuiquangou Gold Ore Field. *Mineral Deposits*, 16(1): 42–53 (in Chinese with English abstract).
- Zimmer, K., Zhang, Y. L., Lu, P., et al., 2016. SUPCRT-BL: A Revised and Extended Thermodynamic Dataset and Software Package of SUPCRT92. *Computers & Geosciences*, 90: 97–111. <https://doi.org/10.1016/j.cageo.2016.02.013>

### 附中文参考文献

- 陈翠华, 曹志敏, 侯秀萍, 等, 1999. 全球金-碲化物型矿床的分布规律和主要成矿条件. 成都理工大学学报(自然科学版), 26(3): 241–248.
- 陈加杰, 冷成彪, 许德如, 等, 2020. 碲同位素研究进展及其地质应用展望. 地质学报, 94(5): 1655–1663.
- 陈毓川, 毛景文, 骆耀南, 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, 1–106.
- 范宏瑞, 李兴辉, 左亚彬, 等, 2018. LA-(MC)-ICPMS和(Nano)SIMS硫化物微量元素和硫同位素原位分析与矿床形成的精细过程. 岩石学报, 34(12): 3479–3496.
- 郭伟, 林贤, 胡圣虹, 2020. 单个流体包裹体LA-ICP-MS分析及应用进展. 地球科学, 45(4): 1362–1374.
- 胡瑞忠, 温汉捷, 苏文超, 等, 2014. 矿床地球化学近十年若干研究进展. 矿物岩石地球化学通报, 33(2): 127–144.
- 胡新露, 何谋恣, 姚书振, 2013a. 东秦岭上宫金矿成矿流体与成矿物质来源新认识. 地质学报, 87(1): 91–100.
- 胡新露, 姚书振, 何谋恣, 等, 2013b. 河南省上宫金矿成矿热力学条件及成矿机制. 中南大学学报(自然科学版), 44(12): 4962–4971.
- 黄富荣, 1998. 碲在官田黄铁矿矿床中的聚集及地球化学. 地球学报, 19(1): 50–58.
- 蒋少涌, 温汉捷, 许成, 等, 2019. 关键金属元素的多圈层循环与富集机理: 主要科学问题及未来研究方向. 中国科学基金, 33(2): 112–118.
- 李碧乐, 张晗, 2010. 浅成低温热液型金矿床研究的某些进展. 矿物学报, 30(1): 90–97.
- 李建威, 赵新福, 邓晓东, 等, 2019. 新中国成立以来中国矿床学研究若干重要进展. 中国科学(D辑:地球科学), 49(11): 1720–1771.
- 刘家军, 翟德高, 刘新会, 等, 2011. 金矿床中硒、碲超常富集研究现状. 矿物学报, 31(S1): 267–269.
- 刘家军, 翟德高, 王大钊, 等, 2020. Au-(Ag)-Te-Se成矿系统与成矿作用. 地学前缘, 27(2): 79–98.
- 罗镇宽, 关康, 王曼祉, 等, 1999. 中国某些金矿床中碲化物

- 的特征. 黄金地质, (3): 69—75.
- 毛景文, 袁顺达, 谢桂青, 等, 2019. 21 世纪以来中国关键金属矿产找矿勘查与研究新进展. 矿床地质, 38(5): 935—969.
- 任富根, 李双保, 赵嘉农, 等, 2000. 应用碲(硒)地球化学信息探寻熊耳群火山岩系中的金矿床. 矿物岩石地球化学通报, 19(4): 401—402.
- 阮林森, 2013. 四川石棉县大水沟碲矿床成矿规律与找矿方向(博士学位论文). 武汉: 中国地质大学.
- 涂光炽, 2000. 初论碲的成矿问题. 矿物岩石地球化学通报, 19(4): 211—214.
- 涂光炽, 高振敏, 胡瑞忠, 等, 2004. 分散元素地球化学及成矿机制. 北京: 地质出版社, 1—288.
- 王雷, 刘家军, 朱文兵, 等, 2016. 陕西小秦岭镰子沟碲金矿床物质组成特征及矿质沉淀机理研究. 矿床地质, 35(3): 456—474.
- 王玉婷, 2011. 四川石棉大水沟碲矿床成矿地球化学过程研究(博士学位论文). 成都: 成都理工大学.
- 谢惠丽, 焦养泉, 刘章月, 等, 2020. 鄂尔多斯盆地北部铀矿床铀矿物赋存状态及富集机理. 地球科学, 45(5): 1531—1543.
- 于学峰, 李大鹏, 李增胜, 等, 2019. 鲁西归来庄金矿田碲金元素地球化学过程研究. 矿床地质, 38(2): 277—290.
- 翟德高, 2014. 黑龙江省三道湾子碲化物型金矿床地质地球化学特征与成矿机制(博士学位论文). 北京: 中国地质大学.
- 翟明国, 吴福元, 胡瑞忠, 等, 2019. 战略性关键金属矿产资源: 现状与问题. 中国科学基金, 33(2): 106—111.
- 张佩华, 2000. 东坪式金矿床碲的元素地球化学(博士学位论文). 广州: 中国科学院广州地球化学研究所.
- 张招崇, 李兆鼎, 1994. 一个值得重视的金矿类型——碲化物型. 贵金属地质, 3(1): 59—64.
- 张招崇, 李兆鼎, 1997. 富碲化物型金矿形成的物理化学条件——以水泉沟金矿田为例. 矿床地质, 16(1): 42—53.