

碲同位素研究进展及其地质应用展望

陈加杰^{1,2)},冷成彪¹⁾,许德如^{1,2)},王大钊¹⁾,李凯旋¹⁾

1) 东华理工大学核资源与环境国家重点实验室,南昌,330013; 2) 东华理工大学地球科学学院,南昌,330013

内容提要:多接收电感耦合等离子体质谱仪以及色谱分离和纯化方法的应用,大大提高了碲(Te)同位素的分析精度和效率,推动了碲同位素研究。本文综述了 Te 同位素研究的最新进展及其地质应用。碲具有亲硫和亲氧双重属性,同时具有一定的挥发性。自然界(包括陨石)中碲同位素($\delta^{130/125}\text{Te}$)的变化范围为 $-4.12\text{‰}\sim 2.15\text{‰}$ 。其同位素分馏受到不同过程的控制,其中球粒陨石碲同位素分馏主要受陨石形成过程中碲的蒸发和冷凝过程的控制,该过程中可引起高达 6.9‰ 的分馏;自然界中氧化还原反应也可以引起较大的碲同位素分馏(4‰),因此碲同位素可能成为反应成岩成矿过程中氧化-还原条件变化的指标;此外,有机溶剂(如石油)参与的萃取作用可引起 1.8‰ 的碲同位素分馏效应,这一效应在重稳定同位素研究过程中需要引起足够的重视。随着碲同位素分馏机制的进一步明晰,碲可能在示踪成矿物质来源、限定成矿时间以及指导矿产勘查等方面得到更为广泛的应用。

关键词:碲同位素;测试方法;分馏机理;地质应用

碲(Te)作为稀散元素中的一员,在高科技领域有着重要的应用(Schulz et al., 2017)。全球碲资源量约为 24000 t(2014 年估计值),其中秘鲁(3600 t)、美国(3500 t)和加拿大(800 t)的资源量排在前三位(Schulz et al., 2017)。地壳中碲的含量非常低($0.4\times 10^{-9}\sim 12\times 10^{-9}$) (McDonough and Sun, 1995),大部分岩浆岩的碲含量只有 $n\times 10^{-9}$ 或者 $10n\times 10^{-9}$ (Beaty and Manuel, 1973; Forrest et al., 2009),但花岗岩类岩石的碲含量相对较高,可达 $100n\times 10^{-9}$ (Beaty and Manuel, 1973)。研究表明,与碱性岩相关的造山型和浅成低温热液型金矿床中,碲的含量可达主量元素级别(Liu et al., 2013)。目前世界上独立的碲矿床仅有两例,分别是我国四川的大水沟浅成低温热液脉型金-碲矿(Mao et al., 2002)和瑞典的 Kankberg 浅成低温热液型矿床(Schulz et al., 2017)。此外,自然界很多矿床中发现伴生碲的存在,存在或预期存在经济价值的伴生碲矿床包括斑岩-矽卡岩矿床、VMS 矿床、岩浆矿床、IOCG 矿床、浅成低温热液矿床、造山型和卡

林型金矿床等类型(Schulz et al., 2017)。

自然界中,碲存在 8 个同位素,分别是 ^{120}Te (0.09‰)、 ^{122}Te (2.55‰)、 ^{123}Te (0.89‰)、 ^{124}Te (4.74‰)、 ^{125}Te (7.07‰)、 ^{126}Te (18.84‰)、 ^{128}Te (31.74‰) 和 ^{130}Te (34.08‰),其中 ^{120}Te 、 ^{123}Te 、 ^{128}Te 和 ^{130}Te 具有弱的放射性,但是考虑他们的半衰期均很长(大于 $2.2\times 10^{16}\text{a}$),其放射性衰变对同位素组成的影响可以忽略不计,因此通常作为稳定同位素(Fehr et al., 2004; Hoefs, 2015)。不同环境下,碲表现出亲氧和亲硫双重属性;自然界中,碲存在 6 个价态,分别为 -2 、 -1 、 0 、 $+2$ 、 $+4$ 和 $+6$ (Fornadel et al., 2017),地表氧化环境下多以 $+4$ 和 $+6$ 价的碲酸盐或亚碲酸盐的形式存在(Housley et al., 2011),地球内部,碲常以 -2 价金属碲化物或者 0 价自然碲等形式存在于岩浆或者热液矿床中,尤其是一些低温热液或者造山型金矿床中(Bi et al., 2011; Cook et al., 2009)。已有研究表明,在热液系统中碲既能以氧化物相在溶液中迁移,也能以气体相迁移(Bi et al., 2011; Cook et al.,

注:本文为江西省教育厅科技计划项目(编号 GJJ18038787)、东华理工大学博士科研启动基金项目(编号 DHBK2018009)和国家自然科学基金项目(编号 41673051)资助成果。
收稿日期:2019-12-19;改回日期:2020-03-23;网络发表日期:2020-03-28;责任编辑:周健。
作者简介:陈加杰,男,1989 年生。博士,讲师,主要从事岩石学及矿床学研究。Email: chenjiatie03@126.com。通讯作者:冷成彪,男,博士,研究员,主要从事矿床地质与地球化学方面的研究。Email: lcb8207@163.com。

引用本文:陈加杰,冷成彪,许德如,王大钊,李凯旋. 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, doi: 10.19762/j.cnki.dizhixuebao.2020147.
Chen Jiajie, Leng Chengbiao, Xu Deru, Wang Dazhao, Li Kaixuan. 2020. Analytical techniques for tellurium stable isotopes and their geological applications: a review. Acta Geologica Sinica, 94(5):1655~1663.

2009)。

研究过程中,低含量的碲在测试分析上有极大困难,早期碲同位素的研究多采用(阳离子或阴离子)热电离质谱仪(P-TIMS 或者 N-TIMS)(Smith et al., 1978; Smithers and Krouse, 1968),但是因为碲的第一电离能较高(~9 eV),热电离的效率较低,导致获得的数据误差较大。随着新的化学纯化(如多步色谱分离)(Smith et al., 1978; Smithers and Krouse, 1968)、质量歧视校正方法(Fornadel et al., 2014; Fukami et al., 2018)和多接收电感耦合等离子体质谱仪(MC-ICP-MS)等的应用,碲同位素的测试精度得到了极大的提高(Fehr et al., 2004),新方法被广泛用来测试陨石的碲同位素组成(Fehr et al., 2004, 2006, 2009),并且逐渐运用在地球样品,如沉积岩中的黄铁矿和多金属热液矿床中的含碲矿物(Fehr et al., 2005; Fornadel et al., 2017)等。近些年来,碲同位素的研究取得了一定的进展,并显示出较大的潜在应用前景。基于前人资料,本文总结了目前碲同位素分析测试常用的流程,并探讨了未来碲同位素应用可能取得突破的方向,以期引起我国学者对碲同位素相关领域研究的重视。

1 碲同位素的表示方法

碲(Te)与硫(S)和硒(Se)同属第 VI 主族元素,在地球系统中,它们的地球化学行为极为相似。同传统的稳定同位素硫(S)、氢(H)等的表示方法相似,碲同位素也采用相对于标准物质碲同位素比值的差异来表示。考虑到碲同位素之间的质量差较大(¹²⁰Te 和 ¹³⁰Te 的质量差达 8.33%),同时理论计算表明碲同位素在实验室或者自然过程中会发生显著的分馏(Smithers and Krouse, 1968),因此碲同位

素通常不采用万分分馏($\epsilon^{m/125}\text{Te}$)的方式来表示,而是用的千分分馏的方式(Smith et al., 1978):

$$\delta^m\text{Te}(\text{‰}) = \left\{ \frac{(^m\text{Te}/^{125}\text{Te})_{\text{sample}}}{(^m\text{Te}/^{125}\text{Te})_{\text{STD}}} - 1 \right\} \times 1000$$

其中 STD 代表标准物质, m 可以根据需要选择不同的同位素(¹²²Te、¹²⁴Te、¹²⁶Te、¹²⁸Te 或 ¹³⁰Te),选择 ¹²⁵Te 作为参考同位素是因为 ¹²⁵Te 有较高的自然含量,同时同质异位干扰弱(Fornadel et al., 2014)。值得注意的是,早期的研究也有学者将 ¹³⁰Te 作为参考同位素(Smithers and Krouse, 1968),万分分馏的表示方法也偶尔使用(Fehr et al., 2004)。

由碲同位素的表示公式不难看出,标准物质的不同会影响获得的 $\delta^{m/125}\text{Te}$ 值,使用相同的标准物质计算的 $\delta^{m/125}\text{Te}$ 利于进行对比,然而目前国际上还没有普遍认可的标准物质。早期研究者曾经使用来自安大略湖 Coppercliff 精炼碲的同位素组成作为参考标准(Smith et al., 1978);但是,现今研究者更多的使用纯碲经酸溶后的溶液作为参考物质。Fehr et al. (2004)在研究陨石和黄铁矿-磁黄铁矿的碲同位素组成时将纯碲(来自美国)溶于 2M HNO₃ 中作为标准溶液(~100 μg/mL),而 Fukami and Yokoyama (2014)则使用了来自日本 Kanto Chemical 公司的碲标准溶液作为参考。虽然制作标准溶液的纯碲的生产公司不同,这些标准溶液同位素组成的测试方法也存在差异(表 1),但是除了 ¹²³Te/¹²⁸Te 外,在误差范围内不同方法获得的这些标准溶液的同位素组成基本一致(Fukami and Yokoyama, 2014)。从表 1 中可以看出,利用 N-TIMS 获得的 ¹²³Te/¹²⁸Te 比值相对于 MC-ICP-MS 获得的比值偏低,这可能与 ¹²³Sb 在 N-TIMS 测试中的电离效率相对于 MC-ICP-MS 要低很多相关(Fukami and Yokoyama, 2014)。

表 1 不同分析方法获得的不同公司碲标准溶液的同位素组成

Table 1 Summary of Te isotopic compositions obtained for various standards by different techniques

标准溶液	分析方法	¹²⁰ Te/ ¹²⁸ Te	¹²² Te/ ¹²⁸ Te	¹²³ Te/ ¹²⁸ Te	¹²⁵ Te/ ¹²⁸ Te	¹²⁶ Te/ ¹²⁸ Te	¹³⁰ Te/ ¹²⁸ Te
Fukami and Yoloyma, 2014 (Kanto Chemical)	N-TIMS	0.002901±25	0.079648±28	0.027865±18	0.222011±22	0.592222±26	1.076120±71
Lee and Halliday, 1995 (Johnson Matthey)	MC-ICP-MS	0.002919±12	0.079603±16	0.027904±12	0.222041±25	0.592264±34	1.075950±30
Fehr et al. 2004 (Alfa Aesar)	MC-ICP-MS	0.002896±13	0.079650±11	0.027913±26	0.222003±16	0.592196±26	1.076148±53

注:所有的碲同位素比值均基于指数法则标准化至 ¹²⁴Te/¹²⁸Te=0.14853。

2 碲同位素的分析测试方法

同位素的分析测试精度高低,除了受元素本身

的含量影响,还取决于样品纯化方法、分析测试仪器、分析过程中的质量歧视校正方法(包括同质异位干扰校正)等因素。早期碲同位素的分析测试主要

依赖于 P-TIMS, 获得的数据精度较低。现今主要通过 MC-ICP-MS 测试碲同位素, 与此同时 N-TIMS 仪器测试方法也获得很大的改进。

2.1 碲同位素样品的化学前处理

化学前处理的主要目的有两个, 其一是分离和纯化目标测试元素, 其二是消除或者降低同质异位素或者基质元素的干扰。对于同位素的测试, 尤其

是低含量元素的同位素测试, 化学前处理是获得高精度数据的基础。回收率和空白水平是化学前处理过程中需要考虑的两个重要参数, 当回收率不高时, 还需要考虑化学前处理过程中可能发生的同位素分馏效应的影响。对于碲同位素测试而言, 化学前处理过程需要尽可能的分离 Cd、Sn、Sb、Xe、Ba 等干扰元素(表 2)。

表 2 Te 同位素分析(MC-ICP-MS)过程中潜在的干扰离子

Table 2 Potential interferences of isobars and ion complex for Te isotopes

相对质量	同位素	干扰离子
120	¹²⁰ Te	¹²⁰ Sn ⁺ 、 ¹¹⁹ SnH ⁺ 、 ¹⁰⁶ Cd ¹⁴ Na ⁺ 、 ¹⁰⁶ Pd ¹⁴ Na ⁺ 、 ¹⁰⁴ Pd ¹⁶ O ⁺ 、 ¹⁰⁴ Ru ¹⁶ O ⁺ 、 ⁸⁰ Kr ⁴⁰ Ar ⁺ 、 ⁸⁰ Se ⁴⁰ Ar ⁺
122	¹²² Te	¹²² Sn ⁺ 、 ¹²¹ SbH ⁺ 、 ¹⁰⁸ Cd ¹⁴ Na ⁺ 、 ¹⁰⁸ Pd ¹⁴ Na ⁺ 、 ¹⁰⁶ Pd ¹⁶ O ⁺ 、 ¹⁰⁶ Cd ¹⁶ O ⁺ 、 ⁸² Kr ⁴⁰ Ar ⁺ 、 ⁸² Se ⁴⁰ Ar ⁺
123	¹²³ Te	¹²³ Sb ⁺ 、 ¹²² SnH ⁺ 、 ¹²² TeH ⁺ 、 ¹⁰⁹ Ag ¹⁴ Na ⁺ 、 ¹⁰⁷ Ag ¹⁶ O ⁺ 、 ⁸³ Kr ⁴⁰ Ar ⁺
124	¹²⁴ Te	¹²⁴ Sn ⁺ 、 ¹²⁴ Xe ⁺ 、 ¹²³ SbH ⁺ 、 ¹²³ TeH ⁺ 、 ¹¹⁰ Cd ¹⁴ Na ⁺ 、 ¹¹⁰ Pd ¹⁴ Na ⁺ 、 ¹⁰⁸ Pd ¹⁶ O ⁺ 、 ¹⁰⁸ Cd ¹⁶ O ⁺ 、 ⁸⁴ Kr ⁴⁰ Ar ⁺ 、 ⁸⁴ Sr ⁴⁰ Ar ⁺
125	¹²⁵ Te	¹²⁴ SnH ⁺ 、 ¹²⁴ TeH ⁺ 、 ¹²⁴ XeH ⁺ 、 ¹¹¹ Cd ¹⁴ Na ⁺ 、 ¹⁰⁹ Ag ¹⁶ O ⁺ 、 ⁸⁵ Rb ⁴⁰ Ar ⁺
126	¹²⁶ Te	¹²⁶ Xe ⁺ 、 ¹²⁵ TeH ⁺ 、 ¹¹² Cd ¹⁴ Na ⁺ 、 ¹¹² Sn ¹⁴ Na ⁺ 、 ¹¹⁰ Pd ¹⁶ O ⁺ 、 ¹¹⁰ Cd ¹⁶ O ⁺ 、 ⁸⁶ Kr ⁴⁰ Ar ⁺ 、 ⁸⁶ Sr ⁴⁰ Ar ⁺
128	¹²⁸ Te	¹²⁸ Xe ⁺ 、 ¹²⁷ IH ⁺ 、 ¹¹⁴ Cd ¹⁴ Na ⁺ 、 ¹¹⁴ Sn ¹⁴ Na ⁺ 、 ¹¹² Sn ¹⁶ O ⁺ 、 ¹¹² Cd ¹⁶ O ⁺ 、 ⁸⁸ Sr ⁴⁰ Ar ⁺
130	¹³⁰ Te	¹³⁰ Xe ⁺ 、 ¹²⁹ XeH ⁺ 、 ¹³⁰ Ba ⁺ 、 ¹¹⁶ Cd ¹⁴ Na ⁺ 、 ¹¹⁶ Sn ¹⁴ Na ⁺ 、 ¹¹⁴ Sn ¹⁶ O ⁺ 、 ¹¹⁴ Cd ¹⁶ O ⁺ 、 ⁹⁰ Zr ⁴⁰ Ar ⁺

注:表中数据来源于 Fehr et al. (2004)。

目前,关于样品的碲同位素分离和纯化主要利用的是离子交换树脂法(色谱法)。相对很多其他同位素(如 Os 等)使用的单步色谱法(Selby et al., 2009),碲同位素的化学前处理多使用多步色谱法,以达到尽可能降低杂质元素的目的。Smith et al. (1978)直接将酸溶后的陨石样品依次载入 3 mL Dowex AG1-X8(100~200 目)阴离子交换树脂和 0.75 mL Dowex AG50W-X8(100~200 目)阳离子交换树脂来进行样品的纯化和分离,获得的空白水平为 0.5±0.2 ng, 并认为该过程中碲可以达到全部的回收。Fehr et al. (2004)对上述的两步色谱法做了一定的改进,并将其运用于陨石和硫化物(黄铁矿和磁黄铁矿)的碲同位素分析,其碲纯化的主要过程是:首先将样品酸溶,利用溶剂(甲基异丁基酮: MIBK)萃取法将 Te 和样品其他物质分离;然后利用两步色谱分离法依次分离残存的主要基质元素和 Sn(主要的干扰元素),该过程所用树脂分别为 AG1 X 8 阴离子交换树脂(200~400 目)和 Eichrom Tru-Spec™树脂。相对于 Smith et al. (1978)的化学处理方法, Fehr et al. (2004)的方法在空白水平方面有了一定的改善(陨石样品<0.3 ng;硫化物样品<0.03 ng),但是值得注意的是, Fehr et al. (2004)的化学前处理方法中碲的总平均回收率(萃取和两步色谱分离)只有 75%, 这样的回收率必须考虑色谱分离法对不同同位素差异性选择(质量歧视)的影响,然而, Fehr et al. (2004)并没有对这一

可能影响进行定量评估。

Fornadel et al. (2014)在研究 Au-Ag-Te 热液系统含碲矿物的碲同位素的过程中对碲的纯化方法进行了调整,他们使用 Bio-Rad AG 1-X8 树脂对酸溶样品进行一次色谱分离可以清除~99%的银(可能的干扰元素),并获得了~96%的回收率(表 3)。同时,他们发现,他们研究的硫化物样品中镉(Cd)对碲同位素同质异位干扰非常有限(±0.005‰),而且 ^{116/114}Cd 值变化与标准溶液碲同位素比值的变化具有耦合性,证明 Cd 可以作为质谱分析时同位素质量歧视校正的内标,基于这种方法获得的 ^{130/125}Te 的精度达到了 ±0.08‰。

除了上述方法外, Fukami and Yokoyama (2014)针对玄武岩和陨石样品,设计了三步色谱法,其中第一步使用的是 2mL Bio-Rad AG 1-X8 树脂(200~400 目)来清除主要的基质元素,第二步使用的是 0.2 mL Eichrom Tru-Spec 和 0.1 mL Amberchrom CG-71C 树脂来清除锡(Sn),第三步使用的是 0.01 mL Bio-Rad AG 1-X8 树脂(200~400 目)来清除前两步色谱分离过程中残留的树脂有机质,该方法的回收率高达~98%(表 3)。

2.2 碲同位素的质谱测量

早期碲同位素的分析主要是利用 P-TIMS 完成,测试过程中将样品置于铼(Re)灯丝上,使用的电离激发剂为硅胶(silica gel activator)(Smith et

表 3 Te 同位素的化学分离流程

Table 3 Chemical separation procedure of Te

三步色谱法(Fukami and Yokoyama,2014)		
洗脱液	体积(mL)	备注
柱子 1:2 mL BioRad AG1-X8 树脂		
		树脂载入
1 M HNO ₃	10	树脂清洗
H ₂ O	10	
2MHCl	10	树脂环境调节
2MHCl (样品载入)	15	杂质元素洗脱
2MHCl	15	杂质元素洗脱
12MHCl	4	杂质元素洗脱
5M HF	15	杂质元素洗脱
1M HNO ₃	10	收集洗脱液(Sn, Te)
柱子 2: 0.2 mL Eichrom TRU-Spec and 0.1 mL Amberchrom CG-71C 树脂		
0.5 MHCl	10	树脂清洗和环境调节
0.5 MHCl (样品载入)	1	收集洗脱液(Te)
0.5 MHCl	5	收集洗脱液(Te)
柱子 3: 0.01 mL BioRad AG1-X8 树脂		
1 MHNO ₃	0.05	树脂清洗
H ₂ O	0.2	树脂清洗
12 MHCl	0.1	树脂环境调节
12 MHCl 样品载入)	0.1	杂质元素洗脱
5 M HF	0.05	杂质元素洗脱
1 MHNO ₃	0.1	收集洗脱液(Te)
单步色谱法(Fornadel et al. ,2014)		
2mL Bio-Rad AG1-X8 树脂		
		树脂载入
1 N HNO ₃	10	树脂清洗
2 NHCl	10	树脂环境调节
溶有样品的 2 N HCl	2	样品载入
2 NHCl	23	杂质元素 Ag 洗脱
10 NHCl	1	丢弃洗脱液
10 NHCl	3	收集洗脱液
1 N HNO ₃	9	含 Te 洗脱液

al. , 1977)。随着 N-TIMS 技术的发展, Wachsmann and Heumann(1992)开始将这一技术应用于碲同位素的分析,并使用 Ba(OH)₂ 作为激发剂,这大大提高了离子的生成效率。利用这一方法,Richter et al. (1998)测试了球粒陨石中金刚石的碲同位素组成。Lee and Halliday(1995)最早利用 MC-ICP-MS 对碲同位素进行了分析,测试获得的数据可与早期 TIMS 或者 NTIMS 获得的数据进行对比,并且测试的精度提高了两个数量级。Fukami and Yokoyama(2014)将最新的化学前处理方法和 N-TIMS 相结合获得的数据质量精度可以与 MC-ICP-MS 获得的数据进行对比。综合来看,目前已经很少采用 P-TIMS 方法来测试碲同位素的组成,N-TIMS 与 MC-ICP-MS 方法可以获得相近的碲同位素测试精度,但是 N-TIMS 的测试时间较 MC-ICP-MS 长很多,这可能是很多研究者更多地

采用 MC-ICP-MS 开展碲同位素研究的原因 (Fornadel et al. , 2017; Fehr et al. , 2018; Fukami et al. , 2018)。

无论采用哪种质谱技术,测试过程中均不可避免地存在同质异位干扰和质量歧视效应。前述的化学前处理方法可以大大提高样品的纯度,从而可以在一定程度上降低同质异位干扰。对于仪器测试来说,仪器校正包括两方面目的,其一是扣除一部分干扰元素的同质异位干扰的影响(通过测试对应干扰离子的某一同位素进行干扰校正),如碲同位素测试过程中常见的干扰元素 Sn 和 Xe,可以在测试碲的同时分析¹¹⁸Sn⁺和¹²⁹Xe⁺,然后根据同位素的相对含量进行校正(Fehr et al. , 2004);其二是对质量歧视效应进行修正,通常包括外标法、内标法和双稀释剂法。在碲同位素的分析过程中,目前用作内标的元素主要是 Cd (Fehr et al. , 2004),双稀释剂法选用的同位素为¹²⁵Te-¹²⁸Te(Fehr et al. , 2018; Fukami et al. , 2018)。

3 不同储库碲同位素的组成

早期对于碲同位素主要集中于陨石研究,地球样品很少,这与“陨石(~0.5×10⁻⁶~2.5×10⁻⁶)中碲的含量相对于地球样品(×10⁻⁹级别)高得多”和“测试分析相对容易”有关(Fehr et al. , 2005),近年来新增了几例专门针对地球样品碲同位素组成的报道(Fehr et al. , 2018; Fornadel et al. , 2017)。然而,目前获得的地球样品的碲同位素组成数据仍然非常有限,并且由于不同研究者所使用的标准物质、质量歧视校正方法的差异,以及选用的同位素表示方法的不同(Fehr et al. , 2004, 2018; Fukami et al. , 2018),导致不同来源的数据间的对比变得尤为困难。本文将近年获得的精度较高的陨石和地球样品的碲同位素组成特征总结如图 1 所示。

(1)陨石。陨石的碲同位素组成数据相对较多, Smith et al. (1978)在研究碲元素同位素组成的时候利用固体源质谱仪分析了不同陨石的碲同位素组成,获得的球粒陨石的^{130/125}Te 为 4.70832~4.74226,一个铁陨石的^{130/125}Te 为 4.71854。Fehr et al. (2018)利用 MC-ICP-MS 双稀释剂法对球粒陨石进行了测试,获得的 δ^{130/125}Te 为-4.12‰~2.15‰(mesh),总体的变化幅度达 6.3‰;其中碳质球粒陨石和顽火辉石类球粒陨石的变化范围较小,分别集中于-0.35‰~0.04‰和-0.55‰~-0.34‰,普通球粒陨石的变化范围较大(-4.12‰

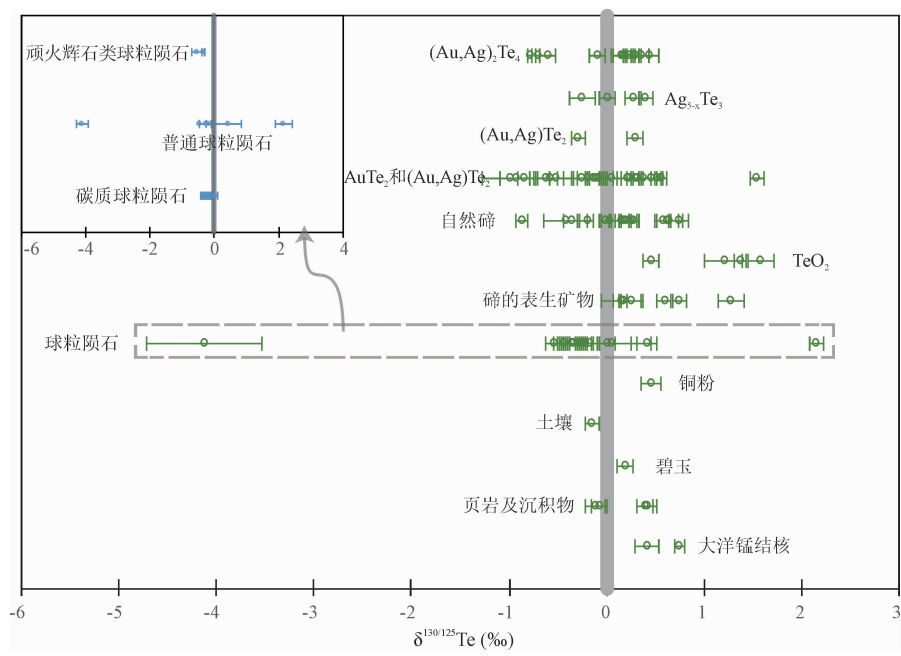


图 1 自然界中不同物质的碲同位素组成(数据来源 Fornadel et al. , 2014, 2017; Fehr et al. , 2018)

Fig. 1 Summary of Te isotopic composition of natural samples (data from Fornadel et al. , 2014, 2017; Fehr et al. , 2018)

~2.51‰),这可能是普通球粒陨石在形成过程中经历了强烈撞击,其中的 Te 经历了挥发和冷凝过程,导致了 Te 同位素较大的分异作用(Fehr et al. , 2018)。总体来看,碳质球粒陨石和顽火辉石类球粒陨石的 Te 同位素组成变化范围与地球中样品的变化范围较为吻合,表明所获得的碳质球粒陨石的和顽火辉石类球粒陨石的 Te 同位素组成可能代表了硅酸盐地球的碲同位素组成。

(2)沉积物。Fehr et al. (2005)首先对太古宙沉积黄铁矿的碲同位素进行了研究,发现不同黄铁矿的碲同位素组成在误差范围内一致,导致这一现象的原因可能是沉积黄铁矿不存在碲同位素分馏或者分馏因子太小,也可能是数据误差较大。Fukami et al. (2018)报道了大西洋和太平洋铁锰结核的 $\delta^{130/125}\text{Te}$ 为 1.49‰~1.96‰,变化幅度为 0.47‰,Fehr et al. (2018)也对这些样品进行了分析,发现他们的 $\delta^{130/125}\text{Te}$ 为 0.42‰~0.78‰,变化幅度为 0.36‰,两位研究者报道的数据差异的原因可能是其选用的标准物质的不同(Kanto chemical vs. Alfa Aesar metal;表 1),当然更可能的是样品自身不均一性的影响。除了铁锰结核,Fehr et al. (2018)对页岩、大西洋软泥和河流沉积物的碲同位素组成也进行了研究,获得的 $\delta^{130/125}\text{Te}$ 分别为-0.08‰~-0.42‰,-0.11‰和 0.39‰(图 1)。

(3)矿床中碲矿物,包括碲化物、碲酸盐和亚碲酸盐、自然碲等。其中碲化物的 $\delta^{130/125}\text{Te}$ 为-1‰

~1.54‰,自然碲的 $\delta^{130/125}\text{Te}$ 为-0.87‰~0.74‰,碲酸盐或亚碲酸盐的 $\delta^{130/125}\text{Te}$ 为 0.14‰~1.27‰,斜方晶系 TeO_2 的 $\delta^{130/125}\text{Te}$ 为 0.46‰~1.58‰(Fornadel et al. , 2017; Fornadel et al. , 2014)。碲矿物中碲酸盐或亚碲酸盐(碲的表生矿物)和 TeO_2 的 $\delta^{130/125}\text{Te}$ 都是正值,表现为重碲同位素的富集,自然碲和碲化物的 $\delta^{130/125}\text{Te}$ 在零值附近浮动,总体来看,价态高的碲矿物倾向富集重碲同位素,而价态较低碲矿物既可以表现为重碲同位素的富集,也可以表现为轻碲同位素的富集(图 1)。

此外,土壤、碧玉和铜粉均有单一的碲同位素数据的报道,其 $\delta^{130/125}\text{Te}$ 分别为-0.15‰±0.07‰、0.19‰±0.0‰8 和 0.45‰±0.1‰(Fehr et al. , 2018);微生物样品的碲同位素组成也有少量研究(Baesman et al. , 2007);水体、火成岩、变质岩和地幔岩石的碲同位素组成暂时未有报道。总体而言,已报道的碲同位素数据还不足以用来区分不同储库中碲同位素组成差异,仍然需要大量的数据进一步限定。

4 碲同位素的分馏机理

引起同位素分馏的过程包括蒸发、扩散、氧化还原、化学反应和生物吸附等。对于碲同位素而言,目前关于其分馏机制的研究还处在起步阶段。现有少量研究指示,碲同位素可能在还原过程、溶剂萃取过程或者陨石撞击过程(蒸发和冷凝)发生同位素的分

馏(Fehr et al. , 2006; Fornadel, 2014; Fornadel et al. , 2014)。

4.1 氧化还原过程中碲同位素的分馏

碲的氧化还原分为有机和无机两类。Smithers and Krouse(1968)在实验中利用 H₂SO₃ 将 K₂TeO₃ 中+4 价的碲还原成单质碲,发现单质碲相对于反应物(K₂TeO₃)更富集轻碲同位素,计算表明该还原反应中存在 7‰ 的同位素动力学效应(kinetic isotope effects)影响,这一效应受 Te-O 键断裂的控制。

虽然碲具有一定的生物毒性(Baesman et al. , 2007),但是前人研究表明革兰氏阴性细菌可以利用细胞色素来将+4 价的碲还原成自然碲(0 价)(Trutko et al. , 2000);此外,Csotonyi et al.(2006)在研究深海热液排气孔时,也发现存在两种未知菌群可以将+4 价的碲还原成自然碲(0 价),在这些细菌的生长过程中碲主要作为电子受体的形式发挥作用。为了进一步研究细菌生长过程中碲的作用以及生物作用对碲同位素分馏的影响,Baesman et al.(2007)选取两种厌氧菌(Bacillus selenitireducens 和 Sulfurospirillum barnesii)开展实验研究,发现这些厌氧菌可以将+4 价亚碲酸盐或者+6 价碲酸盐还原成自然碲的纳米颗粒,在这一过程中碲同位素会发生显著分馏(同位素富集因子达每毫升-0.4~-0.1 原子单位)。

由此可见,实验室中无论是无机还是有机还原反应,均存在碲同位素的分馏。上述结论也得到了理论计算的支持:Fornadel et al.(2017)通过计算,发现在 100℃ 的条件下,+6 价碲酸盐和-2 价碲化物或者 0 价自然碲之间的分馏可以达 4‰($\delta^{130/125}\text{Te}$; 图 2)。然而,对自然界矿床中价态不同的含碲矿物的分析发现,不同价态含碲矿物的碲同位素组成虽然总体趋势上显示碲价态高的矿物相对富集重碲同位素(图 1),但是它们的碲同位素变化范围接近,变化规律也并不明显,可能指示自然界中氧化还原反应对碲同位素的分馏作用有限(Fornadel et al. , 2017)。

4.2 溶剂萃取过程中碲同位素分馏

为了检验非质量效应引起的亲铜元素的同位素分馏,Moynier et al.(2008)将 TeCl₄ 溶于不同浓度的盐酸中,并与二环己胺冠醚(crown ether of dicyclohexano-18-crown-6)充分混合,然后利用离心机分离两种不混溶液体,并开展碲同位素组成测试。该研究发现有机溶剂和水溶液平衡过程中碲同

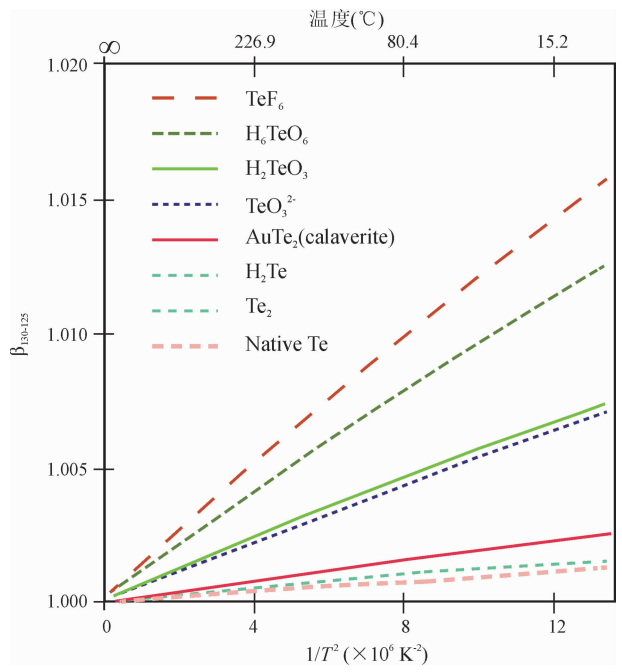


图 2 基于 B3LYP/Def2-SVPD 模型计算的不同含碲分子碲同位素的分馏系数(¹³⁰Te/¹²⁵Te 相对于假设的蒸汽相碲原子)与温度的关系(改编自 Fornadel et al. , 2017)
Fig. 2 Calculated fractionation factors for the¹³⁰Te-¹²⁵Te isotope pair of various molecules and solid Te species (with respect to a hypothetical atomic Te vapor) at different temperatures based on B3LYP/Def2-SVPD model (modified from Fornadel et al. , 2017)

位素存在明显的分馏(高达 1.8‰),并且这一分馏效应与同位素之间的质量差异无关,而是核场偏移效应(Nuclear field shift effect)导致,核场偏移效应是由奇数质量数和偶数质量数的同位素不同的行为引起的,其主要作用于重同位素的分馏,如 Te、U、Hg、Tl (Yang and Liu, 2016)。基于这一实验认识可以合理推测,自然界中有机流体(如石油等)的参与可能对碲同位素的分馏起到一定的控制作用,而有机流体萃取作用对同位素分馏的影响在很多非传统重稳定同位素研究中未受到足够的重视。

4.3 陨石撞击(蒸发和冷凝)过程中碲同位素的分馏

碲是一个中等挥发性元素,其 50% 的冷凝温度(half-mass condensation temperature; 宇宙天体演化过程中元素的一半呈固相时的温度)为 709 K (Lodders, 2003)。陨石在撞击热变质过程中,碲会发生蒸发丢失和重新分配(Ngo and Lipschut, 1980),在蒸发过程中,气相倾向于富集轻同位素(Richter et al. , 2002),因此陨石热变质可能会导致同位素的分馏。Fehr et al.(2014)对不同陨石的

碲同位素开展双稀释剂 MC-ICP-MS 分析发现碳质球粒陨石和顽火辉石球粒陨石的 $\delta^{130/125}$ 变化范围只有 $\sim 1\%$, 而普通球粒陨石, 尤其是非平衡的普通球粒陨石的碲同位素存在较大的变化范围 ($\delta^{130/125} \text{Te}$ 变化达 6.9%), 并且普通球粒陨石碲同位素的变化与碲含量和陨石变质级别无关, 推测普通球粒陨石碲同位素较大的变化范围是在陨石母体在挥发和冷凝过程中同位素分馏所致 (Fehr et al., 2018)。

5 碲同位素的地质应用展望

近年来, 地球样品中碲同位素的精确测定获得一定的进展 (Fehr et al., 2004; Fukami et al., 2018; Fukami and Yokoyama, 2014), 目前对于不同地质储库中的碲同位素组成还没有很好的限定 (如: 尚未见火成岩碲同位素数据的报道), 仍处于数据初始积累阶段。此外, 对于不同过程中碲同位素的分馏机理的研究仍然很匮乏, 这大大限制了碲同位素在地球科学中的应用。但从已有研究看, 碲同位素在以下几个方面存在较大的应用潜力:

(1) 示踪成矿物质来源。在浅成低温热液和造山型金矿床中常见金和碲伴生产出 (Liu et al., 2013)。金的源区一直是金矿床研究的难点, 主要原因是作为成矿元素的金只有一个稳定同位素, 无法通过分析金的同位素组成来限定其源区, 考虑到碲与金的密切共生, 存在借助碲同位素来示踪金的源区的可能。此外作为一种关键金属, 碲同位素同样可以作为独立或伴生碲矿床碲源区的指示剂 (Fornadel et al., 2014)。

(2) 反演成矿物理化学条件及成矿过程。Fukami et al. (2018) 在研究不同物质的碲、硒含量和碲同位素组成时发现, 样品的 $\delta^{130/125} \text{Te}$ 和 Te/Se 比值成正比。研究表明 Te/Se 比值可以作为氧化还原性质的指标 (Fukami et al., 2018), 因此也可以利用与 Te/Se 成正比的 $\delta^{130/125} \text{Te}$ 来反应样品 (矿床) 形成时的氧化还原环境或者反演成矿过程中氧化还原条件的变化。此外, 虽然目前碲同位素的平衡分馏还鲜有研究, 但是可以合理地推测平衡过程中碲同位素的分馏系数是温度的函数。因此, 随着研究深入, 同 S 等传统同位素类似, 碲同位素同样可以用来反演成矿过程中的温度变化。

(3) 成矿年龄直接限定。研究发现 $^{130} \text{Te}$ 经过双 β 衰变生成稳定稀有气体同位素 $^{130} \text{Xe}$ (Kirsten et al., 1968)。利用上述放射性衰变体系, 前人在含碲热液金 (银) 矿床的成矿时间的研究中已经取得了

一定的成果 (Srinivasan et al., 1972; Thomas et al., 2005)。目前获得的 $^{130} \text{Te}$ - $^{130} \text{Xe}$ 年龄数据误差较大 (Thomas et al., 2005), 其一是因为 $^{130} \text{Te}$ - $^{130} \text{Xe}$ 体系的半衰期较长 ($(1.25 \pm 0.16) \times 10^{21} \text{a}$) (Thomas et al., 2005), 放射性衰变引起的子体同位素的积累有限, 给测试分析造成了一定的挑战; 其二, 目前获得的 $^{130} \text{Te}$ - $^{130} \text{Xe}$ 体系的衰变常数或者半衰期的误差较大 (Srinivasan et al., 1972)。随着测试分析技术的进展, $^{130} \text{Te}$ - $^{130} \text{Xe}$ 体系的衰变常数的精度会进一步提高, 同时同位素的测试精度也会不断改善, 如类比于 Ar-Ar 体系, 研究者利用中子辐射技术将放射性母体 $^{130} \text{Te}$ 转化为 $^{131} \text{Xe}$, 仪器分析过程中直接一次性测试 $^{130} \text{Xe}/^{131} \text{Xe}$ 的比值计算年龄, 大大提高了分析的精度 (Thomas et al., 2005)。考虑到碲化物在金属矿床中一般作为矿石矿物存在 (Wang et al., 2018), $^{130} \text{Te}$ - $^{130} \text{Xe}$ 定年体系相较于 K(Ar)-Ar 和 Rb-Sr 等基于脉石矿物的定年体系具有独特的优势, 在直接限定热液矿床年龄方面具有较好的应用前景。

(4) 矿体地质勘探。Fornadel et al. (2019) 在研究浅成热液矿床时, 发现含碲矿物碲同位素组成与样品距岩体与围岩接触带 (与成矿有关) 的距离成反比, 虽然控制碲同位素变化规律的因素还有待深入研究, 但是基于这一规律, 可以通过测试已知矿脉样品的碲同位素组成来寻找与成矿有关的岩体, 进而通过成矿岩体的确定探寻新的矿体。

(5) 记录古海洋环境。非传统稳定同位素在古海洋环境的研究中获得了成功应用, 同属硫族元素的硒稳定同位素在古海洋环境中的应用也已经受到一定的关注 (Mitchell et al., 2012)。由于碲离子在海水中存在 +6 和 +4 价两种价态, 碲同位素组成或者其含量可以用来限定海水的氧化还原环境。值得注意的是, 作为解码古海洋环境之一的海底铁锰氧化物, 其碲含量大大高于平均地壳 (Hein et al., 2003), 研究表明海洋铁锰氧化物中碲的富集受控于多种过程, 如六价的碲作为结构混入物进入铁氧化物或氢氧化物和四价碲被锰氧化物所还原, 这些过程会影响同位素的分馏, 因此通过研究铁锰氧化物中碲的同位素组成必然可以反演海洋中不同的过程 (Fukami et al., 2018; Kashiwabara et al., 2014)。可以预见, 随着海水中碲的来源、循环, 分馏机制等的深入研究, 碲同位素在古海洋环境研究方面也会占据一席之地 (Fehr et al., 2018)。

6 结语

目前,已有的碲同位素研究主要集中在陨石学领域。地球样品中碲同位素的研究才刚起步,积累的数据仍然十分有限,地球不同储库的碲同位素特征还没有得到很好的限定,碲同位素的分馏机制也仅限于有限的几个研究案例,这与地球中碲同位素相对较低的丰度、相关测试技术的复杂性、统一的同位素国际标样的缺乏和研究时间较短等因素有关。

随着研究的深入和上述关键科学问题的逐步解决,碲同位素在地质学研究应用领域将会得到扩展,在矿床学、海洋学等研究领域展现其独特性和优越性。

致谢:感谢两位匿名评审人在论文评审过程中给本文提出的宝贵意见。

References

- Baerman S M, Bullen T D, Dewald J, Zhang D, 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.
- Beatty R D, Manuel O K. 1973. Tellurium in rocks. *Chemical Geology*, 12(2): 155~159.
- Bi S, Li J, Zhou M, Li Z. 2011. Gold distribution in As-deficient pyrite and telluride mineralogy of the Yangzhaiyu gold deposit, Xiaoqinling district, southern North China craton. *Mineralium Deposita*, 46(8): 925~941.
- Cook N J, Ciobanu C L, Spry P G, Voudouris P. 2009. Understanding gold-(silver)-telluride-(selenide) mineral deposits. *Episodes*, 32(4): 249~263.
- Csotonyi J T, Stackebrandt E, Yurkov V. 2006. Anaerobic respiration on tellurate and other metalloids in bacteria from hydrothermal vent fields in the eastern Pacific Ocean. *Applied and Environmental Microbiology*, 72(7): 4950~4956.
- Fehr M A, Rehkämpfer 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, Rehkämpfer M, Halliday A N, Wiechert U, Hattendorf B, Günther D, Ono S, Eigenbrode J L, Rumble D. 2005. Tellurium isotopic composition of the early solar system—A search for effects resulting from stellar nucleosynthesis, ^{126}Sn decay, and mass-independent fractionation. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 69(21): 5099~5112.
- Fehr M A, Rehkämpfer 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, Rehkämpfer 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. ProQuest Dissertations Publishing.
- Fornadel A P, Spry P G, Jackson S E, Mathur R D, 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: 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*, 202: 215~230.
- Forrest A, Kingsley R, Schilling J. 2009. Determination of selenium and tellurium in basalt rock reference materials by isotope dilution hydride generation-inductively coupled plasma-mass spectrometry (ID-HG-ICP-MS). *Geostandards and Geoanalytical Research*, 33(2): 261~269.
- Fukami Y, Yokoyama T. 2014. Precise tellurium isotope analysis by negative thermal ionization mass spectrometry (N-TIMS). *Journal of Analytical Atomic Spectrometry*, 29(3): 520~528.
- Fukami Y, Kimura J, 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.
- 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.
- Hoefs J. 2015. *Stable Isotope Geochemistry*. Springer.
- Housley R M, Kampf A R, Mills S J, Marty J, Thorne B. 2011. The remarkable occurrence of rare secondary tellurium minerals of Otto Mountain near Baker, California, including seven new species. *Rocks & Minerals*, 86(2): 132~145.
- 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.
- Lee D, 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: 35~46.
- Kirsten T, Shaeffer O, Norton E, Stoenner R. 1968. Experimental evidence for the double-beta decay of ^{130}Te . *Physical Review Letters*, 20(23): 1300~1303.
- Liu J, Zhao H, Zhao S, Zhao Z, Cook N J, Bai Xiaodong, Zhang Zhaochong, Lu Jun. 2013. Bonanza-grade accumulations of gold tellurides in the Early Cretaceous Sandaowanzi deposit, northeast China. *Ore Geology Reviews*, 54: 110~126.
- Lodders K. 2003. Solar system abundances and condensation temperatures of the elements. *The Astrophysical Journal*, 591(2): 1220~1247.
- Mao J, Wang Y, Ding T, Chen Y, Wei J, Yin J. 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.
- McDonough W F, Sun S. 1995. The composition of the Earth. *Chemical Geology*, 120(3-4): 223~253.
- Mitchell K, Mason P R D, van Cappellen P, Johnson T M, Gill B C, Owens J D, Diaz J, Ingall E D, Reichart G, Lyons T W. 2012. Selenium as paleo-oceanographic proxy: A first assessment. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 89: 302~317.
- 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(sup. 6): 10~14.
- Ngo H T, Lipschut M E. 1980. Thermal metamorphism of primitive meteorites—X. Additional trace elements in Allende (C3V) heated to 1400°C. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 44(5): 731~739.

- Richter S, Begemann F, Ott U. 1998. Tellurium in pre-solar diamonds as an indicator for rapid separation of supernova ejecta. *Nature*, 391(6664): 261~263.
- Richter F M, Davis A M, Ebel D S, Hashimoto A. 2002. Elemental and isotopic fractionation of Type B calcium-, aluminum-rich inclusions: experiments, theoretical considerations, and constraints on their thermal evolution. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 66(3): 521~540.
- Schulz K J, Deyoung J H, Seal R R I, Bradley D C. 2017. Critical mineral resources of the United States—economic and environmental geology and prospects for future supply. U. S. Geological Survey Professional Paper 1802, 797.
- Selby D, Kelley K D, Hitzman M W, Zieg J. 2009. Re-Os sulfide (bornite, chalcopyrite, and pyrite) systematics of the carbonate-hosted copper deposits at Ruby Creek, southern Brooks range, Alaska. *Economic Geology*, 104(3): 437~444.
- Smith C L, deLaeter J R, Rosman K J R. 1977. Mass spectrometric isotope dilution analyses of tellurium in meteorites and standard rocks. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 41(5): 676~681.
- 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.
- Srinivasan B, Alexander E C, Manuel O K. 1972. Te¹³⁰-Xe¹³⁰ age determinations of tellurium minerals. *Economic Geology*, 67: 592~596.
- Thomas H V, Patrick R A D, Gilmour J D. 2005. Progress in developing Te-Xe dating of ore minerals. In: *Mineral Deposit Research: Meeting the Global Challenge*. Berlin, Heidelberg: Springer, 1427~1430.
- Trutko S M, Akimenko V K, Suzina N E, Anisimova L A, Shlyapnikov M G, Baskunov B P, Duda V I, Boronin A M. 2000. Involvement of the respiratory chain of gram-negative bacteria in the reduction of tellurite. *Archives of Microbiology*, 173(3): 178~186.
- Wang D, Liu J, Zhai D, Carranza E J M, Wang Y, Zhen S, Wang J, Wang J, Liu Z, Zhang Fa. 2018. Mineral paragenesis and ore-forming processes of the Dongping gold deposit, Hebei Province, China. *Resource Geology*, 69(3): 287~313.
- Yang S, Liu Y. 2016. Nuclear field shift effects on stable isotope fractionation: a review. *Acta Geochimica*, 35(3): 227~239.

Analytical techniques for tellurium stable isotopes and their geological applications: a review

CHEN Jiajie^{1,2)}, LENG Chengbiao^{*1)}, XU Deru^{1,2)}, WANG Dazhao¹⁾, LI Kaixuan¹⁾

1) *State Key Laboratory of Nuclear Resources and Environment, East China University of Technology, Nanchang, 330013;*

2) *School of Earth Sciences, East China University of Technology, Nanchang, 330013*

** Corresponding author: lcb8207@163.com*

Abstract

Data from multiple-collector inductively coupled plasma-mass spectrometry and liquid chromatographic procedure have led to a significant improvement in precise and quick determination of Tellurium (Te) isotope compositions, thus promoting studies of these isotopes. This contribution provides a summary of recent advances in Te isotopes and their geological implications. Te is a chalcophile, lithophile and volatile element, with $\delta^{130/125}\text{Te}$ varying from -4.12‰ to 2.15‰ which can be attributed to different processes. The Te isotope compositions (with an overall variation of 6.9‰) of chondrites are controlled by evaporation and condensation processes. Oxidation and reduction process can also cause Te isotopic fractionation (up to 4‰), and thus Te isotopes may act as proxies for redox conditions. Besides, liquid-liquid extraction, a process overlooked by many researchers, can cause 1.8‰ isotopic fractionation of Te and thus should be accounted for during the study of stable heavy isotopes. As the mechanism of Te isotope fractionation is further elucidated, Te isotopes may gain widely application on tracing sources of ore-forming materials, dating mineralization time, locating orebodies and so on.

Key words: tellurium isotopes; analytical method; isotopic fractionation mechanism; geological applications