

中国南极球粒陨石的高精度钾同位素研究

蒋云^{1, 2)}, Piers KOEFOED³⁾, 王昆³⁾, 徐伟彪^{1, 2)}

1) 中国科学院紫金山天文台, 江苏南京, 210023, 中国;

2) 中国科学院比较行星学卓越创新中心, 安徽合肥, 230000, 中国;

3) 美国圣路易斯华盛顿大学, 地球和行星科学系, 密苏里, 63130, 美国

内容提要:钾和其他中等挥发性元素亏损是类地行星普遍的全岩化学成分特征之一, 能用来示踪不同的亏损过程。球粒陨石是组成行星的前体物质, 研究球粒陨石中钾同位素的亏损和分异机制, 对于太阳系物质或行星的起源、形成和演化具有十分重要的意义。本文利用近年来发展的高精度钾同位素分析技术, 测试了 14 个中国南极陨石以及 6 个目击型陨石(Murchison、Allende、Ningqiang、Tagish Lake、Xinyang 和 Banma)的全岩钾同位素组成。结果显示, 21 个碳质球粒陨石全岩 $\delta^{41}\text{K}$ 值分布范围为 $-0.62\text{‰} \pm 0.05\text{‰}$ 至 $0.37\text{‰} \pm 0.08\text{‰}$, 平均值为 $-0.32\text{‰} \pm 0.24\text{‰}$ (2SD), 比全岩硅酸盐地球(BSE)稍重。18 个普通球粒陨石全岩数据(如果异常值 GRV 021603 除外)的 $\delta^{41}\text{K}$ 值分布范围为 $-1.02\text{‰} \pm 0.05\text{‰}$ 到 $-0.61\text{‰} \pm 0.02\text{‰}$, 平均 $\delta^{41}\text{K}$ 值为 $-0.81\text{‰} \pm 0.15\text{‰}$ (2SD), 比全岩硅酸盐地球稍轻。2 个目击型陨石 Murchison(CM2 型)和 Allende(CV3 型), 呈现较大的内部钾同位素差异(分别为 0.22‰ 和 0.16‰), 可能反映了水蚀变导致的钾同位素在 100 mg 球粒陨石全岩尺度上的不均一性。小行星母体过程(水蚀变、热变质和冲击变质)不能很好地解释球粒陨石的钾同位素分馏, 母体作为一个封闭体系只是平衡均一化同一个化学群内的钾同位素成分。不同化学群球粒陨石之间的钾同位素与钾元素之间没有显示明确的相关性, 这一趋势与最近国际上发表的数据在误差范围内基本一致, 太阳星云的单阶段热过程如蒸发或冷凝均不能很好地解释。核合成异常是一种可能的解释, 大质量恒星的星风或者超新星爆发注入可以增加一些 ^{41}K 到太阳星云中, 而在原始球粒陨石中保存下来, 然而这一观点需要更多研究支持。

关键词: 南极陨石; 钾同位素; 球粒陨石; 水蚀变; 热变质; 蒸发/冷凝; 星云

与太阳系的平均组成(以 CI 群碳质球粒陨石为代表)相比, 其他类型的球粒陨石尤其是分异的类地行星如地球、月球、火星和灶神星都明显亏损中等挥发性元素(MVEs)如 Na、K、Cu、Zn 和 Rb (Wasserburg et al., 1964; Norris et al., 2017)。以钾(K)为例, 其是中等挥发性元素(Lodders, 2003), 与难熔元素如铀(U)的比值常被用来指示挥发性元素亏损的程度。CI 群碳质球粒陨石最原始, 代表了太阳光球层的成分, 其 K/U 值为 70000 (Anders et al., 1989)。与 CI 群碳质球粒陨石相比, 地球亏损了 5 倍(K/U=13800; Arevalo et al., 2009), 而月球则亏损了 25 倍之多(K/U=2500;

Taylor, 1982)。钾和其他挥发性元素亏损是地球、月球和其他内太阳系天体, 如火星、灶神星及 Angrite 等小行星母体普遍的全岩化学特征之一, 能用来示踪不同的亏损过程, 如发生在太阳星云环境中物质的不完全冷凝或蒸发(Wasson et al., 1974; Huss, 2004), 星子/行星形成时的吸积过程挥发分丢失(Hin et al., 2017)、高能碰撞(Wang et al., 2016a)、岩浆洋的脱气(Day et al., 2014)及局部火山去气(Young et al., 2019)等, 因此能为类地行星的起源、形成和演化提供重要约束。

球粒陨石是组成行星的前体物质。与分异行星的挥发性元素亏损相比, 球粒陨石间的挥发性元素

注: 本文为国家自然科学基金项目(编号 41873076)、国防科工局民用航天技术预先研究项目(编号 D020202 和 D020302)及中国小行星基金会联合资助的成果。

收稿日期: 2021-04-27; 改回日期: 2021-06-03; 网络发表日期: 2021-08-02; 责任编辑: 李曼。

作者简介: 蒋云, 女, 1984 年生。副研究员, 博士, 从事陨石的岩矿学、地球化学和年代学研究。E-mail: yjiang@pmo.ac.cn。

引用本文: 蒋云, Piers KOEFOED, 王昆, 徐伟彪. 2021. 中国南极球粒陨石的高精度钾同位素研究. 地质学报, 95(9): 2878~2888, doi: 10.19762/j.cnki.dizhixuebao.2021234.
Jiang Yun, Piers Koefoed, Wang Kun, Hsu Weibiao. 2021. High precision potassium isotopic study of Chinese Antarctic chondrites. Acta Geologica Sinica, 95(9): 2878~2888.

亏损程度小得多,如相比 CI 球粒陨石,其他未分异的球粒陨石的中等挥发性元素(如 K、Rb、Cu 和 Zn)的亏损程度一般在一个数量级左右,而分异的行星如月球和灶神星的亏损程度高达两至三个数量级(Bloom et al., 2020)。以碳质球粒陨石为例,CI 群碳质球粒陨石没有元素亏损,其成分(高度挥发性元素 H、C、N、O 及稀有气体除外)代表太阳的光球层,其他碳质球粒陨石中的挥发性元素的丰度为:CI>CM>CO=CV>CR>CK(Lodders et al., 1998)。与分异行星物质的亏损机制不同,球粒陨石中的挥发性元素亏损主要有两种机制:挥发性元素从热的星云中不完全冷凝(Palme et al., 1988)以及球粒形成之前固体尘埃部分蒸发(Young, 2000)。因此,挥发性元素亏损是影响陨石和行星物质的基本化学过程之一,其是行星或者球粒陨石母体普遍的全岩化学成分特征。研究球粒陨石中钾同位素的亏损和分异机制,对于太阳系物质或行星的起源、形成和演化具有十分重要的意义。

钾(K)是大离子亲石元素和中等挥发性元素,在 10 Pa 的星云压力条件下 50% 的平衡冷凝温度为 1006 K(Lodders, 2003)。作为组成硅酸盐矿物的主要元素之一,钾在地壳中的丰度位列第八,在总体硅酸盐地球中第十五。钾只有一个氧化态(+1),具有两个稳定同位素³⁹K (93.2581%) 和⁴¹K (6.7302%) 及一个放射性同位素⁴⁰K (0.0117%, 半衰期 $t_{1/2} = 1.277 \times 10^9$ a)。其中放射性同位素⁴⁰K 衰变为 ⁴⁰Ca (89.25%) 和 ⁴⁰Ar (11.55%), 释放产生的热能被认为是早期地球内热的主要来源之一(Urey, 1955)。地外样品的早期钾同位素研究以 Humayun 和 Clayton 为代表,利用钾同位素研究挥发性元素的亏损,建立的蒸发模型预测瑞利部分蒸发过程可产生大的钾同位素分异,但由于当时的分析精度(0.5‰, SIMS 和 TIMS)的限制,研究人员在地球、月球和小行星样品之间没有观察到钾同位素分异(Humayun et al., 1995)。自 2016 年开始,多接收电感耦合等离子体质谱仪(MC-ICP-MS)的发展使得高精度(0.05‰)钾同位素测量成为可能(Li et al., 2016; Wang et al., 2016b; Hu et al., 2018; Morgan et al., 2018; Wang Kun et al., 2020),揭示了不同行星之间(如地球-月球,灶神星)的钾同位素差异(Wang et al., 2016a; Tian et al., 2019, 2020),不同类型的球粒陨石(Zhao et al., 2019; Bloom et al., 2020; Ku et al., 2020)以及球粒、难熔包体和基质等的钾同位素组成(Koefoed et

al., 2020; Jiang et al., 2021)。

本文利用高精度钾同位素分析技术,分析了 14 个中国南极陨石的全岩钾同位素组成,通过对比分析不同化学群球粒陨石之间钾同位素成分的相关性,研究球粒陨石中钾元素的亏损程度与钾同位素成分的相关性,探讨早期太阳星云中钾同位素的亏损机制和分异机制。本文还分析了 6 个目击型(Observed fall, 目击降落后短期内迅速被收集)陨石(Murchison、Allende、Ningqiang、Tagish Lake、Xinyang 和 Banma)的不同全岩的钾同位素成分,探讨钾同位素在球粒陨石全岩尺度上的不均一性。

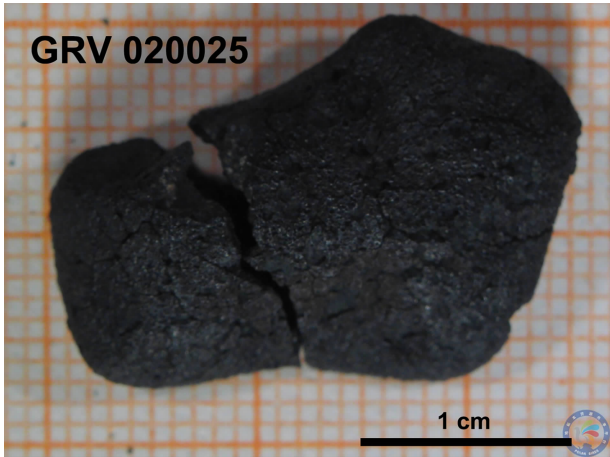


图 1 南极陨石(如 GRV 020025)最表层的黑色熔壳保存完整,风化程度低
Fig. 1 The black fusion crust of an Antarctic meteorite (such as GRV 020025) is well preserved with low terrestrial weathering

1 陨石样品和实验方法

为了最大限度地减少地球风化的潜在影响,本研究涉及的样品只有南极陨石(图 1)和目击陨石,没有沙漠发现的陨石。样品名称及其类型见表 1 和表 2,陨石名称缩写“GRV”表示在南极的格罗夫山地区收集。将全岩样品(远离熔壳的部分)50~120 mg 在研磨钵里磨碎成粉末,称重后溶解在混合酸(3HF : 1HNO₃)中,加热 150℃ 溶解 10 d 以上,蒸干后再次溶解在王水(3HCl : 1HNO₃)中。待样品彻底溶解后,蒸干,加入 0.7 mol/L 硝酸,其中 10% 的溶液用于元素分析,90% 的溶液用于钾同位素分析。元素分析采用美国圣路易斯华盛顿大学的四级杆质谱仪(Thermo Scientific iCapQ ICP-MS),分析精度一般为 2%~10% RSD。钾同位素分析采用美国圣路易斯华盛顿大学的多接收电感耦合等离子体

质谱仪(MC-ICP-MS)进行,并和高纯度的标准物质溶液进行标样-样品交叉测试(Standard-sample bracketing)。因此,所有样品在上机测试前都需要经过高度提纯。为了将钾从基质元素中提纯出来,采用常见的离子交换柱层析原理。离子色谱柱内径

为 1.5 cm,填充 17 mL 的 Bio-Rad AG50W-X8(100~200 目)阳离子交换树脂,利用 0.7 mol/L 的硝酸洗脱钾和回收钾。为了进一步提纯钾,采用更小内径(ID=0.5 cm,填充 2.4 mL 树脂)的离子色谱柱重复提纯步骤,洗脱和回收所用硝酸浓度为 0.5 mol/L。

表 1 不同碳质球粒陨石和普通球粒陨石的钾元素成分和钾同位素组成
Table 1 The K concentration and isotopic compositions of carbonaceous and ordinary chondrites

样品编号	样品名称 ^①	类型	质量(mg)	$\delta^{41}\text{K}(\text{‰})$	95% C. I.	$n^{\text{②}}$	K ₂ O(%)	K($\times 10^{-6}$)
碳质球粒陨石								
Bulk_JG2	GRV 020025	CM2	76.3	0.18	0.02	12	0.04	321.0
Bulk_JG4	GRV 050179	CM2	76.7	0.37	0.08	3	0.02	192.6
Bulk_JG5	GRV 13051	CM2	69.8	-0.14	0.09	3	0.03	271.2
Bulk_JM1	Murchison	CM2	75.6	-0.19	0.04	12	0.06	468.3
Bulk_JM2	Murchison	CM2	87.8	-0.41	0.05	12	0.07	608.1
Bulk_JM3	Murchison	CM2	61.5	-0.40	0.05	12	0.05	393.6
Bulk_JM4	Murchison	CM2	56.7	-0.35	0.04	12	0.05	398.3
Bulk_JM5	Murchison	CM2	71	-0.38	0.03	8	0.05	445.1
Bulk_JG3	GRV 021579	CO3	70.9	-0.27	0.03	12	0.05	439.3
Bulk_JA1	Allende	CV3	76	-0.60	0.04	8	0.03	228.5
Bulk_JA2	Allende	CV3	83.4	-0.49	0.04	8	0.03	221.1
Bulk_JA3	Allende	CV3	90.4	-0.46	0.06	8	0.03	226.2
Bulk_JA4	Allende	CV3	77.3	-0.48	0.04	7	0.05	395.6
Bulk_JA5	Allende	CV3	74.6	-0.62	0.05	6	0.03	256.6
Bulk_JN	Ningqiang	CV3/CK3	71.1	-0.52	0.02	12	0.05	397.0
Bulk_JG1	GRV 020015	CK4	69.1	-0.48	0.03	12	0.03	277.1
Bulk_JT1	Tagish Lake	未分类	85	-0.30	0.04	8	0.04	345.6
Bulk_JT2	Tagish Lake	未分类	121.3	-0.29	0.05	13	0.04	360.0
Bulk_JT3	Tagish Lake	未分类	112.3	-0.29	0.02	13	0.04	366.4
Bulk_JT4	Tagish Lake	未分类	84.3	-0.32	0.05	7	0.04	332.2
Bulk_JT5	Tagish Lake	未分类	56.8	-0.31	0.04	12	0.04	329.5
普通球粒陨石								
Bulk_JG9	GRV 021603	H3	74.9	0.35	0.06	5	0.02	144.0
Bulk_JG10	GRV 022907	H3	93.2	-0.71	0.03	9	0.11	891.0
Bulk_JG11	GRV 021481	H3	81.2	-0.61	0.02	9	0.11	928.4
Bulk_JX1	Xinyang	H5	92.7	-0.95	0.03	12	0.11	927.4
Bulk_JX2	Xinyang	H5	95.7	-0.97	0.03	13	0.10	861.5
Bulk_JX3	Xinyang	H5	69.1	-1.01	0.04	13	0.10	837.3
Bulk_JX4	Xinyang	H5	86.1	-1.02	0.05	12	0.10	862.3
Bulk_JX5	Xinyang	H5	88.6	-0.97	0.03	13	0.10	835.1
Bulk_JX6	Xinyang	H5	78.5	-0.98	0.04	13	0.10	826.5
Bulk_JG12	GRV 020106	L3	86.6	-0.65	0.04	10	0.08	661.7
Bulk_JG13	GRV 052080	L3	67.9	-0.61	0.02	11	0.08	628.2
Bulk_JG14	GRV 090306	L3	89.8	-0.66	0.04	10	0.09	707.5
Bulk_JB1	Banma	L5	71.1	-0.78	0.03	11	0.11	916.4
Bulk_JB2	Banma	L5	71.5	-0.82	0.02	11	0.10	804.7
Bulk_JB3	Banma	L5	80.3	-0.82	0.02	11	0.09	788.1
Bulk_JB4	Banma	L5	50	-0.76	0.02	12	0.11	930.3
Bulk_JG6	GRV 020034	LL3	65.5	-0.93	0.02	11	0.11	871.9
Bulk_JG7	GRV 020104	LL3	82.9	-0.77	0.04	10	0.09	754.1
Bulk_JG8	GRV 020105	LL3	72.8	-0.62	0.03	9	0.09	762.0
地质标样	BHVO-2			-0.40	0.02	11		
	BHVO-2			-0.40	0.03	11		

注:①GRV 开头的样品为南极陨石,其他为目击型陨石(Observed fall)。②为分析测试次数。

表 2 不同碳质球粒陨石和普通球粒陨石的主量元素成分(%)

Table 2 Major elemental compositions of carbonaceous and ordinary chondrites (%)

样品名称	类型	SiO ₂ ^①	TiO ₂	Cr ₂ O ₃	Al ₂ O ₃	FeO	MnO	MgO	CaO	NiO	Na ₂ O	K ₂ O	总量
碳质球粒陨石													
GRV 020025	CM2	56.04	0.09	0.36	1.74	22.90	0.18	15.99	1.39	1.10	0.17	0.04	100
GRV 050179	CM2	57.76	0.09	0.32	1.67	22.14	0.17	14.55	2.19	0.99	0.10	0.02	100
GRV 13051	CM2	58.01	0.09	0.34	1.66	22.11	0.17	14.87	1.51	1.05	0.14	0.03	100
Murchison ^②	CM2	51.57	0.09	0.35	1.82	24.84	0.19	17.65	1.64	1.19	0.60	0.06	100
GRV 021579	CO3	49.96	0.09	0.40	1.98	26.82	0.21	17.09	1.79	1.28	0.33	0.05	100
Allende ^②	CV3	45.04	0.11	0.43	2.49	26.85	0.16	21.06	2.25	1.28	0.30	0.03	100
Ningqiang	CV3/CK3	43.64	0.12	0.43	3.05	26.13	0.17	22.04	2.54	1.24	0.59	0.05	100
GRV 020015	CK4	43.71	0.12	0.46	2.36	27.70	0.16	21.26	2.27	1.52	0.40	0.03	100
Tagish Lake ^②	未分类	58.11	0.08	0.32	1.23	22.11	0.18	15.24	1.53	1.04	0.12	0.04	100
普通球粒陨石													
GRV 021603	H3	49.48	0.10	0.41	2.30	24.78	0.12	19.25	2.00	1.24	0.29	0.02	100
GRV 022907	H3	53.80	0.08	0.38	1.51	23.59	0.23	17.22	1.33	1.02	0.72	0.11	100
GRV 021481	H3	55.63	0.08	0.40	1.53	21.68	0.21	17.52	1.32	0.80	0.71	0.11	100
Xinyang ^②	H5	46.69	0.09	0.47	1.79	25.94	0.27	20.82	1.66	1.32	0.85	0.10	100
GRV 020106	L3	58.82	0.07	0.37	1.49	19.60	0.22	16.53	1.30	0.80	0.72	0.08	100
GRV 052080	L3	60.80	0.08	0.43	1.51	18.83	0.21	15.51	1.13	0.82	0.60	0.08	100
GRV 090306	L3	60.11	0.08	0.39	1.53	17.76	0.24	17.10	1.41	0.60	0.70	0.09	100
Banma ^②	L5	48.19	0.10	0.45	1.76	24.05	0.29	21.39	1.67	1.13	0.87	0.10	100
GRV 020034	LL3	56.18	0.09	0.41	1.61	18.75	0.26	19.51	1.49	0.75	0.84	0.11	100
GRV 020104	LL3	57.03	0.08	0.40	1.55	19.63	0.25	17.95	1.43	0.82	0.78	0.09	100
GRV 020105	LL3	56.62	0.09	0.40	1.51	20.19	0.24	17.88	1.41	0.87	0.70	0.09	100

注:①由于样品在溶解过程中气化了元素 Si,此处 SiO₂为总量(被认为是 100%)减去其他主量元素的质量百分数;②主量元素成分为不同全岩的平均值(5 个 Murchison,5 个 Allende,5 个 Tagish Lake,6 个 Xinyang,4 个 Banma)。

为了更好地提纯钾,此步骤重复一次。实验分析方法详见 Chen et al. (2019)。钾的回收率大于 99%,钾的丢失(< 1%)可忽略不计。钾的空白为 0.26±0.15 μg(2SD),相对于样品的钾含量,可以忽略不计。钾的同位素成分一般用 δ⁴¹K 来表示,单位为千分之一(‰)。δ⁴¹K 的计算公式为:

$$\delta^{41}\text{K} = \left[\left(\frac{{}^{41}\text{K}}{{}^{39}\text{K}} \right)_{\text{sample}} / \left(\frac{{}^{41}\text{K}}{{}^{39}\text{K}} \right)_{\text{NIST SRM 3141a}} - 1 \right] \times 1000$$

采用 NIST SRM 3141a 作为钾同位素标准物质。为了监测每 24 h 的数据质量,还将地球标样(BHVO-2)作为未知样与球粒陨石样品一起进行分析。典型的内部误差为 0.05‰(95% C. I.)。长期(20 个月)分析精度为 0.11‰(2SD; Chen et al. , 2019)。

2 样品的钾同位素组成

不同碳质球粒陨石和普通球粒陨石的钾同位素成分(δ⁴¹K)见表 1,相应的主量元素成分见表 2。图 2 显示了不同碳质球粒陨石群(图 2a)和普通球粒陨石群(图 2b)的钾同位素对比。

2.1 碳质球粒陨石的钾同位素组成

对于碳质球粒陨石(图 2a),4 个 CM 群碳质球

粒陨石的 δ⁴¹K 值从 −0.41‰±0.05‰到 0.37‰±0.08‰,平均值为 −0.16‰±0.29‰(2SD)。1 个 CO 群碳质球粒陨石的 δ⁴¹K 值为 −0.27‰±0.03‰,与前人报道范围一致(Bloom et al. , 2020; Ku et al. , 2020)。1 个 CV 群碳质球粒陨石(Allende)的 δ⁴¹K 值从 −0.62‰±0.05‰至 −0.46‰±0.05‰,平均值为 −0.53‰±0.07‰(2SD)。Ningqiang 是 1983 年降落在中国陕西省宁强县的一块碳质球粒陨石,被认为是未分类的或 CV3/CK3 群碳质球粒陨石(Wang et al. , 2009),其 δ⁴¹K 值为 −0.52‰±0.02‰,与 CV 群平均值(−0.53‰±0.07‰)和 CK 群碳质球粒陨石 GRV 020015(−0.48‰±0.03‰)在误差范围内一致。Tagish Lake 是一块未分类的碳质球粒陨石,其平均 δ⁴¹K 值(−0.3‰±0.01‰),比全岩硅酸盐地球(−0.48‰±0.03‰; Wang et al. , 2016b)稍重。本文 21 个碳质球粒陨石数据分布范围为 −0.62‰±0.05‰至 0.37‰±0.08‰,平均值为 −0.32‰±0.24‰(2SD),比全岩硅酸盐地球稍重。

2.2 普通球粒陨石的钾同位素组成

对于普通球粒陨石(图 2b),9 个 H 群普通球粒陨石的 δ⁴¹K 值从 −1.02‰±0.05‰到 0.35‰±

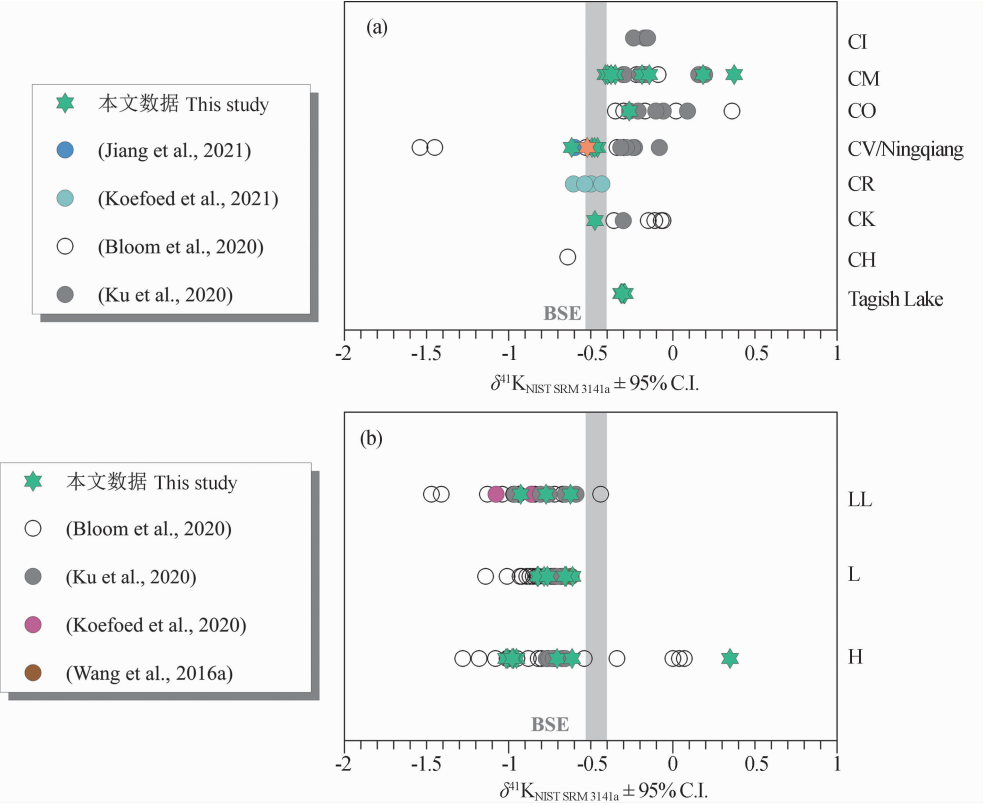


图 2 碳质球粒陨石(a)和普通球粒陨石(b)的全岩钾同位素成分

Fig. 2 The bulk K isotopic compositions of carbonaceous chondrites (a) and ordinary chondrites (b)

碳质球粒陨石有 CI 群、CM 群、CO 群、CV 群、CR 群、CK 群和 CH 群，Ningqiang (橙色六角星形) 为 CV3/CK3 群，Tagish Lake 为未分类的碳质球粒陨石群。普通球粒陨石有 H 群、L 群和 LL 群。六角星形所示为本文数据，圆圈所示来自文献 Jiang et al. (2021)，Bloom et al. (2020)，Ku et al. (2020)，Koefoed et al. (2020)，Wang et al. (2016a)。Koefoed et al. (2021) 数据暂未公开发表。全岩硅酸盐地球 (BSE, 垂直灰色区域) 数据引自 (Wang et al., 2016b)。图中数据误差小于图标大小

In this study (marked by hexagrams) and literatures (marked by circles), which include Jiang et al. (2021), Bloom et al. (2020), Ku et al. (2020), Koefoed et al. (2020), Wang et al. (2016a). Koefoed et al. (2021) is from personal communication. Carbonaceous chondrites include CI, CM, CO, CV, CR, CK and CH groups. Ningqiang (marked by orange hexagram) is classified as CV3/CK3 group. Tagish Lake is an ungrouped carbonaceous chondrite. Ordinary chondrites include H, L and LL groups. The vertical gray area is the bulk silicate Earth (BSE, Wang et al., 2016b). The data error is smaller than the symbol size

0.06‰。如果排除一个异常高的数据 (GRV 021603, $0.35\text{‰} \pm 0.06\text{‰}$), 其余 8 个 H 群普通球粒陨石的平均 $\delta^{41}\text{K}$ 值为 $-0.9\text{‰} \pm 0.15\text{‰}$ (2SD)。7 个 L 群普通球粒陨石的 $\delta^{41}\text{K}$ 值从 $-0.82\text{‰} \pm 0.02\text{‰}$ 到 $-0.61\text{‰} \pm 0.02\text{‰}$, 平均 $\delta^{41}\text{K}$ 值为 $-0.73\text{‰} \pm 0.09\text{‰}$ (2SD)。3 个 LL 群普通球粒陨石的 $\delta^{41}\text{K}$ 值从 $-0.93\text{‰} \pm 0.02\text{‰}$ 到 $-0.62\text{‰} \pm 0.03\text{‰}$, 平均 $\delta^{41}\text{K}$ 值为 $-0.77\text{‰} \pm 0.15\text{‰}$ (2SD)。可以看出, 三个普通球粒陨石群 (H 群、L 群和 LL 群) 在误差范围内具有相似的 $\delta^{41}\text{K}$ 值, 没有显示出与化学群相关的变化趋势。本文 18 个普通球粒陨石 (如果异常值 GRV 021603 除外) 的全岩 $\delta^{41}\text{K}$ 值分布范围为 $-1.02\text{‰} \pm 0.05\text{‰}$ 到 $-0.61\text{‰} \pm 0.02\text{‰}$, 平均 $\delta^{41}\text{K}$ 值为 $-0.81\text{‰} \pm 0.15\text{‰}$ (2SD),

比全岩硅酸盐地球 ($-0.48\text{‰} \pm 0.03\text{‰}$; Wang et al., 2016b) 稍轻。

2.3 样品的钾同位素组成不均一性

为了检验同一块陨石内部的钾同位素成分的不均一性, 我们对 5 个不同的球粒陨石样品在 4 ~ 6 个不同的碎片上分别进行了分析: 包括 5 个 Murchison 碎片、5 个 Allende 碎片、5 个 Tagish Lake 碎片、6 个 Xinyang 碎片以及 4 个 Banma 碎片。陨石碎片质量范围为 50 ~ 120 mg (表 1), 分别依次磨成粉末、溶解、提纯并独立分析。在长期分析精度范围内 (0.11‰ , 2SD; Chen et al., 2019), 5 个球粒陨石中的 3 个样品内部具有相对均一的钾同位素成分, 如未分类的 Tagish Lake 碳质球粒陨石、Xinyang (H5) 和 Banma (L5) 普通球粒陨石 (图 3)。

其他 2 个陨石的不同碎片在分析不确定性范围内不一致,如 5 个 Murchison(CM2)碎片的 $\delta^{41}\text{K}$ 差异为 0.22‰,5 个 Allende(CV3)碎片的 $\delta^{41}\text{K}$ 差异为 0.16‰。这 2 个样品的内部差异,可能反映了钾同位素在 100 mg 全岩尺度上的不均一性。

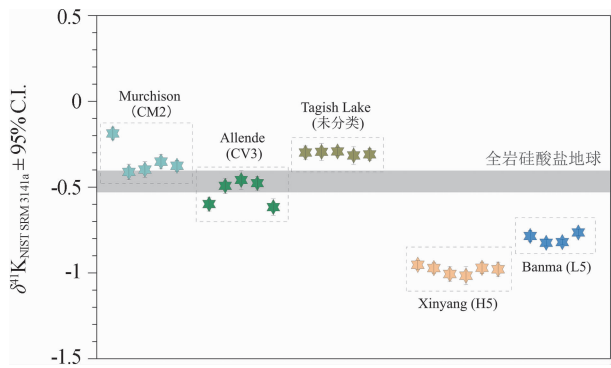


图 3 球粒陨石样品中的钾同位素不均一性(5 个 Murchison, 5 个 Allende, 5 个 Tagish Lake, 6 个 Xinyang, 4 个 Banma)。水平灰色区域代表全岩硅酸盐地球范围 (Wang et al. , 2016b)

Fig. 3 The bulk K isotopic heterogeneity in chondrites samples (5 Murchison samples, 5 Allende ones, 5 Tagish Lake ones, 6 Xinyang ones, 4 Banma ones). The horizontal gray area represents the range of bulk silicate Earth (Wang et al. ,2016b)

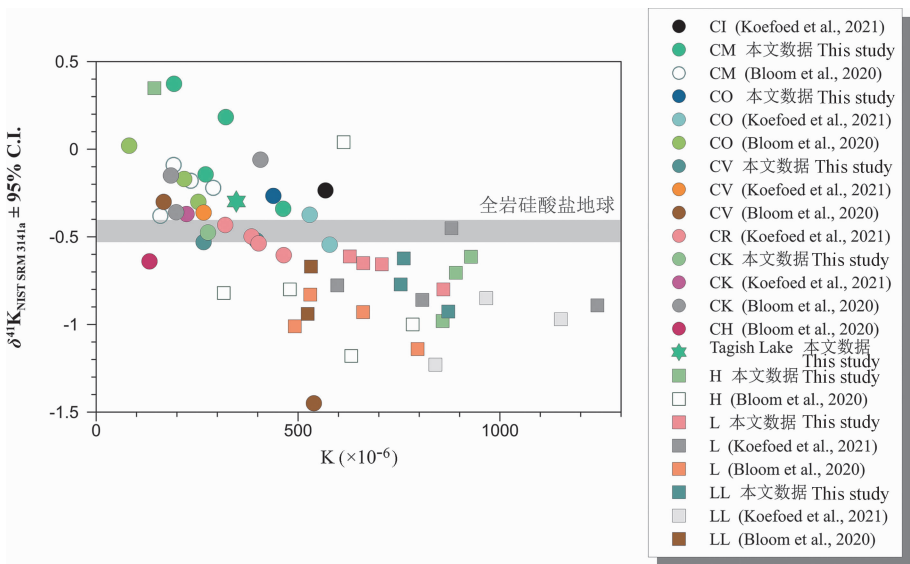


图 4 碳质球粒陨石和普通球粒陨石的全岩钾同位素成分与钾元素含量图

Fig. 4 The bulk K isotopic compositions ($\delta^{41}\text{K}$) versus K abundances ($\times 10^{-6}$) of carbonaceous 碳质球粒陨石(圆圈所示)的钾同位素比全岩硅酸盐地球略重,普通球粒陨石(正方形所示)比全岩硅酸盐地球略轻;文献数据来自 Bloom et al. (2020)和 Koefoed et al. (2021),其中 Koefoed et al. (2021)数据暂未公开发表;全岩硅酸盐地球(水平灰色区域)数据引自 (Wang et al. , 2016b);图中数据误差小于图标

Chondrites (marked by circles) and ordinary chondrites (marked by squares) samples from this study and literatures (after Bloom et al. , 2020; Koefoed et al. , 2021). Koefoed et al. (2021) is from personal communication; the horizontal gray area represents the bulk silicate Earth (Wang et al. ,2016b); the data error is smaller than the symbol size

3 讨论

3.1 地球风化作用对球粒陨石钾同位素组成的影响

与地球上陆壳的钾元素含量(约 23244×10^{-6} , Rudnick et al. , 2014)相比,球粒陨石的钾元素含量明显低得多($200 \times 10^{-6} \sim 970 \times 10^{-6}$, Lodders et al. , 1998),本文 40 个球粒陨石全岩数据的钾元素含量范围为 $140 \times 10^{-6} \sim 930 \times 10^{-6}$ (表 1)。球粒陨石中的钾盐易溶于水,在风化过程中容易被雨水或者地表水淋滤出来,因此地球风化和混染可以潜在地增加发现型陨石的钾元素含量,改变陨石的钾同位素成分 (Zipfel et al. , 2000)。Tian et al. (2019) 研究结果证实,南极发现的陨石样品与同类的目击型陨石具有一致的钾同位素组成,而沙漠里发现的同类样品明显地受地球风化影响。

本文中分析的样品为中国科考队在南极格罗夫山地区收集的陨石样品(以 GRV 开头的样品编号)以及目击型陨石(Murchison、Allende、Ningqiang、Tagish Lake、Xinyang 和 Banma)。南极由于气候干燥寒冷,陨石熔壳保存新鲜完整(图 1),较少受到地球混染。目击型陨石由于降落在地球后被迅速收集,也被认为较少遭受地球风化作用的影响。因此,

我们认为本文中的南极陨石和目击型陨石应该真实地反映了它们在地外过程如星云中或小行星母体上形成的钾同位素成分特征。

3.2 母体过程不能解释球粒陨石的钾同位素分馏

球粒陨石的岩石类型一般分为 1 到 6 型,指示其在小行星母体上遭受的水蚀变和热变质的程度。从 3 型到 1 型,水蚀变程度增强,从 3 型到 6 型,热变质程度增强,3 型代表了最原始的非平衡型球粒陨石。钾是一个随水流动的元素,在小行星母体上的水蚀变过程中容易导致钾元素的重新分配,引起钾同位素的不均一性。大量不同岩石类型的碳质球粒陨石和普通球粒陨石样品的钾同位素表明,3 型球粒陨石显示最大的钾同位素成分变化,随着水蚀变程度增强(从 2 型到 1 型)以及热变质程度增加(从 4 型到 6 型),同一化学群的不同球粒陨石的钾同位素范围变小(Bloom et al., 2020)。这表明母体过程如水蚀变和热变质会造成球粒陨石的初始的钾同位素成分均一化,符合封闭体系的等化学反应(Bland et al., 2009)。这可以用来解释本文 5 个球粒陨石样品(Murchison、Allende、Tagish Lake、Xinyang 和 Banma)的不同全岩的钾同位素成分变化。Xinyang 和 Banma 代表高变质程度的普通球粒陨石,由于受到较高的热变质(岩石类型均为 5 型),具有相对均一的钾同位素组成。Tagish lake 是一个未分类的碳质球粒陨石,其水蚀变程度是 2 型(Zolensky et al., 2002),也具有相对均一的钾同位素成分(图 3)。其他 2 个陨石 Murchison 和 Allende,其岩石类型分别为 2 型和 3 型,较大的内部钾同位素差异(分别为 0.22‰和 0.16‰),可能反映了水蚀变造成的钾同位素在 100 mg 全岩尺度上的不均一性。

其他可能影响钾同位素成分的母体过程为冲击变质。球粒陨石的冲击程度指示母体上经历的冲击变质事件的强度,从低到高分 S1 到 S6 型。同样地,大量相同化学群和岩石类型的球粒陨石的钾同位素与其相应的冲击变质程度没有显示任何相关性,如同为 6 型的 L 群普通球粒陨石 ALH 85017 和 ALHA 76001,冲击变质程度分别为 S6 和 S3,它们的钾同位素分别为 $-0.74‰\pm0.03‰$ 和 $-0.82‰\pm0.04‰$,在误差范围内没有差异(Bloom et al., 2020)。这与最近的热化学计算结果一致:相对于其他的中等挥发性元素 Cu 和 Zn,钾元素具有更低的挥发性(Jiang et al., 2019)。Jiang et al. (2019)对全球不同散落区的一些玻璃陨石(Tektites)进行了

钾同位素分析,玻璃陨石是上陆壳在遭受陨石撞击后高温熔融快速冷却所形成,其发现玻璃陨石的钾同位素与全岩硅酸盐地球值没有任何区别,表明上陆壳岩石在转变成玻璃陨石的撞击、熔融和蒸发过程中,并没有发生钾的丢失和同位素分馏。因此,不像元素 Cu 和 Zn,球粒陨石中的钾同位素变化不能用冲击变质来解释。

因此,母体过程(水蚀变、热变质和冲击变质)不能解释球粒陨石的钾同位素分馏,母体作为一个封闭体系只是平衡均一化钾同位素成分,减少钾同位素成分的变化,球粒陨石母体吸积前的星云过程才造成了钾同位素的分馏。

3.3 星云过程产生球粒陨石的钾同位素分馏

对于碳质球粒陨石来说,中等挥发性元素(如 K、Na、Rb、Cu 和 Zn)在不同化学群中的亏损程度有一种分布趋势:从 CI 群、CM 群、CO 群、CV 群、CR 群到 CK 群,元素丰度逐渐降低(Wai et al., 1977)。中等挥发性元素的亏损程度主要由它们在星云里的挥发性控制,而不是元素的化学属性如亲石性、亲铁性和亲铜性决定(Lodders, 2003)。因此,碳质球粒陨石中挥发性元素的亏损通常被解释为太阳星云过程如不完全冷凝或者部分蒸发导致的(Wasson et al., 1974; Huss, 2004)。

早在 1995 年,Humayun 和 Clayton 分析了 5 个碳质球粒陨石(1 个 CI 群 Orgueil, 1 个 CM 群 Murchison, 3 个 CV 群 Allende、Vigarano 和 Leoville)的钾同位素组成,由于受当时的分析精度(0.5‰)的限制,他们没有观察到明显的钾同位素分异,认为部分蒸发机制不能解释碳质球粒陨石的钾同位素特征,因为星云中发生的部分蒸发会导致钾同位素发生瑞利分馏,引起挥发分亏损的球粒陨石(如 CV 群)明显富集重的钾同位素。因此他们认为,从热的太阳星云中不完全冷凝机制更符合不同群碳质球粒陨石中呈现的挥发性元素亏损的趋势。本文数据(表 1)显示,21 个碳质球粒陨石数据分布范围为 $-0.62‰\pm0.05‰$ 至 $0.37‰\pm0.08‰$,具有 1‰的变化。与最近国际上发表的数据相比(Bloom et al., 2020; Ku et al., 2020; Jiang et al., 2021),误差范围内基本一致,且碳质球粒陨石的钾同位素成分变化仍为 1‰左右(图 2a)。尽管钾同位素分析精度(0.05‰)已大幅度提高,但是仍然没有观察到碳质球粒陨石具有明显的钾同位素分异。钾同位素组成和钾元素成分投图显示,随着钾元素亏损程度的增加,从 CI 群、CM 群、CO 群、CV 群、CR 群到

CK 群,没有呈现出明确的逐渐富集重钾同位素的趋势(图 4)。因此本文数据也支持前人观点(Humayun et al., 1995; Bloom et al., 2020),单阶段的部分蒸发过程不能产生碳质球粒陨石中的钾元素亏损和钾同位素组成变化。

尽管碳质球粒陨石和普通球粒陨石的全岩钾元素成分和钾同位素组成显示出粗略的负相关性,但是这主要是两个不同类的钾同位素成分造成的,前者比全岩硅酸盐地球略重,后者比全岩硅酸盐地球略轻(图 4)。碳质球粒陨石和普通球粒陨石之间的这种钾同位素的二分性也体现在其它中等挥发性元素体系如 Cu、Zn 和 Rb 等(Luck et al., 2005; Pringle et al., 2017)。这可能与两种储库经历了不同程度的蒸发/冷凝过程有关,或者经历了不同的尘埃/气体分离导致碳质球粒陨石更富集较重的钾同位素,普通球粒陨石更富集较轻的钾同位素。

球粒陨石主要由三部分组成:球粒(Chondrules)、基质(Matrix)和难熔包体(CAIs)。球粒是在太阳星云早期高温(1700 ~ 2100 K)熔融快速冷却结晶形成的一毫米大小的硅酸盐球体(Hewins et al., 1990)。球粒是球粒陨石(CI 除外)的主要组成部分,约占球粒陨石的 20%~80%,记录了早期太阳系发生的高能事件,因而很有可能记录钾同位素的明显分馏。然而,无论是碳质球粒陨石还是普通球粒陨石,其球粒的钾同位素组成与钾元素成分均没有显示出明显的负相关性(Alexander et al., 2000; Koefoed et al., 2020; Jiang et al., 2021),即星云的蒸发过程没有产生显著的钾同位素分馏。这与前人的实验模拟和理论计算不符(Ebel et al., 2000; Taylor et al., 2005)。Young(2000)指出扩散限制的星云蒸发过程(如固体尘埃的蒸发)会抑制钾同位素的分馏。此外,蒸发实验表明,相较于低压(10 Pa)的星云条件,更高压(如 1 bar)条件下钾同位素分馏程度小得多(Yu et al., 2003)。在球粒的形成区域,固体/气体比值比平均太阳星云高几个数量级(Alexander et al., 2008; Hezel et al., 2010),这会极大地抑制钾同位素的分馏。而且球粒形成时会与周围的星云气体发生倒转反应(Back reaction),蒸发掉的元素(如 K 和 Na)部分会冷凝回球粒熔体,减少同位素的分馏程度(Alexander et al., 2008)。因此,球粒在星云形成区域周围具有高的固体/气体比值(更高的压力)以及球粒熔融事件中熔体与周围的蒸发气体发生交换反应可能极大地减少了钾同位素的分馏程度,造成了球粒陨石的

钾同位素和钾元素不具有明确的相关性。

关于球粒陨石的钾元素亏损和钾同位素成分没有明显的相关性,对此还有另一种解释。最近,Ku 和 Jacobsen(2020)发现球粒陨石的钾同位素成分(^{41}K)与富中子核素(如 ^{64}Ni 和 ^{54}Cr)呈正相关。非质量同位素 ^{64}Ni 和 ^{54}Cr 异常一般被认为反映了太阳系内不同的核合成成分的不均一分布,因此他们认为球粒陨石中观察到的 ^{41}K 变化也具有核合成起源。 ^{41}K 主要是由短寿期核素 ^{41}Ca 衰变而成,半衰期为 $T_{1/2}$ 为 10 万年(0.1 Ma)(Kutschera et al., 1992)。恒星内的核合成包括 p 过程、 s 过程和 r 过程, ^{41}Ca 作为大多数 ^{41}K 的主要来源,主要通过 s 过程产生(Meyer et al., 2000)。当大质量恒星进入 Wolf-Rayet 阶段时,或者大质量恒星超新星爆发时,富中子的同位素会被注入到分子云中,和太阳星云物质进行混合(Clayton, 2003; Liu et al., 2012)。因此,大质量恒星的星风注入或者超新星(与 ^{64}Ni 正相关,即为 II 型超新星)爆发注入可以增加大量的 ^{41}K 和少量的 ^{41}Ca 到太阳星云物质中,造成原太阳分子云具有不均匀的钾同位素分布,在原始球粒陨石中保存下来。然而目前为止,前太阳的 ^{41}K (即 ^{41}Ca)的来源依然存在争议,也没有太多证据支持产生 ^{41}Ca 的 s 过程起源,更多样品的钾同位素成分(^{41}K)与其它富中子核素(如 ^{50}Ti , Lugaro et al., 2014)的相关性还有待研究。

4 结论

(1)利用高精度钾同位素分析技术,测试了 14 个中国南极陨石以及 6 个目击型陨石(Murchison、Allende、Ningqiang、Tagish Lake、Xinyang 和 Banma)的全岩钾同位素组成。南极陨石由于南极气候干燥寒冷,保存新鲜完整,目击型陨石由于被迅速收集,遭受地球风化作用的影响较低,它们更能反映地外过程造成的钾同位素组成。

(2)本文报道的 21 个碳质球粒陨石全岩数据的 $\delta^{41}\text{K}$ 值分布范围为 $-0.62\text{‰} \pm 0.05\text{‰}$ 至 $0.37\text{‰} \pm 0.08\text{‰}$,平均值为 $-0.32\text{‰} \pm 0.24\text{‰}$ (2SD),比全岩硅酸盐地球($-0.48\text{‰} \pm 0.03\text{‰}$; Wang et al., 2016b)稍重。随着钾元素亏损程度的增加,从 CI 群、CM 群、CO 群、CV 群、CR 群到 CK 群,它们没有呈现出明确的逐渐富集重钾同位素的趋势。18 个普通球粒陨石全岩数据(如果异常值 GRV 021603 除外)的 $\delta^{41}\text{K}$ 值分布范围为 $-1.02\text{‰} \pm 0.05\text{‰}$ 到 $-0.61\text{‰} \pm 0.02\text{‰}$,平均 $\delta^{41}\text{K}$ 值为 $-$

0.81‰ ± 0.15‰ (2SD), 比全岩硅酸盐地球稍轻。三个普通球粒陨石群(H 群、L 群和 LL 群)在误差范围内具有相似的 $\delta^{41}\text{K}$ 值, 没有显示出与化学群相关的变化趋势。小行星母体后期变质过程(水蚀变、热变质和冲击变质)不能很好地解释球粒陨石的钾同位素分异, 母体作为一个封闭体系只是平衡均一化同一个化学群内的钾同位素成分。岩石类型为 3 型的球粒陨石显示最大的钾同位素组成变化, 随着水蚀变程度增强以及热变质程度增加, 同一化学群的不同球粒陨石的钾同位素范围变小。2 个目击型陨石 Murchison(2 型)和 Allende(3 型), 呈现较大的内部钾同位素差异(分别为 0.22‰ 和 0.16‰), 可能反映了水蚀变导致的钾同位素在 100 mg 球粒陨石全岩尺度上的不均一性。

(3) 本文研究结果表明, 不同化学群球粒陨石之间的钾同位素组成与钾元素成分之间没有显示明显的相关性, 与最近国际上发表的数据在误差范围内基本一致。可能的原因, 组成球粒陨石的球粒在星云形成区域周围具有高的固体/气体比值(更高的压力)以及球粒熔融事件中熔体与周围的蒸发气体发生交换反应极大地减少了钾同位素的分馏程度, 造成球粒陨石的钾同位素和钾元素不符合星云蒸发和冷凝趋势。此外, 球粒陨石中观察到的 ^{41}K 变化也可能具有核合成起源, ^{41}K 主要是由短寿期核素 ^{41}Ca 衰变而成。大质量恒星的星风注入或者超新星爆发注入可以增加一些 ^{41}K 和少量的 ^{41}Ca 到太阳星云物质中, 造成原太阳分子云具有不均匀的钾同位素分布, 在原始球粒陨石中保存下来。这一推断尚需更多相关研究工作支持。

致谢: 感谢国家海洋局中国极地研究中心为本研究提供南极陨石样品。

References

- Alexander C M O'D, Grossman J N. 2005. Alkali elemental and potassium isotopic compositions of Semarkona chondrules. *Meteoritics & Planetary Science*, 40: 541~556.
- Alexander C M O'D, Grossman J N, Ebel D S, Ciesla F J. 2008. The formation conditions of chondrules and chondrites. *Science*, 320: 1617~1619.
- Alexander C M O'D, Grossman J N, Wang J, Zanda B, Bourrodenise M, Hewins R H. 2000. The lack of potassium-isotopic fractionation in Bishunpur chondrules. *Meteoritics & Planetary Science*, 35: 859~868.
- Anders E, Grevesse N. 1989. Abundances of the elements: meteoritic and solar. *Geochim. Cosmochim. Acta*, 53, 197~214.
- Arevalo R, McDonough W F, Luong M. 2009. The K/U ratio of the silicate Earth: insights into mantle composition, structure and thermal evolution. *Earth and Planetary Science Letters*, 278: 361~369.
- Bland P A, Jackson M D, Coker R F, Cohen B A, Webber J B W, Lee M R, Duffy C M, Chater R J, Ardakani M G, McPhail D S, McComb D W, Benedix G K. 2009. Why aqueous alteration in asteroids was isochemical: high porosity-high permeability. *Earth and Planetary Science Letters*, 287: 559~568.
- Bloom H E, Lodders K, Chen H, Zhao C, Tian Z, Koefoed P, Petö M K, Jiang Y, Wang K. 2020. Potassium isotope compositions of carbonaceous and ordinary chondrites: Implications on the origin of volatile depletion in the early solar system. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 277: 111~131.
- Chen H, Tian Z, Tuller-Ross B, Korotev R L, Wang K. 2019. High-precision potassium isotopic analysis by MC-ICP-MS: an inter-laboratory comparison and refined K atomic weight. *Journal of Analytical Atomic Spectrometry*, 34: 160~171.
- Clayton D. 2003. Handbook of isotopes in the cosmos: hydrogen to gallium (Cambridge Univ. Press).
- Day J M D, Moynier F. 2014. Evaporative fractionation of volatile stable isotopes and their bearing on the origin of the Moon. *Philosophical transactions-Royal Society. Mathematical, Physical and engineering sciences*, 372: 20130259.
- Ebel D S, Grossman L. 2000. Condensation in dust-enriched systems. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 64: 339~366.
- Hewins R H, Radomsky P M. 1990. Temperature conditions for chondrule formation. *Meteoritics*, 25: 309~318.
- Hezel D C, Needham A W, Armytage R, Georg B, Abel R, Kurahashi E, Coles B J, Rehkämper M, Russell S S. 2010. A nebula setting as the origin for bulk chondrule Fe isotope variations in CV chondrites. *Earth and Planetary Science Letters*, 296: 423~433.
- Hin R C, Coath C D, Carter P J, Nimmo F, Lai Y J, Pogge von Strandmann P A E, Willbold M, Leinhardt Z M, Walter M J, Elliott T. 2017. Magnesium isotope evidence that accretional vapour loss shapes planetary compositions. *Nature*, 549: 511~515.
- Hu Y, Chen X Y, Xu Y K, Teng F Z. 2018. High-precision analysis of potassium isotopes by HR-MC-ICPMS. *Chemical Geology*, 493: 100~108.
- Humayun M, Clayton R. N. 1995. Potassium isotope cosmochemistry-genetic-implications of volatile element depletion. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 59: 2131~2148.
- Huss G. 2004. Implications of isotopic anomalies and presolar grains for the formation of the solar system. *Antarctic meteorite research*, 17: 132~152.
- Jiang Y, Chen H, Fegley Jr B, Lodders K, Hsu W, Jacobsen S B, Wang K. 2019. Implications of K, Cu and Zn isotopes for the formation of tektites. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 259: 170~187.
- Jiang Y, Koefoed P, Pravdivtseva O, Chen H, Li C-H, Huang F, Qin L-P, Liu J, Wang K. 2021. Early solar system aqueous activity: K isotope evidence from Allende. *Meteoritics & Planetary Science*, 56: 61~76.
- Koefoed P, Pravdivtseva O, Chen H, Gerritzen C, Thiemens M M, Wang K. 2020. Potassium isotope systematics of the LL4 chondrite Hamlet: Implications for chondrule formation and alteration. *Meteoritics & Planetary Science*, 55: 1833~1847.
- Ku Y, Jacobsen S. B. 2020. Potassium isotope anomalies in meteorites inherited from the protosolar molecular cloud. *Science Advances*, 6: eabd0511.
- Kutschera W, Ahmad I, Paul M. 1992. Half-life determination of ^{41}Ca and some other radioisotopes. *Radiocarbon*, 34: 436~446.
- Li W, Beard B, Li S. 2016. Precise measurement of stable potassium isotope ratios using a single focusing collision cell multi-collector ICP-MS. *Journal of Analytical Atomic Spectrometry*, 1023~1029.
- Liu M C, Chaussidon M, Srinivasan G, McKeegan K D. 2012. A lower initial abundance of short-lived ^{41}Ca in the early solar system and its implications for solar system formation. *Astrophysical Journal*, 761: 137.

Lodders K. 2003. Solar System abundances and condensation temperatures of the elements. *Astrophysical Journal*, 591: 1220~1247.

Lodders K, Fegley B. 1998. *The Planetary Scientist's Companion*. Oxford University Press, New York.

Luck J M, Othman D, Ben Albarède F, Albarede F. 2005. Zn and Cu isotopic variations in chondrites and iron meteorites: early solar nebula reservoirs and parent-body processes. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 69: 5351~5363.

Lugaro M, Heger A, Osrin D, Goriely S, Zuber K, Karakas A I, Gibson B K, Doherty C L, Lattanzio J C, Ott U. 2014. Stellar origin of the ¹⁸²Hf cosmochronometer and the presolar history of solar system matter. *Science*, 345: 650~653.

Meyer B S, Clayton D D. 2000. Short-lived radioactivities and the birth of the sun. *Space Science Reviews*, 92: 133~152.

Morgan L E, Santiago Ramos D P, Davidheiser-Kroll B, Faithfull J, Lloyd N S, Ellam R, Higgins J. A. 2018. High-precision ⁴¹K/³⁹K measurements by MC-ICP-MS indicate terrestrial variability of $\delta^{41}\text{K}$. *Journal of Analytical Atomic Spectrometry*, 33: 175~186.

Norris C A, Wood B J. 2017. Earth's volatile contents established by melting and vaporization. *Nature*, 549: 507~510.

Palme H, Larimer J W, Lipschutz M E. 1988. Moderately volatile elements. In *Meteorites and the early Solar System* (eds JF Kerridge, MS Matthews), pp. 436 ~ 460. Tucson, AZ: University of Arizona Press.

Pringle E A, Moynier F. 2017. Rubidium isotopic composition of the Earth, meteorites, and the Moon: evidence for the origin of volatile loss during planetary accretion. *Earth and Planetary Science Letters*, 473: 62~70.

Rudnick R L, Gao S. 2014. Composition of the Continental Crust. Volume 4 of *Treatise on Geochemistry* (Second Edition) (ed. R. L. Rudnick). 1~51.

Taylor S R. 1982. Lunar and terrestrial crusts: a contrast in origin and evolution. *Physics of the Earth and Planetary Interiors*, 29: 233~241.

Taylor S, Alexander C M O'D, Delaney J, Ma P, Herzog G F, Engrand C. 2005. Isotopic fractionation of iron, potassium, and oxygen in stony cosmic spherules: implications for heating histories and sources. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 69: 2647~2662.

Tian Z, Chen H, Fegley B, Lodders K, Barrat J A, Day J M D, Wang K. 2019. Potassium isotopic compositions of howardite-eucrite-diogenite meteorites. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 266: 611~632.

Tian Z, Jolliff B L, Korotev R L, Fegley B, Lodders K, Day J M D, Chen H, Wang K. 2020. Potassium isotopic composition of the Moon. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 280: 263~280.

Urey H C. 1955. The cosmic abundances of potassium, uranium, and thorium and the heat balances of the Earth, the Moon, and Mars. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 41: 127~144.

Wai C M, Wasson J T. 1977. Nebular condensation of moderately volatile elements and their abundances in ordinary chondrites. *Earth and Planetary Science Letters*, 36: 1~13.

Wang K, Jacobsen S B. 2016a. Potassium isotopic evidence for a high-energy giant impact origin of the Moon. *Nature*, 538: 487~490.

Wang K, Jacobsen S B. 2016b. An estimate of the Bulk Silicate Earth potassium isotopic composition based on MC-ICPMS measurements of basalts. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 178: 223~232.

Wang Y and HsuWeibiao. 2009. Petrology and mineralogy of the Ningqiang carbonaceous chondrite. *Meteoritics & Planetary Science*, 44 (5): 763~780.

Wasserburg G J, Macdonald G J, Hoyle F, Fowler W A. 1964. Relative contributions of uranium, thorium, and potassium to heat production in the Earth. *Science*, 143(80): 465~467.

Wasson J T, Chou C L. 1974. Fractionation of moderately volatile elements in ordinary chondrites. *Meteoritics*, 9: 69~84.

Young E D. 2000. Assessing the implications of K isotope cosmochemistry for evaporation in the preplanetary solar nebula. *Earth and Planetary Science Letters*, 183: 321~333.

Young E D, Shahar A, Nimmo F, Schlichting H E, Schauble E A, Tang H, Labidi J. 2019. Near-equilibrium isotope fractionation during planetesimal evaporation. *Icarus*, 323: 1~15.

Yu Y, Hewins R H, Alexander C M O'D, Wang J. 2003. Experimental study of evaporation and isotopic mass fractionation of potassium in silicate melts. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 67: 773~786.

Zhao C, Lodders K, Bloom H, Chen H, Tian Z, Koefoed P, Petó M. K., Wang K. 2019. Potassium isotopic compositions of enstatite meteorites. *Meteoritics & Planetary Science*, 55: 1404~1417.

Zipfel J, Scherer P, Spettel B, Dreibus G, Schultz L. 2000. Petrology and chemistry of the new shergottite Dar al Gani 476. *Meteoritics & Planetary Science*, 35: 95~106.

Zolensky M E, Nakamura K, Gounelle M, Mikouchi T, Kasama T, Tachikawa O, Tonui E. 2002. Mineralogy of Tagish Lake: an ungrouped type 2 carbonaceous chondrite. *Meteoritics & Planetary Science*, 37: 737~761.

参 考 文 献

王昆,李伟强,李石磊. 2020. 钾稳定同位素研究综述. *地学前缘*, 27 (3): 104~122.

High precision potassium isotopic study of Chinese Antarctic chondrites

JIANG Yun^{*1,2)}, Piers KOEFOED³⁾, WANG Kun³⁾, HSU Weibiao^{1, 2)}

1) *Purple Mountain Observatory, Chinese Academy of Sciences, Nanjing, Jiangsu 210023, China;*

2) *CAS Center for Excellence in Comparative Planetology, Hefei, Anhui 230000, China;*

3) *Department of Earth and Planetary Sciences, Washington University in St. Louis, Missouri 63130, USA*

** Corresponding author: yjiang@pmo.ac.cn*

Abstract

Potassium and other moderately volatile element (MVEs) depletion is a common feature of planetary bodies and can be used to trace different depletion processes. As the precursor materials of asteroids and planets, understanding the MVE patterns of chondrites is also of great significance as without this, the origin, formation and evolution of planetary bodies cannot be fully understood. In this paper, using a recently developed high-precision potassium isotope technique, we report the bulk potassium isotopic compositions of 14 Chinese Antarctic chondrites and 6 observed falls (Murchison, Allende, Ningqiang, Tagish Lake, Xinyang and Banma). The results show a range of $\delta^{41}\text{K}$ for the 21 carbonaceous chondrites of $-0.62\text{‰} \pm 0.05\text{‰}$ to $0.37\text{‰} \pm 0.08\text{‰}$, with an average of $-0.32\text{‰} \pm 0.24\text{‰}$ (2SD), which is slightly heavier than that of bulk silicate earth (BSE). The range of $\delta^{41}\text{K}$ for the 18 ordinary chondrites (excluding one extreme GRV 021603) span from $-1.02\text{‰} \pm 0.05\text{‰}$ to $-0.61\text{‰} \pm 0.02\text{‰}$, with an average of $-0.81\text{‰} \pm 0.15\text{‰}$ (2SD), which is slightly lighter than that of the BSE. Murchison (CM2) and Allende (CV3) have relatively large internal variation in $\delta^{41}\text{K}$ (0.22‰ and 0.16‰ , respectively) possibly due to the heterogeneity at the 100 mg-scale within the samples caused by aqueous alteration. Parent-body processes (aqueous alteration, thermal metamorphism and shock metamorphism) cannot explain the observed variations in K isotopic composition of bulk chondrites because as a closed-system, the whole asteroid has been affected by isochemical modification. In this work, we found no clear correlation between K depletion and K isotopic composition among chondrites of different chemical groups, which is generally consistent with the data recently published by others. The single-stage thermal processes such as evaporation or condensation in the solar nebula cannot be well explained. Nucleosynthetic origin could be a possible explanation. Massive stellar winds and supernova ejecta would inject abundant ^{41}K to the solar nebula, which was preserved in the primitive chondrites. Future research is much needed to resolve this issue.

Key words: Antarctic meteorites; potassium isotopes; chondrites; aqueous alteration; thermal metamorphism; evaporation/condensation; nebula