

新疆罗布泊东部发现球粒陨石雨

李世杰¹, 王世杰^{2*}, LEYA Ingo³, SMITH Thomas³, 唐俊林⁴, 王鹏⁴, 曾小家^{1,5}, 李阳¹

1. 中国科学院地球化学研究所, 月球与行星科学研究中心, 贵阳 550081;
2. 中国科学院地球化学研究所, 环境地球化学国家重点实验室, 贵阳 550081;
3. Physical Institute, University of Bern, Sidlerstrasse 5, CH-3012 Bern, Switzerland;
4. 新疆地质矿产勘查开发局第六地质大队, 哈密 839000;
5. 中国科学院大学, 北京 100049

* 联系人, E-mail: wangshijie@vip.skleg.cn

2017-01-24 收稿, 2017-03-17 修回, 2017-03-20 接受, 2017-06-07 网络版发表
国家自然科学基金(41273080, 41473067 和 41490630)资助

摘要 新疆罗布泊以东65 km处的三峰山区域发现了陨石(Tuya 002~007)散落区, 呈3 km×11 km的椭圆状. 散落区内收集到130余块普通球粒陨石, 总重超过160 kg, 最大的陨石重30 kg, 最小的陨石重约15 g. 散落区为一南东北西向分布且陨石样品逐渐增大的椭圆形区域, 这意味着陨石从南东向以较低的角度进入地球大气层. 除Tuya 002(760 g)外, 散落区内的陨石可能来自同一次陨石雨, 陨石类型为L5, 冲击程度为S2, 风化程度为W3. Tuya 003的宇宙射线暴露年龄为45.6±4.4 Ma, 因此三峰山陨石雨的流星体可能形成于约40 Ma时普通球粒陨石L群母体的破裂事件中. Tuya 002具有和其他三峰山陨石显著不同的外表特征, 表面熔壳全部脱落, 球粒清晰可见, 为L4型普通球粒陨石, 样品中有大量的硫酸钙. 其宇宙射线暴露年龄为17.0±4.1 Ma, 也证明了其不是三峰山陨石雨的产物. 三峰山区域陨石的研究表明三峰山区域不是陨石富集区, 而是L5普通球粒陨石散落区. 因此, 需要对其他一些区域的陨石样品进行矿物岩石学、风化特征、宇宙射线暴露年龄和居地年龄的研究, 从而确定出新疆及其周边沙漠区域的陨石富集区.

关键词 陨石散落区, 沙漠陨石, 三峰山, 宇宙射线暴露年龄

陨石是穿越大气层降落到地球表面的地外岩石样品. 虽然人类已经通过6次“阿波罗”和3次“月球”探测分别带回了381.7和0.3 kg月球样品^[1], 隼鸟号从细川小行星带回了1500多颗表土微粒^[2], 然而陨石依然是天体化学研究的主要对象. 南极和沙漠区域已经成为陨石收集的主要区域. 中国、美国、日本、俄罗斯和韩国等已经从南极收集到了大量的陨石样品(截至2016年11月2日获得国际陨石学会命名的南极陨石已达41746块). 自1989年在非洲撒哈拉沙漠发现了集中分布的陨石样品以来^[3], 已从沙漠地区发现了大量的陨石样品, 目前从利比亚沙漠中收集到超过

1000块陨石, 撒哈拉沙漠中收集到有明确地理坐标的陨石有近500块, 阿曼沙漠中收集到4000余块, 埃及沙漠中收集到60块, 伊朗沙漠中收集到近50块, 澳大利亚沙漠中收集到600多块, 智利沙漠中收集到超过800块. 此外, 在西北非沙漠中收集到了8800多块无坐标陨石(样品提供者未给出陨石收集地点的地理坐标). 可以肯定的是, 目前还有大量的沙漠陨石未获得国际命名.

与国际沙漠陨石的回收相比, 中国沙漠陨石的发现时间相对较晚, 2007年在新疆阿拉尔的戈壁滩中发现了2块陨石, 后来被命名为Alaer 001和Alaer

引用格式: 李世杰, 王世杰, Leya I, 等. 新疆罗布泊东部发现球粒陨石雨. 科学通报, 2017, 62: 2407–2415

Li S J, Wang S J, Leya I, et al. A chondrite strewn field was found in east of Lop Nor, Xinjiang (in Chinese). Chin Sci Bull, 2017, 62: 2407–2415, doi: 10.1360/N972016-01450

002^[4]. 随后在新疆及青海的10个戈壁区域内(面积均约为84 km×110 km, 分别为Hami, Kumtag, Alatage Mountain, Xingdi^[5], Argan^[5], Loulan Yizhi^[5], Lop Nur^[5], Tuya, Lenghu和Tuanjie(图1))发现了一定数量的陨石, 这些陨石均为普通球粒陨石. 目前已报道为陨石富集区的分别为: Loulan Yizhi, Lop Nur, Argan, Xingdi, Hami, Alatage Mountain和Kumtag^[5,6]. Alatage Mountain地区发现了42个陨石样品且主要为L5球粒陨石^[6], 这些陨石为成对陨石的可能性非常大, 今后的相关研究将给出答案. Loulan Yizhi区发现了7块陨石(1块H5, 1块L4和5块L5), Lop Nur, Argan和Xingdi区内均分别发现了2块陨石^[5]. 显然多数区域内陨石数量偏少, 陨石收集较多的区域内的样品也未做成对检验, 因此, 对这些区域内样品进行成对性检验是确定陨石富集区的重要工作.

继2013年在新疆罗布泊以东约65 km处的三峰山区域发现陨石以来, 先后多次在该区域找到了130余块共计超过160 kg陨石. 该区域的国际陨石命名为Tuya 002~007(图1), 而研究表明这是约3 km宽11 km长的陨石散落区, 即这里曾经降落过一次陨石雨. 三峰山陨石发现区位于土崖(Tuya)陨石命名区(40°~41°N与91°~92°E之间的长方形区域(图1))的中东部,

之前在该长方形区域的南部名为土崖(Tuya)的地方首次发现了陨石, 因此依据国际陨石委员会对于沙漠陨石的命名规则将该长方形区域内发现的其他陨石以Tuya加编号的形式命名. 本文将介绍三峰山区域的自然地理特征及地质背景、陨石散落区的发现和陨石的搜索过程, 并报道该散落区内代表性陨石的岩石学特征及宇宙射线暴露年龄. 期望本研究能促使我们对新疆沙漠陨石富集区和散落区的认识, 甄别出一些典型的陨石富集区.

1 三峰山的自然地理特征及地质背景

陨石发现区位于若羌县东偏北方向直线距离约300 km处, 距哈密市南偏西方向直线距离约270 km处. 行政区划隶属新疆维吾尔自治区巴音郭楞蒙古自治州若羌县管辖. 陨石发现区位于北山山系西段, 属低山-丘陵地形, 山脉总体呈北东东-南西西向展布. 地势东高西低, 海拔高度一般为1000~1350 m, 相对高差一般为20~50 m, 最大为200 m. 区内水系不发育, 无常年流水. 该区属暖温带大陆型荒漠干旱气候, 年平均气温10.7~11.5℃, 极端最低气温-27.2℃, 极端最高气温43.6℃. 区内干旱缺水, 年降水量17.4 mm, 多集中于夏季, 年蒸发量1400 mm. 夏季偶有

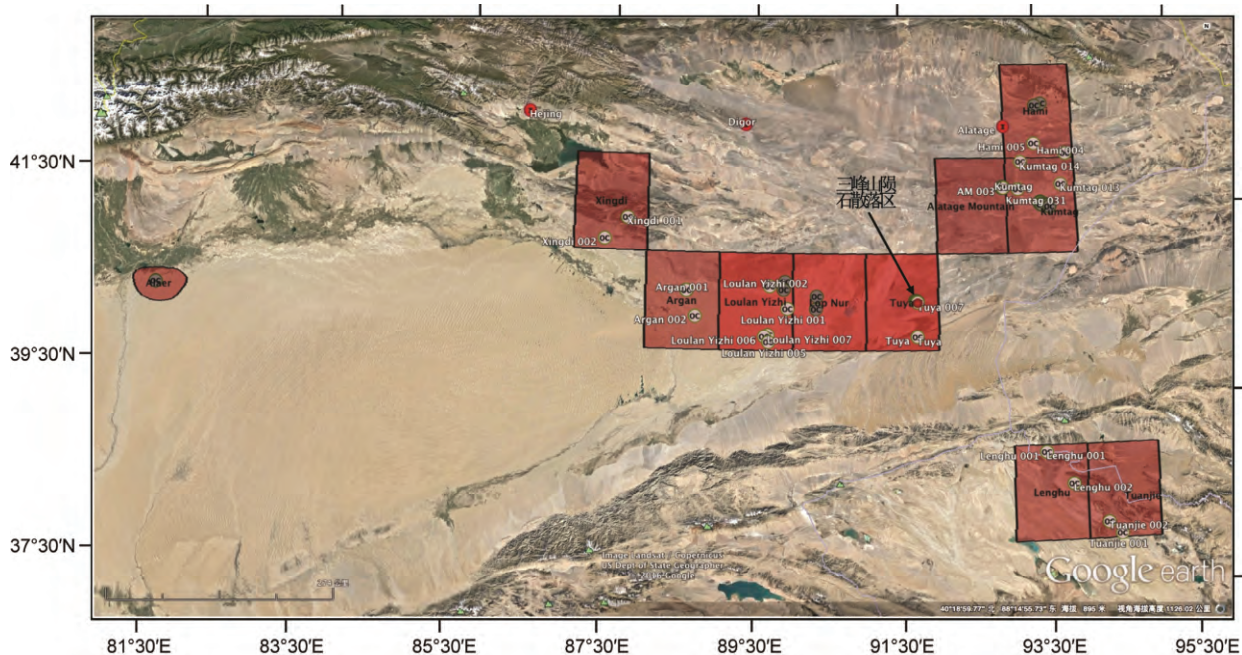


图1 新疆沙漠及其周边发现的陨石分布区. 红色区域为陨石发现区. 底图为Google earth提供的卫星图
 Figure 1 The distribution of meteorites in the deserts in and around Xinjiang. The red areas are the meteorites collection areas. The background map was copied from Google earth

大雨,可形成季节性水流^[7].

三峰山陨石发现区地形起伏较大,西北部区域相对较为平坦,出露岩石主要为片岩,地表覆盖少许由砾石、风成砂、土质等组成的冲积物(图2(a)). 陨石分布区中部地形起伏较大,主要以花岗闪长岩出露,地表岩石风化破碎显著(图2(b)). 陨石分布区的东南区域地形复杂,为地势起伏非常大的戈壁山区(图2(c)),该区域主要出露砂岩.

2 陨石的收集过程

2013年10月9日,根据其他沙漠区域陨石收集的经验,本文的合作者唐俊林和一名同事在其工作区之外20 km处的一座小山背后发现了1块重5.2 kg的陨石. 接着唐俊林和同事采取一人步行一人驾车的方式进行了3 h的搜寻,又陆续找到3块陨石(共计14个碎块). 之后分别于2013年10月10日至2016年共计11次进入三峰山区域收集陨石. 至此,通过徒步和驱车结合的搜索方式,在三峰山区域共计收集到130余块陨石,总重超过160 kg. 其中最大的一块陨石重30 kg,由4个碎块组成,最大碎块的重量为20050 g. 最小的陨石重约15 g.

3 陨石散落区的分布

将三峰山区域收集的陨石依据地理坐标和重量范围投点于陨石收集区的地图上,可以看到三峰山区域的陨石分布于一个宽约3 km长约11 km的近椭圆

状区域,长轴沿北西向南东方向延伸(图3). 一个非常显著的特征是,从南东向北西方向回收的陨石的单个重量呈逐渐增加趋势,分布于南东向边缘附近的样品的重量通常小于1 kg,而分布于北西向边缘的样品重量通常为较大的陨石,其中重量为30 kg的陨石就分布于该分布区的北西向边缘. 吉林陨石雨及其他陨石散落区的研究表明,沿飞行方向质量最大的碎片通常降落在最前方,随后碎片按质量递减顺序降落在后方区域^[8-10]. 三峰山回收的陨石样品的位置及重量分布表明,其应为一个陨石散落区——即陨石雨降落区,且陨石雨降落的方向从南东向北西(图3).

4 分析方法

陨石的岩石结构观察和背散射电子图片的获得均是在中国科学院地球化学研究所月球与行星科学研究中心完成,使用的仪器为Scios-FIB场发射扫描电子显微镜. 陨石中橄榄石和低钙辉石的电子探针分析在桂林理工大学完成,所用的仪器为JXA 8230型电子探针,分析电压为15 kV,束流为20 nA,束斑直径为1 μm. 分析结果用ZAF方法校正.

陨石的稀有气体含量和同位素组成是在伯尔尼大学物理学院自制的稀有气体质谱仪上完成的,分析流程与文献[11]中的方法完全一致. 基本如下:首先对Tuya 002和Tuya 003的两个碎块用超声波清洗仪在分析纯酒精中清洗,等酒精晾干后称重并分别包裹于3 cm×3 cm的铝箔中搓成球状. 再将铝箔包

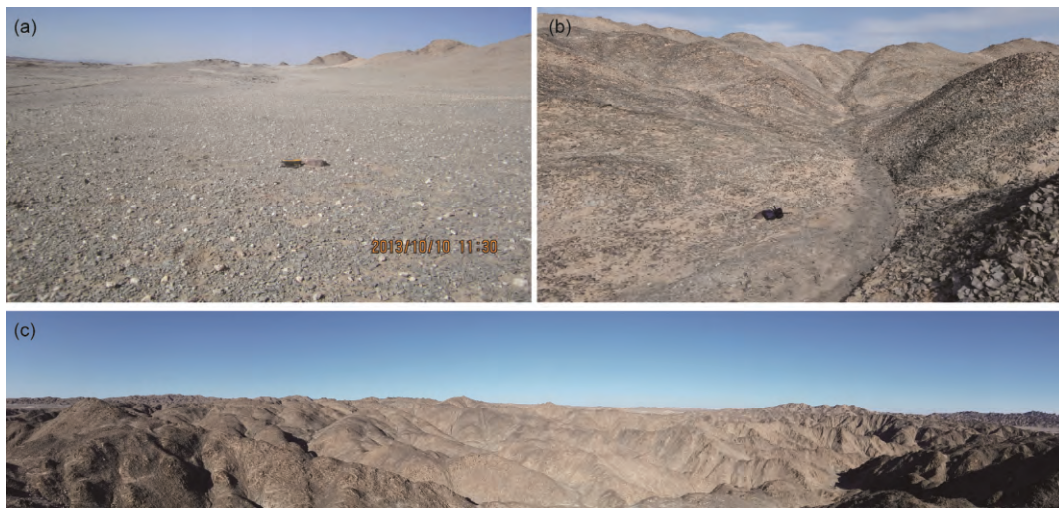


图2 三峰山陨石收集区的地表特征. (a) 西北部区域; (b) 中部区域; (c) 东南部区域

Figure 2 Land surface features of Sanfengshan area where the meteorites were collected. (a) The northwest area; (b) the middle area; (c) the southeast area

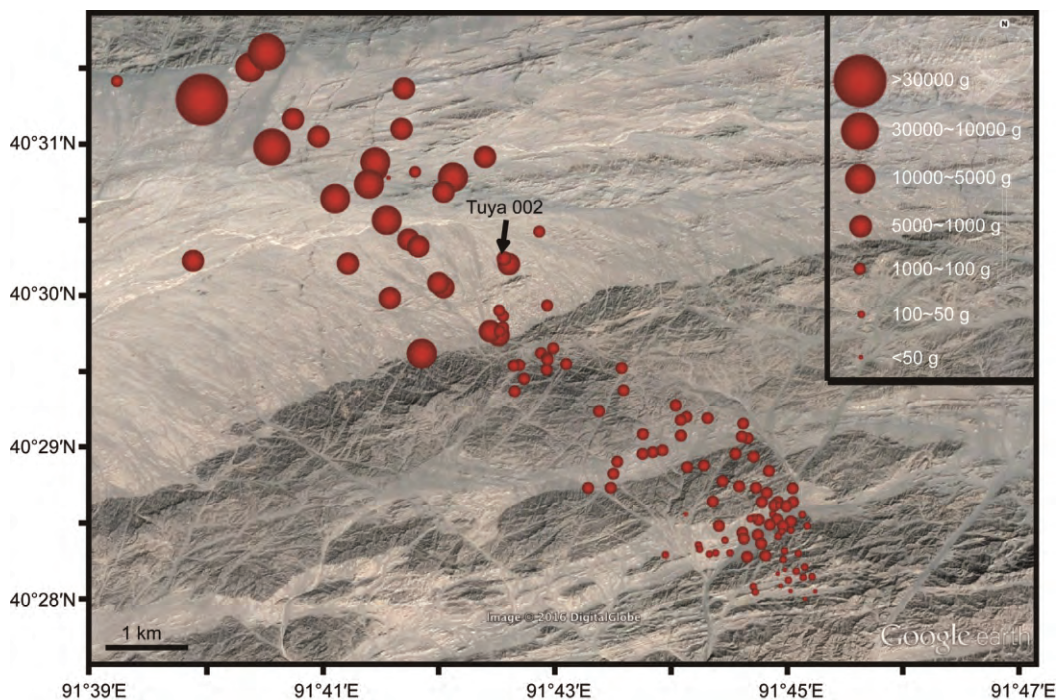


图 3 三峰山陨石散落区样品的质量分布投图。底图为Google earth提供的卫星图。陨石的质量从南东向北西方向逐渐增大，这是典型的陨石散落区特征

Figure 3 Mass distribution of meteorites in Sanfengshan strewn field plotted on a Google earth map. The sizes of the meteorites increase from SE to NW

裹后的样品加载于稀有气体质谱仪的样品台上，80℃加热3 d并保持抽真空状态以去除样品的空气污染。再将待测样品推入钼坩埚中在1700℃下加热45 min，释放出的气体进行一系列纯化后将Ar气用液氮冷冻分离，He和Ne组分再经过纯化后通入He-Ne气体测定质谱仪测定。最后将Ar气加热释放并通过纯化后引入Ar气体测定质谱仪进行测定。

5 岩石外部特征及岩石学特征

三峰山区域收集到的陨石表面形态多样，多数陨石表面熔壳较为完整且呈深褐色(图4(a))，部分陨石表面有气印(图4(b)和(c))，少数样品呈现明显的降落后的断面(图4(b))。此外，Tuya 002陨石表面特征和其他收集于三峰山的陨石有明显的不同，其表面的熔壳全部脱落，手标本上球粒清晰可见(图4(d))。这很可能反映了Tuya 002相比其他收集于三峰山的陨石具有更长的居地时间，长时间的风沙磨蚀致使表面熔壳脱落。光薄片下的研究也证明了Tuya 002较之其他三峰山陨石的风化更为显著。

光薄片下的观察表明，Tuya 002和其他该区域发现的陨石有显著不同。Tuya 002陨石的球粒结构和轮

廓清晰(图5(a))，为4型球粒陨石。该陨石遭受了较强的风化作用，薄片发现了大量的硫酸钙应该和风华有关，金属几乎全部氧化，大部分硫化物已被氧化物替代。Tuya 002的另外一个特征是矿物颗粒中裂隙较为少见，本次研究的光片中也未见冲击脉，因此，其冲击程度较低。其他三峰山收集的陨石(Tuya 003~007)的岩石结构特点极为相似，球粒结构和轮廓可辨，矿物重结晶显著，为5型球粒陨石(图5(b)~(d))。此外，这些陨石中矿物颗粒内裂隙较为发育，多数裂隙被风化产物充填(图5(b)~(d))。这一特征表明Tuya 003~007受到的冲击较Tuya 002受到的强烈。

对Tuya 002~007的光片的电子探针分析显示(表1)，Tuya 002中的橄榄石的Fa(mol%)值为 26.7 ± 0.4 (1sd, $n=5$)，低钙辉石的Fs(mol%)和Wo(mol%)值分别为 22.4 ± 0.2 (1sd, $n=5$)和 1.2 ± 0.1 (1sd, $n=5$)。Tuya 003~007中橄榄石和低钙辉石的化学组成非常相似，Fa(mol%)值分别为 25.1 ± 0.6 , 25.3 ± 0.2 , 25.2 ± 0.2 , 24.6 ± 0.2 和 25.2 ± 0.6 (均为1sd, $n=5\sim7$)。低钙辉石的Fs(mol%)值分别为 21.2 ± 0.7 , 21.2 ± 0.4 , 21.2 ± 0.3 , 21.2 ± 0.8 和 20.8 ± 0.4 (均为1sd, $n=5\sim7$)。低钙辉石的Wo(mol%)值分别为 1.5 ± 0.2 , 1.5 ± 0.1 , 1.5 ± 0.2 , 1.4 ± 0.2 和 1.5 ± 0.2 。显然，Tuya 002中



图4 三峰山陨石的野外照。(a) 表面熔壳覆盖完整的陨石; (b) 三峰山陨石发现区质量最大的陨石的最大碎块, 重约 20 kg; (c) 三峰山区域收集到的重 16.2 kg 的陨石, 熔壳较完整, 表面有气印; (d) Tuya 002, 熔壳已完全脱落

Figure 4 Pictures of the meteorite of Sanfengshan strewn field. (a) A meteorite with intact fusion crust; (b) the largest fragment (~20 kg) from the largest meteorite from the strewn field, with rhegmalypt on one surface; (c) a 16.2 kg meteorite from the strewn field, with rhegmalypt and fusion crust; (d) Tuya 002, without fusion crust

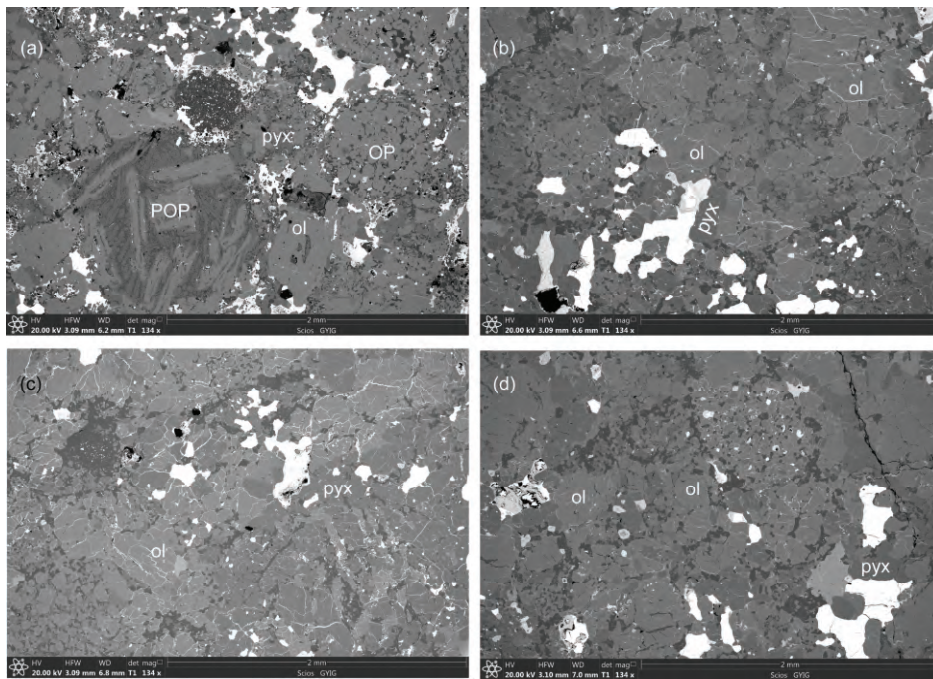


图5 三峰山陨石光片的背散射电子图像(POP为斑状橄榄石辉石球粒, OP为斑状橄榄石球粒, ol代表橄榄石, pyx代表低钙辉石)。(a) Tuya 002; (b) Tuya 003; (c) Tuya 004; (d) Tuya 005

Figure 5 Back-scattered electron images of polished sections (POP, porphyritic olivine-pyroxene; OP, porphyritic olivine; ol, olivine; pyx, low-Ca pyroxene). (a) Tuya 002; (b) Tuya 003; (c) Tuya 004; (d) Tuya 005

表1 Tuya 002-007 陨石中的橄榄石与低钙辉石化学组成的电子探针分析(质量百分含量)^{a)}
Table 1 EPMA analysis composition (wt.%) of olivine and low-Ca pyroxene in Tuya 002~007

	SiO ₂	TiO ₂	Al ₂ O ₃	Cr ₂ O ₃	FeO	MnO	MgO	CaO	Na ₂ O	NiO	Total	Fa/Fs (mol%)	Wo (mol%)
Tuya 02_ol	38.2±0.3	0.02±0.02	b.d.	0.02±0.01	24.2±0.3	0.32±0.01	37.2±0.4	0.03±0.02	b.d.	0.04±0.04	100.0±0.4	26.7±0.4	-
Tuya 03_ol	37.6±0.5	b.d.	b.d.	b.d.	22.6±0.6	0.31±0.01	37.7±0.4	0.04±0.01	0.05±0.02	0.09±0.13	98.5±0.7	25.1±0.6	-
Tuya 04_ol	37.8±0.3	b.d.	0.05±0.06	0.02±0.02	22.7±0.2	0.31±0.02	37.6±0.3	0.02±0.01	b.d.	0.08±0.05	98.6±0.5	25.3±0.2	-
Tuya 05_ol	37.5±0.3	b.d.	b.d.	0.02±0.01	22.5±0.1	0.32±0.02	37.5±0.3	0.04±0.05	0.08±0.15	0.11±0.07	98.1±0.2	25.2±0.2	-
Tuya 06_ol	38.6±0.3	b.d.	b.d.	0.02±0.02	22.5±0.4	0.33±0.01	38.6±0.3	0.03±0.01	b.d.	0.04±0.05	100.1±0.7	24.6±0.2	-
Tuya 07_ol	37.8±0.4	b.d.	0.03±0.01	0.02±0.02	22.7±0.3	0.31±0.02	37.8±0.7	0.02±0.01	b.d.	0.09±0.08	98.8±0.7	25.2±0.6	-
Tuya 02_pyx	55.2±0.3	0.15±0.02	0.12±0.04	0.10±0.02	14.6±0.2	0.33±0.03	27.9±0.2	0.59±0.05	0.02±0.01	0.04±0.04	99.0±0.6	22.4±0.2	1.2±0.1
Tuya 03_pyx	54.7±1.0	0.21±0.05	0.17±0.05	0.11±0.03	13.8±0.2	0.31±0.01	28.2±0.8	0.79±0.09	0.08±0.06	0.10±0.17	98.4±1.6	21.2±0.7	1.5±0.2
Tuya 04_pyx	55.1±0.4	0.19±0.04	0.16±0.03	0.15±0.03	13.9±0.3	0.34±0.02	28.4±0.3	0.75±0.03	0.02±0.01	0.07±0.06	99.1±0.2	21.2±0.4	1.5±0.1
Tuya 05_pyx	54.6±0.2	0.18±0.04	0.17±0.03	0.11±0.03	13.7±0.2	0.33±0.01	28.1±0.2	0.76±0.08	0.05±0.05	0.04±0.03	98.0±0.1	21.2±0.3	1.5±0.2
Tuya 06_pyx	54.9±0.6	0.22±0.03	0.18±0.04	0.12±0.03	13.8±0.6	0.30±0.02	28.3±0.2	0.71±0.10	0.02±0.01	0.17±0.23	98.7±0.4	21.2±0.8	1.4±0.2
Tuya 07_pyx	55.0±0.2	0.17±0.07	0.15±0.02	0.09±0.02	13.6±0.3	0.31±0.01	28.5±0.1	0.77±0.09	0.02±0.01	0.05±0.07	98.7±0.2	20.8±0.4	1.5±0.2

a) 表中的误差均为1sd, 分析数量为5~7, ol代表橄榄石, pyx代表低钙辉石, b.d.=含量低于检测限

表2 Tuya 002 和Tuya 003 中He, Ne和Ar含量(10⁻⁸ cm³ STP g⁻¹)及宇宙射线暴露年龄(Ma)^{a)}
Table 2 Helium, Ne, and Ar concentrations (10⁻⁸ cm³ STP g⁻¹) and cosmic-ray exposure ages (Ma) of Tuya 002 and Tuya 003

陨石	样品	³ He	⁴ He	²¹ Ne _c	²² Ne	³⁶ Ar	³⁸ Ar _c	²⁰ Ne/ ²² Ne	²¹ Ne/ ²² Ne	²² Ne/ ²¹ Ne _c	³⁶ Ar/ ³⁸ Ar	⁴⁰ Ar	T ₃	T ₂₁	T ₃₈	平均	
类型	质量	(mg)														年龄	
Tuya 002	L5	73	19.7±0.7	319±12	5.20±0.17	6.18±0.20	6.70±0.12	0.764±0.020	1.077±0.017	0.842±0.013	1.153±0.018	3.47±0.09	549±5	12.4±3.7	18.5±5.6	20.1±6.1	17.0±4.1
Tuya 003	L5	63.67	82.2±3.1	364±14	17.0±0.6	18.7±0.6	3.03±0.06	2.074±0.053	0.846±0.014	0.912±0.015	1.091±0.018	1.27±0.04	164±1	50.7±15.3	42.9±12.9	43.3±13.0	45.6±4.4

a) 浓度测定的误差为3%。“c”代表宇宙成因核素和捕获核素

橄榄石和低钙辉石的铁含量高于Tuya 003~007,且前者低钙辉石中的钙含量低于Tuya 003~007.

6 宇宙射线暴露年龄

Tuya 002陨石的表面特征与其他三峰山区域收集的陨石有显著不同,初步判断其与三峰山区域收集的其他陨石很可能不属于同一次降落.因此选取了Tuya 002及作为三峰山其他陨石的代表性样品的Tuya 003进行了稀有气体(He, Ne和Ar)含量及同位素组成的测定,从而了解三峰山区域陨石的宇宙射线暴露历史.根据He, Ne和Ar同位素及含量测定值(表2),计算了Tuya 002和Tuya 003的宇宙射线暴露年龄(表2).Tuya 002的 T_3 , T_{21} 和 T_{38} 的年龄分别为 12.4 ± 3.7 , 18.5 ± 5.6 和 20.1 ± 6.1 Ma,平均年龄为 17.0 ± 4.1 Ma.Tuya 003的 T_3 , T_{21} 和 T_{38} 的年龄分别为 50.7 ± 15.3 , 42.9 ± 12.9 和 43.3 ± 13.0 Ma,平均年龄为 45.6 ± 4.4 Ma.显然Tuya 002和Tuya 003陨石不是同一次降落的陨石,而Tuya 003的宇宙射线暴露年龄代表了三峰山散落区陨石的宇宙射线暴露年龄(45.6 ± 4.4 Ma).Tuya 003的宇宙成因($^{22}\text{Ne}/^{21}\text{Ne}$)_c比值(1.091 ± 0.018)低于Tuya 002的该值(1.153 ± 0.018),表明Tuya 003来自更深的屏蔽位置,这与Tuya 003来自三峰山陨石雨(较大流星体)而Tuya 002为单独降落是一致的.

7 总结

三峰山陨石收集区是一个典型的陨石散落区,样品基本以一次陨石雨的样品为主,该次陨石雨的样品为L5普通球粒陨石,风化等级为W3,橄榄石的Fa值范围为 $24.6\text{ mol}\%\sim 25.3\text{ mol}\%$,低钙辉石Fs值范围为 $20.8\text{ mol}\%\sim 21.2\text{ mol}\%$.由于样品的风化程度较低,推测其居地时间较短,因此其宇宙射线暴露时间基本代表了该次陨石流星体从母体脱离的时间,为

45.6 ± 4.4 Ma. Tuya 002虽然发现于该散落区内,橄榄石的平均Fa值为 $26.7\text{ mol}\%$,低钙辉石的平均Fs值为 $22.4\text{ mol}\%$,即Tuya 002与Tuya 003~007相比,其橄榄石和低钙辉石中的铁含量更高.此外,Tuya 002的表面特征、内部岩石结构(4型球粒陨石)、风化等级、冲击程度及宇宙射线暴露年龄(17.0 ± 4.1 Ma)等方面,也证实了Tuya 002与散落区内其他的样品不属于同一次降落的陨石.三峰山陨石散落区以南约40 km处曾发现1块重11.45 kg的H5普通球粒陨石,国际命名为Tuya (<https://www.lpi.usra.edu/meteor/metbull.php?sea=tuya&sfor=names&ants=&falls>),显然该陨石与三峰山区域的陨石不属于同一次降落.三峰山西侧约110 km处的罗布泊区域(Lop Nur)发现的2块陨石分别为H4和H5普通球粒陨石,与三峰山陨石也不属于同次降落.因此三峰山区域的陨石发现区不是陨石富集区,仅仅是一个陨石散落区中叠加了另外一个单独降落的陨石.

对于新疆沙漠陨石,在已报道为陨石富集区中,即便是陨石收集数量较多的区域(如Alatage Mountain和Kumtag),回收到的陨石样品类型均较为单一,通常仅有普通球粒陨石H群或L群样品,而且岩石类型也较为单一^[5,12].这说明这些区域极有可能是陨石散落区而非陨石富集区.而其他一些陨石富集区(Loulan Yizhi, Lop Nur, Argan, Xingdi和Hami)相对于其区域面积($84\text{ km}\times 110\text{ km}$)而言,陨石的发现数量较少.这与国外其他沙漠陨石富集区相比陨石数量明显偏少,例如San Juan陨石富集区每平方千米发现14个单独降落的陨石^[13].

总体而言,新疆沙漠地区是否存在陨石富集区需要对区域内大量样品进行岩石矿物学、风化特征、宇宙射线暴露年龄和居地年龄的综合研究,这也有助于我们理解目前为止未在这些陨石发现区发现普通球粒陨石以外的陨石类型.

致谢 感谢陨石爱好者王长令、杨可欣、张建立、许建疆和王辉在陨石收集过程中给予的帮助.感谢伯尔尼大学的Hans-Erich工程师和桂林理工大学的刘奕志工程师在实验过程的帮助.同时感谢南京大学张爱铤教授对于本文写作给予的鼓励及两位审稿人的建设性修改意见.

参考文献

- 1 Heiken G H, Vaniman D T, French B M. Lunar Sourcebook: A User's Guide to the Moon. Cambridge: Cambridge University Press, 1991. 5
- 2 Nakamura T, Noguchi T, Tanaka M, et al. Itokawa dust particles: A direct link between S-type asteroids and ordinary chondrites. Science, 2011, 333: 1113-1116

- 3 Lin Y T, Wang D D. Desert meteorite (in Chinese). *Geol-Geochem*, 1994, 3: 43–48 [林杨挺, 王道德. 沙漠陨石. *地质地球化学*, 1994, 3: 43–48]
- 4 Weisberg M K, Smith C, Benedix G, et al. The Meteoritical Bulletin, No.97. *Meteorit Planet Sci*, 2010, 45: 449–493
- 5 Li S L, Hsu W B. New dense meteorite collection areas were found in Lop Nur, Xinjiang (in Chinese). *Chin Sci Bull*, 2014, 59: 2091–2097 [李少林, 徐伟彪. 新疆罗布泊地区发现陨石富集区. *科学通报*, 2014, 59: 2091–2097]
- 6 Lai Y W, Wang G Q. Classification of 10 meteorites from Hami in Xinjiang: Petrology and mineralogy (in Chinese). *Geochimica*, 2015, 44: 301–310 [赖永旺, 王桂琴. 10块新疆哈密沙漠陨石的类型及岩石矿物学特征. *地球化学*, 2015, 44: 301–310]
- 7 Li S C. *County Annals of Ruoqiang* (in Chinese). Urumqi: Xinjiang University Press, 1992. 49–53 [李双成. 若羌县志. 乌鲁木齐: 新疆大学出版社, 1992. 49–53]
- 8 Jilin Meteorite Shower Investigation Group of Chinese Academy of Sciences. A preliminary investigation of Jilin meteorite shower (in Chinese). *Sci Sin*, 1977, 1: 38–45 [中国科学院吉林陨石雨联合考察组. 吉林陨石雨的初步考察. *中国科学*, 1977, 1: 38–45]
- 9 Pedersen H, Bon C C D, Lindgren H. Vaca Muerta mesosiderite strewnfield. *Meteoritics*, 1992, 27: 126–135
- 10 Gnos E, Lorenzetti S, Eugster O, et al. The Jiddat al Harasis 073 strewn field, Sultanate of Oman. *Meteorit Planet Sci*, 2009, 44: 375–387
- 11 Li S J, Wang S J, Leya I, et al. Petrology, mineralogy, porosity, and cosmic-ray exposure history of Huaxi ordinary chondrite. *Meteorit Planet Sci*, 2017, doi: 10.1111/maps.12842
- 12 Dai D Q, Yang R F, Chen X Y. The petrography, mineral chemistry and classification of 6 new desert meteorites collected from Xinjiang (in Chinese). *Earth Sci Front*, 2014, 21: 92–101 [戴德求, 杨荣丰, 陈新跃. 6块新回收沙漠陨石的矿物岩石学特征及类型划分. *地学前缘*, 2014, 21: 92–101]
- 13 Gattacceca J, Valenzuela M, Uehara M, et al. The densest meteorite collection area in hot deserts: The San Juan meteorite field (Atacama Desert, Chile). *Meteorit Planet Sci*, 2011, 46: 1276–1287

Summary for “新疆罗布泊东部发现球粒陨石雨”

A chondrite strewn field was found in east of Lop Nor, Xinjiang

LI ShiJie¹, WANG ShiJie^{2*}, LEYA Ingo³, SMITH Thomas³, TANG JunLin⁴, WANG Peng⁴, ZENG XiaoJia^{1,5} & LI Yang¹

¹ Center for Lunar and Planetary Sciences, Institute of Geochemistry, Chinese Academy of Sciences, Guiyang 550081, China;

² State Key Laboratory of Environmental Geochemistry, Institute of Geochemistry, Chinese Academy of Sciences, Guiyang 550081, China;

³ Physical Institute, University of Bern, Sidlerstrasse 5, CH-3012 Bern, Switzerland;

⁴ Sixth Geological Brigade, Division of Mines and Geology, Hami 839000, China;

⁵ University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China

* Corresponding author, E-mail: wangshijie@vip.skleg.cn

The meteorites are the most important extraterrestrial samples for understanding the formation and the evolution history of the solar system, although ~382 kg lunar samples and ~1500 asteroid mineral grains have been returned by human space exploration activities. The Northwest region of China, especially the Xinjiang, has a vast area of sandy deserts and Gobi Deserts. The lower annual rainfall and the dry climate of this region provide a good condition for meteorite preservation. In recent years, the number of recovered meteorites from the Gobi Deserts in Xinjiang increased significantly. The Sanfengshan area, located about 65 km east of Lop Nor, is one of the research regions. We first collected three ordinary chondrites in Sanfengshan area on October 9, 2013. Then, we carried out 11 meteorite search campaigns in this area. More than 130 meteorite fragments with a total mass over 160 kg have been recovered. The map of all collected Sanfengshan meteorites depicts a clearly 3 km×11 km elliptic strewn field. The sizes are sorted in the SE-NW-oriented ellipsoid of the strewn field, therefore indicating that the meteor entered the atmosphere from SE at a low angle relative to the ground.

In this study, six meteorites (Tuya 002–007) from the Sanfengshan field have been measured using a Scios-FIB field emission scanning electron microscope (SEM), a JXA 8230 electron microprobe analysis (EMA), and a self-made noble gas mass spectrometer. Among all of the collected meteorites, Tuya 002 is the only one unusual sample, which doesn't show any fusion crust on its surface. We inferred that Tuya 002 is not paired with the other collected meteorites. The well-defined chondrule boundaries and heavy weathering grade, i.e. W3 (the occurrence of large amounts of calcium sulfate in Tuya 002 indicates that it suffered a heavy terrestrial weathering) also support the conclusion that Tuya 002 is obviously different from the other meteorites collected in the Sanfengshan area. In addition to Tuya 002, all the meteorites collected in this region most likely originate from one single meteoric shower. These meteorites all belong to the L5 ordinary chondrite group, with a moderate shock stage of S2 and a heavy weathering grade of W3. The cosmic ray exposure age of Tuya 003 (the representative meteorite of the Sanfengshan meteoric shower) is 45.6±4.4 Ma. This indicates that the meteoroid that produced the Sanfengshan meteoric shower could be produced in the 45 Ma break-up event on L chondrite parent body. On the other hand, petrographic observations and noble gas measurements shown that Tuya 002 belongs to the L4 ordinary chondrite group. A rather lower CRE age relative to the Sanfengshan L5 chondrites of 17.0±4.1 Ma has been calculated. This also indicates that Tuya 002 is not paired with other L5 meteorites collected in the same strewn field.

Our studies shown that the meteorites collected in Sanfengshan area consist of more than one meteorite fall. It includes the main L5 meteorite fall (produced the Sanfengshan L5 strewn field) and the L4 meteorite fall (represented by Tuya 002). This indicates that the Sanfengshan area is not a meteorite dense area. In recent years, several meteorite dense areas (e.g., Loulan Yizhi, Lop Nur, Argan, and Xingdi) have been gradually reported. The limited meteorite types found in such reported meteorite dense areas indicates that these regions are maybe not the real meteorite dense areas, but probably represents the meteorites strewn field. Therefore, it is necessary, in the future, to carry out detailed petrology, mineralogy, cosmic ray exposure age as well as terrestrial age measurements to identify the meteorite dense area in/around the Xinjiang.

meteorite strewn field, desert meteorite, Sanfengshan, cosmic ray exposure age

doi: 10.1360/N972016-01450