N 972016-00536
yxm

科学通报 2016 年 第 61 卷 第 1 期: 1 ~ 9
论 文

《中国科学》杂志社
SCIENCE CHINA PRESS

# 新疆发现世界最长陨石雨——阿勒泰陨石雨

王科超[①②], 徐伟彪[①③*]

① 中国科学院行星科学重点实验室, 紫金山天文台, 南京 210008;
② 中国科学院大学研究生院, 北京 100039;
③ 太空科学研究所, 澳门科技大学, 澳门
* 联系人, E-mail: wbxu@pmo.ac.cn

2016-04-26 收稿, 2016-06-12 修回, 2016-06-13 接受
国家自然科学基金委面上基金(41273079, 41573059)、紫金山天文台小行星基金会和澳门科学技术发展基金(039/2013/A2)资助

**摘要** 2011年在新疆阿勒泰地区发现了一块特大铁陨石, 乌希里克(Wuxilike), 重5 t. 该陨石的主要矿物是铁纹石、镍纹石和合纹石, 副矿物有陨磷铁镍石、陨碳铁(haxonite)、陨硫铁和陨硫铬铁矿, 与同一地区发现的新疆铁陨石(Armanty)和乌拉斯台(Ulasitai)铁陨石相一致. 微量元素地球化学分析显示乌希里克与新疆铁陨石和乌拉斯台铁陨石是成对陨石, 同属IIIE群. 三块铁陨石来源于同一母体, 在其穿过地球大气层时, 发生爆炸后散落开来, 陨石分布范围长达425 km, 远远超过了曾被公认为世界第一长陨石雨, 纳米比亚的Gibeon陨石雨(长轴长275 km). 国际陨石学会最近已正式批准把包括新疆铁陨石(Armanty)、乌拉斯台(Ulasitai)和乌希里克(Wuxilike)在内的陨石统称为阿勒泰陨石雨(Aletai), 该陨石雨的确定对研究小行星轨道的演化和撞击地球的历史有重要启示作用.

**关键词** 阿勒泰, 铁陨石, IIIE 群, 陨石雨 中英文关键词保持前后一致

常规陨石雨的分布范围一般在几千米到几十千米内, 比如: 2013年的俄罗斯车里雅宾斯克陨石雨(20 km)和1976年的吉林陨石雨(70 km). 世界上发现的分布范围最大的陨石雨是纳米比亚Gibeon陨石雨, Gibeon陨石的母体在距地面较高的位置爆炸后, 散落在长275 km, 宽120 km的范围内, 该区域内已经发现数百块铁陨石个体[1]. 超大规模的陨石雨对研究近地小行星的轨道演化和母体与地球大气层的相互作用有重要启示意义.

1898年在新疆北部阿勒泰地区的青河县阿尕什敖包乡冬特村南20 km处的银牛沟(45°52′20″N, 90°30′24″E)发现了一块特大铁陨石, 新疆铁陨石(国际命名为Armanty), 重约28 t, 是世界第四大陨石(图1(a)). 该陨石属中粒八面体铁陨石, 化学类型为IIIE群[2,3].

2004年在阿勒泰地区又发现一块重430 kg的铁陨石(图1(b)), 乌拉斯台(Ulasitai). 矿物岩石学和微量元素研究表明, 乌拉斯台与新疆铁陨石是成对陨石, 同属IIIE群[4].

2011年, 在阿勒泰地区的克兰峡谷(48°3′8″N, 88°22′19″E)发现了一块重达5 t的铁陨石(图1(c)), 乌希里克(Wuxilike). 如图2, 这3块铁陨石大致分布在东南-西北走向的一条直线上, 其中乌拉斯台在新疆铁陨石东南约130 km处, 乌希里克在新疆铁陨石的西北约300 km处, 而乌希里克与乌拉斯台相距425 km, 并且另有报道称在该区域内又发现了数块大质量的铁陨石个体, 这些陨石的坠落地点有着很强的相关性, 新疆阿勒泰地区很有可能发生过一场规模空前的陨石雨.

本文对2011年发现的乌希里克铁陨石进行了矿物岩石学和微量元素地球化学分析, 以期更多的证据来确认新疆阿勒泰曾发生过一次特大陨石雨陨落事件.

**引用格式**: 王科超, 徐伟彪. 新疆发现世界最长陨石雨——阿勒泰陨石雨. 科学通报, 2016, 61: 1–9
Wang K C, Hsu W B. The longest meteorite strewn field on Earth (in Chinese). Chin Sci Bull, 2016, 61: 1–9, doi: 10.1360/N972016-00536

© 2016《中国科学》杂志社

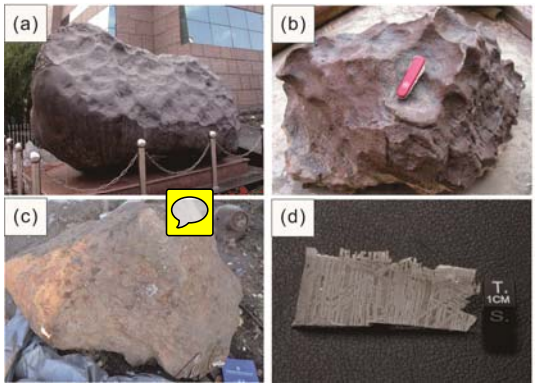


**图 1** 铁陨石图片. (a) 1898 年在新疆北部阿勒泰地区的青河县银牛沟发现的中国最大铁陨石—新疆铁陨石, 重 28 t; (b) 2004 年新疆阿勒泰地区发现的乌拉斯台铁陨石, 重 430 kg[摘自Xu等人[4]]; (c) 2011 年在新疆阿勒泰地区的克兰峡谷发现的乌希里克铁陨石, 重 5 t; (d) 乌希里克的切片

**Figure 1** The pictures of iron meteorite. (a) Armanty, weighing 28 t, which is the largest iron meteorite in China, found in Qinghe city of Aletai region in 1898; (b) Ulasitai, found in 2004, weighing 430 kg [photo from Xu et al.[4]]; (c) Wuxilike, a new iron meteorite found in Kelan Canyon of Aletai region in 2011, weighing 5 t; (d) the specimen of Wuxilike

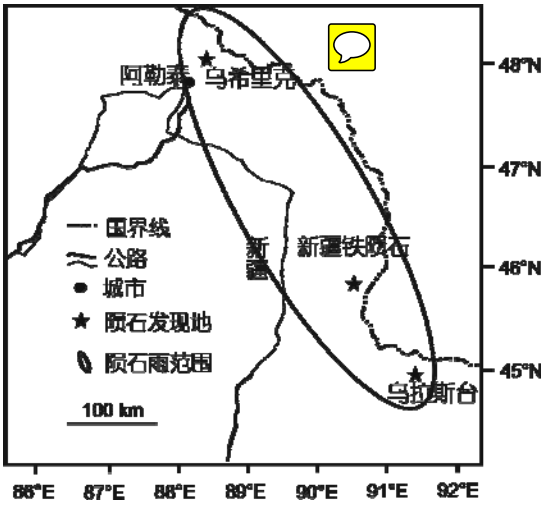


**图 2** 新疆 3 块铁陨石的发现地点. 它们大致分布在东南-西北走向的一条直线上, 椭圆区是新疆阿勒泰陨石雨的可能分布范围

**Figure 2** A map showing the finding sites of three iron meteorites in Xinjiang province. The finding sites are along a southeast to northwest direction. The ellipse region is the possible strewn field of the Aletai meteorite shower

## 1 实验仪器及方法

矿物岩石学实验工作是在紫金山天文台天体化学和行星科学实验室完成. 使用的实验仪器有Nikon E400 POL高精度偏光透反光显微镜、配备了Oxford INCA能谱仪的Hitachi S-3400N II型高低真空扫描电子显微镜、日本电子JXA-8230电子探针. 首先将铁陨石样品表面抛光, 最终抛光颗粒大小为0.3 μm, 在未喷碳膜的情况下, 用光学显微镜先对样品主要矿物及形态进行观测, 镀上碳膜后, 再利用扫描电子显微镜和电子探针分析. 铁陨石的矿物形态和背散射电子图像是由Hitachi S-3400N II型高低真空扫描电子显微镜获得的, 工作电压为15 kV. 矿物的化学成分是由日本电子JXA-8230电子探针获得, 其工作电压为15 kV, 电流20 nA, 各矿物皆用点分析. 标准样品为美国国家标准局天然及合成的金属和化合物, 其中Cu, Co, Fe, Ni和Cr使用金属单质, S使用黄铁矿, P使用InP作为标准样品. 所有数据均用ZAF(atomic number absorption fluorescence)方法进行校正.

中子活化分析是在UCLA(University of California at Los Angeles)的实验室完成, 实验方法和条件与Wasson等人[5]类似. 对每个样品都进行2次分析以减少取样步骤带来的分析误差. Filomena陨石作为Fe, Co, Ni, W, Pt, Au, Ir元素的标样, NBS 809B镍钢作为Cr, Cu, Au元素的标样. 样品和标样厚度为3.0 mm, 取样时尽量避免肉眼可见的陨硫铁和陨磷铁镍矿包体. 照射用的中子通量为$1.8\times10^{12}$ $cm^{-2}$ $s^{-1}$. 在样品照射后的6, 15, 80, 600 h分别进行了4次计数.

## 2 实验结果

### 2.1 矿物岩石学特征

乌希里克铁陨石中主要矿物有铁纹石、镍纹石和合纹石, 副矿物有陨磷铁镍石、陨碳铁、陨硫铁和陨硫铬铁矿, 属中粒八面体铁陨石. 维斯台登结构(图1(d))中的铁纹石条带宽度在0.28~1.62 mm之间, 平均宽度为0.89±0.41 mm. 合纹石有环带结构, 有富铁纹石的中心和富镍纹石的边缘. 合纹石的结构通常从边缘到核心, 从一个颗粒到另一个颗粒都有变化, 在样品中发现的合纹石有: 球形合纹石、梳状合纹石、针状合纹石、网状合纹石等(图3(a)和(b)). 陨磷铁镍石[$(Ni,Fe)_3P$]矿物颗粒中有很多不规则的裂理(图3(c)), 板条状颗粒与周围的铁纹石不整合接触, 最大的矿物宽度超过1 mm, 长度超过5 mm; 小的陨磷铁镍石矿物宽只有2 μm, 长仅数微米呈杆状镶嵌在铁纹石中. 在板条状陨磷铁镍石与铁纹石接触的位置, 发现2个陨硫铬铁矿与陨硫铁组成的出溶叶片, 大小约150 μm(图3(d)). 样品中未找到单独存在的陨

硫铁. 陨碳铁出现在合纹石中, 矿物颗粒中有很多不规则的裂理, 呈一种特殊的“碳玫瑰”状与铁纹石和镍纹石交错共生(图3(e)和(f)), 含有陨碳铁的合纹石的边界呈现出特殊的锯齿状边缘.

镍纹石条带中有典型的“M”形Ni分布, 中心Ni含量低, 越靠近边缘Ni含量越高. 中心的Ni含量与镍纹石的宽度呈负相关, Co的含量与Ni的含量呈负相关, 镍纹石中Co的平均含量为0.40±0.11 wt%, P的含量通常较低, 小于0.1 wt%(表1).

铁纹石条带和合纹石中铁纹石的Ni含量为4.76 wt%~6.93 wt%(平均6.11±0.71 wt%), Co含量为0.69 wt%~0.76 wt%(平均0.73±0.02 wt%). 含Ni最低(4.76 wt%)的铁纹石出现在从镍纹石中出熔的颗粒中, 陨碳铁附近的铁纹石Co的含量比正常铁纹石条带或合纹石里的铁纹石Co的含量高很多, 最多可达1.65 wt%(表1).

板条状陨磷铁镍石[$(Ni,Fe)_3P$]成分较均一(表2), P的含量为15.24±0.07 wt%, Ni的含量为19.64 wt%~21.00 wt%, 在与铁纹石交界处和裂痕的位置, 有少量的磁铁矿出现. 细小杆状的陨磷铁镍石P的含量为15.14±0.10 wt%, Ni的含量变化范围大(30.67%~47.87%), 越小的陨磷铁镍石Ni的含量越高.

陨碳铁Ni的含量较低, 通常在4.68 wt%~4.98 wt%, Co的含量为0.38~0.43 wt%. 由于C的存在, 陨碳铁化学分析的总量偏低, 为91.50 wt%~93.00 wt%. 铁陨石中的陨碳铁通常有两种: cohenite[$(Ni,Fe)_3C$]和haxonite [$(Ni,Fe)_{23}C_6$]. Cohenite含0.7 wt%~2.3 wt%的Ni和0.02 wt%~0.3 wt%的Co, 而haxonite含3.5 wt%~5.6 wt%的Ni和0.05 wt%~0.4 wt%的Co; 从Ni和Co的含量上可以将haxonite与cohenite区分开来, 并且haxonite常出现在含Ni较高的合纹石中, 呈一种特殊的“碳玫瑰”结构与铁纹石和镍纹石交错共生[4]. 乌希里克样品的陨碳铁中Ni的含量为4.68 wt%~4.98 wt%, Co的含量为0.38 wt%~0.43 wt%, 并且呈典型的“碳玫瑰”结构出现在合纹石中, 可以判断此陨碳铁应为haxonite.

## 2.2 中子活化分析结果

中子活化方法测得乌希里克和新疆铁陨石样品

**表 1 铁纹石和镍纹石的化学成分**(wt%)

**Table 1** Chemical compositions (wt%) of kamacite and taenite

| 元素 | 镍纹石 | | | | | | | | 铁纹石 | | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| | 条带中心 | | 条带边缘 | | | 合纹石中 | | | 合纹石中 | | 条带 | | haxonite附近 |
| Fe | 84.83 | 72.36 | 54.28 | 57.35 | 60.56 | 81.32 | 61.15 | 86.68 | 94.13 | 93.32 | 90.56 | 92.05 | 92.56 |
| Ni | 14.52 | 26.06 | 45.17 | 41.89 | 38.32 | 18.15 | 38.43 | 12.29 | 4.76 | 5.00 | 6.86 | 6.65 | 5.36 |
| P | 0.00 | 0.00 | 0.02 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.01 | 0.00 | 0.01 | 0.05 | 0.03 | 0.00 |
| Co | 0.46 | 0.34 | 0.16 | 0.16 | 0.19 | 0.48 | 0.19 | 0.53 | 0.68 | 0.70 | 0.75 | 0.69 | 1.02 |
| Cu | 0.04 | 0.00 | 0.08 | 0.13 | 0.12 | 0.03 | 0.07 | 0.00 | 0.00 | 0.01 | 0.00 | 0.01 | 0.00 |
| 总和 | 99.85 | 98.76 | 99.71 | 99.53 | 99.19 | 99.98 | 99.84 | 99.51 | 99.57 | 99.04 | 98.22 | 99.43 | 98.94 |

**表 2 副矿物的化学成分**(wt%)

**Table 2** Chemical compositions (wt%) of accessory phases

| 元素 | 陨磷铁镍石 | | | | 陨硫铁 | | 陨硫铬铁矿 | | haxonite | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| | 板状 | | 杆状 | | | | | | | |
| Ni | 21.00 | 19.89 | 47.87 | 44.23 | 0.3 | 0.09 | 0.28 | 0.15 | 4.77 | 4.86 |
| Fe | 63.21 | 63.23 | 36.32 | 39.05 | 59.41 | 60.25 | 18.23 | 18.48 | 87.41 | 87.90 |
| S | 0.08 | 0.000 | 0.02 | 0.06 | 36.57 | 36.21 | 43.43 | 43.79 | 0.00 | 0.01 |
| P | 15.18 | 15.31 | 14.98 | 15.28 | 0.00 | 0.00 | 0.04 | 0.00 | 0.00 | 0.00 |
| Cu | 0.00 | 0.00 | 0.10 | 0.04 | 0.00 | 0.00 | 0.01 | 0.04 | 0.00 | 0.00 |
| Co | 0.30 | 0.30 | 0.12 | 0.10 | 0.07 | 0.04 | 0.31 | 0.03 | 0.33 | 0.30 |
| Cr | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.69 | 0.68 | 34.62 | 35.12 | 0.01 | 0.01 |
| Total | 99.77 | 98.75 | 99.41 | 98.76 | 97.04 | 97.27 | 96.92 | 97.61 | 92.51 | 93.08 |

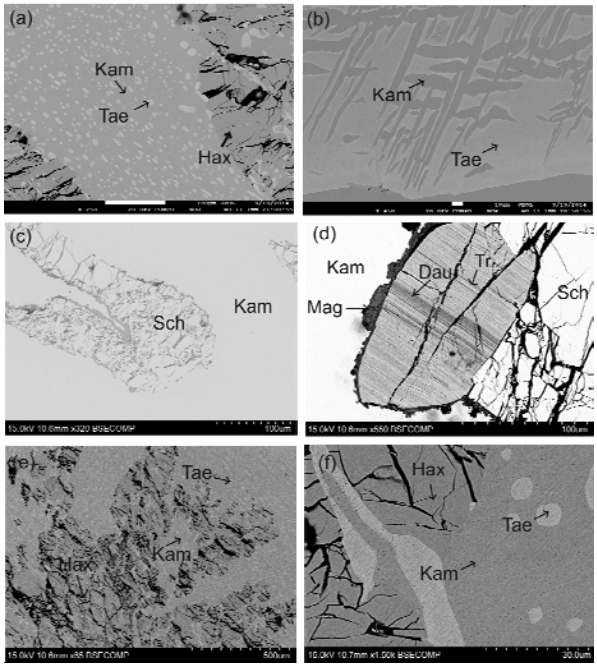


**图 3** 铁陨石的矿物岩石学特征. (a) 球状合纹石结构, 浅灰色的是镍纹石(Tae), 灰色的是铁纹石(Kam), 深灰色的是haxonite(Hax); (b) 出现在镍纹石基质中的针状铁纹石; (c) 分布在铁纹石中的陨磷铁镍石(Sch); (d) 陨磷铁镍石与铁纹石交界处的陨硫铬铁矿(Dau)和陨硫铁(Tr)组成的聚片双晶, 靠近交界裂隙处有少量的磁铁矿(Mag); (e), (f) haxonite与铁纹石, 镍纹石交错互生

**Figure 3** Mineral petrology characteristics of iron meteorites. (a) Plessite, consisting of numerous spheroids; taenite (Tae) is in bright gray; Kamacite (Kam) is in gray and Haxonite(Hax)is in dark gray. (b) Acicular kamacite in taenite matrix. (c) Schreibersite (Sch) distributed in kamacite of Wuxilike. (d) The dark gray lamellae of daubréelite (Dau) and the light gray lamellae of troilite (Tr) constitute polysynthetic twin in the boundary of kamacite and schreibersite in Wuxilike; some magnetite (Mag) occurs near the cracks. (e) and (f) Haxonite in the Wuxilike iron meteorite, inlaying with kamacite and taenite

的微量元素成分与Xu等人[4]用ICP-MS方法测得的新疆铁陨石和乌拉斯台样品的微量元素成分一同列入表3进行对比.

UCLA中子活化方法测得的乌希里克和新疆铁陨石样品的微量元素结果非常一致, 除As, Pt, W外, 其他元素测量结果偏差都小于3%. 与Xu等人[4]用ICP-MS方法测得的新疆铁陨石和乌拉斯台微量元素数据也比较一致, 除了Cr (50%), W, Cu, Pt (30%)以外, 其他元素测量结果偏差都小于10%; 乌拉斯台的As比其他2块陨石少20%左右. Cr富集在硫化物中, 硫化物颗粒的分布不均匀可能是造成Cr元素成分差异较大的原因. 值得注意的是, UCLA和Xu等人[4]中采用的分析方法不同, 可能会带来系统误差, 用同样方法在同次实验中得到的分析结果可比性更强.

## 3 讨论

### 3.1 冷却速率

冷却速率记录了陨石在其母体中自形成以后冷却过程的历史, 与其在母体中的位置和母体大小有密切关系. 对于成对陨石来说, 其冷却速率应大致相同. 铁陨石的冷却速率是通过模拟维氏结构的生长及冷却过程中Ni在铁纹石和镍纹石中的扩散来估算的[6]. 用所测得的镍纹石半宽及中心Ni含量, 投图到具有相似成分的乌拉斯台铁陨石的模拟冷却速率曲线图上, 如图4. 可以发现乌希里克的冷却速率在20~50℃/Ma, 用同样的方法测量的乌拉斯台的冷却速率为10~40℃/Ma[3], 新疆铁陨石的冷却速率是20~40℃/Ma[7]. 在误差范围内3块铁陨石的冷却速率一致.

### 3.2 乌希里克的化学群与成对关系

早期的研究工作常采用铁陨石中铁纹石的带宽来归类铁陨石, 把铁陨石分为3大类: 六面体铁陨石、八面体铁陨石和富镍无结构铁陨石, 其中八面体铁陨石又细分为极粗粒、粗粒、中粒(带宽在0.5~1.3 mm)、细粒、极细粒、和过渡体6个亚类. 乌希里克的铁纹石带宽范围为0.28~1.62 mm, 平均为0.89±0.41 mm. 与新疆铁陨石1.24 mm(1.08~1.43 mm)的带

**表 3** 乌希里克与新疆铁陨石、乌拉斯台的微量元素成分[a)]

**Table 3** Bulk compositions of Wuxilike, Armanty and Ulasitai

| 样品 | Cr (μg/g) | Co (mg/g) | Ni (mg/g) | Cu (μg/g) | Ga (μg/g) | As (μg/g) | W (μg/g) | Ir (μg/g) | Pt (μg/g) | Au (μg/g) |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| 乌希里克* | 45 | 5.20 | 98.0 | 105 | 17.0 | 15.8 | 0.26 | 0.234 | 2.6 | 1.86 |
| 新疆铁陨石* | 46 | 5.15 | 97.7 | 108 | 16.9 | 14.4 | 0.28 | 0.228 | 2.4 | 1.81 |
| 乌拉斯台** | 33.3 | 5.4 | 100.3 | 85.8 | 15.3 | 11.7 | 0.40 | 0.22 | 1.75 | 1.76 |
| 新疆铁陨石** | 30.8 | 5.5 | 106.2 | 126.2 | 16.5 | 15.3 | 0.36 | 0.26 | 1.96 | 2.00 |

a) *, UCLA中子活化方法测得; ** 数据来源: Xu等人[4], Ni和Co用ICP-AES 方法分析, 其他元素用ICP-MS方法测得

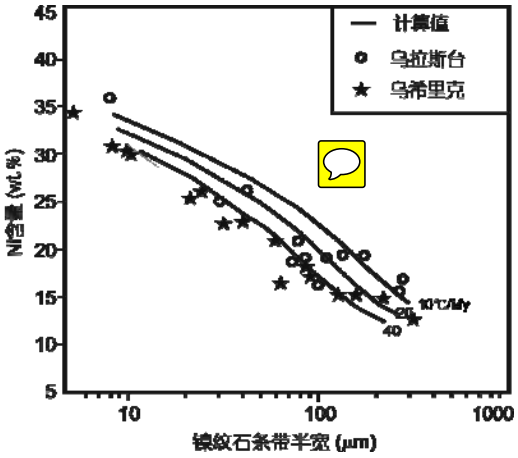


**图 4** 乌希里克冷却速率的估算

**Figure 4** Estimation of the cooling rate of Wuxilike

宽以及乌拉斯台1.2±0.2 mm(0.9~1.8 mm)的带宽相比，带宽的平均宽度相近，在误差范围内是一致的. 需要指出的是铁纹石带宽在铁陨石中分布并不均匀，变化范围很大，统计的结果和取样位置有很大关系，随机性比较强. 铁纹石条带宽度与陨石的小行星母体内核的P，Ni元素的含量以及母体冷却速率相关，不同群的铁陨石可以具有相同的铁纹石宽度，不能反映铁陨石的成因关系，因此铁纹石带宽不能作为铁陨石分群的主要依据. 正因为如此，目前国际陨石界通常采用微量元素化学分析方法来归类铁陨石，将铁陨石分为IAB，IC，IIAB，IIC，IID，IIE，IIF，IIG，IIIAB，IIICD，IIIE，IIIF，IVA，IVB和ungrouped等类型[8,9]，其中IAB，IIE和IIICD为非岩浆结晶成因，常含有硅酸盐包体，其他类型为岩浆结晶型成因. IIIAB和IIIE群铁陨石在化学成分上有很大的相似性，很难区分. IIIE群铁陨石是铁陨石的一个很小的群体，目前仅有15块样本，是Scott等人[10] 根据其较小的Ga/Ni，Ge/Ni值从IIIAB群铁陨石中分离出的小的群体. 主要的区分标准是特征副矿物haxonite，IIIAB群铁陨石没有haxonite，而IIIE群铁陨石含有特征副矿物haxonite.

将IIIAB群、IIIE群、新疆铁陨石、乌拉斯台和乌希里克的微量元素对比Ni元素作图(图5). 可以看到IIIAB群和IIIE群的微量元素成分分布比较接近，尤其是Ir-Ni图中IIIAB群与IIIE群完全重合无法区分开来，但是相似Ni含量的IIIE群相对IIIAB群有较低的Ga，Au，Co，As. Xu等人[4]测得的新疆铁陨石和乌拉斯台样品与IIIE群的关联性接近；UCLA分析的新疆铁陨石和乌希里克的微量元素在Ga-Ni，As-Ni，Au-Ni，W-Ni图上与IIIAB群有重合，其他微量元素与IIIE群的关联性更接近. 如前所述，仅从微量元素成分上很难区分IIIAB和IIIE群，关键是特征副矿物haxonite，因为新疆铁陨石和乌希里克都含有haxonite，所以同属IIIE群. 值得注意的是UCLA分析的新疆铁陨石和乌希里克的微量元素在图中位置完全重合，充分说明乌希里克和新疆铁陨石是成对陨石.

乌希里克的冷却速率约为40℃/Ma，与新疆铁陨石、乌拉斯台很接近，而与IIIAB的56~338℃/Ma的冷却速率有很大差别[6]. 而且在乌希里克与新疆铁陨石、乌拉斯台内都发现了IIIE群的特征副矿物haxonite.

综上，可以认为乌希里克与新疆铁陨石、乌拉斯台是成对陨石. 综合岩石学与矿物学特征及微量元素地球化学的特征，可以推断乌希里克与新疆铁陨石、乌拉斯台属于同一群，为IIIE群.

### 3.3 新疆铁陨石的成因意义

IIIE群铁陨石是岩浆分异成因铁陨石，是由其小行星母体因太阳系早期放射性元素衰变和吸积能加热而发生大规模熔融，在重力作用下分异形成Fe-Ni核和硅酸盐幔，缓慢冷却后形成的. 岩浆分异型铁陨石，其冷却过程很缓慢，并且是线性冷却. 冷却速率与母体半径有如下函数关系:

$$R = g \cdot 149CR^{-0.465}, \tag{1}$$

式中，$R$为母体半径(km)，$CR$为冷却速率(℃/Ma)，$g$是常数一般取1. 通过测定铁陨石的冷却速率，可以计算出铁陨石母体的半径. 新疆铁陨石雨个体的冷却速率大致为10~50℃/Ma，取平均冷却速率30℃/Ma，由式(1)计算获得的母体半径为31 km. 金属核的半径最大不超过母体半径的0.5倍，则相应的母体金属核半径不超过15 km.

铁陨石成分组成除了受母体在太阳星云凝聚过程中的物质分馏作用影响外，还受到岩浆分异作用和岩浆分离结晶作用的影响. 岩浆分离结晶分馏对元素的作用可以用瑞利分馏方程表示:

$$X_S = \bar{X} \cdot K_X \cdot (1-f)^{K_X - 1}, \tag{2}$$

式中，$X_S$是元素$X$在固相中的浓度，$\bar{X}$是元素$X$在初始岩浆中的浓度，$f$是固相占原始岩浆的分数，$K_X$是元素在固相与液相的浓度比，即分配系数. 当元素$X$，$Y$同时从岩浆中分离结晶时，联立2个方程则可以消除$f$，

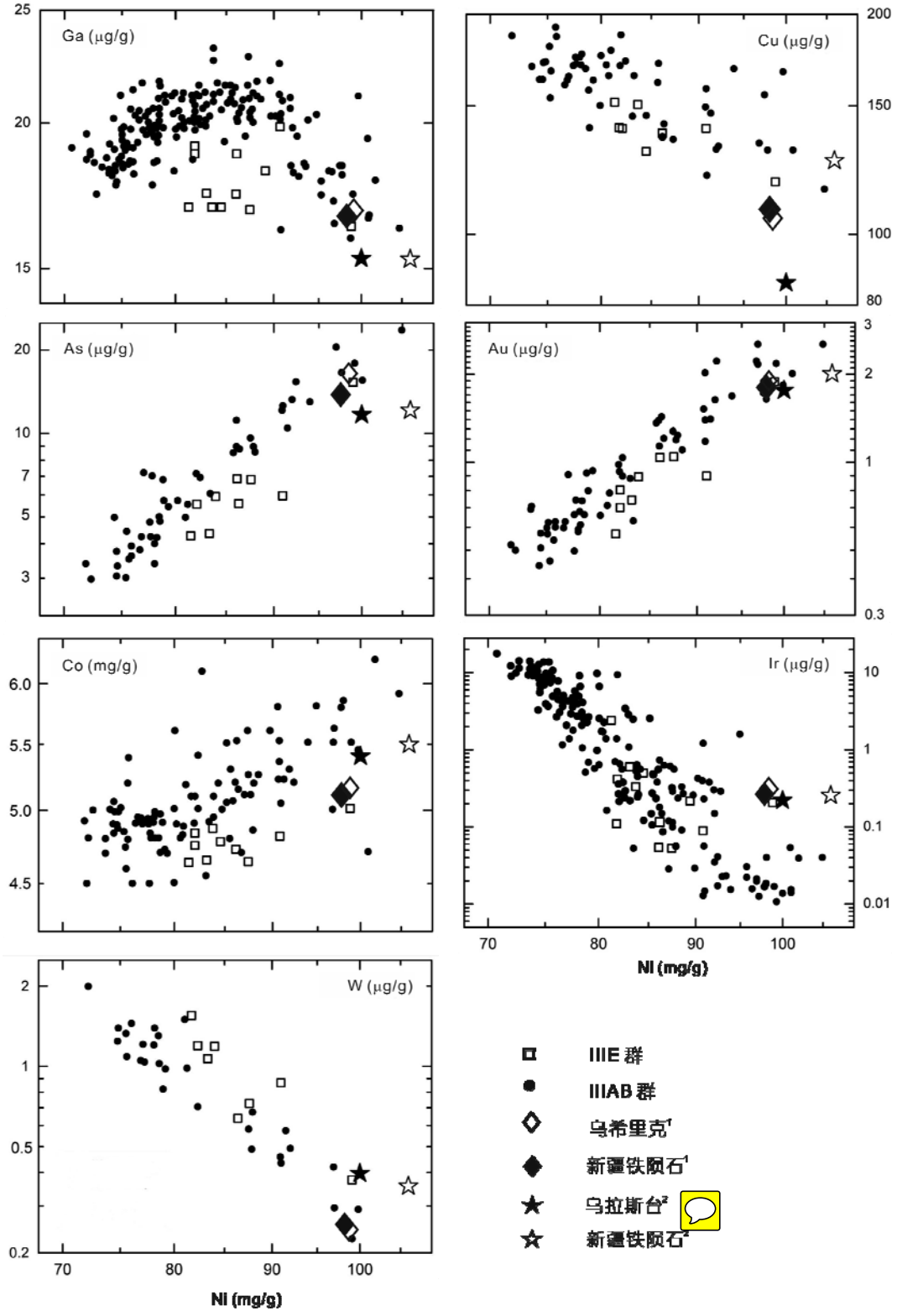


**图 5** 乌希里克、乌拉斯台、新疆铁陨石与IIIAB、IIIE群铁陨石在微量元素-Ni图上的关系. 1 UCLA中子活化方法测得; 2 Xu等人[4], Ni和Co用ICP-AES方法分析, 其他元素用ICP-MS方法测得

**Figure 5** The relationship of Wuxilike, Ulasitai, Armanty, and IIIAB, IIIE iron meteorites on trace elements versus Ni diagram. 1 Measured neutron activation method in UCLA; 2 Xu et al.[4], Ni, Co analyzed by ICP-AES, other elements analyzed by ICP-MS

取对数可得到线性方程:

$$\log X = [(K_X - 1)/(K_Y - 1)] \cdot \log Y + 常数. \quad (3)$$

曲线的斜率是2个元素分配系数的关系，在log元素-Ni图上，不同的元素有不同的分布斜率：由于$K_{Ni}$是0.88，对于$K_X$<1的元素，log元素-Ni图上有正的曲线斜率；对于$K_X$>1的元素，log元素-Ni图上有负的曲线斜率[1].

图5可以看出，IIIAB群中除Ga元素以外，IIIE群中除Ga和Ir元素以外，其他微量元素在log元素-Ni图上呈一条直线. UCLA分析的乌希里克和新疆铁陨石微量元素结果也有相同的变化趋势，表明这些差异可能是岩浆分异结晶造成的化学分馏的结果.

陈永亨等人[1]认为新疆铁陨石母体在大气层摩擦产生的高温烧蚀作用和表面热扩散作用下，元素会发生重新分布，处于铁陨石体前端的样品较其他部位富Ni，其他微量元素含量也有富集现象.

Wasson等人[11]发现新疆铁陨石的一侧有一处明显断裂痕迹的粗糙断口，其边缘处的样品与其他位置的样品成分存在较大差异. 认为该处可能位于两个高温相的交界——捕获的残余岩浆或是2个米量级的初始镍纹石的接触面，副矿物易于在此聚集，不同的晶体间在岩石矿物学特征和成分上可能存在较大差异.

上述机制都可以造成乌希里克、新疆铁陨石和乌拉斯台之间岩石矿物学特征和成分上的差异，这些差异可能是母体岩浆作用和大气剥蚀消融作用的共同结果.

新疆铁陨石雨的3个个体是IIIE群中Ni含量最高的个体，比其他IIIE群铁陨石Ni的含量多14%，对比IIIE群不同个体间微量元素的变化范围和趋势，以及岩石矿物学上的差异，有利于进一步推断IIIE群小行星母体所经历岩浆分异程度、分异时间和分异结晶序列等热历史过程，探讨微量元素在母体体系内的分配规律.

## 4 结论

矿物岩石学特征及微量元素地球化学分析表明，在阿勒泰地区新近发现的乌希里克铁陨石与早先发现的新疆铁陨石和乌拉斯台铁陨石是成对陨石，同属IIIE群. 它们来源于同一母体，在穿过地球大气层时，发生爆炸后散落开来. 历史上，在新疆阿勒泰地区曾经发生过一场罕见的陨石雨，降落的区域呈东南-西北走向，洒落范围长达425 km，远远超过了Gibeon陨石雨的规模(275 km)，成为世界上分布范围最大的陨石雨. 常见陨石雨的分布范围一般在几千米到几十千米，阿勒泰陨石雨有如此长的陨石降落距离，反映了其母体大小、进入大气层的飞行速度和角度、以及母体在空中解体的高度都很特殊，对研究近地小行星的轨道演化和动力学问题有重要启示意义. 但是由于目前发现的陨石数量太少，还不能确定其母体进入大气层的飞行方向. 在该区域内可能还会找到更多的阿勒泰铁陨石个体，确定陨石雨降落的范围对未来在该区域收集陨石有指导意义. 国际陨石学会2016年正式批准了阿勒泰铁陨石雨的命名.

单位：紫金山天文台

**致谢** UCLA的Wasson J T教授帮助完成了中子活化分析，王英副研究员、李少林、吴蕴华在实验操作中给予了大量帮助，谈建云帮助制作了样品，作者在此致以衷心的感谢.

补充人员的工作单位

## 参考文献

1 Buchwald V F. Handbook of Iron Meteorites. Berkeley and Los Angeles California: University of California Press, 1975

2 Chen Y, Sun Y. Multi-samples trace element distribution of Xinjiang iron meteorite and its geochemical implication (in Chinese). Geochimica, 1986, 3: 271–277 [陈永亨，孙用均. 新疆铁陨石多样品的微量元素分布及其在地球化学中的意义. 地球化学，1986, 3: 271–277]

3 Chen Y, Wang D D. Chemical composition and trace element abundances of the Xinjiang iron meteorite (in Chinese). Geol Rev, 1996, 42: 54–63 [陈永亨，王道德. 新疆铁陨石的物质组成和微量元素特征. 地质评论, 1996, 42: 54–63]

4 Xu L, Miao B, Lin Y, et al. Ulasitai: A new iron meteorite likely paired with Armanty (IIIE). M&PS, 2008, 43: 1263–1273

5 Wasson J T, Ouyang X, Wang J. Chemical classification of iron meteorites: XI. Multi-element studies of 38 new irons and the high abundance of ungrouped irons from Antarctica. GCA, 1989, 53: 735–744

6 Yang J J, Goldstein J I. Metallographic cooling rates of the IIIAB iron meteorites. GCA, 2006, 70: 3197–3215

7 Mao Y H. Determination of metallographic cooling rate of meteorites and study of thermal history of their parent bodies (in Chinese). Doctor Dissertation. Guangzhou: Guangzhou Institute of Geochemistry, Chinese Academy of Sciences ,1998 [毛艳华. 陨石金相冷却速率测定及母体热历史研究. 博士学位论文. 广州: 中国科学院广州地球化学研究所, 1998]

8 Scott E R D, Wasson J T. Classification and properties of iron meteorites. RvGSP, 1975,13: 527–546

9 Kracher A, Willis J, Wasson J T. Chemical classification of iron meteorites-IX. A new group (IIF), revision of IAB and IIICD, and data on 57 additional irons. GCA, 1980, 44: 773–787

10 Scott E R D, Wasson J T. Two more chemical groups of iron meteorites, IIIE and IIIF. Meteoritics, 1973, 8: 70–71

11 Wasson J T, Ouyang X, Wang D D. Compositional study of a suite of samples from the 28-t Armanty (Xinjiang) iron meteorite. Meteoritics, 1988, 23: 365–369

# The longest meteorite strewn field on Earth

WANG KeChao[1,2] & HSU WeiBiao[1,3]

[1] *Key Laboratory of Planetary Sciences, Purple Mountain Observatory, Chinese Academy of Sciences, Nanjing 210008, China;*
[2] *University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100039, China;*
[3] *Space Science Institute, Macau University of Science and Technology, Macau, China*

In general, the long axis of a meteorite strewn field ranges from several to tens of kilometers, such as Chelyabinsk (20 km) and Jilin (70 km). It is mainly affected by the angle and velocity of a meteoroid approaching Earth's atmosphere, the altitude of airburst, and the physical properties of the meteoroid (shape, density and structure). An extensive long axis of a meteorite strewn field has important implications for the celestial dynamics of its parent asteroid.

In the last hundred years, several massive irons were found in Aletai (Altay) region of Xinjiang province. Armanty (also known as Xinjiang), a 28-t iron, was recovered in a trench, 20 km south of Dongte village, Agasheaobao town, Qinghe city, Aletai prefecture. No impact crater was observed in the vicinity. In 1965, it was transported to the Xinjiang Geology and Mineral Museum in Urumqi. Armanty is a medium octahedrite and belongs to the chemical group IIIE. Another iron, Ulasitai (430 kg), was found on a hillside in Mulei city of Aletai prefecture in 2004. Petrographic and chemical analyses reveal that Armanty and Ulasitai are paired and belong to the same fall.

Recently in 2011, one large iron meteorite, Wuxilike, weighing 5 t, was found in the Aletai region, Xinjiang province. Interestingly, the recovery sites of these three irons are located geographically within an array that spans over 425 km. They seem to be siblings of a single meteorite shower. The total mass of Aletai irons is well over 30 t, including it among the top three most massive meteorites in the world. If confirmed, this will be the longest strewn field on Earth.

Mineral compositions, petrographic textures and trace element contents of Wuxilike are reported here. The major minerals are kamacite, taenite and plessite, and the accessory phases are schreibersite, haxonite, troilite and daubreelite. The average bandwidth of kamacite is 0.9±0.4 mm. The petrography and mineralogy of Wuxilike is very similar to that of Armanty and Ulasitai which were found in the same region. The analysis of trace element compositions also shows similarity among the three irons. Wuxilike contains 0.52 wt% Co, 9.8 wt% Ni, 17.0 ppm Ga, 15.8 ppm As, 0.26 ppm W, 0.234 ppm Ir, 2.6 ppm Pt, and 1.86 ppm Au. It also belongs to the chemical group IIIE. It is clear that these three meteorites were scattered by an explosion, when their parent body passed through the atmosphere. These three irons are paired, and thus were recently renamed Aletai by the Meteorite Nomenclature Committee.

The distance between Wuxilike and Ulasitai is about 10 times longer than the average size of a meteorite shower. This may imply that the trajectory of the Aletai irons was exceedingly oblique resulting from the distinctive orbital dynamics of their parent asteroid. On the other hand, the parent body of the Aletai irons could have been disaggregated by gravitation before entering the Earth's atmosphere, a scenario similar to the impact of Shoemaker-Levy 9 on Jupiter in July 1994. Due to their record large sizes and huge masses, it is also important to know when the Aletai irons impacted the Earth. This will help us reconstruct the frequency of meteoroid impacts that have had a significant role in shaping the geological and biological history of the Earth.

**Aletai, Armanty, iron meteorites, IIIE group, meteorite strewn field**

doi: 10.1360/N972016-00536