科 学 通 报
第 42 卷 第 16 期 Chinese Science Bulletin 1997 年 8 月

【综合评述】

(微)玻璃陨石研究进展

李春来 欧阳自远
(中国科学院地球化学研究所,贵阳 550002)

关键词 (微)玻璃陨石 撞击事件 化学和同位素成分 年龄 成因

玻璃陨石是地外物体剧烈撞击地球时,地表靶物质熔融后快速凝结的天然玻璃. 地表发现的玻璃陨石多呈块状,棕黑色到浅绿色,一般为厘米级大小,表面多具空气动力学熔蚀刻痕[1,2];与地表发现的玻璃陨石不同,微玻璃陨石是在沉积物或地层极为局限的层位中发现的微细玻璃陨石,粒度一般为毫米级以下,它们与相应的玻璃陨石事件在成因和分布范围上有密切的联系,其形成年龄和化学成分与玻璃陨石相当,并常具有撞击成因的结构构造特征[2,3].

虽然玻璃陨石也是一种撞击玻璃,但它具有广泛而限定的地理分布,至今没有找到相应的、可以确定的撞击坑,其靶物质的性质也不清楚,因此玻璃陨石在概念上不包括与特定撞击坑或界线事件有关的撞击玻璃(Impact glasses)或撞击成因的微玻璃球.

(微)玻璃陨石与火山玻璃在化学成分范围上有重叠,结构上也不易区别,但在许多特征上,玻璃陨石明显不同于火山玻璃,例如玻璃陨石几乎不含水,而火山玻璃的水含量很高[3~5]. 玻璃陨石形成于极特殊的环境中,其中 Fe 主要以 Fe^{2+} 形式存在,三价铁(Fe^{3+})含量很低,Fe^{3+}/Fe^{2+} 比值为 0.06~0.26(平均 0.13),火山玻璃中 Fe 主要以 Fe^{3+} 形式存在,$Fe^{3+}/Fe^{2+}>>1$[6,7];(微)玻璃陨石属撞击作用的产物,具有特殊的表面构造,如空气动力烧蚀表面,凿空、沟槽、气孔、凹坑、圆形气泡(火山玻璃气泡一般为长形)等[2,3,7].

由于玻璃陨石在很多特征上与火山玻璃相似,故早期曾被称为黑曜岩[1,2]. 1900 年 F.E. Suess 据其熔融的特征,由希腊语"τηχτοξ"(意谓"熔融")将之转译命名为英语"Tektite",并一直沿用至今. 本世纪初,由于这种天然玻璃被认为是地外成因的,也曾被称为"Glassy Meteorite","玻璃陨石"这一中文译名即源于此.

人类对玻璃陨石的认识可追溯到几万年以前. 从墓葬的发掘与考古中发现,远古时期,人类用玻璃陨石这种天然玻璃作为武器、工具、饰物甚至护身符. 近代,在欧洲,珠宝商人曾将之作为宝石而广泛收集. 早在 10 世纪中叶,我国唐朝的刘恂在其所著的《岭表录异》中就对"雷公墨"(玻璃陨石的古称)作过描述,这是公认的历史上有关玻璃陨石的最早的文字记载[8]. 近代的科学文献中,第一篇论述玻璃陨石的文章是由 Mayer 于 1787 年完成的[9]. 1844 年,进化论的创始人 Darwin[10]在他的环球旅行中,对纽扣状澳大利亚玻璃陨石进行了考察和科学的描述,并认为它是一种火山玻璃. 从 18 世纪到 19 世纪末,只有大约 40 篇论述莫尔达维石(分布在东欧波西米亚和摩拉维亚一带的玻璃陨石)的文章相继发表. 本世纪初,对玻璃陨石的研究从一般的描述更多的到了化学组成方面. 玻璃陨石真正的科学研究始自本世纪 40 年代,Barnes[11]对玻璃陨石进行了系统的收集和分类. 之后,对玻璃陨石作了散落群的划分、化学成分的分析和成因的讨论. 60 年代,由于登月计划的需要,对玻璃陨石和微玻璃陨石进行了最全面、最深入、最详细和最系统的研究,并一直持续到 70 年代,这期间发表了大量有关玻璃陨石的论文,"Geochimie and Cosmochimie Acta"还分别于 1964 年和 1969 年为玻璃陨石研

究出版了两期专刊，一系列专著也问世了，对玻璃陨石的认识已达到了相当高的地步．80年代以来，玻璃陨石研究进入综合性研究阶段，主要探讨(微)玻璃陨石的分布范围和形成方式，玻璃陨石事件与其他地质事件的内在关系，尤其是对地球古气候的影响，并试图得出一个统一的成因模式．

1 分布特征

迄今为止，只发现了4个玻璃陨石群，因为它们分布在不同的区域，所以称为玻璃陨石散落区(Tektite Strewn field)(图1)．它们分别是：北美散落区(包括得克萨斯州的Bediasites和佐治亚州的Georgia tektites)、莫尔达维石散落区(包括波西米亚和摩拉维亚两个主要产地)、象牙海岸散落区和澳大利亚-东南亚散落区，它们较公认的形成年龄分别为34±1，14±1，1.3±0.2和0.7Ma．每个玻璃陨石群代表了不同的地外物体撞击事件．



图1 澳大利亚-东南亚、象牙海岸、莫尔达维和北美群(微)玻璃陨石散落区

微玻璃陨石的岩芯位置分别用实心圆、三角形和星号表示，没有找到微玻璃陨石的钻孔用空心圆和三角形表示；黄土中微玻璃陨石的位置用实心方块表示，(大)玻璃陨石的位置用×表示，散落区边界(虚线)是据已知玻璃陨石和微玻璃陨石的产地圈出来的

除莫尔达维石外，其他玻璃陨石群均发现了相应的微玻璃陨石，它们广泛地分布于整个印度洋、菲律宾海、西太平洋海域(以上为澳-亚群)、赤道大西洋海域(象牙海岸群)、墨西哥湾、加勒比海和赤道太平洋海域(北美群)[2, 3, 12~23]．微玻璃陨石的发现和研究，使玻璃陨石群的分布范围大大地扩大了．

除以上的4个玻璃陨石群外，人们还在其他一些孤立的地理范围，极其局限的地点发现了与玻璃陨石成分相似的玻璃物质，它们在成因上被认为可能与撞击事件有关，但在归属上仍有很大的争论．这些玻璃物质包括：(1) Zhamanshin撞击坑周围的玻璃物质(Irghizites)和撞击熔岩(Zhamanshinites)，及附近河流沉积物中年龄相当的微玻璃球粒(Microirghizites)[2, 24~27]；(2) 古巴“玻璃陨石”．其成分和年龄与Bediasites相当[28,29]；(3) 利比里亚沙漠玻璃．淡黄绿色，块状，其成分较单一，SiO_2含量达98%[30, 31]；(4) 西南非洲“玻璃陨石”[32]；(5) Louisiana“玻璃陨石”[33]，其化学成分和年龄与东南亚玻璃陨石，而不是与邻近的北美玻璃陨石相似．

2 矿物和岩石学特征

Chao[34]，O'Keefe[35]和欧阳自远[1]对玻璃陨石的岩石学和矿物学特征作了非常详尽的描述．它们一般呈块状、不规则状、哑铃状、液滴状和纽扣状，比重为2.32~2.5 g/mm^3，折射率为1.48~1.52，且折射率值与SiO_2含量呈负相关关系；颜色以棕黑色和深绿色为主，大多数玻璃陨石发育流动构造，有异离体，焦石英和气孔，凹坑及各种刻蚀痕迹．除Muong Nong型层状玻璃陨石外，大多数玻璃陨石所含包体矿物极少，Muong Nong型玻璃陨石所含的微粒矿物包体中，有些被证明是撞击母体的残留物[36, 37]．

微玻璃陨石主要呈球状、椭球状、滴状、长形和其他不规则形状. 与玻璃陨石不同,微玻璃陨石都是浅色玻璃体,多以浅黄、褐、浅绿者居多,并普遍发育圆形气孔、凹坑和刻蚀槽坑,有时气孔所占体积达 50% 以上. 微玻璃陨石折射率分布在 1.560～1.570 之间,比重为 2.37～2.55,均比玻璃陨石高,这主要是因为其化学成分的差异所致. 少数微玻璃陨石球粒甚至含有焦石英包体和其他异离体[2, 3]. 各群玻璃陨石的化学成分均已作过详尽的研究(表 1).

表 1　澳大利亚-东南亚玻璃陨石群不同类型的主要元素含量范围[a](重量百分比)

类型 样品数	高钠/钾澳大利亚石 (8)	普通澳大利亚石 (3)	普通菲律宾石 (2)	普通印支石 (2)	高铝澳大利亚石 (3)	低钙高铝菲律宾石 (5)	高钙澳大利亚石 (5)	高钙菲律宾石 (5)	高镁玻璃陨石 (10)
SiO_2	62.2～63.9	70.4～72.4	71.2～71.6	72.9～73.3	66.9～68.5	67.2～69.2	68.9～79.7	68.6～74.9	64.8～77.0
Al_2O_3	15.8～17.1	12.9～14.3	13.0～13.4	13.1～13.5	15.4～16.1	15.2～17.7	9.3～14.3	8.9～11.0	10.7～13.3
FeO	5.54～6.88	4.67～4.97	4.55～5.12	4.47～4.49	5.27～5.43	4.87～5.87	3.57～4.47	3.87～4.55	3.85～8.63
MgO	3.57～4.68	2.16～2.23	2.33～2.42	2.00～2.04	2.44～2.60	2.45～3.15	1.31～2.53	1.87～2.43	1.83～7.95
CaO	4.49～6.00	2.94～3.48	3.31～3.34	2.17～2.41	3.18～3.83	1.37～2.37	1.83～5.48	4.34～9.77	1.79～3.73
K_2O	0.90～1.12	2.41～2.62	2.33～2.47	2.36～2.40	2.37～2.57	2.33～2.81	2.14～2.21	1.77～2.33	1.34～2.56
Na_2O	2.75～3.91	1.32～1.56	1.31～1.50	1.17～1.27	1.04～1.27	0.97～1.18	1.00～1.24	0.91～1.28	0.62～1.38
TiO_2	0.53～0.65	0.80～0.83	0.78～0.82	0.72～0.89	0.87～0.93	0.85～1.00	0.49～0.81	0.50～0.63	0.66～0.77

a) 据 Chapman & Scheiber, 1969

3　化学成分和化学类型

(1)　玻璃陨石. 在 4 个玻璃陨石群中,以澳-亚玻璃陨石获得的分析数据最多,研究程度最为详尽,并提供了最多的化学演化和成因信息[1～3, 7, 38～40]. 研究发现,澳亚玻璃陨石的化学成分变化是有规律的,除普通型(Normal)外,据化学成分还可划分出几个特殊的化学类型(表 1): (1) 普通型(Normal): 为主要化学类型; (2) 高 Ca 型:CaO 含量可达 10%,主要分布在澳大利亚 Tasmania 西北到 Henbury 及菲律宾 Luzon;(3) 高 Na 型:MgO 含量可高达 8%,且与 SiO_2 含量呈负相关关系,主要分布在澳大利亚中部,印度尼西亚和菲律宾;(4) 高 Na/K 型:其化学成分以显著高的 Na/K 比值区别于其他玻璃陨石,因为一般玻璃陨石中,Na/K＜1,而该群 Na/K＞1; (5) 高 Al 型: Al_2O_3 含量＞15%,主要分布在澳大利亚、菲律宾和象牙海岸.

北美玻璃陨石分为分布在得克萨斯州的贝迪亚斯石(Bediasites)和佐治亚州的佐治亚石(Georgia tektites), 其中佐治亚玻璃陨石含 SiO_2 较高,而 Al_2O_3 和 FeO 则明显低于贝迪亚斯石[34, 41～44](表 2). 莫尔达维石(Moldavites)的化学成分(表 2)研究表明,它至少由两种组分混合而成: 泥质岩石(如页岩)和钙质岩石[45～47]. 象牙海岸群玻璃陨石的化学成分数据相对较少,其中,最明显的化学成分差别是,象牙海岸玻璃陨石的 Na_2O/K_2O 值接近 1,而其他群的 Na_2O/K_2O 值＜1[7, 48～50].

(2)　微玻璃陨石. 总体上,微玻璃陨石与玻璃陨石的化学成分是相近的,但在细节上,两者又有差异,将表 3 与表 1 和表 2 对比可知,与玻璃陨石相比,微玻璃陨石主要元素含量变化范围较大,且其 SiO_2 含量普遍较低,而 Al_2O_3 和 CaO 等难熔元素含量明显偏高. 这一成分变化规律也在 Zhamanshin 撞击坑形成的撞击玻璃中得到了证实[24, 25, 27, 51]:在撞击坑周围的河流沉积物中发现的微玻璃球 microirghizites(＜1mm,类似微玻璃陨石),其化学成分与撞击

玻璃(Irghizites)相似,但变化范围较大,SiO_2 含量较低,Al_2O_3 较高,且显示受陨石物质的污染较重(Ni 高达0.41%)[51].

表2 北美群、莫尔达维石群和象牙海岸群玻璃陨石的化学成分(重量百分比)

	北美群		莫尔达维石群		象牙海岸群
	佐治亚石[a]	贝迪亚斯石[b]	波西米亚[c]	摩拉维亚[c]	象牙海岸玻璃陨石[d]
样品数	(9)	(21)	(61)	(21)	(15)
SiO_2	79.8~83.6	71.9~80.2	75.5~85.1	74.9~81.4	67.0~69.3
Al_2O_3	9.50~11.7	11.2~17.6	7.32~11.4	9.44~13.8	15.8~17.1
FeO	1.83~3.14	2.29~5.75	1.08~2.93	1.72~3.50	6.03~6.80
MgO	0.37~0.69	0.37~0.95	1.34~2.74	1.13~2.06	2.64~3.93
CaO	0.40~0.69	0.49~0.96	1.21~3.96	0.95~3.17	0.71~1.61
Na_2O	1.00~1.53	1.20~1.84	0.20~0.89	0.40~1.08	1.54~2.44
K_2O	2.22~2.51	1.60~2.43	2.23~3.81	2.83~3.81	1.70~2.07
TiO_2	0.42~0.60	0.59~1.05	0.24~0.74	0.31~1.40	0.52~0.60

a) Cuttitta et al., 1967; b) Chao, 1963; c) Bouska et al., 1973; Bouska & Povondra, 1964; Schnetzler & Pinson, 1964; Luff, 1983; Cohen, 1963; Konta & Mraz, 1969; Philpotts & Pinson, 1966; d) Chapman & Scheiber, 1969; Cuttitta et al., 1972; Shaw & Wasserburg, 1982

表3 微玻璃陨石的化学成分(重量百分比)

类型	澳大利亚-东南亚群					北美群			象牙海岸群	
	普通型[a]		瓶绿色型[b]		高铝型[c]	普通型[d]	瓶绿色型[e]	高铝型[f]	普通型[g]	瓶绿色型[h]
产地	深海岩芯	黄土中	深海岩芯	黄土中[c]	黄土中					
样品数	(60)	(1)	(44)	(3)	(7)	(314)	(174)	(31)	(23)	(6)
SiO_2	48.1~77.0	85.03	48.2~72.0	46.96~54.54	40.93~53.49	47.30~84.16	39.70~68.03	29.39~51.39	62.41~68.20	48.6~53.6
Al_2O_3	7.5~22.1	9.13	8.81~21.6	12.18~17.28	30.01~57.37	3.99~25.30	4.84~13.30	16.03~48.37	12.75~17.33	13.4~20.3
FeO	3.0~9.6	2.39	3.42~10.8	9.11~10.71	0.62~5.72	1.13~13.08	4.21~12.76	4.05~24.41	5.70~8.61	9.45~10.8
MgO	1.9~27.3	0.55	2.64~24.4	5.84~7.77	0.73~4.53	0.44~18.60	0.65~12.49	0.71~11.81	2.01~7.69	16.6~20.0
CaO	1.0~5.8	0	1.35~5.35	0.11~1.00	0.00~1.09	0.27~19.19	0.91~18.00	2.11~14.69	0.22~1.82	2.09~3.53
Na_2O	0.2~1.9	0.37	0.03~1.43	0~1.58	0.00~3.11	0.00~3.38	0.79~2.06	0.00~1.58	1.41~2.03	0.42~0.73
K_2O	0.1~3.7	2.09	0.01~2.33	7.66~8.68	0.28~9.16	0.05~9.37	1.06~4.25	1.70~5.91	1.12~2.87	0.12~0.33
TiO_2	0.0~1.0	0.44	0.57~1.09	0~1.46	0.00~0.49	0.13~1.44	0.15~0.56	0.71~1.13	0.45~0.93	0.48~0.54

a) Cassidy et al., 1969; b) Glass, 1972; c) Li Chunlai et al., 1993; d) D'Hondt et al., 1987; Glass et al., 1987; Glass, 1989; Sanfilippo, 1985; e) Glass, 1969, 1972; f) D'Hondt et al., 1987; g) D'Hondt et al., 1987; Glass et al., 1987; Glass, 1989; Sanfilippo, 1985; h) Glass, 1969

微玻璃陨石与玻璃陨石化学成分的差异,主要是因为靶岩成分的不均一所致,说明撞击靶岩在空间上(横向,纵向)是化学不均一的,有些微玻璃陨石甚至可能是某些单矿物或难熔组分的熔体;由于微玻璃陨石比表面积较大,元素的挥发损失更甚,这也可在一定程度上导致微玻璃陨石与玻璃陨石的化学成分差异[2,3].

微玻璃陨石与玻璃陨石在形成方式上也可能有差异,大多数(微)玻璃陨石是靶岩直接熔融的产物,但某些微玻璃陨石可能是在撞击产生的高温气柱(蘑菇云),由挥发物质冷凝而成.玻璃陨石较多地提供了母岩的全岩化学成分信息,而微玻璃陨石的化学成分则主要体现靶岩的难熔组分,反映了靶岩物质的不均一性.

4 微量元素特征

(微)玻璃陨石的微量元素特征提供了大量有关其成因、源区特征和演化历史的信息,因为

(微)玻璃陨石的形成方式决定了其绝大多数元素,尤其是难熔元素的分布较好地继承了母源物质的特征. 但是,由于(微)玻璃陨石的微量元素分析对分析技术要求很高,因而难度较大,许多元素的分析数据不完全甚至缺失,对其成因的讨论造成一定的影响.

(微)玻璃陨石 REE 含量及配分模式,为探讨其母源物质类型提供了最强有力的证据. 研究表明,玻璃陨石富含轻稀土,且多呈 Eu 负异常(象牙海岸群除外),从图 2 可看出,玻璃陨石 REE 分布模式接近地壳和地球岩石,而与月海玄武岩截然不同,这一结果说明玻璃陨石是地球物质的熔融物,而不赞成玻璃陨石的月球成因观点. 作为地表广布的岩石类型,尽管花岗岩的 REE 配分模式与玻璃陨石相似,但其 REE 含量,尤其是轻稀土元素含量高于(澳亚群)玻璃陨石;流纹岩的稀土含量低于玻璃陨石;只有地表沉积岩的 REE 含量和分布模式均与玻璃陨石相近(页岩+粘土)的 REE 模式类似于贝迪亚斯石(Bediasites),亚杂砂岩的 REE 含量和分布模式与澳亚群玻璃陨石相似,因此,REE 特征支持玻璃陨石的母源物质是地球沉积岩[1, 52~54].

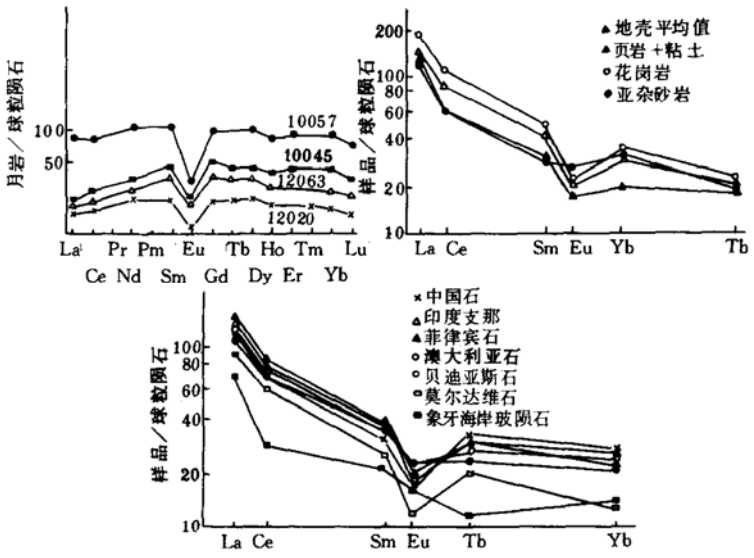

图 2　玻璃陨石、月岩、地球物质的稀土配分模式图
(据欧阳自远, 1988)

表 4 还尽可能多地列出了其他微量元素的含量,其中 Sc, V, Cr, Mn, Co, Ni, Cu, Rb, Sr, Zr, Cs, Ba, REE, Hf, Th 和 U 的数据较完整,其他元素的分析数据较少. 研究显示, Li, Be, B 和 F 等元素的含量与地表沉积物相似,而与火山玻璃相差较大; Becker 和 Manuel, Moore 等, Weinme 和 Koeberl 等的研究表明,熔融型玻璃陨石的极挥发性元素存在亏损,其含量低于地表相应沉积岩[55~57],这表明玻璃陨石在空中飞行熔融过程中产生了分馏. 某些亲铁元素(如铂族元素)含量特征表明,有些玻璃陨石受到陨石物质的污染.

微玻璃陨石的微量元素数据较少,这主要是因为微玻璃陨石样品较难获得,而且少量样品的微量元素的分析测定较困难. 进行微量元素分析时微玻璃陨石样品有两种组合方法: (1) 用多颗微玻璃陨石组成一个组合样品作仪器中子活化(INAA)分析[21, 22, 25]; (2) 用单颗微玻璃陨石作 INAA 分析[3]. 有限的分析数据(参考表 6)表明,组合样品的微量元素含量与玻璃陨石相近,而单颗粒微玻璃陨石的微量元素含量有很大的离散性,与玻璃陨石相差较大,甚至存在 Eu 正异常. 这些数据的离散性,可能说明其母源物质中难熔组分较富集,甚至可能就是单一矿物质点(如长石类矿物)的熔融物.

表4 玻璃陨石的微量元素数据(单位:μg/g)[a)]

	澳大利亚石	印支石	菲律宾石	莫尔达维亚石	象牙海岸玻璃陨石	贝迪亚斯石	佐治亚石	Irghizites	富硅 Zhamanshinites
Li	40.0[6)]	47.1[6)]	–	42.0[6)]	43[4)]	–	–	–	26[6)]
Be	2.2[18)]	2.2[18)]	2.6[18)]	1.9[18)]	1.2[4)]	–	–	–	–
B	19[9)]	24[9)]	39[9)]	19[9)]	11[4)], 15[9)]	18[9)]	–	–	–
C	100[20)]	60[20)]	55[20)]	160[20)]	–	150[20)]	–	–	–
F	36[7)], 18[20)]	46[7)], 34[20)]	27[20)]	39[20)]	–	14[21)], 12[20)]	–	61[8)]	72[8)]
P	300[22)]	–	–	–	202[4)]	–	–	–	–
S	2.9[20)], 7[20)]	3[20)]	4.3[20)]	–	–	5.7[20)]	–	–	–
Cl	4.3[3)], 7[20)]	1.4[3)], 8[20)]	3.6[3)], 15[20)]	2.1[3)], 10[20)]	–	2.8[3)], 11[20)]	–	128[8)]	170[8)]
Sc	13[1)]	10.5[1)]	11.5[1)]	4.93[2)]	17[4)]	13[11)]	6.9[11)]	8.8[1)]	15[1)]
V	83[1)]	63[1)]	84[1)]	32[13)]	132[4)]	–	46[30)]	46[1)]	117[1)]
Cr	145[1)], 72[14)]	63[1)], 90[14)]	100[1)]	22[2)]	327[4)]	49[11)]	22[11)]	170[1)], 260[8)]	92[1)], 49[8)]
Mn	670[13)]	690[13)]	–	620[13)]	500[4)]	300[21)]		600[8)]	700[8)]
Co	25[1)]	11[1)]	13.5[1)]	4.45[2)]	21[4)]	13.5[11)]	6.7[11)]	73[1)], 91[8)]	16[1)], 8.6[8)]
Ni	105[1)], 43[14)]	19[1)], 44[14)]	50[1)]	17[2)], 15[14)]	129[4)]	–	–	1 200[1)]	40[1)]
Cu	6.5[1)]	4[1)]	10[1)]	5.4[17)]	17[4)]	12[17)]	3.2[17)]	24[1)]	36[1)]
Zn	2.0[13)]	5.7[13)]	–	26[13)]	–	–	–	–	16[27)]
Ga	8.4[22)], 0.9[24)]	8.2[24)]	7.1[24)]	5.4[25)]	9.8[24)]	11[17)]	9[17)]	–	–
Ge	0.06[24)]	0.21[24)]	0.4[24)]	0.09[25)]	0.35[24)]	0.13[26)]	0.23[26)]	–	–
As	–	–	–	–	–	0.9[21)]	–	–	4.7[8)], 13[10)]
Se	0.001 9[7)]	0.000 74[7)]	–	–	–	–	–	–	0.001 8[7)]
Br	0.18[3)]	0.23[3)]	0.13[3)]	0.09[3)]	–	0.21[3)], 0.1[21)]	–	–	0.4[8)]
Rb	80[6)]	130[6)]	–	130[2)], 117[6)]	69[4)]	66[11)]	66[11)]	38[8)]	118[8)]
Sr	200[22)]	90[26)]	100[26)]	134[2)]	303[4)]	125[11)]	160[11)]	–	630[10)], 127[27)]
Y	31[1)]	29[1)]	28[1)]	2[17)]	17[4)]	25[17)]	20[17)]	17.5[1)]	33.8[1)]
Zr	264[1)]	252[1)]	280[1)]	225[2)]	116[4)]	230[11)]	160[11)]	351[1)]	272[1)]
Nb	18.7[1)]	19.6[1)]	18.8[1)]	–	–	20[17)]	–	12.5[1)]	16.8[1)]
Mo	0.3[1)]	0.3[1)]	0.3[1)]	–	–	–	–	0.40[1)]	0.73[1)], 3.6[10)]
Ru	0.30[13)]	0.28[13)]	–	0.29[13)]	–	–	–	–	0.21[13)]
Pb	0.001[15)]	–	–	–	–	–	–	–	–
Ag	–	–	–	–	1.0[4)]	2[17)]	–	–	–
Cd	0.01[15)]	–	–	–	–	–	–	–	–
Sn	1.3[1)]	0.9[1)]	1.7[1)]	–	–	–	–	0.75[1)]	3.1[1)]
Sb	0.06[7)]	0.5[7)]	0.33[29)]	0.61[2)]	–	0.05[21)]	–	0.25[8)]	0.50[8)]
I	0.22[3)]	0.56[3)]	0.26[3)]	0.19[3)]	–	0.17[3)]	–	–	–
Cs	5.7[1)]	6.5[1)]	6.7[1)]	13.1[2)]	2.3[4)]	2.0[11)]	1.0[11)]	2.6[1)]	7.8[1)], 3.7[8)]
Ba	356[1)]	360[1)]	390[1)]	705[2)]	650[5)]	470[11)]	620[11)]	527[1)]	347[1)]
La	36.9[1)]	36.5[1)]	36.2[1)]	30.1[2)]	–	35[11)]	19.6[11)]	19.7[1)]	34[1)], 18.2[8)]
Ce	78.6[1)]	73.1[1)]	74.8[1)]	53.8[2)]	45.2[5)]	76[11)]	43[11)]	44.2[1)]	83.6[1)], 50.1[8)]
Pr	9.0[1)]	8.80[1)]	8.76[1)]	–	–	–	–	4.53[1)]	8.98[1)]
Nd	35.0[1)]	33.2[1)]	34.5[1)]	24.1[2)]	24.9[5)]	20[21)]	–	18.7[1)]	34.1[1)], 16.8[8)]
Sm	6.10[1)]	6.60[1)]	6.74[1)]	4.96[2)]	4.59[5)]	7.2[11)]	4.03[11)]	3.78[1)]	6.95[1)], 4.1[8)]
Eu	1.17[1)]	1.22[1)]	1.28[1)]	0.88[2)]	1.13[5)]	1.58[11)]	0.97[11)]	0.80[1)]	1.56[1)], 0.99[8)]
Gd	5.35[1)]	5.24[1)]	5.92[1)]	3.20[2)]	3.57[5)]	–	–	3.46[1)]	6.47[1)]
Tb	0.84[1)]	0.85[1)]	0.88[1)]	0.57[2)]	–	0.97[11)]	0.59[11)]	0.60[1)]	0.97[1)], 0.69[8)]
Dy	5.17[1)]	5.58[1)]	5.44[1)]	2.74[12)]	2.76[5)]	3.6[21)]	–	3.45[1)]	5.63[1)], 3.8[8)]
Ho	0.97[1)]	1.03[1)]	1.12[1)]	0.71[2)]	–	–	–	0.67[1)]	1.12[1)]
Er	2.90[1)]	2.91[1)]	3.32[1)]	–	1.36[5)]	–	–	1.89[1)]	3.29[1)]

（续表 4）

	澳大利亚石	印支石	菲律宾石	莫尔达维亚石	象牙海岸玻璃陨石	贝迪亚斯石	佐治亚石	Irghizites	富硅 Zhamanshinites
Tm	–	–	–	0.24[2)]	–	–	–	–	–
Yb	2.80[1)]	2.90[1)]	3.01[1)]	1.83[2)]	1.68[5)]	3.0[11)]	1.73[11)]	1.90[1)]	3.4[1)], 1.98[8)]
Lu	0.44[12)]	0.54[12)]	0.39[28)]	0.24[2)]	0.12[28)]	0.47[11)]	0.19[11)]	0.26[8)]	0.35[8)]
Hf	7.1[1)]	6.95[1)]	7.95[1)]	5.71[2)]	–	6.7[11)]	4.7[11)]	8.66[1)]	6.3[1)]
Ta	1.2[13)]	1.6[13)]	–	0.54[2)]	–	0.60[21)]	–	0.82[8)]	0.53[8)]
W	0.39[1)]	0.29[1)]	0.54[1)]	1[2)]	–	–	–	0.17[1)]	0.73[1)]
Re	0.000 005[15)], 0.000 21[15)]	–	0.000 38[16)]	–	–	–	–	–	–
Os	0.002[15)], 0.000 3[13)], 0.000 05[15)]	0.00 05[13)]	–	0.002[13)]	–	–	–	–	0.001[13)]
Ir	0.002[15)], 0.00018[13)], 0.000 02[15)]	0.000 8[13)]	–	0.000 07[16)], 0.000 08[13)]	–	–	–	–	0.000 12[13)]
Au	0.002 2[13)]	0.002[13)]	–	0.006[13)]	–	–	–	–	0.006 7[10)], 0.002 9[13)]
Hg	0.001 6[17)]	–	–	–	–	–	–	–	–
Tl	–	–	0.08[1)]	–	–	–	–	–	0.43[1)]
Pb	5.0[1)]	1.6[1)]	10.5[1)]	6[23)]	14[4)]	–	–	2.9[1)]	26[1)]
Bi	–	–	0.03[1)]	–	–	–	–	0.04[1)]	0.12[1)]
Th	13.7[1)]	14.0[1)]	15.6[1)]	10.4[2)]	3.85[19)]	7.6[11)]	4.9[12)]	5.98[1)]	10.3[1)], 7.8[8)]
U	2.1[1)]	2.07[1)]	3.49[1)]	2.35[2)]	0.93[19)]	2.0[11)]	1.25[11)]	1.02[1)]	2.97[1)], 1.50[8)]

a) 1) Taylor & McLennan, 1979; 2) Luft, 1983; 3) Becker & Manuel, 1972; 4) Cuttita et al., 1972; 5) Schnetzler et al., 1967; 6) Koeberl et al., 1984; 7) Koeberl et al., 1984; 8) C. Koeberl & K. Fredriksson in preparation; 9) Mills, 1968; 10) Bouska et al., 1981; 11) Haskin et al., 1982; 12) Koeberl et al., 1985; 13) C. Koeberl, unpublished data; 14) Koeberl et al., 1985; 15) Morgan, 1978; 16) Morgan et al., 1979; 17) O'Keefe, 1976; 18) Pal et al., 1982; 19) Yellin et al., 1983; 20) Moore et al., 1984; 21) Weinke & Koeberl, 1985; 22) Taylor 1966; 23) Tilton, 1958; 24) Cohen, 1960; 25) Cohen, 1963; 26) Schnetzler & Pinson, 1963; 27) Van Patter et al., 1981; 28) Bouska & Randa, 1976; 29) Tanner 7 Ehmann, 1967; 30) Dod et al., 1985

5　(微)玻璃陨石的年龄

玻璃陨石的形成年龄一般由K-Ar法和裂变径迹法测定，表5列出了4个玻璃陨石群的形成年龄．澳亚群玻璃陨石的形成年龄研究最为详细，但其数据的分散性也最大，这可能有两种原因：(1) 这些年龄数据可能反映的是不同测年方法之间及其本身的分析误差；(2) 这些年龄数据可能确实反映了不同地域玻璃陨石形成年龄的差异，也就是说澳亚群不同地域的玻璃陨石是年龄相近的不同撞击事件所形成的．Fleischer 甚至测得一块 H-Na/K 澳大利亚石的年龄为 4 Ma[58]，Storzer 和 Wagner 也曾报道过一块澳大利亚石的年龄为 0.83 Ma[59]，但一般认为，澳亚区玻璃陨石的形成年龄为约 0.7 Ma；象牙海岸群玻璃陨石的形成年龄为约 1.1 Ma；莫尔达维石的形成年龄为 15～14 Ma；北美群为 34～32 Ma.

理论上，微玻璃陨石的形成年龄应与相应的玻璃陨石一致，但由于微玻璃陨石样品有限和粒度甚小，至今无人对其进行过同位素年龄和裂变径迹年龄的测定．微玻璃陨石的形成年龄，

是根据其在地层中赋存层位的古地磁年龄(和沉积物的沉积速率)求得的. 由于新生代古地磁地层学的发展已相当成熟,古地磁年龄系统已非常完善,由此求得的微玻璃陨石沉降年龄,即形成年龄是可信的.

表5 玻璃陨石的形成年龄(单位:Ma)

散落群	玻璃陨石	K-Ar法	裂变径迹法	数据来源
澳大利亚-东南亚群	澳大利亚石	0.72±0.06	0.7±0.1	Gentner et al, 1969
	印度支那石	0.73±0.06	0.7, 0.78	Fleischer & Price, 1964
	菲律宾石	0.70±0.07	0.63, 0.78	Fleischer & Price, 1964
	泰国石	0.72±0.06		
	中国石		0.687~0.733	严正等, 1979
			0.640±0.006 7	刘顺生等, 1985
			0.755±0.082	刘顺生等, 1985
			0.644±0.04	李斌, 1982
象牙海岸群	象牙海岸石	1.1±0.1	1.02±0.1	Gentner et al., 1967
捷克斯洛伐克群	莫尔达维石	14.7±0.7	14.1±0.6, 16.9±1.7	Fleischer & Price, 1964
北美群	贝迪亚斯石	34.2	34.9, 32.1 34.2±2.0, 36.4±1.5	Fleischer & Price, 1964 Gentner et al., 1969

象牙海岸微玻璃陨石富集层,与古地磁哈拉米洛(Jaramillo)事件相当,其沉降年龄为约0.9 Ma,与裂变径迹和K-Ar法测得的年龄(1.1Ma)相当;澳亚群微玻璃陨石的赋存年龄与B/M(Brunhes/Matuyama)界线相当,沉降年龄为约0.73 Ma,亦与K-Ar和裂变径迹年龄相当[2,3].

北美群微玻璃陨石在赤道太平洋、墨西哥湾和大西洋西部的许多钻孔(DSDP sites 292, 612, 462, 69A, 70A, 94, 149, 166, 167, 216, 291, 315A, E67, RC9-58, Barbados及西班牙Molino de Cobo)中均有发现,某些产地微玻璃陨石的赋存层位常与Ir异常伴生[7]. 引人注目的是,在这些深海钻孔中,至少有3个微玻璃陨石层,且各层微球粒的化学成分存在一定的差异. 根据古地磁年龄和沉积速率推算,其沉降年龄为38~32 Ma[60,61].

以上论述表明,沉积物中微玻璃陨石的时间分辨率比放射性方法和裂变径迹方法高,而且沉积物可以记录撞击事件发生时的许多细节,这对认识玻璃陨石的成因有很大的启示. 对于地层古地磁年龄系统,微玻璃陨石沉积年龄的精度,主要受以下几个因素的影响:

(1) 沉积物的沉降速率. 因为古地磁年龄时标系统是不连续的,两个年龄值之间的年龄,一般须由沉积速率求得,而平均沉积速率可用测年点间的沉积物厚度与年龄间隔来求得. 但由于撞击事件发生后,大量冲击尘埃的加积,会使很短的时间间隔内,沉积速率大大增加,这一因素使所得的年龄值大于真实年龄值. 因此用平均沉降速率求得的沉降年龄,应大于实际的形成年龄.

(2) 微玻璃陨石的原始层位. 水相沉积物中,由于底栖生物的扰动,会使微玻璃陨石层位发生变化,也会使玻璃陨石发生分散,从而难以精确确定其原始的层位. 同时,从微玻璃陨石形成、沉降到在水相体系中沉积及成岩压实诸过程,对微玻璃陨石赋存层位的扰动和时间差,使由地层中微玻璃陨石赋存层位求得的沉降年龄,实际上小于其实际的形成年龄.

(3) 地磁倒转界线的位置. 详细的研究表明,在千或万年时间尺度上,地磁倒转事件并不是一个突发事件,而是在万年时间尺度上的一个变化过程,这期间包括极性、地磁倾角、地磁偏角和地磁强度的不规则变化,以及磁极性正负的不规则反复. 以B/M界线为例,其极性事件

延续了至少 5 ka(C. A. Burns, 1989), 甚至 32 ka(Donghuai Sun, 1993), 这段时间, 在深海沉积物和黄土剖面的沉积厚度可达 1～2 m. 地层学工作者对地磁倒转现象和理论的认识的不一致性, 以及工作精细程度的不一致, 使得在古地磁地层剖面上, B/M 界线的位置存在不一致性, 如对 B/M 界线的位置, 不同时期不同作者的划定位置有很大的变化, 从 L9, S8, L8, S7 甚至 L7 均有. 因此, 地层剖面地磁倒转界线位置的不确定性, 也是影响微玻璃陨石沉降年龄精度的重要因素.

6　同位素特征

欧阳自远[1]、Taylor 和 Epstein[62], Tilton[63]和 Wampler 等(1969)曾对玻璃陨石的 Pb, O 和 H 同位素作过研究, 认为玻璃陨石的 δD, δ^{18}O 及 $^{207}Pb/^{204}Pb$, $^{206}Pb/^{204}Pb$, $^{208}Pb/^{207}Pb$ 与地球物质相似, 而与月球物质有截然的差别(表 6), 因此认为玻璃陨石的母源物质应是地球物质. Wampler 等(1969)甚至根据 Pb 同位素特征, 判断出莫尔达维石源于德国的 Ries 撞击坑; 象牙海岸玻璃陨石源于加纳的 Bosumtwi 撞击坑.

表 6　玻璃陨石的铅、氧和氢同位素特征及其与地球和月球物质的对比

	δD/‰	δ^{18}O/‰	$^{207}Pb/^{204}Pb$	资料来源
玻璃陨石	−165～+51	+9.5～+11.5	15.6～15.75	Taylor & Epstein, 1969; Tilton, 1958
地球物质	−20～−150	+5～+10	15～16	霍夫斯, 1976
月球物质	−169～−870	+3.91～+6.33	140～1050	中国科学院地球化学研究所, 1979

Schnetzler[64, 65]对玻璃陨石的 Rb-Sr 同位素进行了较系统的研究(图 3), 认为玻璃陨石的 $^{86}Sr/^{87}Sr$ 比值与地球岩石相似. 他们甚至发现, 莫尔达维石与里斯坑玻璃、象牙海岸玻璃陨石与 Bosumtwi 坑玻璃几乎落在同一条等时线上, 表明具有相同的母源物质, 因而认为里斯坑和 Bosumtwi 坑分别是莫尔达维石和象牙海岸玻璃陨石的源坑.

Shaw[66]和 Wassenberg 及 Ngo 等人[67]对玻璃陨石 Rb-Sr 和 Sm-Nd 同位素的详细研究证明, 玻璃陨石具有极大的负值, 且在玻璃陨石群内存在相当大的变化; 而 ε_{Sr}(O)具有极大的正值, 在玻璃陨石群内也是不均一的. 化学、微量元素和同位素成分的证据都表明, 玻璃陨石的母源物质来源于地球古老的前寒武纪地壳沉积物. 澳亚群、象牙海岸群、莫尔达维石群和北美群母源物质的形成年龄分别为 1.15, 1.91, 0.9 和 0.65 Ga, 表明撞击靶岩区均为前寒武纪陆壳物质或其风化产物, 而不是洋壳物质(图 4).

Tilles[68]测定了玻璃陨石的 Si 同位素, 发现澳大利亚石的 $\delta(^{30}Si/^{28}Si + ^{29}Si)$为 −0.17～0.15, 中国石为 −0.20～0.15, 莫尔达维石为 −0.17～0.1, 贝迪亚斯石为 0.37±0.15, 表明玻璃陨石的 Si 同位素与大多数岩浆岩有较大的差别.

Tera 等、Pal 等、Yiou 等、Englert 等、Cressy 等测定了玻璃陨石的某些宇宙成因核素(^{26}Al, ^{10}Be, ^{56}Mn)[69～73], 这些数据也显示玻璃陨石的母源物质是陆壳(包括陆缘)物质, 而不是洋壳物质; 澳大利亚石的^{26}Al 含量为(0.48±0.26) dpm/kg, 这一含量可以是宇宙射线子体在地表与硅铝质的玻璃陨石反应生成, 没有证据发现玻璃陨石在地外空间经历过宇宙射线的照射, 因此认为它们应是地球撞击熔融的产物.

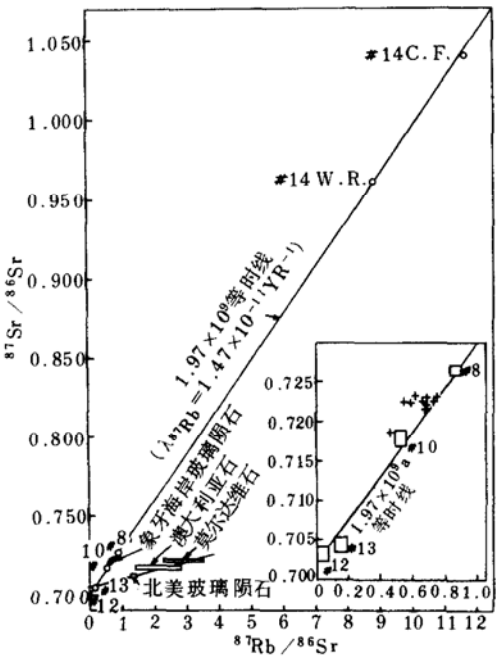

图3 玻璃陨石的Rb-Sr同位素特征[64, 65]

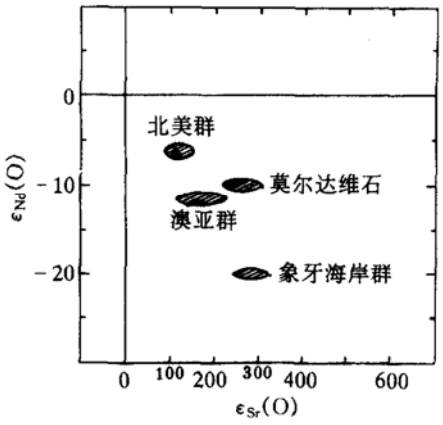

图4 玻璃陨石的Sr-Nd同位素特征[67]

7 其他方面的研究

玻璃陨石的穆斯鲍尔谱研究证明,与火山玻璃不同,玻璃陨石中Fe^{3+}/Fe^{2+}比值为0.06~0.26(平均0.13),Fe主要以二价铁(Fe^{2+})存在,三价铁(Fe^{3+})含量很低[2, 7, 74, 75]. 电子顺磁共振谱(EMR)的测定,表明玻璃陨石是在极低的氧逸度环境下,经高温熔融后极速淬火而形成的[76]. Weeks等人[76]的工作还证明,利比亚沙漠玻璃和玻璃陨石的熔融条件是不同的.

玻璃陨石中气体包裹体成分的测定[77]证明,玻璃陨石(印度支那石和莫尔达维石)的N/O比值与大气比值大致相当;Muong Nong型玻璃陨石[1]的气泡主要由O_2, N_2和CO_2组成,且具有大气成分的比值,说明它们是在地球大气环境中形成的. 研究还发现,利比亚沙漠玻璃的包体虽含有N_2和CO_2,但没有O_2成分,可能经历过比较特殊的形成过程.

Gilchrist等人[78]用红外光谱仪成功地测定了玻璃陨石的水含量,发现玻璃陨石含水量为0.012%,且水的分布不均一,这一数值远远低于地球黑曜岩,而又远远高于月岩中水的含量(几乎为0)[4,5].

Klein[79]用Muong Nong型层状玻璃陨石进行了流体和结晶行为方面的研究,发现在1 320℃温度下,玻璃陨石的粘度为2×10^4P,在900~1 300℃范围内,玻璃陨石流体没有任何结晶行为,但当将玻璃陨石与合成玻璃样品一起加热时,在此温度范围内,发现方石英的析出,从两相结合面向玻璃陨石相生长. 比Muong Nong玻璃陨石SiO_2含量低的微玻璃陨石组合样品的研究表明,由于粘度系数的限制,这种成分不能形成Muong Nong玻璃陨石大小的玻

1) Muong Nong型玻璃陨石属澳亚玻璃陨石群,主要分布在泰国和老挝边境地区,是表观上具有(似)层状构造的块状玻璃陨石

璃. 结晶行为和热流计算表明,具 Muong Nong 玻璃成分的玻璃可以形成比现有玻璃陨石还大的个体;微玻璃陨石的形成需要极高的冷却速率.

Kleinmann[37]对玻璃陨石中磁性球粒进行了研究,发现在玻璃陨石中存在 3 种磁性球粒:(1) 玻璃基质中以纯铁为晶核的磁铁矿骸晶;(2) 与方铁矿交互生长的磁铁矿;(3) 含有细粒磁铁矿骸晶和与方铁矿交互生长的自形磁铁矿的单一玻璃球. 这些现象表明玻璃陨石经历了高温熔体的快速冷却过程.

现今发现的 4 次玻璃陨石的年龄都与重大的地磁倒转界线相吻合,其中最明显的是澳亚(微)玻璃陨石事件与 B/M 界线,象牙海岸玻璃陨石事件与哈拉米洛(Jaramillo)地磁倒转事件的发生时间一致,而且有证据表明,玻璃陨石事件也常与地球古气候发生突然变化的时间吻合,因此不少学者都认为它们之间的时间关系不是偶然的,而可能存在着一个必然的联系[80~85].

Muller 和 Morris 的理论[86]认为,地球磁场会受到由于撞击作用产生的气候突然变化的影响,当撞击作用发生时,大量的尘埃抛向大气圈,会使太阳辐射量降低,从而引起地球的突然变冷. 气温的下降,又会使大量海水突然大量沉降于极地地区,大大地增加极地冰量,从而突然改变地球的自转速率,进而干扰地磁场的生成,致使地磁发生倒转. 这一理论尚需进一步证实和完善.

8　中国在(微)玻璃陨石方面的研究进展

如上所述,我国有关于玻璃陨石的最古老的文字记载[8],但我国学者对玻璃陨石的科学研究起步较晚. 1963 年,李达明首次对海南岛和雷州半岛的玻璃陨石进行了实地考察和样品收集[87],但系统、全面的科学研究则始自 70 年代后期.

1976 年,欧阳自远[88]对海南岛玻璃陨石进行了微量元素分析,得出了我国第一批有价值的分析数据,并把海南岛玻璃陨石划归澳大利亚～东南亚撒布区,解决了海南岛(雷州半岛)玻璃陨石的归属等基本问题.

我国对玻璃陨石最为系统、全面的研究和论述见于欧阳自远所著《天体化学》[1],它以详实的资料和数据,综合论述了玻璃陨石的分布、岩石学特征、化学成分、同位素组成、形成年龄及成因论据. 袁宝印[89]和许汉卿[90]对海南岛和琼州地区的玻璃陨石进行过化学成分测定和成因的讨论. 李斌[1)]对世界各地的玻璃陨石进行了年代学、化学组成和成因的研究,分析样品涵盖了已发现的所有玻璃陨石群,尤其是对 9 个中国玻璃陨石的探针分析、中子活化和裂变径迹测年工作,取得了中国玻璃陨石系统的分析数据,是迄今对中国玻璃陨石最全面的研究.

玻璃陨石的研究,带动了中子活化,尤其是裂变径迹测年方法等分析技术在我国的开展、应用和发展. 1976 年,中国科学院原子能研究所和地球化学研究所[91]用裂变径迹法对玻璃陨石的形成年龄进行了测定. 其后,严正[92]和刘顺生[93]获得了海南岛和琼州地区玻璃陨石裂变径迹年龄的系统数据,其年龄值的精度远远高于国外同行的分析数据,并与其他测年方法(K-Ar 法)的数据吻合(详见表 5).

此外,我国学者对玻璃陨石的形成条件和鉴定特征做了一些富有特色的研究工作,并提出了一些富有创建性的成因观点. 1989 年,林文祝和欧阳自远[94]根据熔体在核爆炸产生的非

1) 李 斌. 玻璃陨石的化学组成及其成因. 中国科学院地球化学研究所硕士论文,1982

平衡条件下的化学成分特性，提出玻璃陨石是由靶岩各组成岩石混合熔融而成，证实了核爆炸玻璃与玻璃陨石在形成方式上的一致性，并认为澳亚玻璃陨石群存在着4个不同的源岩和源坑．林文祝等人[95]利用红外光谱法，对火山玻璃、核爆炸玻璃和玻璃陨石的水含量进行了对比研究，提出了玻璃陨石的特征谱线和鉴定特征．林文祝[96]利用热释光技术对火山玻璃、核爆炸玻璃和玻璃陨石进行了对比研究，指出冲击玻璃与火山玻璃热历史的截然区别．林文祝等人[97]和李春来[98]根据(微)玻璃陨石的年龄、分布、成分、同位素组成和空气动力学特征等，探讨了玻璃陨石的成因和源区特征，提出彗星撞击是玻璃陨石形成的最有可能的方式．

微玻璃陨石是在深海沉积物中发现的，陆相沉积物由于沉积的不连续性和沉积速率过大，不适合于微玻璃陨石的收集和研究工作．黄土是一种风成沉积物，在我国发育良好．由于黄土堆积物沉积连续性好、岩性均一，易于连续采样和分离，我国学者在黄土中进行了一系列微玻璃陨石的收集和研究工作．1991年，袁宝印等人[99]报道了黄土底部层位微玻璃陨石的证据．1992年，李春来等[3]在我国黄土地层中发现了澳亚群微玻璃陨石，并与深海沉积物中微玻璃陨石进行了对比研究，确定了黄土中微玻璃陨石赋存层位和沉降年龄，详细研究了其物理性质、化学成分和成因类型，探讨了微玻璃陨石的成因和源区特征，扩展了澳亚群微玻璃陨石的分布范围；其后，他们以黄土中微玻璃陨石的发现和研究为契机，对微玻璃陨石赋存层位的黄土样品进行了详细的地球化学和古气候研究，在界线地层位置发现了碳同位素[83]、磁化率[84]、粒度分布[85]和微量元素[100]的异常，证实了撞击效应所引起的古气候的变化及其特征．徐和聆等人[101]在蓝田段家坡黄土剖面的相应层位也找到了微玻璃陨石和其他撞击球粒．彭汉昌等人[102]报道了深海沉积物约230ma层位的微玻璃陨石，并讨论了玻璃陨石事件与地磁事件之间的关系．

参 考 文 献

1 欧阳自远．天体化学．北京：科学出版社，1988

2 Glass B P. Introduction to Planetary Geology. Cambridge, London, New York, New Rochelle, Melbourne, Sydney: Cambridge University Press, 1982. 145～172

3 李春来，欧阳自远，刘东生，等．黄土中微玻璃陨石和微玻璃球的发现与意义．中国科学，B辑，1992，11：1 210～1 224

4 King E A, Arndt J. Water content of Russian tektites. Nature, 1977, 269:48～49

5 Friedman I. The water, deuterium, gas, and uranium content of tektites. Geochim Cosmochim Acta, 1958, 14: 316

6 Grass F, Koeberl C, Wiesinger G. Mossbauer spectroscopy as a tool for the determination of Fe^{3+}/Fe^{2+} ratios in impact glasses. Meteoritics, 1983, 18:305～306

7 Koeberl C. Geochemistry of tektites and impact glasses. Ann Rev Earth Planet Sci, 1986, 14: 323～350

8 章鸿钊．石 雅．上海：商务印书馆，1937

9 Mayer J. Ueber die Bohmischen Gallmeyarten, die grune Erde der Mineraloge, die Chrysolithen von Thein and die Steinart von Kuchel, Bohmischen Gesell. Wiss Abb Jahr, 1787, 256～268, Prague und Dresden

10 Darwin C. Geological Observations on the Volcanic Islands and Parts of South America Visited during the Voyage of H.M.S. Beagle, 1844, 44～45 (Republished by Appleton, New York, 1891.)

11 Barnes V E. Tektite research 1936～1990. Meteoritics, 1990, 25: 149～159

12 Glass B P. Microtektites in deep～sea sediments. Nature, 1967, 214: 372～374

13 Glass B P. Chemical composition of Ivory Coast microtektites. Geochim Cosmochim Acta, 1969, 33: 1 135～1 148

14 Glass B P. Bottle green Microtektites. J Geophys Res, 1972, 77: 7 057～7 064

15 Glass B P, Baker R N, Storzer D, et al. North American microtektites from the Caribbean Sea and their fission track age.

Earth Planet Sci Lett, 1973, 19: 184～192

16 Glass B P. High-Magnesium glasses associated with North American microtektites in a Caribbean deep-sea sediment core. Meteoritics, 1974, 9: 345～347

17 Glass B P. Australasian Microtektites and stratigraphic age of the Australites. Geol Soc Amer Bull, 1978, 89: 1 455～1 458

18 Glass B P. Glassy objects (microtektites?) from deep sea sediments near the Ivory Coast. Science, 1968, 161: 891～893

19 Glass B P, Muenow D W, Aggrey K F. Further evidence for the impact origin of tektites. Meteoritics, 1986, 21: 369～370.

20 Glass B P, Burns C A, Lerner D H, et al. North American tektites and microtektites from Barbados, West Indies. Meteoritics, 1984, 19: 228

21 Frey F A, Spooner C M, Baedecker P A. Microtektites and tektites: a chemical comparison. Science, 1970, 170: 845～847

22 Frey F A. Microtektites: a chemical comparison of bottle green microtektites, normal microtektites, and tektites. Earth Planet Sci Lett, 1977, 35: 43～48

23 Cassidy W A, Glass B P, Heezen B C. Physical and chemical properties of Australasian Microtektites. J Geophys Res, 1969, 74: 1 008～1 025

24 Bouska V, Povondra P, Florenskij A C, et al. Irghizites and Zhamanshinites: Zhaman-shin crater, USSR. Meteoritics, 1981, 16: 171～184

25 Taylor S R, McLennan S M. Chemical relationships among irghizites, zhamanshinites, Australasian tektites, and Henbury impact glasses. Geochim Cosmochim Acta, 1979, 43: 1551～1565

26 Glass B P. Zhamanshin crater, a possible source of Australasian tektites? Geology, 1979, 7: 351～353

27 Koeberl C, Kluger F, Kiesl W. Zhamanshin and Aouelloul impact glasses: major element chemistry, correlation analyses, and parent material. Chem Erde, 1985, 44: 47～65

28 Koeberl C. The Cuban Tektite revisted. Meteoritics, 1988, 23: 161～165

29 Gaarlick G D, Naeser C, O'Neill J R. A Cuban tektite. Geochim Cosmochim Acta, 1971, 35: 731～734

30 Barnes V E, Underwood J R. New investigations of the strewn field of Libyan Desert Glass and its petrography. Earth Planet Sci Lett, 1976, 30: 117～122

31 Jessberger E, Gentner W. Mass spectrometric analysis of gas inclusions in Muong-Nong glass and Libyan Desert Glass. Earth Planet Sci Lett, 1972, 14: 221～225

32 Saul J M, Cassidy W A, A possible new tektite occurrence in south West Africa. Meteoritics, 1970, 5: 220

33 King E A. Tektites from near Glenmora, Rapides Parrish, Louisiana? Meteoritics, 1970, 5: 205～206

34 Chao E C T. The petrographic and chemical characteristics of tektites. In: O'Keefe J A ed. The Origin of Tektites, Chicago: The University of Chicago Press, 1963, 51～94

35 O'Keefe J A. Tektites and Their Origin. New York: Elsevier, 1976.

36 Chao E C T, Dwornik E J, Merrill C W. Nickel-iron spherules from Aouelloul glass. Science, 1966, 154: 759～765

37 Kleinmann B. Magnetite bearing spherules in tektites. Geochim Cosmochim Acta, 1969, 33: 1113～1120

38 Taylor S R. Chemical composition of Australites. Geochim Cosmochim Acta, 1962, 26: 685～772

39 Taylor S R. Australites, Henbury impact glass, and subgreywacke: a comparison of the abundances of 51 elements. Geochim Cosmochim Acta, 1966, 30: 121～136

40 Chapman D R, Scheiber L C. Chemical investigation of Australasian Tektites. J Geophys Res, 1969, 74: 6737～6776

41 King E A. New data on Georgia tektites. Geochim Cosmochim Acta, 1964, 28: 915～920

42 King E A. Major element composition of Georgia tektites. Nature, 1966, 210: 828～829

43 Cuttitta F, Clarke R S, Carron M K, et al. Martha's Vineyard and Georgia tektites: new chemical data. J Geophys Res, 1967, 72: 1343～1349

44 Koeberl C, Glass B. Chemical composition of North American microtektites and tektite fragments from Barbados and DSDP Site 612 on the continental slope off New Jersey. Earth Planet Sci Lett, 1988, 87: 80～88

45 Bouska V, Benada J, Randa Z, et al. Geochemical evidence for the origin of moldavites. Geochim Cosmochim Acta, 1973,

37: 121～131

46 Koeberl C. Moldavites from Austria. Meteoritics, 1988, 23: 325～333

47 Bouska V, Povondra P. Correlation of some physical and chemical properties of moldavites. Geochim Cosmochim Acta, 1964, 28: 783～791

48 Delano J W, Lindsley D H, Glass B P. Nickel, chromium, and phosphorous abundances in HMg and bottle-green microtektites from the Australasian and Ivory Coast strewn fields. Lunar Planet Sci, 1982, 13: 164～165

49 Cuttitta F, Carron M K, Annell C S. New data on selected Ivory Coast tektites. Geochim Cosmochim Acta, 1972, 36: 1297～1309

50 Schnetzler C C, Philpotts J A, Thomas H H. Rare earth and barium abundances in Ivory coast tektites and rocks from the Bosumtwi crater area, Ghana. Geochim Cosmochim Acta, 1967, 31: 1987～1993

51 Fredriksson K, Glass B P. Microirghizites from a sediment sample from the Zhamanshin impact structure. Lunar Planet Sci, 1983, 14: 209～210

52 Haskin L A, Gehl M. Rare earth distribution in tektites. Science, 1963, 139: 1056～1058

53 Haskin L A, Gonzales-Garcia A, Klein-mann B, et al. A trace element study of tektites and materials from their possible parent craters. Lunar Planet Sci, 1980, 11: 410～412

54 Koeberl C. Trace element correlationships as clues to the origin of tektites and impactites. Chem Erde, 1986, 45: 1～21

55 Becker V J, Manuel O K. Chlorine, bromine, iodine, and uranium in tektites, obsidians, and impact glasses, J Geophys Res, 1972, 77: 6 353～6 359

56 Moore C B, Canepq J A, Lewis C F. Volatile nonmetallic elements in tektites. J Non-Cryst Solids, 1984, 67: 345～348

57 Haskin L A, Braverman M, King E A. Trace element analyses of some North American tektites. Lunar Planet Sci, 1982, 13: 302～303

58 Fleischer R L. Ages of Darmin glass, Macedon glass and Far Eastern Tektites. Geochim Cosmochim Acta, 1969, 33: 1 071～1 074

59 Storzer D, Wanger G A. Australites older than indochinites-evidence from fission track plateau dating. Naturwissenschaften, 1980, 67: 90～91

60 Glass B P, Burns C A. Late Eocene crystal-bearing spherules Two layers or one?. Meteoritics, 1987, 22: 265～279

61 Sanfilippo, A. Late Eocene Microtektites and radiolarian extinctions on Barbados. Nature, 1985, 314: 613～615

62 Tayor H P, Epstein S. Correlations between $^{18}O/^{16}O$ ratios and chemical compositions of tektites. J Geophys Res, 1969, 74: 6834～6844

63 Tilton G R. Isotopic composition of lead form tektites. Geochim Cosmochim Acta, 1958, 14: 323～330

64 Schnetzler C C. Rubidum-Strontium age of the Bosumtwi crater area, Ghana, compared with the age of the Ivory Coast tektites. Science, 1966, 151: 817～819

65 Schnetzler C C. Rubidum-Strontium correlation study of moldavites and Ries crater material. Geochim Cosmochim Acta, 1969, 33: 1 015～1 021

66 Shaw H F, Wasserburg G J. Age and provenance of the target materials for tektites and possible impactites as inferred from Sm-Nd and Rb-Sr systematics. Earth Planet Sci Lett, 1982, 60: 155～177

67 Ngo H H, Wassenburg G H, Glass B P. Nd and Sr isotopic compositions of tektite material from Barbados and their relationship to North American tektites. Geochim Cosmochim Acta, 1985, 43: 1 865～1 867

68 Tilles D. Stable silicon isotope ratios in tektites. Geochim Cosmochim Acta, 1964, 28: 1 015～1 017

69 Tera F, Brown L, Klein J, et al. Beryllium～10 and aluminum-26 in tektites. Meteoritics, 1983, 18: 405～406

70 Pal D K, Tuniz C, Moniot R K, et al. Beryllium-10 in Australasian tektites: evidence for a sedimentary precursor. Science, 1982, 218: 787～789

71 Yiou F, Raisbeck G M, Klein J, et al. $^{26}Al/^{10}Be$ in terrestrial impact glasses. J Non-Cryst Solids, 1984, 67: 503～509

72 Englert P, Pal D K, Tuniz C, et al. Manganese-53 and beryllium-10 contents of tektites. Lunar Planet Sci, 1984, 15: 250～251

73 Cressy P J, Schnetzler C C, French B M. Aouelloul glass: aluminum-26 limit and some geochemical comparisons with sand-

stone. J Geophys Res, 1972, 77: 3 043～3 051
74 Taylor S R. Chemical composition of Australites. Geochim Cosmochim Acta, 1962, 26: 685～772
75 Evans B J, Leung L K. Mossbauer spectroscopy of tektites and other natural glasses. J Phys (Paris), 1979, 40(C2): 489～491
76 Weeks R A, Nasrallah M, Arafa A, et al. Studies of fusion processes of natural glasses by electron magnetic resonance spectroscopy. J Non-cryst Solids, 1980, 38/39: 129～134
77 Muller O, Gentner W. Gas content in bubbles of tektites and other natural glasses. Earth Planet Sci Lett, 1968, 4: 406～410
78 Gilchrist J, Thorpe A N, Senftle F E. Infrared analysis of water in tektites and other glasses. J Geophys Res, 1969, 74: 1 475～1 483
79 Klein L C. Viscous flow and crystallization behavior of tektite glasses. J Geophys Res, 1980, 85: 5 485～5 489
80 Glass B P, Cheeze B. Tektites and geomagnitic reversals. Nature, 1967, 214: 372
81 Glass B P. Possible correlations between tektite events and climatic changes. In: Geologtcal Implications of Impacts of Large Asteroids and Comets on the Earth. Geol Soc Am Spec Pap, 1982, 190: 251～256
82 Schneider D A, Kent D V, Mello G A. A detailed chronology of the Australasian impact event, the Brunhes-Matuyama Geomagnetic polarity reversal, and glodal climate change. Earth Planet Sci Lett, 1992, 111: 395～405
83 Li Chunlai, Lin Wenzhu, Ouyang Ziyuan. Geochemistry of 0.7Ma Microtektite-bearing Loess Layers. I. Stable Carbon Isotope. Chinese Science Bulletin, 1994, 39(19): 1 629～1 633
84 Li Chunlai, Lin Wenzhu, Ouyang Ziyuan. Geochemistry of 0.7Ma Microtektite-bearing Loess Layers. Ⅱ. Magnetic Susceptibility, Chinese Science Bulletin, 1994, 39(23): 1 985～1 988
85 Li Chunlai, Lin Wenzhu, Ouyang Ziyuan. Geochemistry of 0.7Ma Microtektite bearing Loess Layers. Ⅲ. Particle Size. Chinese Science Bulletin, 1994, 39(24): 2 049～2 052
86 Muller O, Morris D. Geomagnetic reversals from impacts on the Earth. Geophys Res Lett, 1986, 13: 1 177
87 李达明. 雷州半岛与海南岛玻璃陨石——雷公墨的调查与初步研究. 地质科学, 1963, (1): 42～49
88 欧阳自远. 海南岛玻璃陨石中某些微量元素组成. 地球化学, 1976, (2): 144～147
89 袁宝印. 海南岛雷公墨(玻璃陨石)起源问题的初步探讨. 地质科学, 1981, (4): 329～336
90 许汉卿. 中国琼州地区玻璃陨石成分的初步研究. 地球化学, 1983, (3): 322～328
91 中国科学院原子能研究所和地球化学研究所协作组. 用裂变径迹法测定白云母和玻璃陨石的年龄. 地球化学, 1976, (2): 148～156
92 严 正. 海南岛玻璃陨石(雷公墨)裂变径迹年龄的测定. 地质科学, 1979, 1: 37～42
93 刘顺生. 裂变径迹年龄测定. 北京: 地质出版社, 1985
94 林文祝, 欧阳自远. 核爆炸玻璃、撞击玻璃和玻璃陨石源岩. 地质科学, 1991, (2): 148～158
95 林文祝, 刘高魁. 击变玻璃和玻璃质岩石的红外光谱研究. 科学通报, 1993, 38(3): 250～253
96 林文祝. 击变玻璃热释光研究. 地质科学, 1997(待发表)
97 林文祝, 欧阳自远, 李春来. 玻璃陨石的彗星撞击成因. 空间科学学报, 1996, 16(增刊): 1～6
98 李春来. 玻璃陨石的成因争论及可能的彗星撞击模型. 矿物岩石地球化学通报, 1997(待发表)
99 袁宝印, 赵慧敏, 张家云. 黄土中微玻璃陨石的发现及其意义. 科学通报, 1989, 22: 1 725～1 728
100 Li Chunlai, Ouyang Ziyuan, Lin Wenzhu. Geochemistry of 0.7Ma Microtektite bearing Loess Layers. Ⅳ. Trace Elements. Chinese Science Bulletin, 1995, 40(5): 395～399
101 徐和聆, 吴锡浩, 邓寄温, 等. 黄土地层中奇异微颗粒的发现与初步研究. 海洋地质与第四纪地质, 1993, 13(3): 57～66
102 彭汉昌, 庄世杰, 刘正坤, 等. 太平洋岩芯微玻璃陨石层的发现和与地磁事件及地磁倒转的联系. 科学通报, 1993, 37(2): 150～153

(1997-04-01 收稿, 1997-05-20 收修改稿)