中 国 科 学
1992年11月 B 辑 第11期

黄土中微玻璃陨石和微玻璃球的发现与意义*

李春来 欧阳自远
(中国科学院地球化学研究所,贵阳 550002)

刘东生
(中国科学院地质研究所,北京 100029)

安芷生
(中国科学院西安黄土与第四纪地质开放研究实验室,西安 710061)

摘 要

首次在陆相沉积物-黄土中发现了16颗微玻璃陨石和3颗陨石消融型Si-Mg微玻璃球. 它们赋存于洛川黄土剖面中B/M界线之上,L8上部层位中,其沉降年龄为0.72—0.724Ma,与深海岩芯中澳-亚群微玻璃陨石的赋存层位一致,黄土中微玻璃陨石呈球状、椭球状、肾状、滴状及不规则状,颜色以微黄褐色,微黄绿色和浅黄棕色为主,少数为浅绿色、白色及无色透明球粒,粒径在65—220μm之间,多具溶蚀痕迹,但仍可见明显的气孔和凹坑,并发育有流动构造和熔渣构造. 据其主量元素成分,黄土中微玻璃陨石可分为普通、瓶绿色和高铝微玻璃陨石三个化学群,其化学成分分别与深海岩芯中相同类型的微玻璃陨石相同. 据其地理位置,赋存层位,沉降年龄及化学成分,这些黄土中微玻璃陨石属澳-亚散落群. 微量元素研究表明,微玻璃陨石具有复杂的形成过程,其母源物质是多来源的.

关键词 黄土、微玻璃陨石、微玻璃球

地外物体高速撞击地球时,其冲击波使地表物质熔融、溅射、快速冷凝形成(微)玻璃陨石,并散落于特定的区域. 因此,(微)玻璃陨石是一种介于地表岩石和地外物体之间的冲击综合过程的产物[1].

与地表找到的块状玻璃陨石不同,微玻璃陨石常指在地层或沉积物中找到的微细玻璃陨石,其粒径常小于1mm. 60年代中期,微玻璃陨石最早发现于印度洋深海岩芯中[2,3]. 20多年来,通过大量深海岩芯的工作,各散落区微玻璃陨石的分布情况已有了一个初步的了解(图1).

大多数陆相沉积物,由于沉积的连续性较差,并经历过风化、侵蚀、搬运和成岩作用,不利于微玻璃陨石的保存,且陆相沉积物的沉积速率远远大于深海沉积物,而微玻璃陨石粒度小、含量少,分选、鉴定非常困难,因此,长期以来,微玻璃陨石都是在深海芯中发现的,在大陆上和陆相沉积物中还从未找到过.

1991-04-17 收稿,1991-08-10 收修改稿
* 国家自然科学基金和中国科学院西安黄土与第四纪地质开放研究实验室资助项目

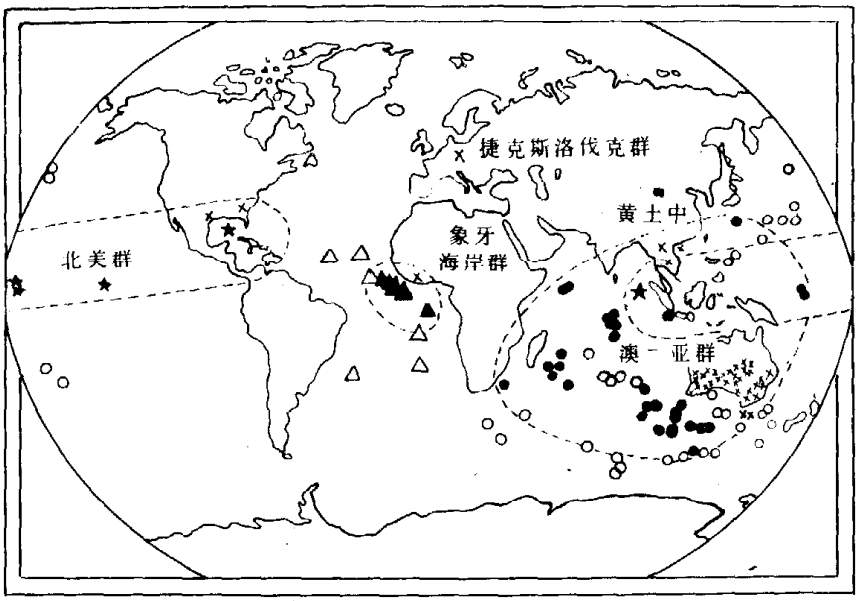

图 1　澳大利亚-东南亚、象牙海岸和北美群微玻璃陨石散落区

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)是据本工作以前所有已知玻璃陨石和微玻璃陨石的产地圈出来的

澳-亚群(微)玻璃陨石是 0.7Ma 前一次撞击事件的产物. 深海岩芯中微玻璃陨石的调查表明，在远离散落区中心 7000—8000km 的深海沉积物中仍发现该群微玻璃陨石[4]，我国黄土高原仅距散落区中心 2000—2500km，在该散落区范围内(图 1)，因此很有可能在黄土高原的地层中找到微玻璃陨石.

黄土是干冷气候下的风成沉积物[5]，与微玻璃陨石的沉积介质(空气)相同，且沉积后风化、搬运、成岩和淋滤作用较弱，有利于微玻璃陨石的保存，黄土-古土壤系列记录了 2.4Ma 以来地表演化的历史，具有沉积的完整性和连续性，有可能保存 0.7Ma 前撞击事件的产物. 黄土成分均一、结构松散，便于连续取样和样品的分选，可能是陆相沉积物中寻找微玻璃陨石的最理想的地质体.

一、采样及样品分选

1. 采样

洛川黑木沟黄土剖面是典型黄土带的标准剖面，地层沉积连续，发育完整，研究程度高，可方便、准确地找到 0.7Ma 前所沉积的黄土层位.

采样剖面从 L3 到 L9 均在一个陡坎上，出露良好，沉积连续，没有滑坡的影响，我们从 S6 底部到 L9 上部进行了两次连续采样，第一套样品规格为 $30 \times 10 \times 5cm^3$，每个样品重约 6kg；第二套样品规格为 $5 \times 10 \times 4cm^3$，每个样品重约 700g(图 2).

2. 样品分选

将第一套样品缩分到 450g 左右，第二套样品缩分称取 150g，在水中崩解后过 300 目(50μm)的筛，大于 50μm 的部分再筛为 50—60，60—65，65—74 和 >74μm 4 个等级，样品干燥后直接用显微镜挑选微玻璃球.

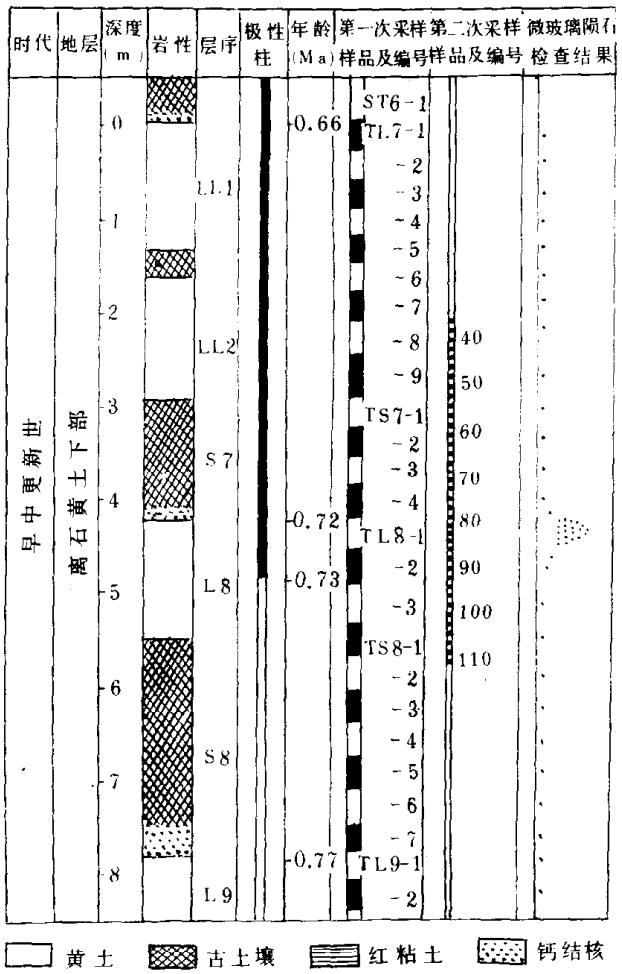

图 2 工作剖面及采样图

二、黄土中微玻璃陨石的赋存层位及年龄

通过对所有样品的工作，我们仅在 TL8-1，81，82 和 83 号样品中找到了共 19 颗微玻璃球.

目前的初步工作结果表明，黄土中微玻璃陨石赋存于 B/M 界线之上的 L8 上部非常局限的层位中(图 2)，与深海岩芯中澳 - 亚群微玻璃陨石的层位一致(图 3).

据黄土地层古地磁年龄和 L8 的沉积速率计算，黄土中微玻璃陨石的沉降年龄约为 0.72 — 0.724Ma.

黄土中微玻璃陨石的赋存层位及沉降年龄均表明它们属于澳大利亚 - 东南亚玻璃陨石散落区.

三、黄土中微玻璃陨石的某些物理性质

1. 颜色

主要为浅色玻璃球粒，如微黄色、浅黄褐色、微黄绿色、淡绿色和淡棕色，少数为白色或无色透明球粒.

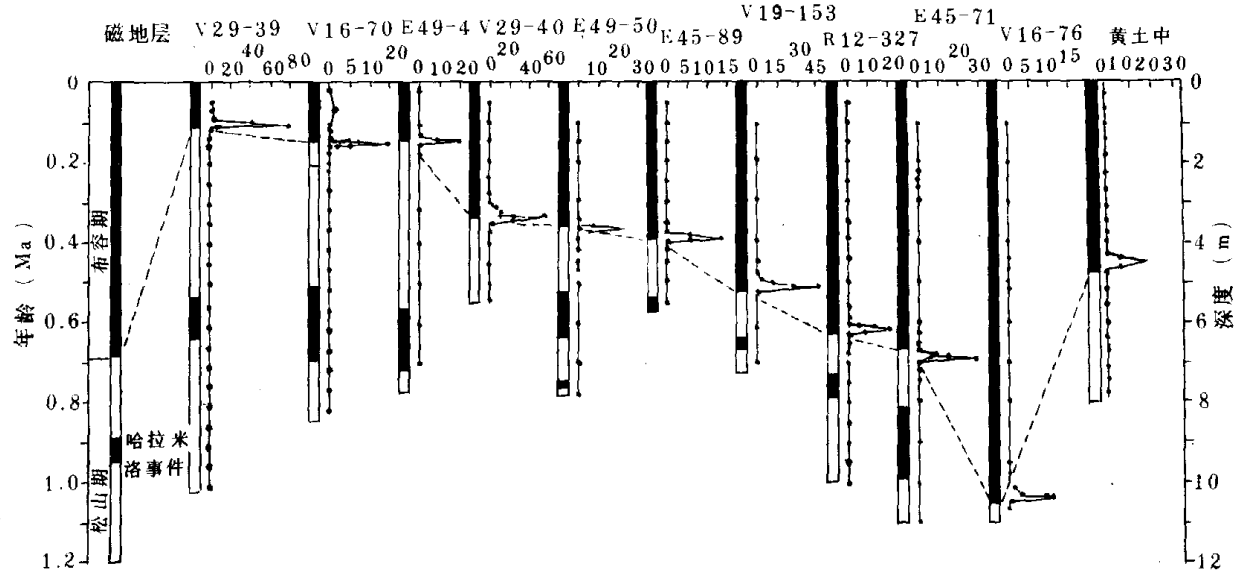

图 3 黄土中和深海岩芯中微玻璃陨石的赋存层位及其与古地磁地层之间的对比图

黑色表示正向磁性沉积物，白色表示倒转磁性沉积物. 与图左侧的磁性年代对比用虚线表示，它标出布容 - 松山 (B/M) 界线的深度. 图右侧的刻度表示岩芯的深度. 每个样品中的微玻璃陨石数目示于该岩芯的右侧. 可以看出，黄土和深海岩芯中微玻璃陨石的赋存层位一致. 深海中微玻璃陨石资料据参考文献[2]

2. 粒度

大于 65μm 的微玻璃陨石粒径分布范围为 65 — 220μm，以 90 — 150μm 频谱最高.

3. 形状

主要为球状（图版 I-1）、椭球状（图版 I-2），也有肾状（图版 I-3）、滴状（图版 I-4）、长形（图版 I-5）和不规则状（图版 I-6）. 具溅沫型和烧蚀型形态，充分反映了微玻璃陨石的撞击成因特点[9].

4. 显微光性

显微镜和 X 射线照相等工作证明，这些微球粒都是玻璃物质.

5. 表面构造

（1）气泡和凹坑　呈圆形、椭圆形，直径小于 10μm，一般 2 — 5μm，这是微玻璃陨石的特征构造（图版 I-1）.

（2）熔渣构造和流动构造　见图版 I-3.

（3）溶蚀构造　由黄土中淋滤溶液溶蚀所形成的不规则槽坑（图版 I-2,4,5）.

四、黄土中微玻璃陨石和微玻璃球的化学成分

1. 主要化学成分

对黄土中找到的 14 个微玻璃球作了电子探针分析，据其主量元素化学成分，黄土中发现的微玻璃球，可分为以下 4 个化学群.

（1）普通微玻璃陨石　大量深海岩芯样品的研究表明，普通微玻璃陨石常为浅色玻璃球，且粒度较大. 其化学成分与（大）玻璃陨石接近，但 SiO_2, Al_2O_3, FeO, MgO 等的含量范围较大[4,6]（表 1，图 4），黄土中 MT-17 微玻璃球分布在深海岩芯中普通微玻璃陨石的成分范围内，该球粒为普通微玻璃陨石类.

表 1　黄土中与深海岩芯中普通微玻璃陨石成分对比表（%）

产地	黄土中 MT-17	澳-亚群[b)](60)	北美群[c)](314)	象牙海岸群[d)](23)
SiO_2	85.03	48.1 — 77.0	47.30 — 84.16	62.41 — 68.20
Al_2O_3	9.13	7.5 — 22.1	3.99 — 25.30	12.75 — 17.33
FeO[a)]	2.39	3.0 — 9.6	1.13 — 13.08	5.70 — 8.61
MgO	0.55	1.9 — 27.3	0.44 — 18.60	2.01 — 7.69
CaO	0	1.0 — 5.8	0.27 — 19.19	0.22 — 1.82
Na_2O	0.37	0.2 — 1.9	0.00 — 3.38	1.41 — 2.03
K_2O	2.09	0.1 — 3.7	0.05 — 9.37	1.12 — 2.87
TiO_2	0.44	0.0 — 1.0	0.13 — 1.44	0.45 — 0.93

a）全 Fe 用 FeO 表示，b）据参考文献[6]，c）据参考文献[7 — 10]，d）据参考文献[11]；括号中的数字为统计样品数

（2）瓶绿色微玻璃陨石　此类微玻璃陨石以较高的 Mg，(Al, Fe)和较低的 Si 含量为特点，其 MgO 含量可高达 25%，而绝大多数颗粒的 SiO_2 含量为 48 — 55%，且随粒度的减小和颜色的加深，其 Mg (Al, Fe)含量增高，Si 含量减少[10 — 12]. 除 K_2O 含量偏高外，黄土中和深海岩芯中瓶绿色微玻璃陨石的主要氧化物含量完全吻合（表 2，图 4）.

（3）高铝微玻璃陨石　此群微玻璃陨石的化学成分与其它两群有较大的差别，它代表了

微玻璃陨石成分富 Al_2O_3，贫 SiO_2 的端元组分. 黄土中发现的 7 颗高铝微玻璃陨石与西班牙 Molino de Cobo 深海岩芯中所产的微玻璃陨石具有相似的成分，但前者 FeO, MgO 含量较低 K_2O 含量较高(表 3，图 4).

表 2 黄土中与深海岩芯中瓶绿色微玻璃陨石成分对比表(%)

产地	黄土中			澳·亚群[b] (44)	北美群[c] (174)	象牙涨岸群[d] (6)
	MT-20	MT-33	MT-37			
SiO_2	53.28	54.54	46.92	48.2 — 72.0	39.70 — 68.03	48.6 — 53.6
Al_2O_3	17.10	17.28	12.18	8.81 — 21.6	4.84 — 13.30	13.4 — 20.3
FeO[a]	10.71	9.42	9.11	3.42 — 10.8	4.21 — 12.76	9.45 — 10.8
MgO	7.77	7.47	5.84	2.64 — 24.4	0.65 — 12.49	16.6 — 20.0
CaO	1.00	0.46	0.11	1.35 — 5.35	0.91 — 18.00	2.09 — 3.53
Na_2O	0	1.58	0.02	0.03 — 1.43	0.79 — 2.06	0.42 — 0.73
K_2O	8.67	7.66	8.96	0.01 — 2.33	1.06 — 4.25	0.12 — 0.33
TiO_2	1.46	0.23	—	0.57 — 1.09	0.15 — 0.56	0.48 — 0.54

a)全 Fe 用 FeO 表示，b)据参考文献[12]，c)据参考文献[11,12]，d)为含雏晶、微晶微玻璃陨石及隐晶质微球粒，据参考文献[7—10]；括号内的数字为统计样品数

表 3 黄土中和深海岩芯中高铝微玻璃陨石成分对比表(%)

产地	北美群[b] (31)	黄土中						
		MT-3	MT-8	MT-10	MT-14	MT-18	MT-19	MT-27
SiO_2	29.39 — 51.39	53.94	40.93	45.18	48.91	50.07	49.37	54.28
Al_2O_3	16.03 — 48.37	40.40	57.37	30.01	31.28	35.75	30.14	38.53
FeO[a]	4.05 — 24.41	1.67	0.62	2.16	3.72	1.22	5.72	2.97
MgO	0.71 — 11.81	0.73	0	2.19	3.53	1.61	4.53	1.37
CaO	2.11 — 14.69	0.64	0.20	0.15	0.07	0.71	0	0.09
Na_2O	0.00 — 1.58	0	0.60	0.15	0.22	3.11	1.74	1.18
K_2O	1.70 — 5.91	0.57	0.28	8.90	9.61	7.34	8.50	0.57
TiO_2	0.71 — 1.13	0.37	0	0.49	0	0.20	0	0
合计		98.32	100.00	89.32	97.34	100.00	100.00	100.00

a)全 Fe 用 FeO 表示，b)据参考文献[7]；产地为西班牙 Molino de Cobo；括号内的数字为统计样品数

如图 4 所示，在 SiO_2-Al_2O_3-MgO 和 SiO_2-Al_2O_3-FeO 三元组分图中，黄土中普通、瓶绿色、高铝微玻璃陨石均投影在深海岩芯中相应类型微玻璃陨石分布区域内，充分说明相互之间成分的一致性.

(4)Si-Mg 微玻璃球 其化学成分主要为 SiO_2 和 MgO(表 4). 3 个球粒的 CIPW 计算结果表明，它们相当于镁橄榄石和顽火辉石的混合成分，可能是撞击体的消融产物.

表 4 黄土中Si-Mg 微玻璃球的化学成分(%)

样品	SiO_2	Al_2O_3	FeO[a]	MgO	CaO	Na_2O	K_2O	TiO_2	合计
MT-6	46.48	0.59	1.25	45.93	0.08	0.04	0	0	94.37
MT-15	51.08	1.30	0.71	44.84	0.45	1.45	0.17	0	100.00
MT-24	47.51	0.46	2.21	47.00	0.02	0.07	0.02	0.02	97.30

a)全 Fe 用 FeO 表示

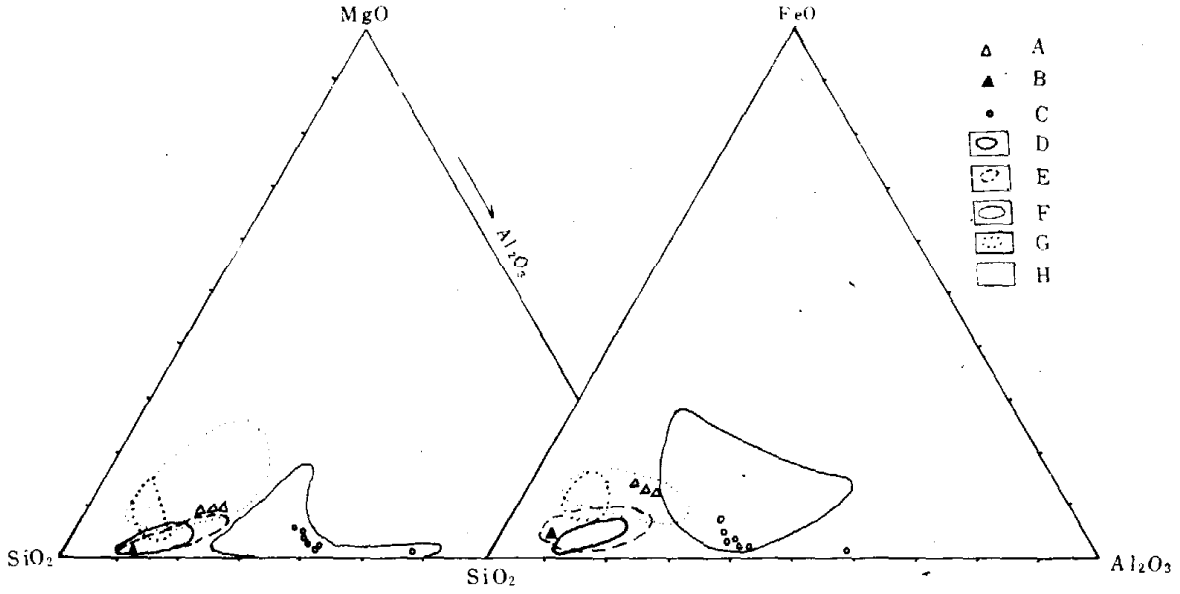

图 4　玻璃陨石和微玻璃陨石的SiO_2-Al_2O_3-MgO 和 SiO_2－Al_2O_3－FeO 三元组分图

A——黄土中瓶绿色微玻璃陨石，B——黄土中"普通"微玻璃陨石；C——黄土中高铝微玻璃陨石；D——玻璃陨石，据 Taylor (1962, 1969)，Chapman (1968, 1969)，Barnes (1964)，Schnetzler (1964)，Konta (1969)，Chao (1963)，Koeberl (1988)；E——深海岩芯中"普通"微玻璃陨石[6－9, 11－13]；F——深海岩芯中高铝微玻璃陨石[1]；G——含雏晶、微晶微玻璃陨石和隐晶质微球粒[7－9, 13]；H——深海岩芯中瓶绿色微玻璃陨石[11, 12]

2. 微量元素特征

对 3 颗黄土中高铝微玻璃陨石，4 颗深海岩芯中澳－亚群普通微玻璃陨石和一颗消融型微玻璃球作了仪器中子活化分析，分析结果列于表 5.

表 5 所示，Si-Mg 微玻璃球在微量元素特征上与微玻璃陨石有较大区别，尤其是前者 Cr，Co 含量很高. 微玻璃陨石的 Ba，Co，Cr，Ta 等典型难熔元素的含量高于（大）玻璃陨石；在各类微玻璃陨石中，高铝型和瓶绿色微玻璃陨石倾向于含较高的难熔元素，黄土中 H-Al 微玻璃陨石的 Ba 含量比澳－亚群普通微玻璃陨石富集 2—11 倍，Sc，Th 等也有一定程度的富集，瓶绿色微玻璃陨石的 Cr 比普通微玻璃陨石富集 13 倍，Sc，Co 分别富集 1.4 倍和 3 倍[10].

Frey[10, 14] 曾挑选多颗大粒度的微玻璃陨石组合样作了中子活化分析，认为微玻璃陨石的 REE 特征与大玻璃陨石相似，但前者 La，Ce 和 Yb，Lu 有一定程度的亏损，而 Eu 显示出不同程度的正异常.

本工作是用单颗较小粒度的微玻璃陨石作中子活化分析，黄土中 7 颗微玻璃陨石的 REE 特征与 Frey 的结论一致，但 La，Ce，Yb，Lu 的亏损更明显，尤其是 Eu 的含量，无论是黄土中高铝微玻璃陨石还是深海岩芯中普通微玻璃陨石，均有极高的正异常，而且随粒度的减小，Eu 含量明显升高.

长石类矿物是常见的，具极高 Eu 正异常的矿物. 如果这些数据不是分析误差及背景误差造成的，意味着这些微玻璃陨石的母质中长石矿物可能占较大的比例.

由于微玻璃陨石粒度，重量很小，单个颗粒的中子活化分析精度较低，其微量元素和 REE 的细微差别尚不得而知.

表5 玻璃陨石、黄土中与深海岩芯中微玻璃陨石微量元素成分(中子活化结果,ppm)[a]

分类	黄土中 Si-Mg 玻璃球	澳大利亚-东南亚群微玻璃陨石									象牙海岸群		澳大利亚-东南亚群玻璃陨石[b]
		黄土中			深海岩芯中						深海岩芯中		
样品	MT-6	MT-3	MT-8	MT-10	WAMT-1	WAMT-2	WAMT-3	WAMT-4	N	B	N	B	
粒径(μm)	160×100	190×100	90×90	130×110	210×210	260×260	190×190	170×170	611		463		
重量(μg)	3	5	1	2	13	23	9	7	1500	100—500	1300	100—500	
Na(%)	0.037	0.02	0.027	0.04	0.475	1.3	0.116	0.054	0.45		1.68		
K(%)	<0.2	<0.3	0.2	8.9	0.073	0.22	1.22	<0.76	1.42		1.66		
Rb					<36.4	79	<50.8	<85.6	66		70		80
Cs					9.82	6.36	16.5	22.2	2.3		2.9		5.7
Sc	7.25	2.23	7.2	19.96	10.5	7.91	3.71	2.43	11.9	17	15.9	15.1	13
Cr	1556.7	<61	<100.6	<78.3	422	59.8	77.1	<56.2	81	1100	230	490	72
Fe(%)	1.25	<0.34	<0.62	2.6	1.95	1.85	1.61	0.07	3.26	5.2	5.15	5.3	
Co	48.2	<8.1	<14.2	<13	7.55	10.4	15.0	15.7	9.9	27	51	32	4.45
Ba	<1137	<516	1246	6106	<212	236	<286	<504	530		830		356
La	<0.746	<6.50	27	<6.6	30.9	26.5	10.4	6.51	40	56	28	27	36.9
Ce	<10.71	<47.3	<78.1	<56.5	77.7	40.2	<27.4	<49.5	93		56	50	78.6
Nd									36		37		35.0
Sm	<0.36	<0.213	1.07	<0.145	4.76	3.86	1.67	1.42	7.1	7.1	5.6	3.9	6.10
Eu	30.9	13	23	<2.4	8.57	4.21	11.2	12.5	1.37	2.0	1.28	1.4	1.17
Gd									5.4		2.8		5.34
Tb	<5.6	<2.4	4.7	<3.9	1.76	<0.681	<1.44	<2.37	0.9		0.9		0.84
Dy									5.1		3.7		5.17
Yb	<19.2	<8.5	<14	<9.6	5.98	5.79	<4.35	<7.83	2.2		1.3	1.4	2.8
Lu	0.99	0.032	0.23	<0.13	0.812	0.568	0.571	1.26	0.45		0.29	0.38	0.44
Hf	<12.6	8.3	<9.2	<7.38	7.08	3.42	4.73	<5.27	6.4		3.8		7.1
Ta	<10.8	<4.8	<8.4	<8.1	2.23	<1.03	5.05	<3.86	2.4				1.2
Th	<6.53	<2.9	<4.8	7.83	9.9	7.58	4.29	4.2	14.5		3.8		13.7
Au	<0.06	<0.035	<0.05	<0.03	0.038	0.021	0.022	0.079					0.0022

a) 分析精度:K、Na、Sc、Sm、Cr、<15%;La、Lu、Eu、Ba、Co、Fe:20—50%;Tb、Hf、Th:60—80%;分析单位:中国科学院高能物理研究所. N为普通微玻璃陨石组合样,B为瓶绿色微玻璃陨石组合样. 粒径为每颗球粒的平均粒径(计算值);重量为组合样总重量. 分析精度:Rb、Ba、Nd、Tb:10—20%;其余元素3~10%,据文献[10,14].

b)据 Taylor & Mclennan (1979)

五、讨　论

半个多世纪以来，(微)玻璃陨石系统全面的研究表明，不同散落区的(微)玻璃陨石之间、同一散落区的(微)玻璃陨石个体之间及(大)玻璃陨石与微玻璃陨石之间，其化学成分有很大的差别．本工作的结果也显示，黄土中与深海岩芯中相应类型的微玻璃陨石，在存在着化学成分的相似性的同时，也表现出两者之间的差别．

Walter (1964, 1969)认为，玻璃陨石在大气层的熔融过程中，挥发性元素的丢失是造成玻璃陨石成分差异的主要原因；Cassidy 认为，由于微玻璃陨石体积小，总表面积和比表面积很大，挥发性元素的丢失程度更高，使(大)玻璃陨石与微玻璃陨石之间产生成分差异[6]．但是他们的实验没有得到现有数据所显示的(微)玻璃陨石成分范围，只能解释母质与(微)玻璃陨石之间、同一母质所形成的玻璃陨石与微玻璃陨石之间的成分差异，无法解释玻璃陨石，尤其是微玻璃陨石成分的巨大变化范围．

我们认为靶岩成分是微玻璃陨石成分的主要制约因素．(微)玻璃陨石总体成分的巨大变化及其地理性差异，均表明其母质是多来源的．这些差异性正是(微)玻璃陨石对其母源成分的继承，因此，不能用单一靶岩成分的演化模式来解释其化学成分的变化．

微量元素研究表明，与玻璃陨石相比，微玻璃陨石，尤其是高铝型和瓶绿色微玻璃陨石难熔元素含量较高，可能说明它们是原始靶岩物质经一定程度的蒸发熔融丢失后难熔组分的玻璃；或者是撞击作用这种特殊条件下，靶岩难熔组分选择性熔融的产物．深海岩芯中微玻璃陨石和月球撞击玻璃的研究均证明，有些玻璃球的标准矿物成分表现为长石等单矿物[12, 15, 16]，说明撞击过程中瞬时的高温和高压可引起岩石中近乎单矿物的熔融．

玻璃陨石中 K_2O 含量一般为 2 — 4%[1, 4]，深海岩芯中微玻璃陨石变化较大，一般为 2 — 6%，少数颗粒低到 0.01%，高者达 9.37%[6, 7, 11, 12, 15, 17]．黄土中微玻璃陨石 K_2O 的含量分布在深海岩芯中微玻璃陨石的范围内，其中 4 颗 K_2O 含量为 0.28 — 2.09%，另有 7 颗 K_2O 较高(7.34 — 9.61 %)，其标准矿物成分主要为长石、刚玉及少量石英、辉石、橄榄石，长石的含量达 35.32 — 73.2%，指示其母源物质中长石类矿物含量很高，这与其表现出 Eu 正异常所得出的推测是一致的．

总之，微玻璃陨石的形成过程非常复杂．由于撞击区靶岩成分的不均一性及撞击作用产生的特殊环境，导致微玻璃陨石化学成分的复杂性．

此外，微玻璃陨石的保存环境也可能在一定程度上影响其化学成分．黄土中和海洋沉积物中淋滤溶液在成分、pH 值、Eh 值和离子强度等方面的明显不同，也可能引起这两种沉积物中微玻璃陨石的成分差异．黄土中钙结核的普遍发育，表明在黄土淋滤时，Ca 和 Mg 是强烈迁移的元素，这可能是黄土中微玻璃陨石 CaO 和 MgO 普遍较低的一个原因．

六、黄土中微玻璃陨石的证据

综合以上工作，有以下确凿的证据可以证明这些黄土中发现的微玻璃球粒为澳 - 亚群微玻璃陨石．

1. 地理分布　　微玻璃陨石具有近似圆形的分布．深海岩芯的工作证明，在远离散落区中心 8000km 的地点发现有澳 - 亚群微玻璃陨石，黄土高原距散落区中心仅 2000 多 km．图 1 所示，黄土中微玻璃陨石分布在澳 - 亚散落区；

2. 年龄证据 黄土中微玻璃陨石的沉降年龄与深海岩芯中澳·亚群微玻璃陨石的沉降年龄及澳·亚群玻璃陨石的 K-Ar、裂变径迹年龄相同;

3. 赋存层位 洛川黄土剖面近 8m 厚的连续样品的调查证实,黄土中微玻璃陨石仅分布在 L8 上部非常局限的层位中,在古地磁剖面上与深海岩芯中澳·亚群微玻璃陨石的赋存层位完全一致;

4. 物理性质 黄土中微玻璃陨石的溅沫型和消融型形状、圆形气孔和凹坑及其熔渣和流动构造,是微玻璃陨石的典型形貌特征;

5. 化学成分 黄土中发现的微玻璃陨石的化学成分和类型可与深海岩芯中微玻璃陨石一一对应,微量元素和 REE 特征也很相似,证明它们确实是微玻璃陨石.

七、意 义

玻璃陨石科学的研究始于本世纪 30 年代,自 60 年代中期第一次发现微玻璃陨石以来,微玻璃陨石的工作一直是以深海岩芯为对象. 本工作是第一次在大陆沉积物 —— 黄土中发现较大粒级的微玻璃陨石,得到了大陆沉积物中微玻璃陨石的第一批化学成分数据,并成功地用单颗微玻璃陨石进行了仪器中子活化分析.

我们的工作证明,黄土是撞击事件形成的熔融球粒的良好存储体,为天体化学,尤其是撞击事件的研究提供了一条崭新的途径.

微玻璃陨石是玻璃陨石的一个重要组成部分,无论就数量还是重量而言,微玻璃陨石都远远多于地表找到的玻璃陨石. 据估计,澳·亚区玻璃陨石总重约 1000 t[18],而微玻璃陨石达 1.5×10^8 t[4]. 因此,微玻璃陨石更能反映玻璃陨石群和撞击事件的原貌. 但是以往的所有关于玻璃陨石的成因理论都没考虑微玻璃陨石这一主要组成部分,可谓舍本逐末.

澳·亚群(微)玻璃陨石是迄今发现的最年轻、分布最广、成分最复杂、争论最多的玻璃陨石群,对其成因,尤其是母源成分一直没有一个统一的认识. 黄土中 0.7Ma 附近微玻璃陨石的发现和研究,对了解澳·亚群(微)玻璃陨石的分布范围、成分、源区特点及其成因有着重要的意义.

由于微玻璃陨石的赋存层位稳定,黄土中微玻璃陨石的发现可能为黄土的层位划分提供一个大尺度的标志层.

撞击效应将严重影响地球环境. 有证据表明,自第三纪以来,每次玻璃陨石事件均伴随着地磁的倒转,生物的大规模突然灭绝,沉积速率的突增,气温的突变和冰期的出现[3, 4, 8, 15, 17],说明玻璃陨石事件与地球环境的灾变密切相关. 黄土是研究古气候的良好地质体,将(微)玻璃陨石事件的研究与黄土中古气候的记录结合起来,将更全面地反映地球环境变迁的历史及其原因.

八、结 论

1. 通过对洛川黄土剖面 L7 — S8 层位共 27 个样品的工作,首次在黄土中发现了 16 颗微玻璃陨石.

微玻璃陨石赋存的层位中,同时发现 3 颗 Si-Mg 微玻璃球,其 CIPW 计算证明,它们的主要成分接近于 6 分镁橄榄石与 4 分顽火辉石的混合,可能是撞击体的消融产物.

2. 黄土中微玻璃陨石赋存于 L8 上部、B/M 界线之上极为局限的层位中,沉降年龄为

0.72 — 0.724Ma，其赋存层位和沉降年龄与深海岩芯中澳 - 亚群微玻璃陨石相同.

3. 黄土中微玻璃陨石为浅色玻璃球，粒度为 65 — 220μm，具消融型、溅沫型形态、圆形气孔和凹坑及熔渣和流动构造；

4. 黄土中微玻璃陨石可分为普通、瓶绿色和高铝 3 个化学群，其成分分别与深海岩芯中相同类型的微玻璃陨石相似，它们之间成分的差别，主要是由于母源成分和保存环境不同所致.

5. (微)玻璃陨石复杂的化学成分，说明其母源物质是多来源的，不能用单一靶岩成分模式来解释.

微玻璃陨石微量元素含量的总体特征是离散性较大. 与玻璃陨石相比，微玻璃陨石，尤其是高铝，瓶绿色微玻璃陨石的难熔元素含量较高，表明其形成过程中存在一定程度的分馏作用；或者其母质是靶岩的较难熔部分.

微玻璃陨石的 REE 特征与玻璃陨石相似，单个较小粒度微玻璃陨石 Eu 含量较高，及标准矿物计算均表明，有些微玻璃陨石是靶岩难熔组分，甚至近乎长石类矿物的熔融玻璃. 说明微玻璃陨石具有复杂的母源成分和形成过程.

致谢　黄土室的全体同志和中国科学院地球化学研究所王三学、张在权同志为我们的工作提供的帮助，美国洛杉矶地球物理与行星物理研究所的 J. T. Wasson 教授和 B. Heins 博士为我们提供了深海岩芯中微玻璃陨石样品，并对我们的工作提供了很好的建议，作者在此深表谢意.

参　考　文　献

[1] 欧阳自远，天体化学，科学出版社，1988，290 — 310.
[2] Glass, B. P., *Nature*, **214**(1967), 372.
[3] Glass, B. P., *Nature*, **214**(1967), 372 — 374.
[4] Glass, B. P., *Intruduction to Planetary Geology*, Cambridge university press, Cambridge, London, New York, New Rochelle, Melbourne, Sydney, 1982, 145 — 172.
[5] 刘东生等，黄土与环境，科学出版社，1985.
[6] Cassidy, W. A., Glass, B. P. & Heezen, B. C., *J. Geophys. Res.*, **74**(1969), 1008 — 1025.
[7] D'Hondt, S. L., keller, G. & Stallard, R. F., *Meteoritics*, **22**(1987), 61 — 79.
[8] Glass, B. P. & Burns, C. A., *Meteoritics*, **22**(1987), 265 — 279.
[9] Glass, B. P., *Meteoritics*, **24**(1989), 209 — 218.
[10] Frey, F. A., *Earth Planet. Sci. Lett.*, **35**(1977), 43 — 48.
[11] Glass, B. P., *Geochim. Cosmochim. Acta*, **33**(1969), 1135 — 1147.
[12] Glass, B. P., *J. Geophes, Res.*, **77**(1972), 7057 — 7064.
[13] Sanfilippo, A. et al., *Nature*, **314**(1985), 613 — 615.
[14] Frey, F. A., *Scienen*, **170**(1970), 845 — 846.
[15] O'keefe, J. A., *J. Geophys. Res.*, **77**(1972), 7057 — 7064.
[16] Chao, E. C. T., *J. Geophys. Res.*, **75**(1970), 7445 — 7449.
[17] Glass, B. P., *Science*, **224**(1984), 309 — 310.
[18] Urey, H. C., *Science*, **137**(1963), 746.