

1908 年俄罗斯西伯利亚通古斯大爆炸 物体性质的地球化学证据*

谢烈文 侯泉林

(中国科学院地质与地球物理研究所岩石圈构造演化开放实验室, 北京 100029)

E. M. Kolesnikov N. V. Kolesnikova

(莫斯科国立大学地质系, 莫斯科 119899, 俄罗斯)

摘要 用 ICP-MS 分析了西伯利亚中部通古斯地区的沉积物和附近的岩石样品, 在 1908 年爆炸事件影响层中分别发现和证实了 Pd, Ni, Co, REE, Ti 和 Sr 等元素的异常, 比背景值高出 4~35 倍. 事件影响层中, Pd 与 Ni, Co, Σ REE 之间均具有良好的相关性, 而这些元素在非事件层中则不具相关性, 表明它们应具有相同的来源, 即通古斯爆炸物体. 事件影响层中 REE 的碳质球粒陨石标准化配分曲线比较平坦, 而非事件层中的配分曲线更为陡峭, 前者的 $(La/Yb)_N$ 为 2.1~3.2, 后者则为 7.0~143.2; 附近的岩石样品中 REE 与球粒陨石的比值为 10~100, 而事件影响层样品中的该比值为 1 左右; 并且影响层的 Ti/Ni 比值以及 Sr/Co 比值与彗星的相近, 表明这些元素异常不可能由地内物质污染所致, 而是由通古斯爆炸事件引起的, 爆炸物体的成分可能与碳质球粒陨石相似, 很可能是彗星. 此外, 根据事件层中 Pd 的异常丰度, 估算出爆炸物体的质量大于 10^7 吨, 半径大于 126 m.

关键词 通古斯大爆炸 微量元素 地球化学

1908 年 6 月 30 日上午在西伯利亚中部的通古斯地区($60^{\circ} 55' N$, $101^{\circ} 57' E$)发生了一次举世瞩目的大爆炸, 周围 2150 平方公里范围内的树木被摧毁^[1], 引起了世界各国学者的极大关注, 纷纷进行考察. 然而, 在所有的考察中并没有发现任何撞击坑和可以反映爆炸物体性质的爆炸残骸. 因此, 关于通古斯大爆炸的原因至今仍在争论中. 许多学者认为是地外天体对地球的袭击, 如: 碳质小行星^[2]、石质小行星^[3]以及彗星^[4]等.

如果是地外天体在空中爆炸, 那么爆炸物质最终将降至地表. 事实上, Fesenkov^[5]根据美国加利福尼亚的 Muont Wilson 气象观测站的观测数据, 计算出在通古斯大爆炸中大约有一百万吨的爆炸物质沉降于地球表面. 因此, 发现和研究爆炸地区沉积物中的地外物质是判断通古斯爆炸物体性质的有效途径. 铂族元素(PGEs)等亲铁元素是指示地外物质存在的有效手段之一, 因为太阳系中 PGEs 的丰度是地壳的 $10^4 \sim 10^5$ 倍^[6]. 一些学者对此已进行了一些有意义的探讨. Ganapathy^[7]研究了南极 1908 年冰层中的微量元素, 发现了 Ir 异常. 但是 Rochia 等^[8]

2001-06-26 收稿

* 国家自然科学基金(批准号: 40072046)、中国科学院岩石圈构造演化开放研究实验室开放课题(批准号: 0104)和俄罗斯基础研究基金(批准号: 99-05-39082)资助项目

在南极同样的冰层中并没有发现 Ir 的异常. 因此, 有人提出要么 PGEs 的分布极不均匀, 要么 Ganapathy 等的分析结果有误的看法. 事实上, 如果通古斯大爆炸引起相应沉积层中 PGEs 异常的话, 应首先表现在爆炸地区或其附近. Korina 等对通古斯地区的沉积物进行了中子活化分析, 发现 Ir 在事件层中的含量为 $17.2 \times 10^{-12} \text{g/g}$, 比背景值($3.8 \times 10^{-12} \text{g/g}$)高 3~4 倍^[2]. 尽管 $17.2 \times 10^{-12} \text{g/g}$ 的 Ir 仍在地壳平均含量 $20 \times 10^{-12} \text{g/g}$ 的范围内, 但仍不失对地外物质存在的指示意义. Nazarov 等^[9]也发现了事件层沉积物中的 Ir 异常. Hou 等^[10]用中子活化分析方法在事件层沉积物中发现了 $0.54 \times 10^{-9} \sim 0.24 \times 10^{-9} \text{g/g}$ 的 Ir 以及其他亲铁元素异常, 并进一步探讨了爆炸物体的性质. Rasmussen 等^[4]在爆炸中心地区事件层中发现了 Ir($39.9 \times 10^{-12} \text{g/g}$)和 ^{14}C 的同步异常. Hou^[11]等曾首次报道并证实了事件层沉积物中 Ru, Rh, Pd 的异常, 但所取样品有限, 在一定程度上影响了对元素异常原因进行更深入的探讨.

到目前为止, 有关通古斯爆炸事件的铂族元素研究主要集中于 Ir. 为了深化并确证 Pd 等元素异常的广泛存在及其地外成因, 本文在 Hou 等^[11]的基础上, 加大了采样密度, 发现 Pd, Co, Ni, Y, Sr, Ti 和 REE 等元素在对应于 1908 年事件层附近明显异常, 进而比较系统地讨论了 Pd 与 Ni, Co 和 ΣREE 之间的相关性, 为探讨爆炸物体的性质提供了依据.

1 样品收集与实验方法

本次分析的泥炭样品柱取自距爆炸中心地带以北 2km 处的沼泽地(见 Kolesnikov 等^[12]文中图 1), 深度范围是从地表到地下 65 cm 处. 为了测定 1908 年事件层所对应的深度, Mul'diyarov 等^[13]计算出通古斯地区沉积物在 1870 年至 1927 年之间每年的沉积速率变化范围为 0.3~0.5 cm. 此外, 在泥炭样品柱附近还采集了 3 个出露玄武岩样品(编号: 1k, 3k, 4k).

在泥炭样品柱中每隔 3cm 采一个样(表 1), 并除去样品中的树根和泥土等杂物. 在烘箱中

表 1 样品处理过程的相关数据

样品编号	对应深度/cm	样品干燥后重量/g	样品灰化后重量/mg	灰化率/%
T1	0	0.70659	13.31	1.88
T2	3	0.56470	8.68	1.54
T3	6	0.49844	5.67	1.34
T4	9	0.64128	6.83	1.07
T5	12	0.54092	4.64	0.86
T6	15	0.58474	4.42	0.76
T7	18	0.63032	4.46	0.71
T8	21	0.73660	4.36	0.59
T9	24	0.58697	3.54	0.60
T10	27	0.84823	4.31	0.51
T11	30	0.70325	3.22	0.46
T12	33	1.09642	6.44	0.59
T13	36	2.83236	63.66	2.25
T14	39	1.53996	28.75	1.79
T15	42	1.71372	31.67	1.89
T16	45	1.30531	20.75	1.51
T17	48	1.17585	15.31	1.30
T18	51	1.44013	21.34	1.48
T19	54	1.60542	25.49	1.59
T20	57	2.02305	32.38	1.60
T21	60	2.02503	32.00	1.58
T22	63	1.97033	25.48	1.29

105℃下干燥 4 h, 称重(以此作为计算元素含量依据), 然后分别进行炭化(200℃, 2 h)和灰化(500℃, 5 h), 灰化率在 0.46% ~ 2.25% 范围内(表 1). 将灰化后的样品转移至带盖的 Teflon 坩埚中, 加 1 mL HF, 在电热板上低温溶解, 蒸至近干. 加入 6 mL 王水, 加盖低温溶解完全后, 再加入 1 mL HClO₄, 蒸干. 最后, 加入 1 mL 浓 HNO₃ 及少量去离子水加热提取; 溶液转移至 25 mL 容量瓶中, 加 Re 和 In 内标, 稀释至 25 mL, 作为试样溶液. 将试样溶液用 VG-PQ2 型 ICP-MS 测定, 结果列于表 2. 用国家标准样品 GSR-1 对分析质量进行控制. 由于缺乏与泥炭样品相应的标样监控铂族元素的分析结果, 为此我们专门建立了一套分析方法^[14], 以保证铂族元素分析结果. 方法检测限分别为: ¹⁰¹Ru, 0.06 ng/mL; ¹⁰³Rh, 0.01 ng/mL; ¹⁰⁵Pd, 0.001 ng/mL; ¹⁹³Ir, 0.001 ng/mL; ¹⁹⁵Pt, 0.002 ng/mL. 整个分析和测试均在中国科学院地质与地球物理研究所岩石圈构造演化开放实验室完成.

2 结果

从表 2 和图 1 可以看出, 通古斯爆炸地区沉积物中的 Pd, Ni, Co, Sr, Ti, Y 及 REE 等微量元素均在样品 T13 ~ T19(对应深度为 36 ~ 54 cm, 即事件主要影响层)中出现明显的正异常. 这与 Rasmussen 等^[4]取自爆炸中心的样品柱中发现的 Ir 异常的位置相近. 沉积物样品 T13(对应深度为 36 cm, 即主事件层)中的 Pd 含量为 317.4×10^{-9} g/g, 比背景值(除事件主要影响层之外的样品平均含量)高出近 10 倍, Ti, Ni, Co, Y 和 Σ REE 分别比背景值高 4, 8, 10, 35 和 15 倍(图 1). 从 36cm 深度往下微量元素的含量呈逐渐降低趋势, Pd 的浓度从 36 cm (T13)至 63 cm (T22)处下降了 6 倍, Co, Ni 和稀土总量则分别下降了 5, 3 和 9 倍. 由于通古斯爆炸地区的沉积物大部分为泥炭沉积物, 具有较好的渗透性, 水的淋滤作用可能将这些元素及其化合物向下运移, 致使异常元素出现在 1908 年相应的沉积物样品之下, 异常丰度逐渐降低. Sr 与其他元素的异常位置有所不同, 可能是由于元素本身或其化合物的化学性质与其他元素有差异所致, 具体原因尚不清楚.

3 讨论

3.1 元素异常原因分析

在事件层附近元素异常的原因不外乎以下 4 个方面: (1)正常宇宙消融物质通量的增加; (2)沉积速率的降低; (3)地内矿物质的污染; (4)通古斯大爆炸导致的地外物质增加.

在其他条件基本不变的情况下, 如果宇宙消融物质增加或沉积速度的降低, 必然导致沉积物中难熔金属元素(如 PGEs 等)的含量上升, 因为地外物质中难熔金属元素的含量要远远高于地壳物质, 尤其是铂族元素, 一般要高出 4 ~ 5 个数量级. Ganapathy 等^[7]分析了取自太平洋的红色沉积物中分离出来的宇宙消融球粒, 发现 11 个宇宙消融球粒中的 Ni 与 Ir 没有任何相关性, 也就是说正常宇宙消融物质中的亲铁元素之间没有相关性, 因为它来自不同的地外物质母体. 通古斯事件主要影响层沉积物中 Pd 与 Ni 以及 Pd 与 Co 之间均具有良好的相关性(图 2(a), (c)), 而在正常沉积层中这些元素则不具有相关性(图 2(c), (d)), 表明这些异常元素具有同源性, 因此它们不可能由宇宙消融物质增加或沉积速率降低所致.

用爆炸期间矿物质(如岩石中的矿物质)的污染也难以解释这些元素的异常. 从泥炭沉积物样品附近 3 个岩石样品(1k, 3k, 4k)的稀土配分图(图 3)可以看出, 其稀土配分曲线略呈负斜

表 2 通古斯大爆炸地区沉积物的 ICP-MS 分析结果^{a)}

编号	T1	T2	T3	T4	T5	T6	T7	T8	T9	T10	T11	T12	T13	T14
Co	0.08	0.10	0.09	0.10	0.11	0.11	0.11	0.10	0.08	0.10	0.09	0.19	1.60	1.09
Ni	0.88	0.70	0.37	0.53	0.46	0.38	0.52	0.43	0.33	0.65	0.43	0.76	5.69	3.69
Pd	21.6	23.5	21.3	22.3	23.2	24.0	23.0	22.6	30.5	27.6	39.3	19.4	317.4	229.8
Ti	5.66	8.99	7.92	10.97	11.49	8.30	6.82	4.68	3.80	4.99	3.05	4.08	25.12	17.60
Sr	7.59	5.73	4.90	4.67	4.29	3.70	3.24	3.19	2.98	3.68	4.21	6.45	3.61	20.19
Y	0.07	0.08	0.06	0.08	0.08	0.07	0.07	0.06	0.06	0.05	0.03	0.05	3.01	2.21
La	108.0	132.4	89.9	145.9	127.6	184.8	182.1	150.4	124.4	160.4	167.8	93.1	1080.0	855.4
Ce	234.2	287.3	190.6	274.8	255.1	394.6	406.5	321.8	242.8	320.9	276.9	193.8	2779.0	2128.0
Pr	15.3	17.3	3.6	15.3	8.4	22.3	25.8	22.1	12.0	26.6	21.0	12.6	430.1	315.6
Nd	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	2006.0	1344.0
Sm	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	491.8	344.3
Eu	7.3	6.5	7.3	6.1	4.0	5.0	4.2	3.6	3.0	4.3	1.5	3.8	122.2	92.2
Gd	13.9	22.7	10.1	17.2	11.2	18.5	20.3	13.3	14.1	15.7	12.2	14.9	561.3	412.4
Tb	1.4	1.2	0.3	2.0	1.5	1.7	1.4	1.2	1.0	1.5	0.1	1.3	82.2	60.2
Dy	6.6	4.7	0.8	7.6	4.9	6.2	5.4	3.3	0.7	5.2	-	5.2	469.4	339.4
Ho	1.6	2.3	1.3	2.1	2.0	1.3	1.3	1.6	0.8	1.2	0.2	1.6	108.8	75.2
Er	6.5	8.6	7.7	7.2	9.0	7.5	6.1	5.9	4.0	5.1	2.6	5.8	332.2	227.0
Tm	0.8	0.9	1.2	1.1	1.2	0.9	0.8	0.9	0.7	0.8	0.3	0.6	49.7	35.0
Yb	2.3	4.1	2.7	2.5	3.4	3.1	5.3	2.2	2.3	3.3	0.7	3.7	308.8	202.8
Lu	1.0	0.9	0.8	0.7	1.0	0.8	0.8	0.9	0.6	0.7	0.3	0.6	45.8	31.2
(La/Yb) _N	28.5	19.0	20.0	35.0	22.3	34.9	20.4	41.4	32.4	28.5	143.2	14.8	2.1	2.5
ΣREE	398.8	512.5	336.8	504.6	452.3	670.9	684	550.5	438.4	574.4	524.3	357.9	9185.0	6693.0
编号	T15	T16	T17	T18	T19	T20	T21	T22	1k	3k	4k	GSR-1	参考值	
Co	0.90	0.74	0.54	0.45	0.50	0.35	0.31	0.33	63.3	39.8	45.7	3.5	3.4	
Ni	3.11	2.16	1.65	1.69	1.79	1.58	1.56	1.66	140.1	19.0	13.5	3.4	2.3	
Pd	223.1	186.1	135.8	139.4	113.1	95.1	74.1	49.8	<0.25	<0.25	<0.25	<0.25	n	
Ti	17.53	11.64	9.92	9.36	10.49	8.91	12.53	8.24	10837.8	5634.8	8534.3	1743.5	1738.3	
Sr	19.24	22.23	24.96	21.96	18.24	10.01	17.24	18.15	210.5	203.5	207.4	127.4	106.0	
Y	2.11	1.35	0.84	0.61	0.38	0.16	0.20	0.16	32.8	50.6	68.2	58.7	62.0	
La	976.4	557.0	311.1	241.0	227.8	219.5	318.5	229.9	9.8	21.4	27.0	57.5	54.0	
Ce	2340.0	1338.0	762.4	566.4	487.1	387.7	649.4	483.0	51.2	51.6	60.9	136.6	108.0	
Pr	325.9	185.0	107.0	75.0	58.4	38.3	69.7	50.4	3.3	6.8	8.3	13.9	12.7	
Nd	1382.0	706.0	298.1	202.6	119.8	16.1	160.1	78.9	15.6	30.9	38.4	49.7	47.0	
Sm	331.2	192.7	106.5	78.3	53.6	21.1	44.1	32.9	4.6	8.4	10.0	10.8	9.7	
Eu	87.5	50.7	31.6	25.3	18.9	9.7	14.3	10.9	1.6	2.6	3.1	1.0	0.9	
Gd	384.3	240.2	142.9	105.1	76.5	41.3	56.8	44.9	5.8	10.4	13.2	11.3	9.3	
Tb	56.2	34.0	21.6	15.4	10.7	5.3	7.1	5.4	1.0	1.7	2.1	1.8	1.7	
Dy	322.5	200.3	122.0	89.5	62.2	29.6	37.5	28.5	6.0	10.3	13.5	10.7	10.2	
Ho	69.5	44.1	26.0	20.0	15.8	6.4	7.4	5.9	1.3	2.2	2.8	2.2	2.1	
Er	206.2	127.1	81.1	62.4	49.3	19.0	21.4	17.1	3.7	6.1	8.0	6.9	6.5	
Tm	30.7	19.2	12.2	9.6	7.8	3.0	3.4	2.6	5.4	0.9	1.2	1.1	1.1	
Yb	182.4	113.8	75.8	62.2	49.7	18.7	17.6	13.2	3.3	5.2	7.2	7.6	7.4	
Lu	27.9	17.3	11.8	9.6	8.0	3.5	2.9	2.0	0.5	0.8	1.1	1.2	1.2	
(La/Yb) _N	3.2	2.9	2.4	2.3	2.7	7.0	10.8	10.3	1.75	2.5	2.2	4.4	4.3	
ΣREE	6946.0	4012.0	2245.0	1701.0	1358.0	913.4	1483.0	1054.0	113.2	159.3	196.9	312.5	271.6	

a) 通古斯地区沉积物样品 T1~T22 中元素 Co, Ni, Ti, Sr 和 Y 的含量单位为 10^{-6} g/g, 其他元素的含量单位为 10^{-9} g/g; 岩石样品 1k, 3k, 3k 和国家标样 GSR-1 的全部元素含量单位均为 10^{-6} g/g. “-”表示未测出, “n”表示没有值

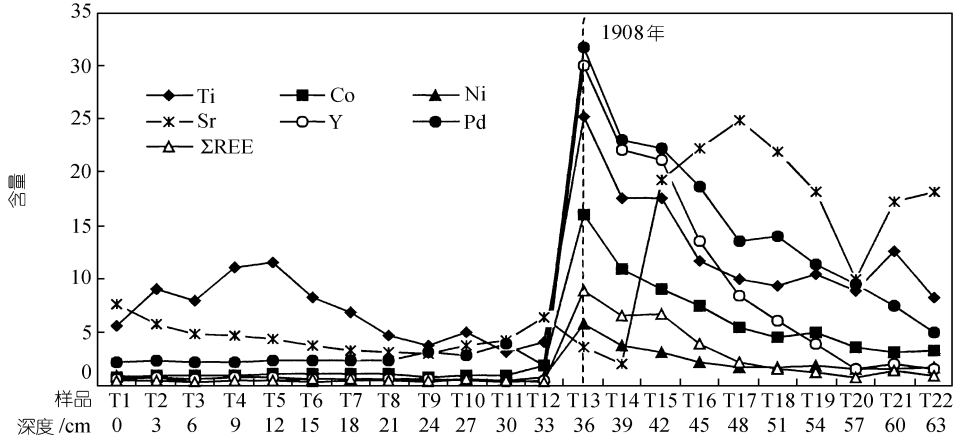


图 1 通古斯地区沉积物中微量元素丰度随深度变化图

图中 Ti, Ni, Sr 和 REE 的含量单位为 10^{-6} g/g; Pd 的含量单位为 10^{-8} g/g; Y 和 Co 的含量单位为 10^{-7} g/g

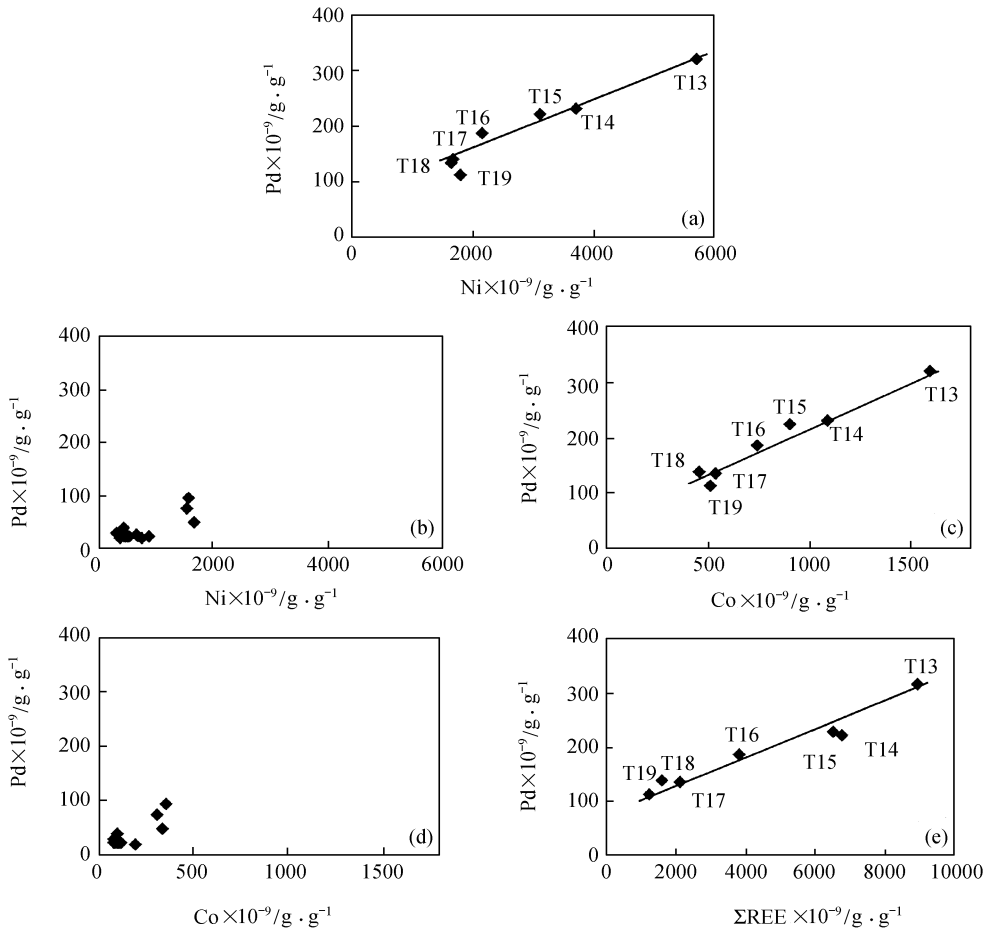


图 2 通古斯地区沉积物中有关元素之间的相关性

(a), (c), (e)表示事件主要影响层中元素之间的相关性; (b), (d)表示正常沉积层中元素之间的相关性

率,与球粒陨石的比值在 10~100 之间,而且未测出 Pd,与事件主要影响层有明显不同.事件主要影响层的各稀土元素与球粒陨石的比值均在 1 附近(图 3),且明显低于岩石样品与球粒陨石的相应比值,表明事件主要影响层沉积物未明显受到地内物质的污染.

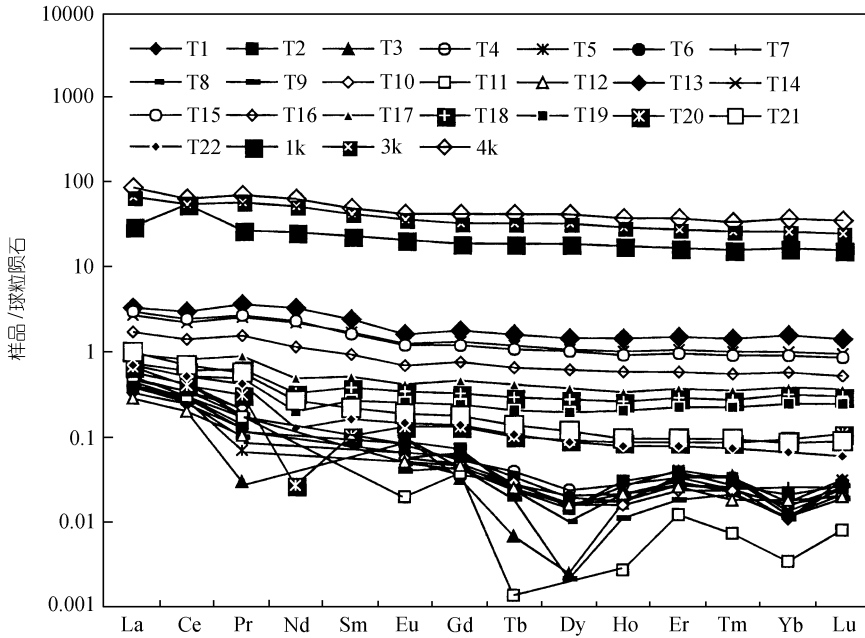


图 3 通古斯地区沉积物与附近岩石样品的 REE 经球粒陨石标准化曲线图比较

综上所述,通古斯事件主要影响层的元素异常很可能是通古斯大爆炸导致地外物质增加的结果.除事件主要影响层中亲铁元素的相关性外,本文还发现其中的 Pd 与稀土元素总量之间也存在较好相关性(图 2(e)),而且主要影响层样品的配分曲线特征相似,比其他层位更为平坦(图 3),前者(La/Yb)_N的比值为 2.1~3.2,而后者则为 7.0~143.2(表 2).这进一步表明这些元素异常具有相同成因,即通古斯爆炸事件,而且爆炸物体的成分可能与碳质球粒陨石类似.

3.2 爆炸物体性质及其大小的推测

宇宙飞船对 Halley 彗星的观察结果表明彗星尘埃的组分与碳质球粒陨石类似,但更富碳(是碳质球粒陨石的 8 倍)和其他易挥发性元素,如: H, N 和 Zn 等^[15].

1908 年事件层沉积物 Ti/Ni 的比值为 4.4,与 Halley 彗星的 0.84^[16]较为接近,远高于 CI 的 0.04^[17],远低于上地壳的 150^[18].同样,主事件层沉积物中 Sr/Co 的比值(2.3)与无锡陨冰(认为来自彗星)的比值(1.1)^[19]相近,比 CI 的 0.014^[17]高近 100 倍,比上地壳的 35^[18]要低 15 倍.另外,主事件层沉积物中 Pd/Co 的比值(0.2)与上地壳的比值(5 × 10⁻⁵)^[18]相比更接近于球粒陨石的比值(1.1 × 10⁻³)^[17](很遗憾无法得到彗星中的 Pd/Co 比值).因此,通古斯爆炸体可能是成分与碳质球粒陨石类似的物体,且更可能是彗星.

假设通古斯大爆炸事件产生的 Pd 全部集中在事件主要影响层 36~54 cm 中,对应的样品为 T13~T19(表 1,图 1),其他层位的 Pd 为背景值.那么,扣除背景值后,根据干燥样品的密度 0.12 g · cm⁻³,可以计算出爆炸所产生的过剩 Pd 的通量为 340 ng · cm⁻².假设通古斯地区

2000 km²的地球表面接收了爆炸所产生的 Pd, 那么由通古斯大爆炸所产生的 Pd 的总量为 6.4×10^6 g. 如果爆炸物体为成分与碳质球粒陨石相类似的星体, 碳质球粒陨石的 Pd 含量为 560×10^{-9} g/g^[17], 由此可估算爆炸物体质量大致为 10^7 吨. 由于爆炸物体在到达地面之前发生爆炸, 因而其密度很低, 约为 $1.1 \text{ g} \cdot \text{cm}^{-3}$ ^[17], 由此计算出其半径约为 126 m. 此值与 Ganapathy^[17]的估计值(直径 160 m, 重量 7×10^6 吨)相近.

应用上述估算方法, 根据事件层的 REE 异常同样可以估算出爆炸物体的重量大致为 7×10^7 吨, 半径为 250 m. 这个结果比利用 Pd 估算出的结果偏高一些, 可能是由于其中的 REE 受到了地内物质的轻微污染所致. 不过 Pd 和 REE 估算的结果基本一致, 说明以上估算结果的可靠性.

如果爆炸物体是彗星, 根据 1995 年 Rasmussen 等^[20]的研究结论——固体物质(彗核)不超过整个彗星的 5%, 那么, 通古斯爆炸物体的质量应为 2×10^8 吨, 半径约为 356 m.

以上的估算值可能是最小的, 因为通古斯大爆炸发生在距地表 8km 左右的大气层中^[21]. 因此, 部分爆炸物质可能分散到更广阔的地区, 甚至扩散到整个地球表面.

4 结论

(1) 根据通古斯地区对应于 1908 年事件沉积层样品中 Pd, Ni, Co, Sr, Y, Ti 和 REE 等元素的异常特征以及 Pd 与 Ni, Pd 与 Co, Pd 与 REE 的相关性, 认为这些元素的异常是由于通古斯爆炸事件导致地外物质的增加所引起的.

(2) 根据事件主要影响层的 REE 球粒陨石标准化配分模式比较平坦, 以及 Ti/Ni 和 Sr/Co 与 Pd/Co 的比值等特征说明通古斯爆炸物体可能与碳质球粒陨石成分类似, 很可能是彗星. 其质量大于 10^7 吨, 半径大于 126 m.

致谢 中国科学院地质与地球物理研究所阎欣和王秀丽在样品测定方面提供了帮助, 在写作过程中得到了周新华研究员的悉心指导, 作者就有关问题与钟宏博士进行了有益的讨论.

参 考 文 献

- 1 Fast V G, Bojakina A P, Baklanov M V. Destructions caused by blast wave of the Tunguska meteorite. In: Problema Tunguskogo Meteorita (in Russian), Izdatelstvo Tomskogo Universeta, Tomsk, 1967, Part 2, 62 ~ 104
- 2 Korina M I, Nazarov M A, Barsukova L D, et al. Iridium distribution in the peat layers from area of Tunguska Event. Lunar Planet Sci Conf, 1987, 18: 501 ~ 502
- 3 Chyba C F, Thomas P J, Zahnle K J. The 1908 Tunguska explosion: atmospheric disruption of a stony asteroid. Nature, 1993, 361: 40 ~ 44
- 4 Rasmussen K L, Olsen H J F, Gwozdz R, et al. Evidence for a very high carbon/iridium ratio in the Tunguska impactor. Meteoritics and Planetary Science, 1999, 34: 891 ~ 895
- 5 Fesenkov V G. Meteorites and Meteor Matter(in Russian). Moscow: Nauka, 1978
- 6 Alvarez L W, Alvarez W, Asaro F, et al. Extraterrestrial cause for the Cretaceous-Tertiary extinction. Science, 1980, 208(4448): 1095 ~ 1108
- 7 Ganapathy R. The Tunguska Explosion of 1908: discovery of meteoritic debris near the explosion site and the South Pole. Science, 1983, 220: 1158 ~ 1161
- 8 Rochia R, Angelis M de, Boclet D, et al. Search for the Tunguska event in the Antarctic snow, global catastrophes in earth

- history. An Interdisciplinary Conference on Impact, Volcanism, and Mass Mortality, Snowbird, UT, 1988. 165 ~ 157
- 9 Nazarov M A, Korina M I, Barsukova L D, et al. Meteoritic and Solar Geochim Acta, 1989, 53: 197 ~ 241
- 10 Hou Q L, Ma P X, Kolesnikov E M, Discovery of iridium and other element anomalies near the 1908 Tunguska explosion site. Planet Space Sci, 1998, 46(2/3): 179 ~ 188
- 11 Hou Q L, Kolesnikov E M, Xie L W et al. Discovery of probable Tunguska Cosmic Body material: anomalies of platinum group elements and REE in peat near the explosion site(1908). Planetary and Space Science, 2000, 48(15): 1447 ~ 1455
- 12 Kolesnikov E W, Boettger T, Kolesnikova N V. Finding of probable Tunguska Cosmic material: isotopic anomalies of carbon and hydrogen in peat. Planet Space Sci, 1999, 47: 905 ~ 916
- 13 Mul' diyarov E Ya, Lapshina E D. Dating of upper layers of peat bog applied for cosmic aerosol investigation. In: Meteorite and Meteor Investigations (in Russian). Novosibirsk: Nauka, 1983. 75 ~ 84
- 14 谢烈文, 侯泉林, 阎欣, 等. ICP-MS 分析通古斯大爆炸地区沉积物中超痕量铂族元素. 岩矿测试, 2001, 20(2): 88 ~ 90
- 15 Jesberger E K, Kissel J, Fechtig H, et al. On the average chemical composition of cometary dust. Comet Nucl Sample Return Mission Eur Space Agency Proc Workshop, Canterbury, 1986, 27 ~ 30
- 16 Jesberger E K, Christoforidis A, Kissel J, et al. Aspects of the major element composition of Halley's dust. Nature, 1988, 332: 691
- 17 Anders E, Grevesse N. Abundance of the elements: Meteoritic and Solar. Geochim Cosmochim Acta, 1989, 53: 197 ~ 241
- 18 Taylor S R, McLennan S M. The continental crust: Its composition and evolution. Oxford: Blackwell Scientific Publications, 1985
- 19 Mao X Y, Chai C F, Ma S L, et al. Determination of trace elements in Wuxi fallen ice by INAA. J Radional Nucl Chem, 1987, 114(2): 345 ~ 349
- 20 Rasmussen K L, Clausen H B, Kallemejn G W. No iridium anomaly after the 1908 Tunguska impact: Evidence from a Greenland ice core. Meteorites, 1995, 30(6): 634 ~ 638
- 21 Turco R P. An analysis of the physical, chemical, optical and historical impact of the 1908 Tunguska meteor fall. Icarus, 1982, 50(1): 1 ~ 52