地 质 学 报
1986 年 ACTA GEOLOGICA SINICA 第 2 期

浙江长兴二叠系/三叠系界线剖面的元素地球化学特征*

柴之芳 马淑兰 毛雪瑛
(中国科学院高能物理研究所)
孙亦因 徐道一
(中国科学院地质研究所) (国家地震局地质研究所)
张勤文 杨正宗
(中国地质科学院地质研究所) (中国科学院北京天文台)

用放射化学和仪器中子活化分析，研究了浙江长兴二叠系/三叠系(P/T)界线剖面中 29 种元素的丰度分布。结果表明，界线粘土层的铱、锇、铂、金和铼，以及一些亲铁和亲硫元素都有程度不同的富集。在考虑了各种可能存在的地内因素后，类似于白垩纪末的地外物质撞击的可能性变得颇有吸引力。然而，Ir/Os 和 Ir/Au 等元素丰度比值与太阳丰度比不符，有可能是二亿三千万年以来这些元素在风化过程中不同的地球化学行为所致。元素丰度的一些特征还有待深入研究。对长兴 P/T 界线的划分也作了适当讨论。

一、引 言

距今约两亿三千万年的二叠纪和三叠纪之交，发生过大规模的生物灭绝。那时生存在地球上的 96% 的物种灭绝，因此可能是地球演化史中生物灭绝规模最大的一次[1,2]。根据 W. Alvarez 等人[3,4]的观点，白垩纪和第三纪交替时的生物大灭绝，很可能与地外物质的撞击事件有关，并且已在全世界陆续找到了 50 处以上的白垩系/第三系 (C/T) 铱异常层[4]。那末，生物绝灭的范围和规模比 C/T 更大的二叠纪/三叠纪(P/T)之交，是否也发生过类似的事件，自然会引起科学界的高度重视。然而，迄今为止仅有的 3 篇有关报道，都还没有对铱的异常给出肯定的结果[5-7]。

鉴于 P/T 绝灭事件的重要性和我国南方具有良好的 P/T 界线剖面，我们用放射化学中子活化分析和仪器中子活化分析测定了浙江长兴 P/T 界线剖面的元素丰度，寻找是否亦存在有类似的铱异常，并进而从元素地球化学特征这一角度探索 P/T 事件的本质。

---

* 本工作部分经费来自中国科学院科学基金会，地准字 275 号。
本文 1985 年 6 月收到，11 月改回，丁祖国编辑。

二、实 验

（一）样 品

浙江长兴煤山煤矿是中国南部二叠系最顶部的长兴阶层型剖面所在地。长兴阶与上覆的下三叠统青龙组为浅海相沉积，在岩性、岩相和生物内容上都有连续过渡之特征。在下三叠统青龙组底部地层中有二叠纪和三叠纪生物的混生现象。作者根据赵金科等[8]所发表的文章，在界线上下系统地采集了标本。图1示出了所取的长兴A剖面之示意图。

在长兴P/T界线剖面上，以早三叠世 *Otoceras-Ophiceras* 为代表的菊石动物群和以 *Claraia* 为代表的瓣鳃类动物群取代了晚二叠世 *Pseudotirolites*, *Pleuronodoceras* 和 *Paleofusulina* 为代表的长兴期组合，详细的古生物资料可见[8,9]。

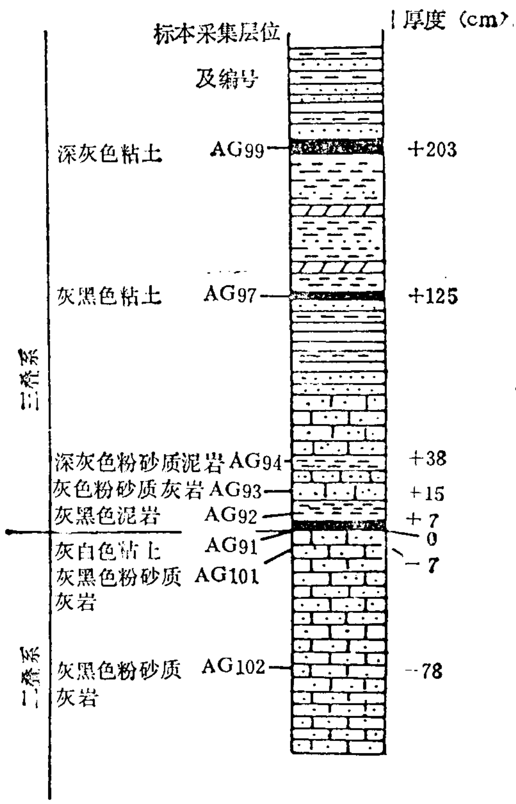

图1 浙江长兴P/T界线A剖面之示意图

Fig. 1 Schematic diagram of Permian/Triassic boundary A section Changxin, Zhejiang

（二）分 析 方 法

每一层样品都经过多次仪器中子活化分析和放射化学中子活化分析的测定。称取约100mg经仔细研磨的P/T界线剖面样品，包于高纯铝箔中，置于重水反应堆中照射40到60h，中子通量为$8 \times 10^{13} n/cm^2 \cdot s$。一般做法是，取2份平行样品，冷却1至2天后，立即进行放射化学分离。我们利用我国自制的硫脲型螯合离子交换树脂，该树脂在性能上与国际通用的SRAFION-NMRR型树脂相当，对铂族元素有良好的吸附选择性。将辐照后的

样品在镍坩埚中用 Na_2O_2 和 NaOH 熔融，用水浸取后调至 0.05*N* HCl 体系，上柱。使样品中的 Ir、Os、Re 等亲铁元素保留在树脂相上，取出树脂相，置于几何形状确定的塑料瓶中，测得其 γ 放射性。具体的放化分离程序，我们将在别处报道1)。

测量 γ 放射性的两台 Ge(Li) 探测器的分辨率均好于 1.9keV，相对效率约 28%，峰康比约 50:1。用本实验室编制的 SINGPK 和 SPECTR 等程序解单峰和重峰。

三、结果和讨论

（一）分析方法之准确度

在放射化学和仪器中子活化分析中，利用 DINO-1 (Fish Clay, Stevns Klint, Denmark) 和 Contessa (Italy) 的粘土样品作为参考物质，以检验分析方法的准确度。我们对 DINO-1 20 次分析的平均值为 33.0±2.1ppb Ir，与文献值 31.5±0.6ppb Ir[6]符合良好。对 Contessa 20 次的分析结果是 4.88±0.64ppb Ir，与文献值的约 5ppb Ir[3]相符。由此可以证明我们的中子活化分析方法是可靠的。

此外，我们还利用初级化学标准物质来定放射化学分离流程的收率。做法是在放化分离前后，分别测量其放射性强度，实验条件自始至终与待测样品的严格相同。由此免去了化学收率的测定。根据几十次的实际结果分析，由化学收率引起的误差一般在 10—20% 左右。

对贱金属和其它痕量元素，我们选用其它标准参考物质（如美国地质调查所的 AGV 和 GSP 等）以及我国的地质标准参考物质 GSD 系列样，来控制分析质量。结果表明，分析误差一般可控制在 10% 以内。

（二）浙江长兴 P/T 界线剖面的中子活化分析结果

表 1 列出了我们用放射化学和仪器中子活化分析测得的浙江长兴煤山 A 剖面的 29 个元素的丰度。其中对重要样品，例 AG91、AG92、AG93 和 AG101，先后测定了 10 次，以避免因分析方法、以及样品中元素分布的不均匀性所引入的误差。对重点元素，例 Ir、Os、Au、Ni 等，经受长时间的监测，计数时间约长达 5—8 × 10^4s，以获得具有足够计数统计的数据。表 1 中所给的误差均为数个单值的平均值之标准差。

下面按测得的元素的地球化学行为，将它们分成若干组，加以讨论。

1. Ir、Os、Au 和 Pt

众所周知，Ir 和 Os 是区别地外物质与地壳物质的两个最好的指示元素。我们用放射化学中子活化法给出了 AG91 和 AG92 中的锇含量，以及所有样品中的铱含量。结果表明，AG91 和 92 这两层不仅具有高丰度的铱，而且具有高丰度的锇。图 2 示出了该 P/T 界线剖面的铱分布曲线。需要指出的是，铱在地层中的分布并不均匀。AG91 的 10 次测定的铱的丰度范围为 0.05 至 0.19 ppb，而 AG92 的 10 次铱丰度为 0.20 至 1.0 ppb，甚至在有一份量较少的样品中，测到过约 5ppb 的铱[9]。然而，可以肯定的是，界线处的铱丰度比其上、下地层要高 10 倍，或者更多。锇的数据少且误差大，但 P/T 界线处的锇含

1）马淑兰等，用放射化学中子活化分析测定粘土样品中的铂族元素（待发表）。

表 1 用放射化学和仪器中子活化分析

Table 1 Elemental abundances of P/T boundary section at

样号	岩性	离界面距离(cm)	Os (ppb)	Ir (ppb)	Re (ppb)	Au (ppb)	Pt (ppb)	Cu (ppm)
AG99	深灰色粘土	+200	—	0.025±0.02	—	0.60±0.1	—	—
AG97	灰黑色粘土	+125	—	0.025±0.02	—	0.77±0.04	—	—
AG94	深灰色粉砂质泥岩	+35	—	0.02±0.02	—	0.20±0.05	—	<4
AG93	灰色粉砂质灰岩	+15	—	0.064±0.007	4.4±1.2	0.61±0.06	<10	5.06±0.03
AG92	灰黑色泥岩	+7	5.2±2.8	0.60±0.40	38±2	2.71±0.80	48±20	20.0±1.0
AG91	灰白色粘土	0	2.7±2.5	0.12±0.06	11.2±2.8	0.54±0.06	41±12	6.2±1.7
AG101	灰黑色粉砂质灰岩	−7	—	0.015±0.015	<2	0.30±0.02	<5	3.4±0.1
AG102	灰黑色粉砂质灰岩	−78	—	0.01±0.015	—	0.20±0.10	—	—

样号	岩性	离界面距离(cm)	Ca (%)	Sr (ppm)	Ba (ppm)	Sc (ppm)	La (ppm)
AG99	深灰色粘土	+200	0.66	131	—	22.2±0.8	57.5±0.5
AG97	灰黑色粘土	+125	2.70	126	—	6.23±0.3	29.6±0.5
AG94	深灰色粉砂质泥岩	+35	2.80	126	—	15.9±0.5	28.7±0.6
AG93	灰色粉砂质灰岩	+15	20.0	281	113±22	4.8±0.2	39.4±0.7
AG92	灰黑色泥岩	+7	3.21	<80	<30	16.4±0.6	57.2±6
AG91	灰白色粘土	0	3.62	120	69.7±14	17.8±0.8	80.8±7
AG101	灰黑色粉砂质灰岩	−7	70.1	663	43±8	0.71±0.05	21.6±0.5
AG102	灰黑色粉砂质灰岩	−78	66.0	989	—	1.78±0.1	11.7±0.3

* 表中测量的结果是多次测量的平均值及其标准偏差：AG91、92、93 和 101 为 10 次测量的平均值；AG97 为

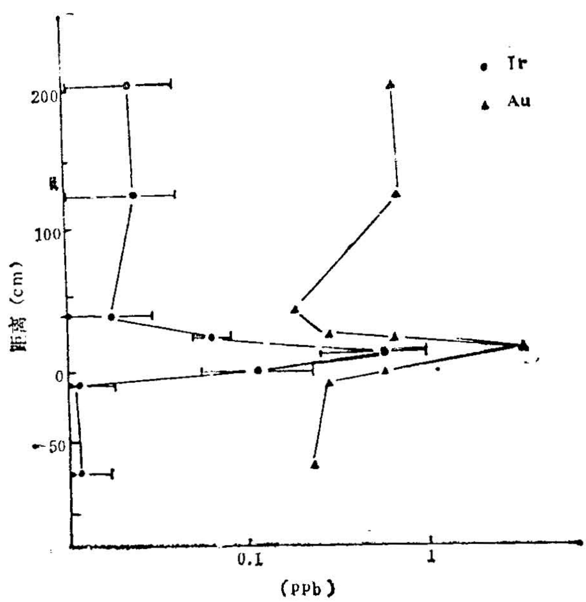

图 2 用放射化学中子活化分析测得的浙江长兴 P/T 界线剖面的铱和金的分布

Fig. 2 Distributions of Ir and Au in P/T boundary section at Changxin, Zhejiang

测得的浙江长兴 P/T 界线剖面的元素丰度*

Changxin, Zhejiang, determined by RNAA and INAA

Mo (ppm)	Ni (ppm)	Co (ppm)	Fe (%)	Cr (ppm)	As (ppm)	Sb (ppm)	U (ppm)	Th (ppm)
—	28.5	6.65±0.6	2.80±0.20	9.45±3.5	20.4±3.0	2.0±0.2	10.2±1.5	49.3±2.0
—	21.8±5.2	3.57±0.77	1.93±0.23	8.8±2.1	9.25±1.5	0.92±0.5	13.9±1.2	57.4±0.4
—	26.7±6.0	10.1±1.0	3.72±0.3	44.8±5.6	20.6±3.0	1.7±0.2	4.7±0.8	27.0±1.2
2.3±0.2	31.2±5.5	3.07±0.40	1.57±0.06	20.0±3.7	6.6±2.0	0.61±0.16	4.15±0.69	4.96±0.46
11.0±1.6	57.1±12.5	13.3±1.2	3.60±0.20	90.4±14.5	23.4±2.2	3.88±0.61	8.42±0.81	20.6±2.5
7.5±2.5	25.4±2.2	1.75±0.39	2.09±0.34	9.2±1.0	14.9±2.0	2.2±1.1	6.54±0.5	54.1±6.2
3.6±1.5	13.0±3.1	1.25±1.1	1.08±0.2	9.8±2.0	11.7±1.6	1.0±0.5	5.56±0.5	0.69±0.1
—	9.65±2.5	0.13±0.01	0.38±0.05	10.3±6.1	6.6±1.0	0.44±0.1	6.78±0.7	3.38±0.4

Ce (ppm)	Pr (ppm)	Nd (ppm)	Sm (ppm)	Eu (ppm)	Tb (ppm)	Ho (ppm)	Yb (ppm)	Lu (ppm)
146±1	25.1±10	84.9±1.5	15.8±2.0	2.01±0.02	1.69±0.01	—	5.98±0.3	0.70±0.05
77.2±2	12.9±6	43.8±1.0	8.36±0.6	0.86±0.01	0.92±0.01	—	4.19±0.5	0.47±0.04
35.6±2	6.39±4	25.0±0.5	4.92±0.3	0.97±0.01	0.90±0.01	—	3.54±0.5	0.48±0.04
50.6±3	—	34.4±0.8	6.73±0.4	1.10±0.03	0.83±0.01	—	2.46±0.2	0.32±0.03
88.5±3	12.5±6	44.2±1.0	8.32±0.5	1.14±0.05	1.16±0.03	—	3.53±0.5	0.43±0.04
186±2	17.7±7	72.4±1.5	14.6±0.9	1.37±0.05	1.65±0.05	—	3.61±0.5	0.41±0.04
22.4±2	—	15.2±0.5	2.36±0.1	0.54±0.02	0.42±0.01	0.64±0.4	2.25±0.3	0.38±0.03
13.6±2	—	10.3±0.5	2.95±0.1	0.33±0.01	0.41±0.01	0.51±0.3	1.37±0.1	0.19±0.01

6 次；AG96、99 和 102 为 2 次；其余为 1 次；——未测定。

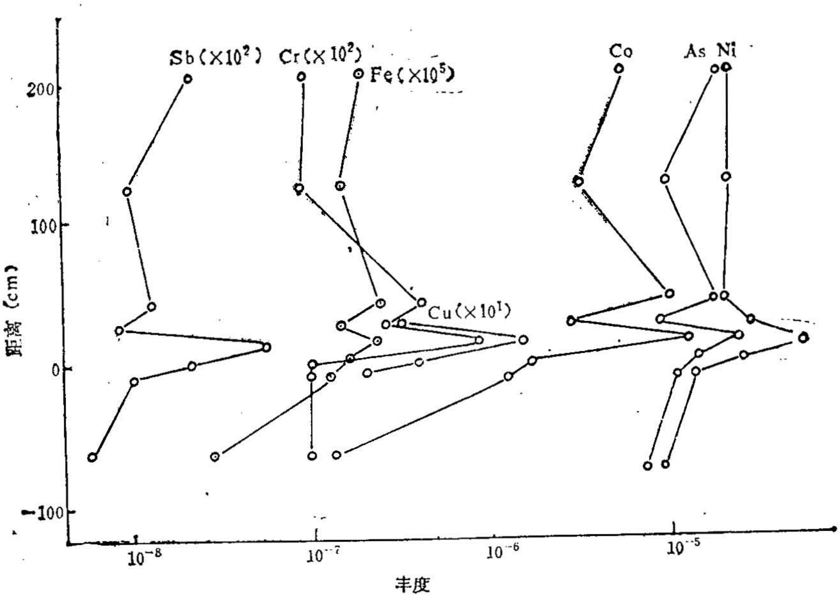

图 3　浙江长兴 P/T 界线剖面的 Ni、Co、Fe、Cr、As、Sb 和 Cu 的分布

Fig. 3　Distributions of Ni, Co, Fe, Cr, As, Sb and Cu in P/T boundary section at Changxin, Zhejiang

量也偏高。

这两个难熔亲铁元素的高丰度，有利于 P/T 生物灭绝来自于地外物质撞击事件这一假说。然而，应当指出的是，陨石等地外物质的 Os/Ir 比一般为 1 左右，而长兴 P/T 界线处的 Os/Ir 比却高达 22.5(AG91) 和 8.7(AG92)，远远偏离陨石比。H. Palme 等人[10]曾指出，Os 比 Ir 也许更易受地壳的风化作用而损失。如果根据这种机制，那末 Os/Ir 比应随年代的增加，而越来越小于 1。显然，这与实验结果是有矛盾的。与本实验可比较的是 U. Krähenbühl 用放射化学方法测得的寒武纪底界粘土样的 Os/Ir 比值[11]。据该作者报道，该粘土层与其上、下地层相比，具有锇和铱的正异常，但其 Os/Ir 比竟高出约 100 倍，作者将这种反常比值归因于地球上的风化作用，但未作详细论述。

我们认为，P/T 界线处的反常 Os/Ir 比值的原因可能是：(1) 在还原环境下，Ir 比 Os 易受地壳的风化作用而损失。H. Palme 等人[10]认为 Os 比 Ir 易受风化作用而损失这一看法，也许在氧化环境下是成立的，因而 Os 与 Ir 相比，易形成高价的氧化物而挥发。但在 P/T（包括 C/T）交替时期，是一个强烈的还原环境。由于大量生物的灭绝，产生 H_2S，使许多亲硫元素得以富集，我们的实验结果也说明了这一点。因此，Ir 与 Os 相比，易于形成低价的化合物而进入水体中。从采集到的 P/T 和 C/T[12]界线附近的样品的实验结果看，铱的含量在界线的上覆地层都不降到与下覆地层类似的水平。(2)另一个可能的原因是，浙江长兴的 Os/Ir 背景浓度比就是如此。由于缺乏对 Os 和 Ir 的地球化学背景值的知识，迄今得不到可靠的 Os 和 Ir 的地壳丰度。据维诺格拉多夫[13]，Os/Ir 的地壳丰度比为 50，这与我们的实验结果相差不远。但据 Wedepol[13]和黎彤[13]，Os/Ir 比为1。因此，仔细测定长兴地区的 Os/Ir 比是十分重要的。

Au 和 Pt 与 Os、Ir 一样，也是在地壳中贫化的亲铁元素。由实验结果可见，P/T 界线处的 Au 和 Pt 的丰度约比其上、下地层高 5—6 倍，与 Ir 和 Os 呈良好的正相关。这对地外成因说是一个实验上的支持。然而，界线处的 Ir/Au 丰度比值约为 0.22，比地外物质的3.3低一个量级，但比地壳的高一个量级[14]，介于两者之间。P/T 的这一现象也与 C/T 的不同，而与寒武系底界的相似。U. Krähenbühl 报道的 Ir/Au 以值为0.27[11]。P/T 的 Ir/Au 比偏离地外物质比值的原因，也可能是如同前面所述的风化作用。还应当指出，自生的金约占界线金含量的 25%，这也使 P/T 界线处的 Ir/Au 比下降。

Pt 的结果误差较大，这是因为实验中选用 ^{199}Au 的 158keV γ 能峰作定量计算，该能峰中包含了来自 ^{197}Au 二级活化的严重贡献。尽管如此，P/T 数据也可用来作为该 P/T 界线剖面存在铂族异常的一个旁证。

在实验中，我们还试图测定 Ru 的丰度，但发现 γ 谱上 Ru 的计数（例 ^{103}Ru 的 496keV 能峰）几乎全部来自铀裂变的贡献，因此无法给出具有一定可信度的数据。

2. Ni、Co、Cr、Fe、As、Sb、Cu

将实验测得的这些元素的丰度按地层位置作图 3。由图可见，作为亲铁元素的 Ni、Co、Fe（和 Cr1)）、以及亲硫元素的 As、Sb 和 Cu，均表现出与 Ir 等类似的同步富集。这

1) Cr 的亲铁性并不明显。

些元素与 Ir、Os 等的相关性是合理的。在研究 C/T 界线剖面[1)]以及宇宙尘等[2)]时，也观察到这些元素在一般情况下，与难熔亲铁元素具有良好的相关性。

高的 Cr 丰度表明，如果 P/T 的生物灭绝是由地外物质撞击所引起的，那末这种陨击母体就很可能是石陨石，而不是铁陨石[10]。

应当指出的是，这些元素在海洋中的停留时间并不相同。最长的与最短的大致要相差三个量级[15]。在 P/T 界线处之所以会发生同步富集，很可能是因为二叠纪末期的大量生物灭绝，形成强烈的还原环境，从而使这些亲铁和亲硫的元素的停留时间缩短到大致与 P/T 界线沉积物的沉积时间相比拟的程度[16]。与此相伴随的是，地壳物质中这些元素的相对富集，其富集时间大致与它们稳态的停留时间成正比[17]。因此，界线层位样品中的物质来源有两个方面，在考虑外来贡献时，必须研究来自地壳的所占的比例。

当然，地外物质有可能以微粒状态而沉降。

3. Re 和 Mo

把这两个亲铁元素[3)]单独作为一小节来讨论，是因为在浙江长兴 P/T 界线剖面中测得异常高的 Re 和 Mo 的丰度。由表 1 可见，AG91 和 92 的 Re/Au 比分别为 21 和 14，它们的 Mo/Au 比分别为 1.4×10^4 和 4.1×10^3，远高于 C1 型陨石的 Re/Au 比（为 0.25）和 Mo/Au 比（为 10）。也比四川广元 P/T 界线层的 Re/Au 比（0.24）和 Mo/Au 比（约 28）高得多。

如此高的 Re 和 Mo 显然是由该地区的表生地球化学作用所造成的。由此引起的一个问题是，浙江长兴 P/T 界线层中的 Ir、Os、Au 和 Pt 的异常，是否由于 Re 和 Mo 的蓄积而带来的[17]？

首先，让我们来检查一下 Mo 和 Re 的丰度。已知 Mo 在自然界中最主要的赋存状态是 MoS_2，其晶格常数为 0.315(10^{-10}m)，与此相应的 ReS_2 为 0.314(10^{-10}m)[18]，因此辉钼矿(MoS_2)中伴生有 Re 是不言而喻的。然而，其 Re/Mo 比落在 0.7×10^{-3} 到 0.75×10^{-3} 之间。据此，我们假定长兴 P/T 界线粘土样中的 Mo 完全来自地壳物质，并由于还原条件，可认为主要以 MoS_2 形式存在。那末根据上述比值，可计算得 AG91 和 92 中的 Re 的丰度分别为 5.6 和 8.3ppb，为总的 Re 丰度的 50% 和 22%。这意味着 Re 还有其它来源，一个吸引人的假设就是地外来源，因为地外物质中 Re 的丰度比地壳高得多(以 C1 型陨石为例，其 Re 含量比地壳高 50 倍以上；对铁陨石，则高 500 倍以上)。

R. Ganapathy[17]和 F. T. Kyte 等人[16]在研究丹麦 Stevns Klint Fish Clay 的 C/T 界线粘土时，也发现有异常高的 Re 丰度。柴之芳等人测定的 DINO 样品，Re 的富集因子也比 Ir 和 Os 高。这三篇报道中的 Re/Au 比分别为 8、2 和 8。与长兴 P/T 界线层 AG91 和 92 在扣除伴生在 MoS_2 的 Re 后，计算得的 Re/Au 比相当。

应当指出的是，对 P/T 界线层中 Re 的富集机制并不十分了解，深入的工作是需要的。

4. Ca、Sr 和 Ba

---

1) 柴之芳等，白垩系和第三系界线铱异常层中铱和其它痕量元素的相关性(待发表)。

2) 柴之芳等，宇宙尘中的痕量元素特征，中国科学(待发表)。

3) Re 和 Mo 亦具有亲硫性。

用表 1 中列出的 Ca、Sr 和 Ba 的数据对地层位置作图 4。由实验结果可见，P/T 界线处这些元素的浓度，与上、下地层相比，有下降的趋势。这与 A. S. Alekseev 等人[5]给出的南亚美尼亚外高加索 P/T 界线剖面中这些元素的分布图象相似，也与 Asaro 等人[6]测得的长兴同一剖面的情况大体一样。

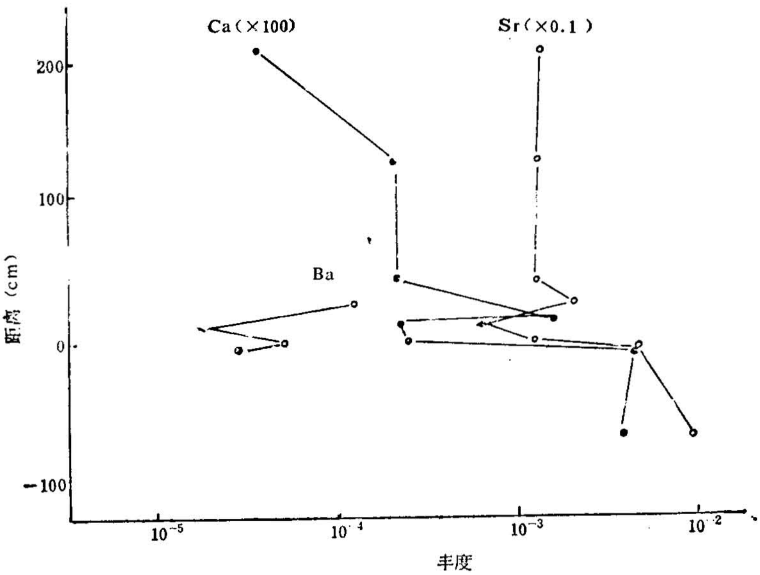

图 4 浙江长兴 P/T 界线剖面的 Ca、Sr 和 Ba 的丰度变化

Fig. 4 Abundance variations of Ca, Sr and Ba at P/T boundary section, Changxin, Zhejiang

这些元素丰度负异常的原因固然主要与其岩性相关，但也可能与当时沉积环境的盐度有关。何锦文[19]利用元素硼的丰度指出，长兴中、晚期(相当于本工作的 AG101 和 102)的海水盐度较高；到了三叠纪初(相当于 AG91)，盐度稍低；接着到 AG92，盐度继续降低。正如 A. S. Alekseev 等人[5]所指出的，盐度的下降会导致 Sr 和 Ba 的减少，海水中的盐度下降到 5‰，便会阻碍 $BaCO_3$ 的沉积。至今对盐度的下降机制还缺乏了解，一种可能的解释是地外物质撞击在极地，造成大量冰的融化，并广泛地分布于全球，从而使海水盐度下降[5]。

这一族元素的沉积与有机质的沉积极有关系。二叠纪末大量生物的灭绝，使这些元素的丰度下降，也是说明负异常的一个重要原因。

5. REE

稀土元素的丰度变化情况示于图 5。这八个 P/T 界线剖面样品中的稀土元素的分布模式基本相似，这意味着它们具有相同的物质来源。

轻稀土 La、Ce 等在 AG91 和 92 处有一定的富集，而重稀土 Yb 和 Lu 几乎无变化。由于 REE 的亲石性，且它们在地外物质中的丰度很低(约比地壳丰度低 100 倍)，因此在界线及其上、下不应有大的波动，如我们对 C/T 界线的研究结果[12]。Yb 和 Lu 的丰度的相对稳定是符合上述推论的，而轻稀土的相对富集也许来自于从两亿三千万年前至今所发生的局部的地球化学过程。R. R. Brooks 等人[20]在研究新西兰的 Woodside Creek

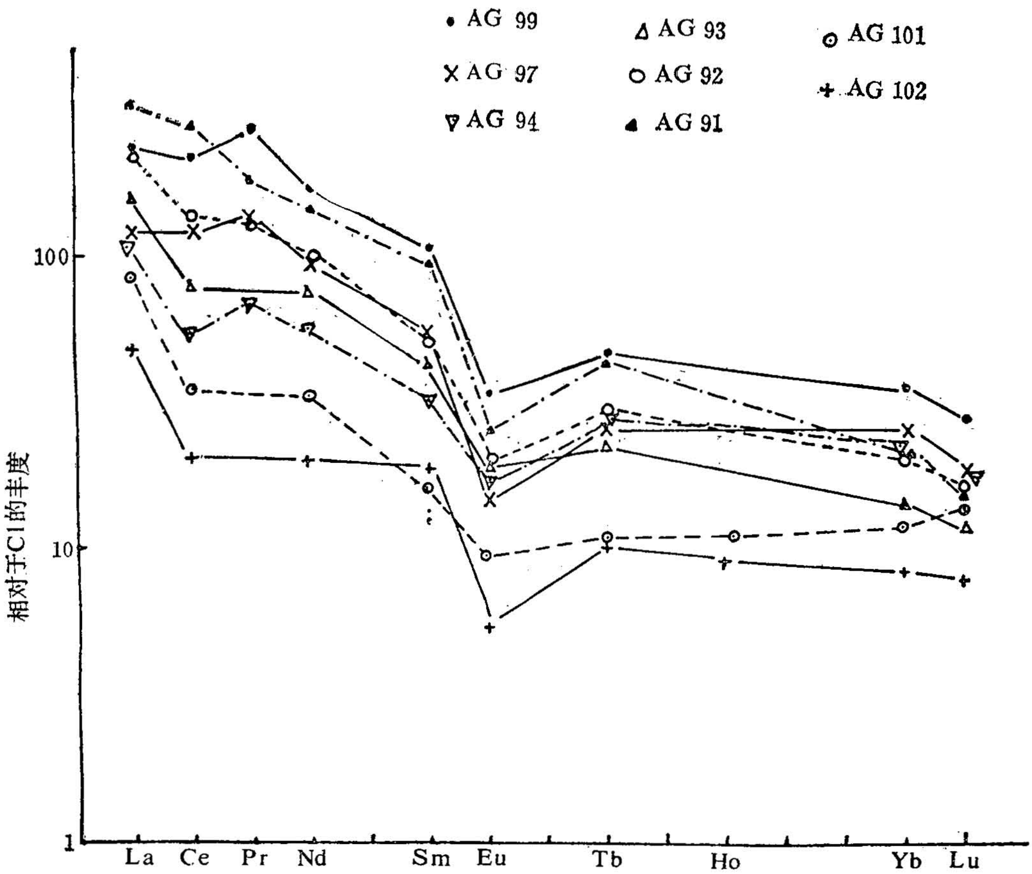

图 5　浙江长兴 P/T 界线剖面的 REE 的丰度变化

Fig. 5　REE abundance variation at P/T boundary section, Changxin, Zhejiang

处的 C/T 界线时，也有类似的报道。

（三）两个值得进一步讨论的问题

1. 铂族元素异常之来源

浙江长兴 P/T 界线附近铂族元素异常层的发现，提出了一些值得深入研究的问题。首先一个问题就是铂族元素异常之来源，在分析地外来源之前，让我们先检查一下有否地内成因的可能性。

第一个假设是异常的铂族丰度来自沉积速率的降低。由表 1 可见，二叠纪晚期粉砂质灰岩中铱背景浓度约为 0.015ppb，P/T 界线层（AG91 和 92）的铱含量分别为 AG101 的 8 和 40 倍。以 AG92 为参考样，即要求 AG92 层的沉积速率比 AG101 层低 40 倍，这意味着(1)在铱浓度保持不变的情况下，生物沉积物和碎屑沉积物的沉积速率，在 AG92 处应比二叠纪末低 40 倍；或者（2）铱等铂族元素的含量在不受影响的情况下，侵蚀掉 97.5% 的生物及碎屑沉积物，或者其它所有元素的浓度亦相应地富集或亏损 40 倍[6]。上

述这些极端情况是不可能的，而且也是和实验结果不相符的。尽管除 Ca、Sr 和 Ba 外，其它元素的丰度在 AG92 层都有程度不同的富集，但它们相对于 AG101 的富集因子一般都在 10 以下[1)]，比 Ir 的富集程度低。因此，P/T 界线处铂族元素的异常不大可能是由于上述两种极端情况所引起的。

第二个假设是界线处的高丰度铱等元素，是由于超铁镁岩的混入所引起的。确实，来自火成作用的超铁镁岩含有比 AG92 更高的铱丰度，但是超铁镁岩不仅铱等铂族元素的丰度高，而且有它一套独特的元素丰度图象。如可根据 Ni、Co、Cr 以及其它元素的丰度来确定超铁镁岩侵入的程度[6]。利用文献数据[6]，可计算得当 AG92 层中的 Ir 来自超铁镁岩时，该层相应的 Ni、CO 和 Cr 的丰度应约为 170ppm、70ppm 和 160ppm[2)]，远大于我们的实验结果。

在排除了上述两种可能性后，再考虑到铱的异常与生物大灭绝[8,9]、碳同位素异常[21]以及粘土矿物[19]等的相关性，我们没有理由不考虑地外事件的可能性。可以设想在二叠纪末，尤如白垩纪末一样，发生了由地外物质撞击地球所引起的巨大灾变事件，由此引起的环境变化导致几乎 96% 的生物在种一级上的绝灭；巨大的撞击使二叠纪末一三叠纪初，地壳活动较频繁，海水动荡，并伴随着小规模的海侵、海退，使混层矿物因缺乏平衡的环境和充裕的时间，从而结晶度较差，并使粘土岩的层数增加[19]；撞击也对 P/T 界线层的元素丰度产生相应的变化，地外物质中高丰度的铱等难熔亲铁元素使 P/T 界线留下了铱等异常的痕迹，由于生物灭绝造成的还原环境，又促使亲硫元素的相应富集。

应当指出，上述地外撞击就目前研究程度而言，还只是一个极其初步的设想。只有对长兴地区的地球化学特征进行深入的研究，并对其它更多的 P/T 界线剖面作比较后，才能得出比较可靠的结论。

2. 浙江长兴 P/T 界线问题

对该 P/T 界线，古生物方面已作了大量研究[8]。这里仅就元素丰度特征，来讨论长兴 P/T 的界线。从表 1 列出的实验结果看，铱及一些元素的最大丰度并不位于 AG91 底界，而是位于与界线粘土层紧连的灰黑色泥岩 AG92 处。这固然可用元素沉降有一个过程来解释，但也不排斥对 P/T 界线的划分稍加修正。即根据元素丰度变化情况，是否可以把长兴 P/T 界线放在 AG91 和 92 之间。何锦文[19]指出："就粘土矿物而言，将二叠系与三叠系的界线置于 $ACT-C_4$ 粘土层（相当于本工作的 AG91 层）之底，或者放在 $ACT-C_4$ 与 $ACT-C_3$(相当于 AG92 层)粘土层之间都是可以接受的。然而，如果考虑到沉积环境的变化，从粘土矿物的角度看，界线放在 $ACT-C_4$ 与 ACT-C、粘土层之间（即 AG91 和 92 层之间）似乎更为合适"。从元素地球化学特征看，大体上也是如此。

参 考 文 献

[1] Newell, N. D. 1963, Crises in the history of life, Scientific American, pp. 76—92.

[2] Raup, D. M. and Sepkoski, J. S. Jr., 1982, Mass extinctions in the marine fossil record, Science, Vol. 205, pp. 1095—1097.

1) 钍是一个例外，原因不明。

2) 计算前提是不考虑海洋体系中的分馏。

[3] Alvarez, L. W. et al., 1980, Extraterrestrial cause for the Cretaceous—Tertiary extinctions, Science, Vol. 208, pp. 1095—1108.
[4] Alvarez, W. et al., 1982, Current status of the impact theory for the terminal Cretaceous extinction, Geol. Soc. Amer. Spec. Pap. 190, pp. 305—315.
[5] Alekseev, A. S. et al., 1983, The Permian—Triassic boundary event: geochemical investigation of the Transcaucasia section, Lunar and Planetary Science, XIV, NASA, Houston, Texas.
[6] Asaro, F. et al., 1982, Geochemical anomalies near the Eocene/Oligocene and Permian/Triassic boundaries, Geol. Soc. Amer. Spec. Pap. 190, pp. 517—528.
[7] 张景华等，1983，中国南方二叠纪-三叠纪界线粘土岩的稀土元素特征及其地层意义，岩矿分析和测试，第2卷，第 81—86 页。
[8] 赵金科等，1981，中国南部的长兴阶和二叠系与三叠系之间的界线。南京地质古生物所丛刊，第 2 号，第 1—112 页。
[9] Sun Yiyin, et al., 1984, Developments in geoscience; Contribution to 27th International Geological Congress, Moscow, Academic Sinica, Science Press, pp. 235—245.
[10] Palme, H., 1982, Identification of projectiles of large terrestrial impact craters and some implications for the interpretation of Ir-rich Cretaceous/Tertiary boundary layers, Geol. Soc. Amer. Spec. Pap. 190, pp. 223—233.
[11] Krähenbühl, U., 1984, Anomal distribution of noble metals at the Cambrian/Precambrium boundary, Intern. Conf. Nucl. Radiochem., FRG, Lindau, Oct. 8—12, p. 144.
[12] 柴之芳等，1984，西藏仲巴地区白垩系-第三系（C-T）界线的中子活化研究，核技术，第 6 期，第 4—8 页。
[13] 中国科学院地球化学研究所编，1976，地球化学简明手册，科学出版社，北京。
[14] 柴之芳等，宇宙尘中金的丰度及其与铱的相关性，地球化学(待出版)。
[15] 柴之芳等，1985，海洋体系中元素富集因子和停留时间相关性的中子活化研究，科学通报，第 30 卷，第 15 期，第 1193—1196 页。
[16] Kyte, F. T. et al., 1980, Siderophile-enriched sediments from the Cretaceous-Tertiary boundary, Nature, Vol. 228, pp. 651—656.
[17] Ganapathy, R., 1980, A major meteorite impact on the Earth 65 million years ago: Evidence from the Cretaceous-Tertiary boundary clay, Science, Vol. 209, pp. 921—923.
[18] 刘英俊等，1984，元素地球化学，科学出版社，北京，第 264 页。
[19] 何锦文，1981，长兴阶层型剖面及殷坑组底部的粘土矿物——兼论二迭、三迭系的分界，地层学杂志，第 5 卷，第 3 期，第 197—206 页。
[20] Brooks, R. R. et al., 1984, Elemental anomalies at the C-T boundary, Woodside Creak, New Zealand, Science, Vol. 226, pp. 539—541.
[21] 陈锦石等，1984，浙江长兴二叠系-三叠系界线碳酸盐层的碳同位素，地质科学，第 1 期，第 88—93 页。

ELEMENTAL GEOCHEMICAL CHARACTERS AT THE PERMIAN-TRIASSIC BOUNDARY SECTION IN CHANGXIN, ZHEJIANG, CHINA

Chai Chifang, Ma Shulan, Mao Xueying
(Institute of High Energy Physics, Academia Sinica)

Sun Yiying
(Institute of Geology, Academia Sinica)

Xu Daoyi
(Institute of Geology, State Seismological Bureau)

Zhang Qinwen
(Institute of Geology, Chinese Academy of Geological Sciences)

Yang Zhengzong
(Beijing Astronomical Observatory, Academia Sinica)

Abstract

The abundance patterns of 29 elements at a Permina- Triassic boundary section, Changxin, Zhejiang, China were studied by RNAA and INAA. The results show that Ir, Os, Pt, Au, Re and other siderophile and chalcophile elements are more or less enriched at the boundary. After excluding various terrestrial factors, the possibility of the impact event of extraterrestrial body, similar to that at the end of the Cretaceous, becomes attractive. However, the ratios of Ir/Os and Ir/Au do not agree with the solar value, which may be caused by a long-term weathering process. Some abundance characters remain to be further studied. The boundary position of P/T, Changxin, was also discussed.