

混合成因模式

——中国南方二叠-三叠系界线地层元素地球化学及其启示

周瑶琪 柴之芳 毛雪瑛 马淑兰 马建国 孔屏

(中国科学院高能物理研究所, 北京)

何锦文

(中国科学院南京地质古生物研究所)



本文通过对中国南方9条二叠-三叠系界线剖面样品的微量元素地球化学及其异常的研究, 提出一个关于二叠-三叠系界线粘土层成因的混合模式。即认为界线粘土岩层是小行星撞击事件和中、酸性火山喷发事件的混合产物。在其物质来源上, 撞击溅射产物与火山灰的比例大体为3:7。

二叠-三叠系界线事件的研究, 已由寻找铀异常到对铀异常的怀疑, 这无疑是一次大的飞跃。尽管如此, 人们至今仍未对二叠-三叠系界线事件的成因提出确定性的答案。到现在为止, 至少有以下4种观点: (1)火山说; (2)地外撞击说; (3)古风化壳理论; (4)海平面升降理论。后面两种观点一般是作为间接的解释而提出来的。尤其是第三种, 曾经可能是作为对界线连续性的怀疑而提出的, 但现在则很少有人提它了, 因为它与基本的地质事实不符。目前, 比较流行的观点是前两种, 即火山说与撞击说。由于它们各自拥有相应的证据, 一直是有关二叠-三叠系界线成因研讨会上争论的焦点。

本文总结了我国南方9条二叠-三叠系界线剖面的十几次中子活化分析结果(其中有少部分数据来自美国 Los Alamos 实验室)。试图从元素地球化学的角度对这一争论已久的问题提出自己的看法。这9条剖面是: 浙江长兴, 四川广元凉风垭, 广西合山和扶绥, 湖北黄石, 福建龙岩, 贵州断杉和珠藏。与此同时, 我们还测量了华北的山东于家庄和河南登封新新等陆相二叠-三叠系界线剖面, 以及巴基斯坦的Narmal剖面。并参考了湖北利川剖面^[1], 苏联外高加索剖面^[2], 南阿尔卑斯的几条剖面的NAA数据^[3,4]。

一、地层、岩石和矿物

中国南方二叠-三叠系界线生物地层的工作已经做到足够的详细了(盛金章等, 1985; 杨遵仪等, 1987)。其中尤以浙江长兴煤山和四川广元上寺剖面为甚。这两条剖面是我国争取作为国际

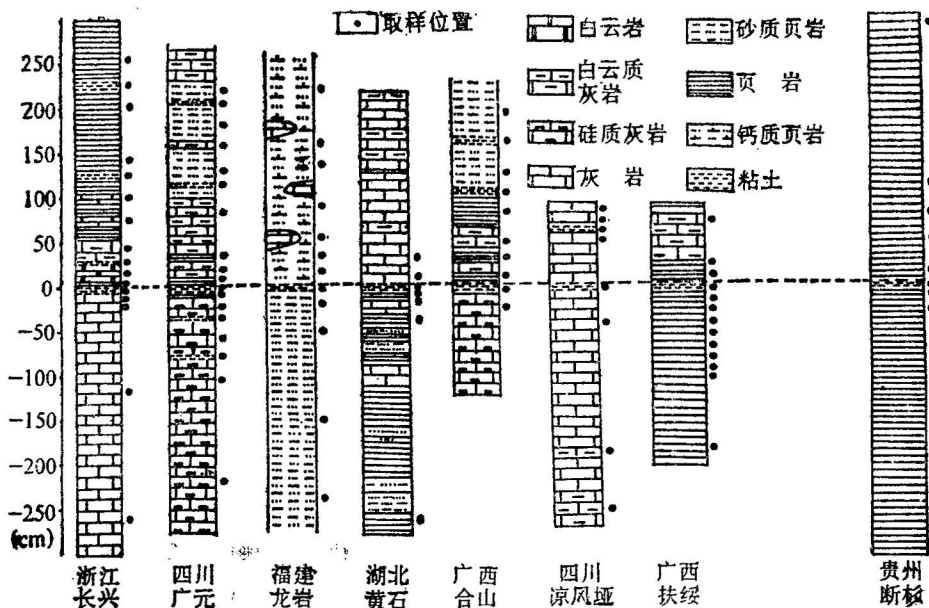


图 1 中国南方二叠—三叠系界线剖面对比图

Fig. 1 Comparison of the P/T boundary sections in southern China

层型候选剖面提出来的, 其它中国南方的二叠—三叠系界线剖面均可与之对比 (图1)。

中国南方二叠系上部一般为灰岩或硅质灰岩, 含有丰富的化石。局部地区 (例如四川广元剖面) 间或夹有1—2层蒙脱石-伊利石混层粘土岩。在二叠—三叠系界线处一般均发育一层2—25cm厚的蒙脱石-伊利石混层粘土岩和3—20cm厚的黑色页岩 (铀异常值一般出在此层位)。古生物界线常划在黑色页岩与界线粘土岩层之间, 因为在界线粘土岩层中曾发现少量的二叠纪型的牙形刺化石。三叠系下部岩性以泥质灰岩、钙质页岩、泥质岩为主, 一般均夹有2—4层薄层状蒙脱石-伊利石混层粘土岩。

整个中国南方二叠—三叠系界线剖面, 在界线及其附近均发育有多层蒙脱石-伊利石混层粘土岩层, 与巴基斯坦Nammal剖面, 苏联外高加索剖面以及南阿尔卑斯地区的二叠—三叠系界线剖面十分相似。这些粘土岩层的成因, 则正是二叠—三叠系界线事件成因争论的焦点。

在这些粘土层中, 一般均或多或少地见有六方双锥型的高温 β -石英^[5]和残余火山流纹结构^[6,7]。因此一般以为这些粘土岩层的成因与中、酸性火山活动有关, 这已无可争议。但是, 在界线粘土岩层中, 似乎更为复杂一些。除了上述与火山有关的高温石英和残余流纹结构外, 还发现大量的各种微球粒^[8,9]和大、小混杂的沉积岩、变质岩碎屑颗粒^[10], 较多的黄铁矿和大量的石膏碎片也是界线粘土岩的重要特征。界线粘土岩中的微球粒一般以铁质微球粒为主, 同时还发现少量的透长石质^[8], 铬尖晶石质^[7]和金红石质^[11]以及磷灰石质和有机质等微球粒。一般认为透长石、铬尖晶石和金红石质微球粒可能与地外撞击事件有关。磷灰石和有机质微球粒则可能与生物作用有关。而磁性铁质微球粒, 从微量元素成分上看, 属于地壳来源物。但其成因则既可能与撞击事件有关, 也可能与火山作用有关^[9]。

在中国南方二叠—三叠系界线粘土岩层中, 均或多或少地发现有各种沉积岩、变质岩岩屑。所发现的岩屑成分主要为灰岩、泥质岩、变质砂岩、变质石英岩等。这些岩屑大、小混杂于粘土岩层中。我们在湖北黄石二叠—三叠系界线粘土岩层中曾发现有长达4cm, 重29.5g的不规则状灰岩砾石。界线粘土岩层中大量的黄铁矿和石膏则显然是蒸发、还原环境的产物。说明了界线粘

土岩层形成时沉积环境的缺氧和高温。

另外，本文作者最近在湖北黄石剖面的界线粘土岩层中发现大量的冲击石英和斯石英（详细内容将另文发表）。表明界线粘土岩的形成确实与冲击溅射作用有关。然而至今为止，冲击石英并未广泛地在其它剖面发现，而火山活动的证据却是广泛而普遍的。因此，现在看来，单纯从岩石学和矿物学的角度对这一界线事件下结论是远远不够的。值得庆幸的是，在二叠—三叠系界线层的元素地球化学方面已经做了足够多的工作^[2,12-17]，对这些工作进行总结，也许能提出一些关于事件成因的有益的看法。

二、元素地球化学

现在关于二叠—三叠系界线地层，元素丰度变化存在两种看法。一种认为只存在低的异常^[1,6,12]；另一种则相反，认为存在非常明显的元素丰度异常^[14,15]。我们认为这之间不应当存在什么争议，争议只在于对“异常”本身的看法。另外，关于元素地球化学异常之中，铀的异常似乎被过分地看重了。实际上，铀的数据并不一定能作为事件性质的唯一重要判别依据。因为铀的富集正象已被讨论过的一样，既可来自于陨星的撞击，也可来自于深部火山活动，甚至可能来自于有机质的富集作用。讨论事件的性质，不仅仅只讨论铀异常，其它亲铁元素、亲硫元素、亲石元素（包括稀土）都或多或少地记录了事件发生的信息。综合讨论是很必要的。

1. Ir、Au、Co、Ni、V和Mn

一般来说，二叠—三叠系界线地层元素地球化学异常出现的层位都是界线粘土岩上覆的黑色页岩层。表1列出了已知的亲铁元素在该界线黑色页岩层的丰度。根据表1计算的各元素的平均值为：Ir, 0.123ppb（所有高于1ppb的结果，都被认为是偶然原因造成的，不参与计算）；Au, 1.8ppb；Co, 22.6ppm；Ni, 126ppm；Cr, 98ppm；V, 200.8ppm；Mn, 550ppm。可以认为这一平均结果基本上表明了二叠—三叠系界线样品的亲铁元素异常规模。显然这样的规模是不足以与白垩—第三系界线的异常相比的。但如果M. Oddone, et al. (1986) 所认为的25 ppt Ir的地壳平均值是正确的话（实际上可能还要低得多）^[4]，那么该界线处Ir异常的富集系数达到5左右，可以以为异常仍然是较明显的。

值得注意的是，亲铁元素的异常出现在界线粘土岩上覆的黑色页岩中（图1,2），而不是象白垩—第三系界线那样正好在粘土岩层中。这不得不让人怀疑这些亲铁元素异常的来源。C. J. Orth等人（1986）所认为的黑色页岩富集海水中的亲铁元素的观点看来是正确的。然而这种富集作用的机制，以及所能富集的规模显然目前还不太清楚。黑色页岩富集微量元素的程度看来与其中有机质含量有关，当然也与海洋体系中微量元素的背景值有关。

中国南方广西扶绥东罗二叠—三叠系界线剖面要比其它二叠—三叠系界线剖面更为富集亲铁元素（表1）。这可能与该地区当时的沉积环境有关。对整个中国南方二叠—三叠系界线之上的黑色页岩来说，有机质对亲铁元素的富集看来并不是均衡的（图3）。

从图3可以看出，Ni、Cr、V的富集较Co普遍得多。Co相对页岩背景值（19ppm, from Turekian and Wedepohl, 1961）最高可富集到4.34倍，而最低却贫化到0.3倍。Ni的富集较为明显，但却比较分散。大部分黑色页岩样品Cr、V值与页岩背景值接近，少部分样品则富集达2—7倍，看来唯一没有富集的亲铁元素只有Mn。在所测的11个黑色页岩样品的Mn数据中，只有两个略有富集，其它均相对页岩背景值贫化。总体看来，亲铁元素，除Mn、Ni之外大约相对背景值富集了一倍左右，Ni则相对背景值富集了2倍左右。富集程度最高的是Ir（富集了4倍）。Ir和Ni相对其它亲铁元素更为富集的原因至少有两方面的解释：（1）有机质对Ir、Ni有优先吸附的特性，

表 1 二叠三叠系界线之上黑色页岩的亲铁元素丰度
Table 1 Some siderophile abundances in black shale of the P/T boundary

剖面名称	Li (ppb)	Au (ppb)	Fe (%)	Co (ppm)	Ni (ppm)	Cr (ppm)	V (ppm)	Mn (ppm)	资料来源
浙江长兴	0.600	2.700	3.60	13.3	57.1	90.4	—	—	见参考文献〔13〕
浙江长兴	5.000	—	3.30	12.9	70.2	90.4	—	—	见参考文献〔14〕
浙江长兴	0.034	<6.00	3.80	26.0	—	66.6	—	—	见参考文献〔1〕
浙江长兴	—	—	3.50	14.4	—	96.2	—	—	本实验室〔1987〕
浙江长兴	0.042	<11.0	3.90	22.3	—	115	147	241	Los Alamos 实验室
浙江长兴	—	9.100	3.40	25.0	124	83.6	—	—	本实验室(1988)
四川广元	2.480	—	3.60	17.5	63.2	88.7	—	—	见参考文献〔15〕
四川广元	0.027	—	4.50	9.92	—	136	213	415	Los Alamos 实验室
四川广元	—	1.090	2.90	14.8	59.2	72.2	—	—	本实验室(1985)
外高加索	0.039	—	2.70	—	—	—	—	—	见参考文献〔2〕
S. Antonio	3.000	—	—	—	60.0	84.0	—	—	见参考文献〔3〕
C. Federata	0.077	0.022	—	—	—	—	—	—	见参考文献〔4〕
Sass de P.	0.019	0.005	—	—	—	—	—	—	见参考文献〔4〕
Tesero	0.037	0.010	—	—	—	—	—	—	见参考文献〔4〕
Butterloch	0.057	0.016	—	—	—	—	—	—	见参考文献〔4〕
贵州珠藏	—	—	7.50	33.4	—	108	295	889	Los Alamos 实验室
贵州断杉	0.052	—	3.30	21.0	—	87.1	148	655	Los Alamos 实验室
Nammal	0.366	—	—	—	—	—	—	—	本实验室(1988)
福建龙岩	—	2.460	4.90	16.4	298	84.3	—	—	本实验室(1987)
湖北黄石	—	0.690	3.00	7.50	56.5	36.1	—	—	本实验室(1987)
广西扶绥	—	<5.90	13.7	82.5	347	232	—	—	本实验室(1987)

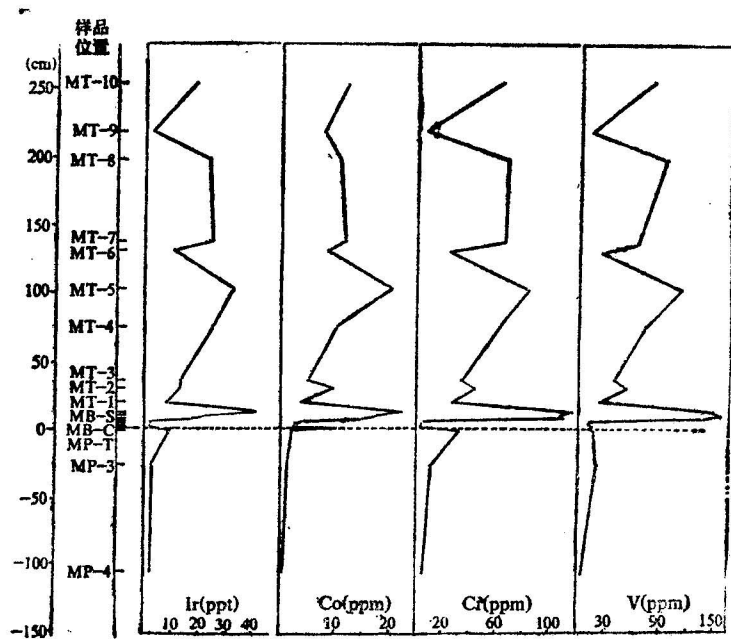


图 2 浙江长兴二叠—三叠系界线剖面亲铁元素的丰度变化
Fig. 2 Abundance patterns for some siderophile elements across the P/T boundary of Changxin, Zhejiang

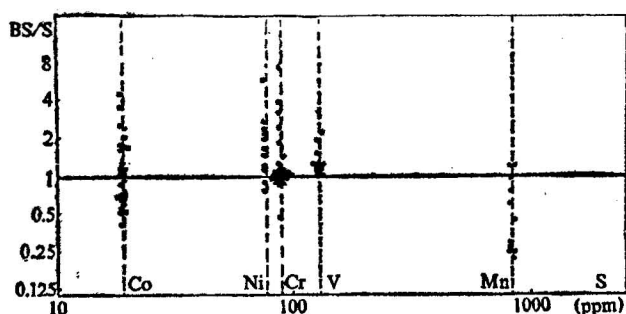


图 3 界线之上黑色页岩的各种亲铁元素相对页岩平均值的相对丰度
Fig. 3 The abundances of various siderophile elements in black shale relative to the average of shale

BS: 二叠—三叠系界线的黑色页岩 (black shale at P/T boundaries); S: 页岩平均值 (shale in crust, from Turekian and Wedepohl, 1961)

(2) 海水亲铁元素背景之上有另外的Ir、Ni补充。

在讨论Ir异常来源时,人们常用到的一对元素比值是Ir/Au。中国南方长兴二叠—三叠系界线的Ir/Au值为0.22,较宇宙丰度比(3.3)低一个量级以上,但比地壳丰度比(0.02)高一个量级左右。在南阿尔卑斯的C. Federala, Sass dep, Tesero, Butterloch二叠系—三叠系界线剖面的Ir/Au值分别为3.5, 3.8, 3.7和3.6,接近于宇宙丰度比^[4]。显然,南阿尔卑斯地区二叠—三叠系界线Ir异常是有利于地外成因的。而中国南方二叠—三叠系界线Ir/Au值介于地壳与宇宙丰度值之间,表明可能存在某种混合效应。

2. Fe、As、Se、Sb和Mo

亲硫元素在所有的二叠—三叠系界线处几乎都有富集。一般认为这是二叠—三叠系之交还原环境的结果。在界线之上黑色页岩中亲硫元素与亲铁元素均得到了富集。这显然是有机质或黑色页岩富集海水中微量元素的结果。然而最富集亲硫元素的层位并不在黑色页岩层中,而是位于界线粘土岩层的底界(图4)。这与该层位出现的大量黄铁矿有关。界线粘土岩层底部样品的穆斯堡尔谱研究表明99%以上的铁都为二价铁。表明了界线粘土岩形成时的强烈还原环境。As、Se、Sb的富集可能是部分替代FeS中硫的结果,而Mo则可能部分替代FeS中的铁而得到富集。

黑色页岩中亲硫元素和亲铁元素虽然都有所富集,但它们似乎并没有明显的相关性(图5)。

3. Na、K、Rb、Cs、Mg、Ca、Ba、Sr、Al、Sc、Ti、Th、U、Hf和Ta

几乎所有亲石元素在二叠—三叠系界线处都开始明显富集(图6)。这与界线事件发生后大陆碎屑物的供应增多有关。大陆碎屑的增多,反映在二叠纪末期,中国南方发生了一次明显的海退事件,这与A. S. Alekseev,等人1983年研究外高加索的Sovetashen剖面所得出的海侵事件的结论正好相反。

从图6可看出,亲石元素的几个峰值都出现于粘土层中,而三叠系下部除粘土岩层之外的其它岩性的亲石元素含量介于粘土层与二叠系海相灰岩之间。由此表明,粘土岩层属于真正的大陆来源物,而三叠系其它沉积物都是含有大量陆源碎屑物的海洋沉积产物。粘土岩层显然是以某种快速的方式沉降下来的。因为正常的海洋沉积粘土岩沉积速率极低,海洋体系的微量元素相应就会增加。事实上,图7所示的Mn/Ti值沿粘土岩层的变化正如所设想的一样。Mn是典型海洋沉积的元素,而Ti则是典型的大陆来源的元素。Mn/Ti值越高,反映沉积速率就越慢。无论界线粘土岩或非界线粘土岩,Mn/Ti值一般均小于0.1,广元剖面界线粘土岩Mn/Ti值可达0.2,如此低的Mn/Ti值,反映5cm厚度的粘土岩层有可能是在1—2年内沉积的,如此快速的沉积作用只有浊流

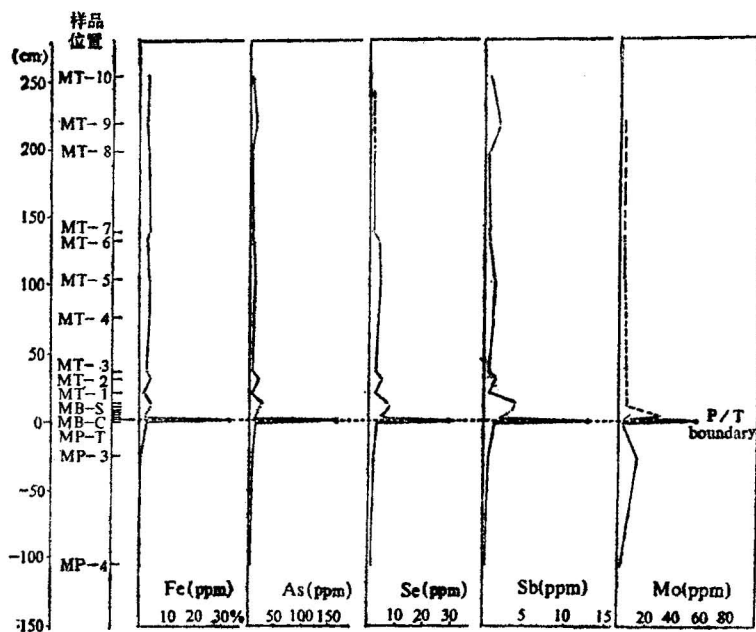


图 4 浙江长兴二叠—三叠系界线剖面亲硫元素的丰度变化

Fig. 4 Abundance patterns for some chalcophile elements across the P/T boundary of Changxin, Zhejiang

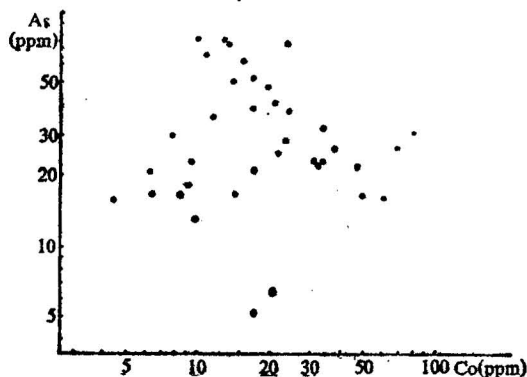


图 5 中国南方二叠—三叠系界线层黑色页岩中As与Co的相关性

Fig. 5 The correlation of As and Co in the P/T boundary black shale in southern China

事件、火山灰或冲击降落物的沉降可以达到。以剖面地质记录来看，浊流事件似乎可以排除，而残余流纹结构以及大量的典型中、酸性火山岩矿物在粘土岩层中的发现，表明这些粘土岩层的成因与火山灰降落物有关已属无疑。

Al也是典型的大陆造岩元素，Mn/Al值同样也反映了沉积速率的变化（图8）。将铍的数据作沉积速率的校正后（Ir/Mn），在界线层黑色页岩的顶部发现明显的铍异常。显然在正常铍沉积的背景上，黑色页岩对铍有明显的富集作用。

Rb/K值反映海水盐度的变化，图8表明以二叠纪末期开始，海水盐度突然性增高，这可能与该时期的高温蒸发环境有关，事实上，在界线粘土岩层的底部已经发现了大量的蒸发成因的石膏矿物碎片^[10]。

Th/U、K/Na、Hf/Ta值也可大致反映沉积物来源的变化。一般来说Th/U、K/Na值越大，

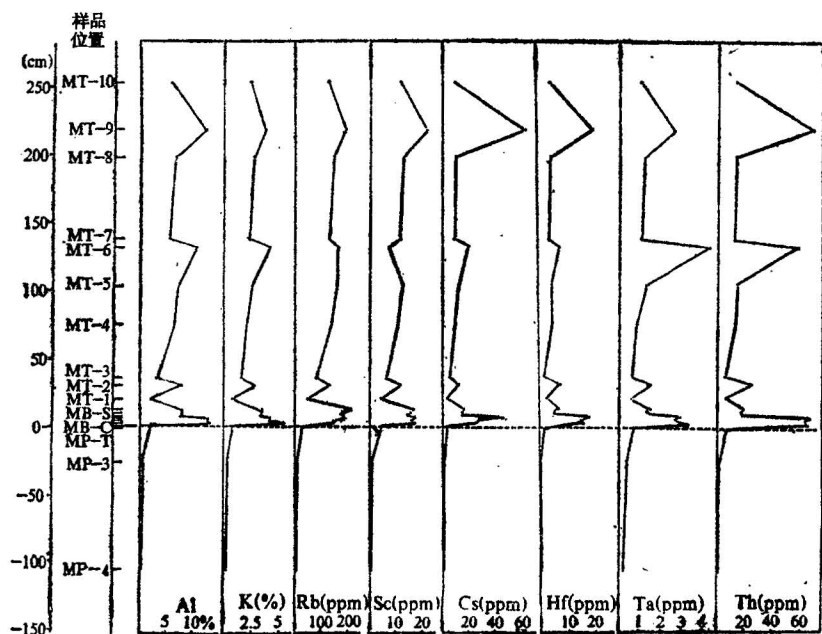


图 6 浙江长兴二叠—三叠系界线剖面亲石元素的丰度变化

Fig. 6 Abundance patterns for some lithophile elements across the P/T boundary of Changxin, Zhejiang

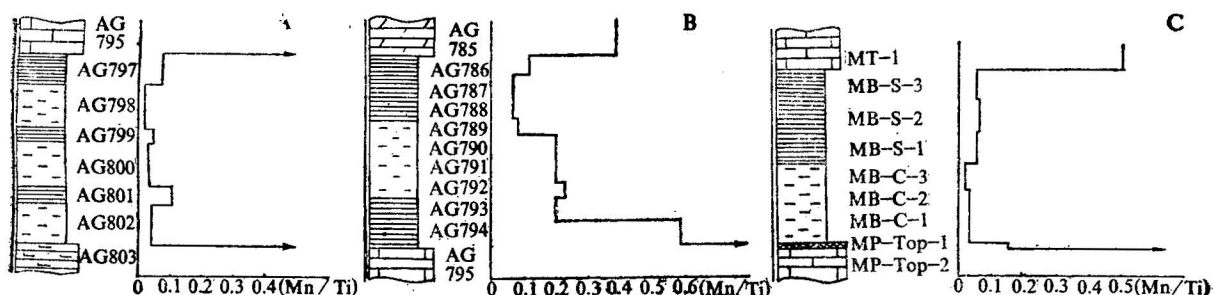


图 7 中国南方二叠—三叠系界线及附近粘土岩的Mn/Ti值的垂向变化

Fig. 7 Patterns for ratios of Mn to Ti concentrations in the claystone at and near the P/T boundary of southern China

A—广元剖面的层粘土岩 (GS25 claystone of Guangyuan section); B—广元剖面的界线粘土岩 (boundary claystone of Guangyuan section); C—长兴剖面的界线粘土岩 (boundary claystone of Changxing section)

岩石含陆源物越多, Hf/Ta值则比较恒定, 不同的岩性一般均有相应的Hf/Ta值范围。图 9、10显示了Hf/Ta、Th/U值在界线粘土岩和黑色页岩中的相互关系, 看来, 在界线粘土岩层中Hf/Ta、Th/U值具有弱的负相关性, 而在黑色页岩中, 它们则几乎不具有相关性。

与界线粘土岩相反, 界线附近的非界线粘土岩中, Hf/Ta与Th/U值呈正相关性 (图11)。由此看来, 界线粘土岩与非界线粘土岩在成因上可能仍有区别。

4. 稀土元素

稀土模式是判断沉积物来源的有效手段。目前, 只有界线及其附近的几层粘土岩成因还存在争议。为了进行对比, 我们还测定了白垩—第三系界线粘土岩和中国南方三叠系火山灰样品的稀土丰度。

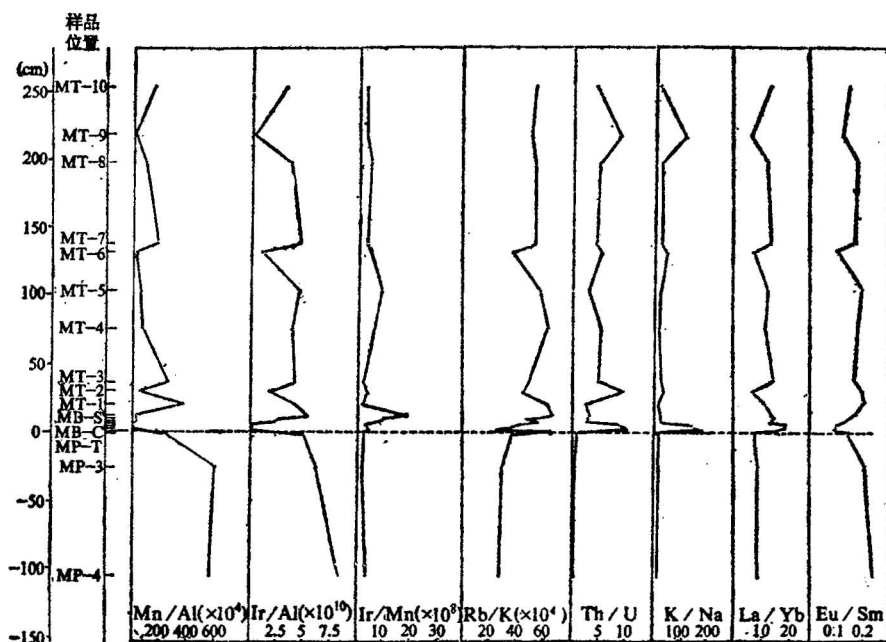


图 8 浙江长兴二叠—三叠系界线剖面Mn/Al, Ir/Al, Ir/Mn, Rb/K, Th/U, K/Na, La/Yb和Eu/Sm值的丰度变化

Fig. 8 Abundance patterns for ratios of Mn to Al, Ir to Al, Ir to Mn, Rb to K, Th to U, K to Na, La to Yb and Eu to Sm concentrations across the P/T boundary, Changxin, Zhejiang

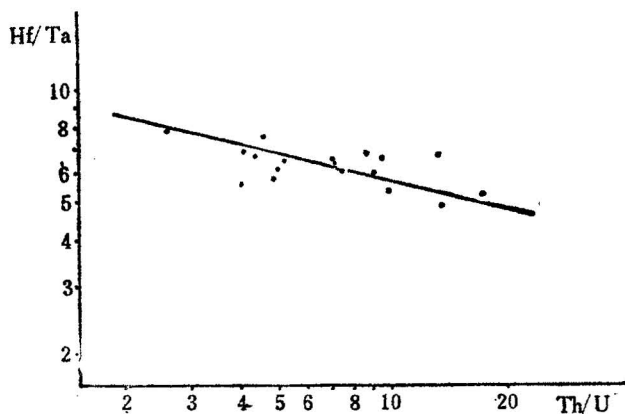


图 9 中国南方二叠—三叠系界线粘土岩Hf/Ta, Th/U值相关性
Fig. 9 The correlation of Th/U and Hf/Ta ratios in the P/T boundary claystone in southern China

图12, 13分别显示了中国南方二叠—三叠系界线和界线附近的粘土岩稀土配分模式。

由图看出, 界线粘土岩和非界线粘土岩在稀土模式上主要存在以下几点区别: 1. 界线粘土岩相对非界线粘土岩更加富集轻稀土; 2. 界线粘土岩的稀土模式斜率大于非界线粘土岩的 (La/Yb值分别为13和5.17); 3. 界线粘土岩的Eu负异常小于非界线粘土岩 (δEu 分别为0.39和0.28); 4. 界线粘土具有较小的Ce负异常 ($\delta\text{Ce}=0.88$), 而非界线粘土岩不明显或具小的Ce正异常 ($\delta\text{Ce}=1.15$)。

从图14可以看出, 界线粘土岩和非界线粘土岩的稀土分布虽然与三叠系的模式相近, 但非界

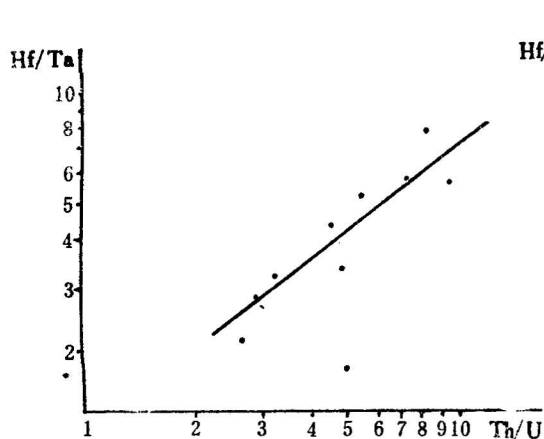


图 10 中国南方二叠—三叠系界线黑色页岩 Hf/Ta, Th/U 值相关性

Fig. 10 The correlation of Th/U and Hf/Ta ratios in the black shale at the P/T boundaries of southern China

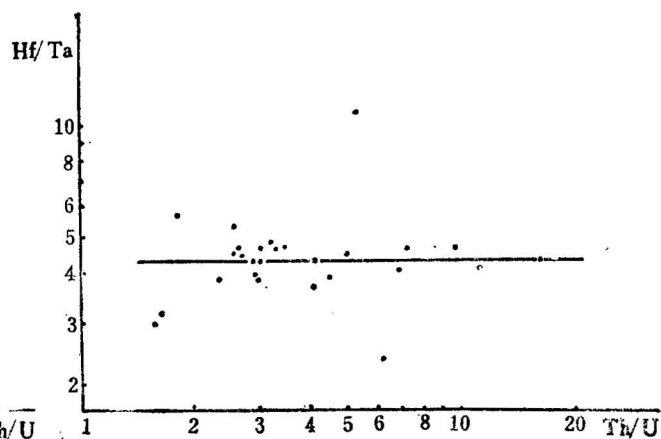


图 11 非界线粘土岩中 Hf/Ta, Th/U 值的相关性

Fig. 11 The correlation of Th/U and Hf/Ta ratios in the non-boundary claystone near the P/T boundaries in southern China

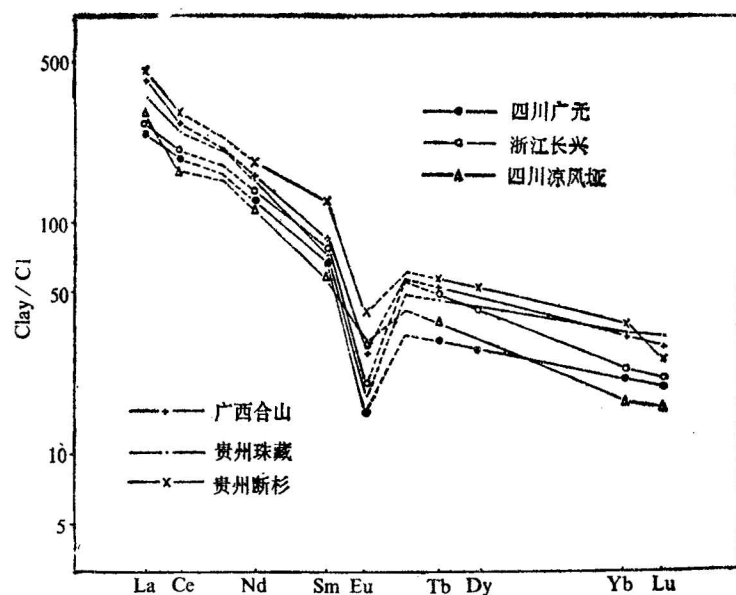


图 12 中国南方二叠—三叠系界线粘土岩层的稀土元素分布

Fig. 12 REE abundances in P/T boundary claystone of southern China

线粘土岩的模式则更为接近些。界线粘土岩与火山灰模式比较, Eu 负异常要小, 而 La/Yb、La/Sm、Tb/Yb 值都要大, 并显示小的 Ce 负异常。由此看来, 界线粘土岩的成因虽然与火山活动有关, 但也并非单纯由火山灰形成。而非界线粘土岩层, 由于稀土元素模式与三叠系火山灰的相似性, 再加上火山矿物和流纹结构的发现, 其为火山灰蚀变产物的可能性极大。

一般认为白垩—第三系界线粘土岩层的成因为撞击溅射物的蚀变产物。从图 14 上可以看出, 其稀土分布模式与中国南方二叠—三叠系界线粘土岩层有某些相似之处, 例如 La/Yb 值大, 具有 Ce 和 Eu 负异常, 但也存在较明显的差别, 即 Ce 负异常大, Eu 负异常小, 稀土总量低。稀土总量

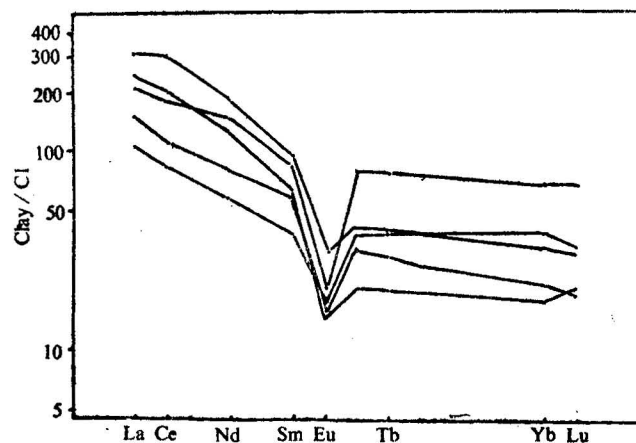


图 13 中国南方二叠—三叠系界线附近的非界线粘土岩稀土元素分布
C₁—C₄型碳质球粒陨石

Fig. 13 REE abundances in non-boundary claystone near the P/T boundaries of southern China

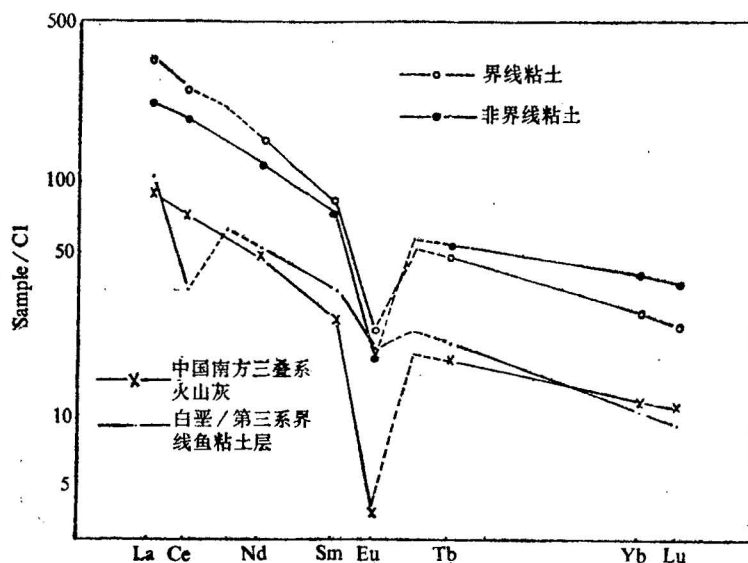


图 14 二叠—三叠系界线及其附近粘土岩与三叠系火山灰和 Stevns Klint (丹麦) 白垩—第三系 界线粘土岩稀土模式对比

Fig. 14 REE patterns of claystone at and near the P/T boundary, and in samples of Triassic volcanic ash and Stevns Klint, Denmark K/Tr boundary claystone. (Data of K/Tr boundary clay from F. Kyte et al., 1980)

低似乎可以用蚀变过程中富集稀土元素程度大小来解释,但一般来说,蚀变过程不会导致稀土元素之间的分馏。因此,Ce和Eu负异常反映了来源物或岩石形成过程的特点。

由此,我们认为二叠—三叠系界线粘土岩的稀土分布模式,可能是由中、酸性火山灰和冲击溅射产物的上地壳物质(以白垩—第三系界线粘土岩作代表)组合起来的一种混合稀土模式。

为了大致了解这两类物质以多大比例混合形成中国南方的二叠—三叠系界线粘土岩,我们作了以下两点基本假设:1.假定Eu负异常的大小,纯属两种物质本身Eu异常简单混合的结果;2.假定界线粘土岩中Ce异常大小纯系上地壳溅射物质产生过程或后期海底蚀变的结果,火山物质在

喷发和蚀变过程中没有导致Ce与其它稀土元素的明显分馏。这一点实际上已经在非界线粘土和白垩—第三系界线粘土的稀土模式上得到证实。

由上述两项假定, 我们可以分别独立地计算出两个混合系数。依据Eu负异常, 计算的结果为上地壳溅射物质与中酸性火山物质的混合比为0.29:0.71; 而依据Ce负异常, 计算结果, 上地壳物质与火山灰的混合比为0.30:0.70。两个独立计算的结果竟如此接近, 这无疑也是对这一假设本身的检验。

三、结 论

中国南方二叠—三叠系界线地层元素地球化学的研究, 表明了二叠—三叠系界线事件是一起较复杂的事件。从稀土元素和其它微量元素的角度看, 都暗示出二叠—三叠系界线粘土岩的成因不仅与火山活动有关, 而且也与撞击事件相关。这与从岩石、矿物和微球粒方面所得到的证据是一致的。

事实上, 火山说与撞击说看来都是对的, 但它们并不一定互相排斥。中国南方二叠—三叠系界线粘土岩由中、酸性火山灰和上地壳冲击溅射物质混合形成的模式能较好地解释来自两方面的证据, 并且从另一个角度, 也支持了二叠—三叠系界线事件并非简单的撞击事件或简单的火山事件的看法。很可能是, 在撞击事件发生的同时, 中国南方的火山活动也是十分普遍而剧烈的。

文中采用的部分样品是分别由徐道一、孙亦因、何锡麟、殷鸿福等提供的。本研究项目得到了国家自然科学基金会的资助。在此一并致以谢意。

参 考 文 献

- [1] Clark, D. L., Wang, C. Y., Orth, C. J., Gilmore, J. S., 1987, Conodont survival and low iridium abundances across the Permian-Triassic boundary in South China. *Science*, Vol. 233, pp. 984—986
- [2] Alekseev, A. S., 1983, The Permian/Triassic boundary event: Geochemical investigation of the Transcaucasia section. *Lunar and Planetary Science* 14, 1983, NASA, Houston, Texas.
- [3] Bandrner, R., Donofrio, D. A., Krainer, K., Mostler, H., Nazarov, M. A., Resch, W., Stingl, V. and Weisrert, N., 1986, Events at the Permian-Triassic boundary in the Southern and Northern Alps. In Abstract for Field conference on Permian and Permian-Triassic boundary in the South-Alpine segment of the Western Tethys, and additional regional reports. pp. 15—16. Pavia: Soc. Geol. Ital. and IGCP-203.
- [4] Oddone, M. and Vannucci, R., 1986, Geochemical stratigraphy at the P/T boundary in the Southern Alps, In Abstract for Field Conference on Permian and Permian-Triassic boundary in the South Alpine Segment of the Western Tethys, and additional regional reports. pp. 44 Pavia: Soc. Geol. Ital. and IGCP-203.
- [5] 何锦文、柴之芳、马淑兰, 1988, 浙江长兴P/T界线剖面高温石英的发现及其意义。科学通报, 第33卷, 第14期, 第1088—1091页。
- [6] 殷鸿福、张克信、杨逢清, 1984, 华南古、中生代之交海洋生物界的更替。国际交流地质学术论文集(1)。地质出版社。
- [7] 殷鸿福、黄思骥、张克信、杨逢清、丁梅华、毕先梅、张素新, 1989, 华南二叠—三叠纪之交的火山活动及其对生物绝灭的影响。地质学报, 第63卷, 第2期, 第169—181页。
- [8] 何锦文、芮琳、柴之芳、马淑兰, 1987, 浙江长兴地区二叠、三叠系之交的火山活动。地层学杂志, 第11卷, 第3期, 第194—199页。
- [9] 周瑶琪、柴之芳、马建国、孔屏、付国民, 1988, 四川广元上寺P/T界线粘土岩中铁质小球的初步研究。科学通报, 第33卷, 第5期, 第397—398页。
- [10] 周瑶琪、柴之芳、马淑兰、毛雪瑛、何锦文、孙亦因, 1986, 浙江长兴煤山二叠、三叠系界线间的冲击事件。科学通报, 第31卷, 第23期, 第1838—1839页。
- [11] 徐桂荣、张克信、黄思骥、吴顺宝、毕先梅, 1988, 湖北黄石地区上二叠统和二叠、三叠系界线事件研究。地球科

- 学, 第13卷, 第5期, 第521—527页。
- [12] Asaro, F., 1982, Geochemical anomalies near the Eocene/Oligocene and Permian/Triassic boundaries. The Geological Society of America, Special Paper. 190, pp. 517—527
- [13] Chai, C. F., 1987, Neutron activation studies of refracting siderophile element anomaly and other trace element patterns in boundary clay between Permian/Triassic, Changxing, China. Jour. Radioanalytical and Nuclear Chem. Articles, Vol. 114, No. 2, pp. 293—301.
- [14] Sun, Y. Y., Xu, D. Y., Chai, C. F., 1984, The discovery of iridium anomaly in the Permian-Triassic boundary clay in Changxing, Zhejiang, China and its significance. In Development in Geoscience ed. Tu Guangzhi, pp. 235—246, Beijing, Science Press.
- [15] Xu, D. Y., Chai, C. H., Sun, Y. Y. and Zhang, Q. W., 1985, Abundance variation of iridium and trace elements at the Permian/Triassic boundary at Shangshi in China. Nature, Vol. 314, pp. 154—156.
- [16] Zhou, Y. Q., Chai, C. F., Ma, S. L., Mao, X. Y., Sun, Y. Y., and He, J. W., 1987, On the catastrophic environment of Permo-Triassic boundary in South China. In the Abstract for the Final Conference of IGCP-203, pp. 38, 5—9 Sept. 1987, Beijing.
- [17] Zhou, Y. Y., Chai, C. F., Ma, S. L., Mao, X. Y., Sun, Y. Y. and He, J. W. 1987, The impact event records at the Permian-Triassic boundary of Changxing, Zhejiang, China. Science Bulletin. Vol. 32, pp. 1655—1656.

A MIXING MODEL—THE ELEMENTAL GEOCHEMISTRY OF PERMIAN-TRIASSIC BOUNDARIES IN SOUTH CHINA AND ITS IMPLICATIONS

Zhou Yaoqi, Chai Zhifang, Mao Xueying, Ma Shulan, Ma Jianguo and
Kong Ping

(Institute of High Energy Physics, Academia Sinica, Beijing)

He Jinwen

(Nanjing Institute of Geology and Palaeontology, Academia Sinica, Nanjing)

Abstract

A large mass extinction occurred at the end of the Permian. What caused the extinction? Extraterrestrial impact or terrestrial volcanicity? Some researchers think the mass extinction might be caused by a large-scale impact event. This hypothesis is based on Pt-group element anomaly and presence of microspherules and clastics of metamorphic rocks in boundary clays, which were thought to be related to impact event. However, some others considered the Permian/Triassic event as a volcanic one. Their reasons are as follows: (1) the volcanic rhyotaxitic structure was found in the boundary claystone, (2) many high-temperature β -quartzs formed in volcanic activity were discovered from the boundary claystone, and (3) there are 3 to 7 claystone layers near the P/T boundary, which are similar to the boundary claystone in elemental composition. In order to answer the question, the authors checked eleven sections of Permian/Triassic boundary in China and the Nammal section in Pakistan by NAA. A slight Ir anomaly has been detected in the black shale on the P/T boundary, and very clear siderophile elements anomalies were found in the Fusui section of China. Those anomalies may be caused by the enrichment process of the black shale, but Ir and Ni abundances,

5 times higher than the background of the shale, may be too high to the normal enrichment of black shale. There must be another siderophile source in addition to the background of sea water. The REE abundances in claystone at and near the P/T boundary in different sections of South China were detected by INAA. And the REE patterns of boundary claystone differ from those of non-boundary claystone, which indicates their different sources. For comparison, the authors also determined the REE of the acidic-intermediate volcanic rocks of Triassic age and those of the Pre ϵ/ϵ , D/C and C/T boundary claystones. From those REE patterns and some other evidence, the authors put forward a proposal that the P/T boundary claystone may be a mixed product consisting of acidic-intermediate ashes and the upper crust substances representing sputtering component (here the data of C/T-boundary claystone are used). And the calculated mixing ratio of the former to latter is 7:3.

The mixed model of forming boundary claystone can better explain the experimental facts from two aspects, i. e.: the volcanic activity and impact event. A possible scenario is that at the end of the Permian, an large-scale impact triggered severe activity of volcanos. Or these two interactions simultaneous occurred at that time.

作者简介

周瑶琪，生于1963年，1983年毕业于武汉地质学院矿产系。1989年12月毕业于中国科学院研究生院，获硕士学位。现为中国科学院高能物理研究所核宇宙化学专业博士研究生。在国内外共发表学术论文30多篇，其中做为第一作者的有20篇。通讯处：北京市2732信箱，邮政编码100080。