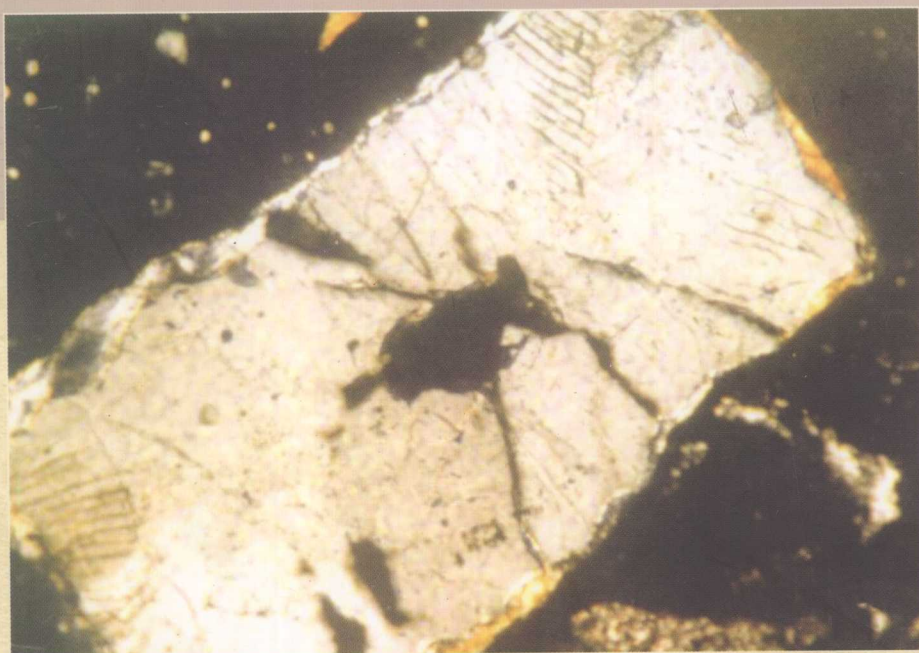


# 二叠三叠系 界线事件研究

The Study on the  
P/T Boundary Events

■ 周瑶琪 著



石油大学出版社

# 二叠三叠系界线事件研究

周瑶琪

石油大学出版社

图书在版编目(CIP)数据

二叠三叠系界线事件研究/周瑶琪编著. —东营:石油大学出版社,2005.3

ISBN 7-5636-1996-8

I. 二... II. 周... III. 二叠纪~三叠纪-地层划分-研究 IV. P534

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2005)第 101220 号

书 名: 二叠三叠系界线事件研究  
作 者: 周瑶琪

---

责任编辑: 周洁韶  
封面设计: 王凌波

---

出 版 者: 石油大学出版社(山东东营, 邮编 257061)  
网 址: <http://sunctr.hdpu.edu.cn>  
电子信箱: [upecpress@hdpu.edu.cn](mailto:upecpress@hdpu.edu.cn)  
排 版 者: 石油大学出版社排版中心  
印 刷 者: 东营市新华印刷厂  
发 行 者: 石油大学出版社(电话 0546-8391797)  
开 本: 185×260 印张:16.75 字数:424千字  
版 次: 2005年5月第1版第1次印刷  
印 数: 1—600册  
定 价: 40.00元

献给

我心爱的妻子和可爱的孩子

# ON THE PERMIAN/TRIASSIC BOUNDARY EVENTS

## Abstract

Almost ten years have past since the Permian/Triassic boundary was studied as an event, but there are no imperative views on the cause of the event. However, the terrestrial volcanic eruption and extraterrestrial impact are considered as two possible mechanisms. In order to find out the event's nature, we systematically studied 11 Permian/Triassic boundary sections in South China with various methods, and compared them with the samples from North China and Pakistan. The methods we used include Neutron Activation Analysis, General Optical Microscope, X-ray Diffraction, Electron Microprobe Analysis, Electron Micro-diffraction, Scanning Electron Microscope, Mössbauer Spectrometry, Sulfur Isotope Mass Spectrography, Strontium Isotope Mass Spectrography, and Cathodoluminescence, etc.

This paper covered sedimentary environments, event sedimentary model, microspherules at the boundary clays, shock quartz and stishovite, element geochemistry in various sedimentary rocks at the Permian/Triassic boundary, abundance and anomalies of sulfur and strontium isotopes across the boundary section in Changxing, difference between boundary and non-boundary clays, element abundances of various material facies in clays at and near the P/T boundaries, a unique detritus in boundary clay and its source and formation, etc. Through the discussions of the above subjects, a mixed model on the P/T boundary events is proposed, i.e., the P/T boundary events are synthetic effect of extraterrestrial impact and terrestrial volcanic eruption. Some main research subjects are introduced as follows.

### 1. Boundary Event Sedimentation

An impact events sedimentary model is discussed on the basis of sedimentary changes across various environments of P/T boundary sections in South China. The environmental changes caused by boundary events relate to the environmental background before the events. High temperature, anoxic system, and regression are general trend of environmental changes after P/T boundary events.

### 2. Microspherules

Up to 13 types of microspherules are discovered at and near the P/T boundary clays. Among them, sanidine, chromium spinel, and rutile microspherules may be directly originated from the asteroid impact, while the formations of apatite, pyrite and organism microspherules relate to the sedimentary and biological processes. However, the formation about ferrite, ferri-stone, silicate, calcareous silicate and silicic microspherules is not clear, but they must have the same cause. Before the spherules were formed, they could have experienced an initial differentiation, occurred in a high



- temperature cloud, which might relate to impact or to volcanic eruption.

Chamosite and illite microspherules in boundary clays are alteration products of ferri - stone and silicate vitreous microspherules on the sea bottom.

### 3. Shock Quartz

The debris of quartz in the P/T boundary clay in Yegang section, Huangshi, Hubei, belongs to a Low - grade metamorphic quartzite. The lamellae consisting of glass are found in many quartz debris. The lamellae directions are along 2 to 3 crystal faces. There are inserting crystalline quartzs in glass facies, which is a typical feature of shock quartz.

In addition, there are also much stishovite crystallite ( $< 1\mu\text{m}$ ) in glass facies. Two main crystal face interval distance ( $2.96 \text{ \AA}$  and  $1.55 \text{ \AA}$ ) of stishovite are all determined by X - ray diffraction and electron diffraction.

The discovery of shock quartz and stishovite in boundary clay indicates that these debris of quartzite could have experienced over 100 kbar pressure.

### 4. Element Geochemical Anomalies

The iridium anomaly at the P/T boundary layers seems true. The abundance of iridium from different sections change from 0.03 to 0.6 ppb, at least 5 time higher than the background value of the Limestone in Permian. However the anomaly appeared at the black shale near the boundary, instead of boundary clay. Hence, a large fraction of iridium may come from the enrichment processes of organism. But the high flux of cosmic iridium also play an important role in the formation of iridium anomaly.

The siderophile and sulphophile anomalies at and near the P/T boundaries may be a result from anoxic environment. The abundances of lithophile elements in Triassic are higher than those in Permian. It may be caused by a major regression of the sea.

### 5. Sulfur and Strontium Isotope Anomalies

There is a  $\delta^{34}\text{S}$  positive anomaly in P/T boundary clay. The  $\delta^{34}\text{S}$  in pyrite of limestone in Permian are  $-6.6\text{‰}$  to  $-9.2\text{‰}$ , while the  $\delta^{34}\text{S}$  is  $-0.6\text{‰}$  in pyrite of limestone in Triassic. In the sypsum of boundary clay, the  $\delta^{34}\text{S}$  is  $+25.7\text{‰}$  in Changxing, and  $+43.1\text{‰}$  in Nammal, Pakistan. The sulfur isotope positive anomaly and the carbon isotope negative anomaly may reflect then same event. They are all the result of anoxic environment and enrichment of organism.

The initial strontium isotope ratio ( $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ ) across the P/T boundary has a large rise from 0.70738 in the limestone at the top of Permian to 0.71501 in marlite at the bottom of Triassic. This change may be related to the increase of continental weathering area and erosion rate caused by acid rain and fall of sea level.

The initial strontium negative anomaly at the boundary clay [ $(^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}) = 0.70384$ ] indicates that the original rock of this clay is different from normal sedimentary rocks.

### 6. Unique Detritus

The grey green illite detritus with specularite rust are found at the boundary clay in Yianshi, Longxing, Hujiang and Yegang, Huangshi, Hubei. These unique detritus shows unfractionated REE patterns, and high abundances of large ion lithophile elements. Besides the illite, there are

also pyrophosphorite, granuline, cristobalite in boundary clay, which are resistant to alteration. When the Rb input in alteration process is considered, we set a model age of these unique detritus of about 4000 Ma. These detritus may be a product of impact spattering from the moon. Their protolith is suspected as a mixed material of KREEP or Framono basalt and lunar highland anorthosite.

### **7. Difference Between the Boundary and Non - boundary Clays**

Although there is much similarity in the major elements, there are also some differences in trace elements, especially, the REE patterns, between the boundary and non - boundary clays. Compared with the non - boundary clays, the boundary clays have smaller negative Eu anomalies and larger La/Yb, La/Sm, and Tb/Yb ratios. The boundary clay, in addition, is also more stable than the non - boundary clays. Thus, although formation of the boundary clays was undoubtedly related to volcanic activity, that was not the only factor affecting formation of the clays. The source rocks of boundary clay may be a product from a mixture of acidic - intermediate volcanic ash and upper crust matter spattered by an impact event, the mixing coefficient is about 1:1. Non - boundary clays, on the other hand, are made mainly of volcanic alteration products.

### **8. Elemental Analysis of Various Facies in Boundary Clays**

Besides montmorillonite - illite and various micropospherules, there are also many minerals of quartz and gypsum and detritus of sedimentary and metamorphic rocks in boundary clays. The INAA results of these detritus in boundary clays from different sections indicate that except a few detritus of sedimentary rocks, a large amount of detritus (including sedimentary, metamorphic rocks and quartz) may be from outside South China, because their REE patterns are similar to the pattern of upper crust, and have a large difference in REE from the sedimentary and volcanic rocks in South China. It is very possible that these detritus are spattering products by impact.

Besides the above detritus, there are a few pyroclastic material and pyrogenetic mineral (including hexagonal bipyramid high quartz, and idiomorphic apatite, zircon) in boundary clays. It indicates that the formation of boundary clay relates to the volcanic eruption at the same time. Hence, the P/T boundary events get a further evidence to hold a mixed events by extraterrestrial impact and terrestrial volcanic eruption.

# 目 录

## Contents

英文摘要	I
前 言	1
序	3
第一部分 绪论	21
参考文献	26
第二部分 事件沉积——模式和分布	29
一、事件沉积模式	29
1. 冲击事件沉积的含义与沉积模式类型	29
2. 模式分层解释	30
3. 事件沉积模式	33
4. 模式带来的疑问	39
二、二叠三叠系界线事件沉积	40
1. 事件背景和环境变化	40
2. 二叠三叠系界线剖面概述	46
3. 界线粘土层	51
4. 非界线粘土层	57
5. 事件沉积	57
参考文献	64
第三部分 微球粒和冲击变质石英	66
一、微球粒	66
1. 微球粒在地层剖面中的分布	66
2. 微球粒的成分分类	68
3. 微球粒的外部形貌和内部结构	74
4. 微球粒成因讨论	76
二、冲击变质石英	82
1. 普通光学显微分析	82
2. X-射线照像分析	86
3. 透射电镜分析	87



4. 阴极射线发光分析 .....	92
5. 中子活化分析 .....	95
6. 讨论 .....	96
参考文献 .....	96
<b>第四部分 微量元素和同位素异常 .....</b>	<b>99</b>
<b>一、中国南方二叠三叠系界线剖面的元素地球化学 .....</b>	<b>99</b>
1. 碱金属 Na、K、Rb、Cs .....	99
2. 碱土金属 Mg、Ca、Sr 和 Ba .....	105
3. 陆源性元素 Al 和 Ti .....	109
4. 亲岩元素 Hf、Ta、Zr 和 Sc .....	113
5. 放射性元素 U 和 Th .....	116
6. 亲硫元素 As、Se 和 Sb .....	118
7. 稀土元素 La、Ce、Nd、Sm、Eu、Tb、Yb 和 Lu .....	119
8. 铁族元素 Fe、Co、Ni、Cr、V、W 和 Mn .....	123
9. 贵金属元素 Os、Ir、Pt、Re 和 Au .....	127
<b>二、元素地球化学异常 .....</b>	<b>130</b>
1. 浙江长兴煤山剖面 .....	132
2. 四川广元上寺剖面 .....	137
3. 湖北黄石冶钢剖面 .....	140
4. 福建龙岩雁石剖面 .....	143
5. 广西扶绥东罗剖面 .....	144
<b>三、浙江长兴煤山二叠三叠系界线剖面同位素异常 .....</b>	<b>148</b>
1. 硫同位素异常 .....	148
2. 锶同位素异常 .....	154
参考文献 .....	161
<b>第五部分 事件成因——火山活动还是地外撞击? .....</b>	<b>167</b>
<b>一、引言 .....</b>	<b>167</b>
<b>二、非界线粘土岩 .....</b>	<b>168</b>
<b>三、界线粘土岩 .....</b>	<b>175</b>
<b>四、界线粘土岩与非界线粘土岩的区别 .....</b>	<b>187</b>
<b>五、混合成因模式——界线粘土成因讨论 .....</b>	<b>189</b>
<b>六、未解决的问题 .....</b>	<b>192</b>
参考文献 .....	193
<b>第六部分 来自月球的冲击溅射物 .....</b>	<b>195</b>
<b>一、剖面分布特征 .....</b>	<b>195</b>
<b>二、碎屑矿物学特征 .....</b>	<b>197</b>
<b>三、元素地球化学特征 .....</b>	<b>205</b>
<b>四、可能的海水蚀变过程 .....</b>	<b>212</b>
<b>五、铷、锶同位素分析 .....</b>	<b>214</b>

六、讨论 .....	216
七、存在的问题 .....	217
参考文献 .....	217
<b>第七部分 未来的研究方向 .....</b>	<b>220</b>
一、界线事件与全球构造 .....	220
二、撞击事件诱发核反应 .....	221
三、痕量铀的赋存状态 .....	223
四、同位素的物相分析 .....	223
五、实验室的化学模拟 .....	223
参考文献 .....	224
<b>附录 I 二叠三叠系界线剖面中子活化分析的微量元素丰度特征 .....</b>	<b>226</b>
<b>附录 II 本文作者发表的有关二叠三叠系界线事件的论文索引 .....</b>	<b>253</b>

# 前 言

我对二叠三叠系界线事件的研究,最早是从 1981 年开始的,当时我正在读大学二年级。一个偶然的机,我在阅览室里读到了法国学者 G. Demortier 的流星陨落说和美国加州大学 Alvarez 小组在意大利 Gubbio 地区白垩、第三系界线粘土中发现铱异常,并由此提出了小行星撞击地球导致恐龙绝灭假说的两篇文章。这给了我启示,并把我对地质学的全部热情都引导到了对二叠三叠系界线事件的研究中。1983 年起,我就开始发表有关二叠三叠系界线及其事件的系列论文,并多次参加全国性和国际性的关于二叠三叠系界线事件的学术会议。在与国内外同行交流过程中,更加深了我对二叠三叠系事件的了解。

本论文工作主要是我 1985 年底到中国科学院高能物理研究所工作后开始的。我工作的重点,是用中子活化分析的手段,测量不同地区的二叠三叠系界线剖面的微量元素丰度及其变化。这一工作实际上也是我们研究小组的一个研究方向,并得到了国家自然科学基金和北京中关村地区联合测试基金的资助。在柴之芳老师的指导和全组同志的共同努力下,我们分析了十五条国内外二叠三叠系界线剖面的大约 300 个样品,其中 237 个样品的分析数据在这一论文中得到了讨论。为了使讨论更加深入,我还对其中部分样品进行了 X 射线衍射电子探针、光学显微镜、S、Sr 同位素质谱、透射电镜、穆斯堡尔谱等项分析。具体工作量见表 1-1。

表 1-1 样品测试统计表

分析项目	单 位	数 量	经费分布/元	测试单位
中子活化分析	个	237	23 700	中科院高能所
X 射线衍射	个	12	600	中科院化冶所
电子探针分析	点	15	750	北京大学地质系
透射电镜分析	机时	200	4 000	北京理化测试中心
光学薄片分析	个	30	300	北京大学地质系
硫同位素质谱	个	6	300	地科院矿床所
铈同位素质谱	个	10	2 000	地科院矿床所
穆斯堡尔谱分析	个	1	—	中国地质大学
阴极射线发光分析	个	12	100	石油科学研究测试中心

在我的论文工作期间,我首先要感谢柴之芳导师同意我选择这一让我感兴趣的课题作为我的学位论文题目,以及对我的耐心指导和全面支持,其次我要感谢我们研究小组的毛雪瑛老师、马淑兰老师、马建国同志、方虹同志、孔屏同志和丁祖国同志所提供的许多无私帮助。在我工作期间,国家地震局地质研究所的徐道一教授、中国科学院贵阳地化所的欧阳自远教授、中国地质大学的杨遵仪教授、刘本培教授、殷鸿福教授;北京大学的白顺良教授、张淑媛教授、王新平教授;中国地质科学院地质所的李子舜教授以及美国伊利诺州



# 序

从事地球科学研究和学习已 25 年,其中大约有 10 年的连续时间(1979 - 1989)我的研究兴趣主要集中在二叠三叠系界线事件方面。这本书集中反映了我这 10 年对该领域的综合性研究成果。该书是以我 15 年前中国科学院的硕士学位论文(1989)为基础的,为了保持历史数据和学术观点的原貌,本书的出版未对原学位论文做任何修改和增删。15 年来,国际二叠三叠系界线事件研究领域又有了许多重大进展,当时一些有争议的观点和看法现在都一一获得观测事实的支持或证伪。对这些争议进行回顾和讨论,应当有益于该学术领域研究的进一步深入和发展。

## 一、地外撞击还是火山成因

标志二叠三叠系界线事件(P/T 界线)的生物绝灭事件[(251.4 ± 0.3)Ma]是过去 540 Ma 以来规模最大的生物事件(D. H. Erwin, 1994),超过 90% 的所有海洋生物种和大约 70% 的地球生物属,以及绝大部分陆生植物(J. J. Sepkoski, 1989, P. D. Ward 等人, 2000, H. Vischer 等人, 1996, D. M. Raup, 1979)均遭到绝灭。有几项最新研究成果(S. A. Bowring 等人, 1998, Y. G. Gin 等人, 2000, M. R. Rampino 等人, 2000)表明这次绝灭事件比过去所想像的要快速得多,绝灭事件延续的时间从小于 500 000 年(S. A. Bowring 等人, 1998)到 8000 年(M. R. Rampino 等人, 2000)。所提出的灾变假说包括地外撞击事件(小行星或彗星)(R. Rampino 等人, 1996)和/或大规模溢流玄武岩火山活动(P. R. Renne 等人, 1995)。西伯利亚溢流玄武岩火山活动的放射性同位素年龄为[(251.2 ± 0.3)Ma],(S. A. Bowring 等人, 1998, P. R. Renne 等人, 1995)表明火山事件与 P/T 界线绝灭事件是几乎同时发生的。包括由海平面和气候变化所引起的海洋毒化等其他绝灭机制曾经也被提出来过(D. H. Erwin, 1994, A. H. Knoll 等人, 1996, P. B. Wignall 等人, 1993)。

二叠纪末的生物集群绝灭是生物演化史上最大规模的一次事件。测定绝灭的时间间隔和生物化石记录图谱是了解绝灭事件成因的基础。来自中国南方 P/T 界线样品的铀/铅锆石年龄为(251.4 ± 0.3)Ma。Bowring S. A. 等人(2001)由生物地层学计算的从火山灰层到生物绝灭界线(海洋生物种约有 85% 发生绝灭)的时间间隔少于一百万年。而在煤山剖面,由界线附近的  $\delta^{13}\text{C}$  负异常计算的时间间隔则少于 165 000 年(图 1),表明在这一时间段灾变事件导致海洋轻碳组分有大幅度增加。

西伯利亚溢流火山事件被认为是显生宙以来所记录的最大规模的爆发性陆内火山事件(图 2)。从 Maymecha-Kotuy 地区火山岩喷发序列最底部单元获取的透长石和锆石 U-Pb 年龄为(251.7 ± 0.4)Ma,而最顶部单元的年龄则为(251.1 ± 0.3)Ma。再加上地层对比和古地磁记录数据,表明西伯利亚溢流火山是快速喷发的产物,其 6 500 ft(1 ft = 0.304 8 m)厚的火山序列是在不到一百万年内形成的。它与先前报道的 P/T 界线生物大规模绝灭事件的锆石 U-Pb 年龄(251.4 ± 0.3)Ma 几乎一致。因此 Kamo SL, 等人(2003)坚持认为是火山事件导致 P/T 界线生物的绝灭。

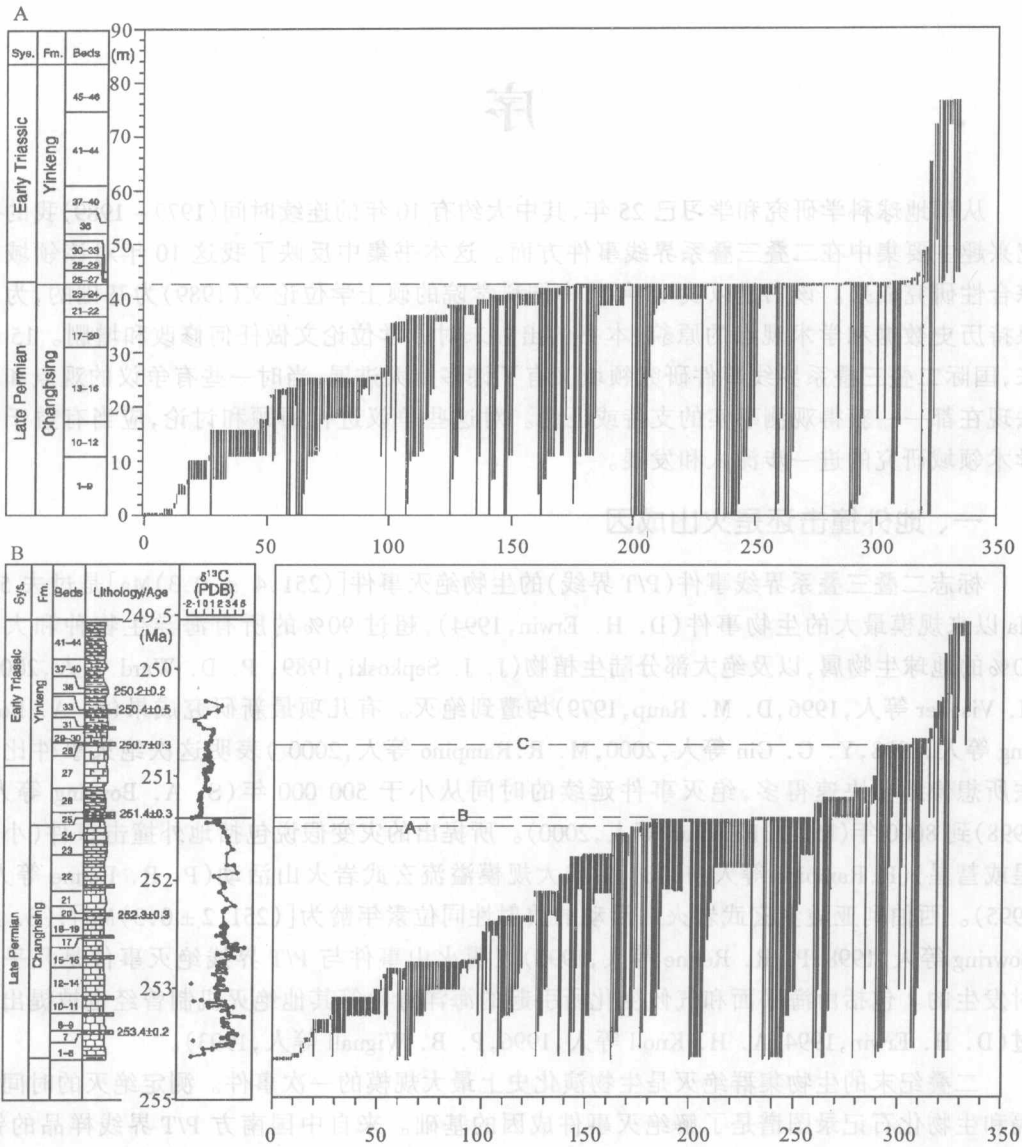


图 1 中国煤山 P/T 界线附近化石记录与碳同位素演化曲线 (Jin Y. G. 等人, 2000)

(A) 化石记录随地层厚度的变化; (B) 化石记录和碳同位素随时间的分布

Gregory J. Retallack 等人 (1998) 讨论了界线碎屑物中冲击石英, 铍异常等矿物学和地球化学特征对识别 P/T 界线地外撞击事件的可能意义。他们分析了南极 Graphite Peak 和 Mount Crean 剖面, 以及澳大利亚 Wybung Head 剖面 P/T 界线层样品, 由同位素年代学和古植物学工作定义的这三个剖面的界线薄层黏土质角砾岩, 被解释为再沉积土壤层而非冲击溅射降落物。所有三个剖面的角砾岩层都包含有冲击石英, 但相对大部分 K/T 界线剖面发现的冲击石英而言, 含量更少 (体积百分数为 0.2), 体积更小 (最大直径只有 176  $\mu\text{m}$ ), 微弱的铍“异常” (最大仅  $134 \times 10^{-12}$ ) 也相对 K/T 界线铍异常要小得多, 另外最大铍



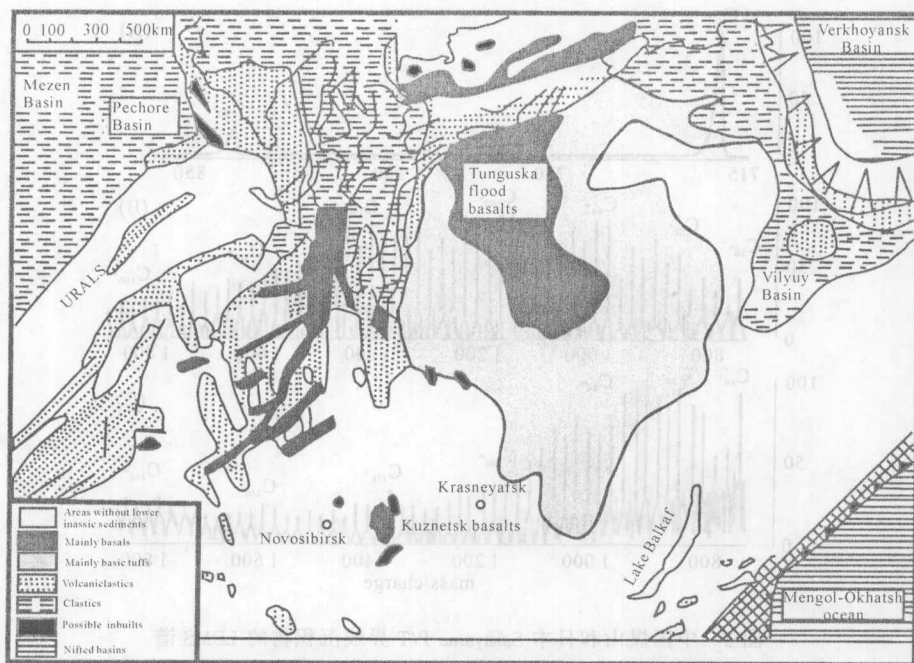


图 2 西伯利亚 P/T 界线裂谷和岩浆作用分布图

(据 A. M. Nikishin 等人(2002))

异常出现的位置在同位素和古植物定义的界线之下 1 m 左右。由此他们认为撞击事件导致生物绝灭的假说还需要进一步令人信服的证明。

自 Alvarez 等人(1980)解释白垩-第三系界线(K/T 界线)生物绝灭的地外撞击成因假说发表以来,人们很自然地假定所有类似的地质事件都具有地外的原因。尽管地外撞击事件成功地解释 K/T 界线的地质记录(包括铱异常,冲击石英,微球粒和碳氧同位素异常等),但在解释 P/T 界线集群绝灭事件方面还长期存在争议。其中一个问题是 P/T 界线没有发现像 K/T 界线那样相对背景富集 10 ~ 100 倍的铱异常(L. W. Alvarez 等人,1980, L. W. Alvarez, 1987, C. J. Orth 等人,1989, G. J. Retallack 等人,1998)。有两个 P/T 界线剖面的石英颗粒尽管显示了一定的变质特征(G. J. Retallack 等人,1998),但是冲击变质的证据却长期仅限于 15 年前的零星报道(Zhou Y. Q., 1991)。直到最近,一系列新的发现才使得 P/T 界线事件的地外成因变得明朗起来。

Becker L. 等人(2001)在几个 P/T 界线剖面均发现包含稀有气体的富勒烯物质富集于界线层中(图 3, 图 4),而其中的稀有气体同位素组成(图 5)表明了它们的地外来源。

图 4 中显示全岩<sup>3</sup>He 在界线处相对上下地层样品有明显降低,而富勒烯和富勒烯所包含的<sup>3</sup>He 则在界线处增加了大约 50 倍。界线处富勒烯所封装的<sup>3</sup>He 大体占全岩<sup>3</sup>He 的一半,而相反在界线上下的样品中则不到 1%。全岩沉积物中<sup>3</sup>He 的变化可能是沉积速率的变化引起的,沉积物可以富集或稀释地质历史中降落到地球表面的宇宙尘埃粒子(IDPs)。封装<sup>3</sup>He 的富勒烯丰度变化结果也相似地出现在煤山界线上下地层中。

图 5 表明了由行星(<1, 0.01)到大气圈组分(295.5, <0.001)的混合趋势。所测的数

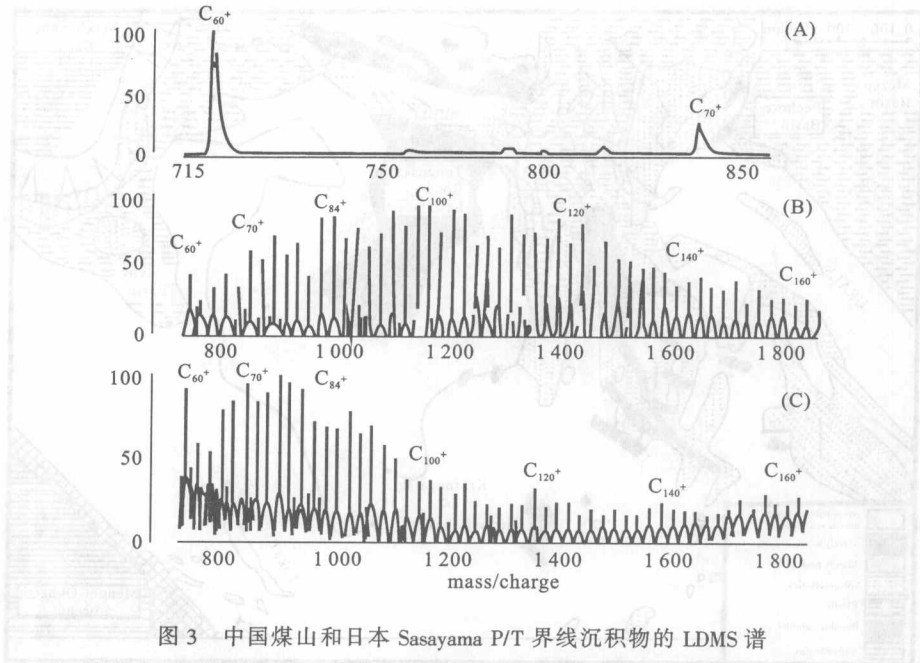


图3 中国煤山和日本 Sasayama P/T 界线沉积物的 LDMS 谱

- (A) 煤山(甲苯)萃取物的 LDMS 谱,显示 720 和 840 m/z 峰的碳原子质量单位 ( $C_{60}^+$  and  $C_{70}^+$ );
- (B) 煤山(TMB)萃取物的 LDMS 谱,显示  $C_{60}^+$  小质量峰和  $C_{70}^+$  到  $C_{160}^+$  之间较大的碳原子团簇分布范围;
- (C) Sasayama(TMB)萃取物的更高富勒烯的 LDMS 谱

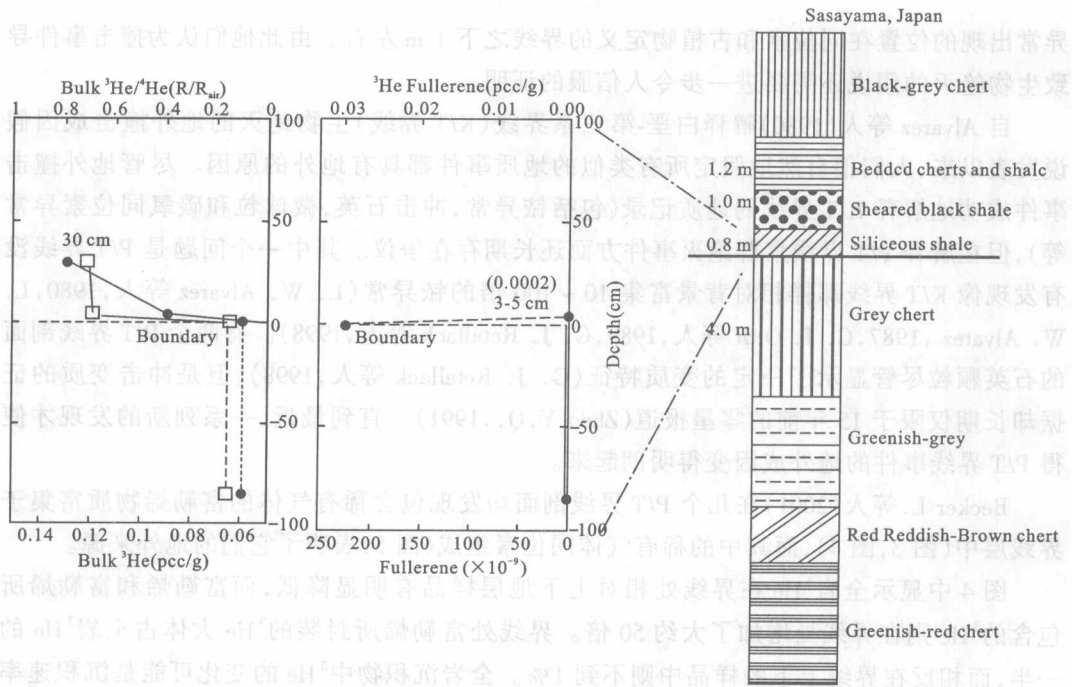


图4 Sasayama 剖面所测得的全岩 $^3\text{He}$ (实线)和 $^3\text{He}/^4\text{He}$ (虚线)与

富勒烯包含的 $^3\text{He}$ 和富勒烯的丰度变化曲线对比

( $^3\text{He}/^4\text{He}$ 比值采用与大气圈比值( $R_{air}$ )的相对值)

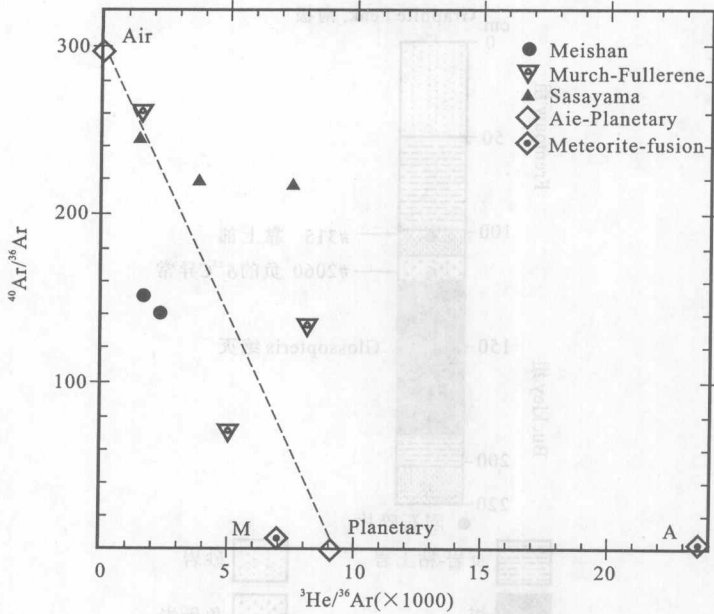


图5 P/T界线沉积物和 Murchison 陨石  $^{40}\text{Ar}/^{36}\text{Ar}$  和  $^3\text{He}/^{36}\text{Ar}$  比值相关图

据点均测自 P/T 界线和 Murchison 陨石中包裹  $^3\text{He}$  组分的富勒烯样品。也标出了 Murchison (M) and Allende (A) 碳质球粒陨石萃取富勒烯组分后的酸熔残渣。

Poreda RJ 和 Becker L (2003) 调查了 P/T 界线附近样品中富勒烯的分布。这些不寻常的由碳原子构成的笼状结构分子内部包裹了富勒烯分子形成时的原始氦、氖和氩等稀有气体成分。通过分析这些稀有气体的同位素组成可以判断富勒烯分子的成因。他们分析了采自南极 Graphite Peak, 中国煤山和日本 Sasayama P/T 界线的样品, 用萃取方法将富勒烯分子从样品中分离出来, 发现这些富勒烯分子所包裹的稀有气体均具有地外同位素组成。同时对 Graphite Peak P/T 剖面的全岩样品和磁选碎片也进行了稀有气体同位素分析, 发现它们的稀有气体同位素组成与现代深海宇宙尘 (IDPs) 和 K/T 界线样品的磁选碎片非常相似。它们均具有太阳系的稀有气体同位素组成, 表明它们具有共同的来源, 即降落到地球表面的宇宙尘埃粒子流。具有相同稀有气体组成的 IDPs 和富勒烯分子在 P/T 界线样品中同时出现, 意味着 P/T 界线事件与地外撞击事件密不可分 (由 IDPs 流提供  $^3\text{He}$ , 而巨型撞击形成富勒烯分子)。

最近一系列的发现表明 P/T 界线事件的确与陨石撞击事件直接相关。A. R. Basu 等人 (2003) 在南极 Graphite Peak P/T 界线两个沉积岩样品中发现了复合型球粒陨石碎片 (图 6, 图 7)。金属颗粒的 Ni/Fe, Co/Ni, 和 P/Fe 比值, 橄榄石和辉石的 Fe/Mg 和 Mn/Fe 比值, 以及陨石碎片的  $\text{Fe}^-$ ,  $\text{Ni}^-$ ,  $\text{P}^-$ , 和  $\text{S}^-$  氧化物丰度表明这些陨石碎片属于 CM 型球粒陨石。一个样品中的陨石碎片包含有非常丰富的独立的金属颗粒, 这种金属颗粒曾经在中国南方煤山 P/T 界线样品中也发现过 (图 8)。界线地层中铀异常, 冲击微球粒, 冲击石英, 碳同位素异常, 地外富勒烯, 以及陨石碎片等发现一起, 已确证 P/T 界线事件是一起规模巨大的地外撞击事件。这起巨大规模撞击事件的撞击地点在哪里, 以及它对全球性的板块运动有何影响, 则是进一步深入研究 P/T 界线事件要涉及的更为重要的问题。