

# 川北江油—广元一带二叠系—三叠系界线粘土岩 稀土元素地球化学特征及其地质意义

甘 媛, 于林松, 何明友, 张 玥, 刘 峰, 王玉婷, 阙 微

GAN Yuan, YU Lin-song, HE Ming-you, ZHANG Yue,

LIU Feng, WANG Yu-ting, QUE Wei

成都理工大学核技术与自动化工程学院和材料与化学化工学院, 四川 成都 610059

*Geochemistry Department, Chengdu University of Technology, Chengdu 610059, Sichuan, China*

**摘要:**选择川北江油滚柴坡和广元上寺、杨家湾二叠系—三叠系界线剖面为研究对象, 利用中子活化法分析了粘土岩样品中稀土元素的组成。通过对稀土元素丰度、标准配分模式和特征参数的比较研究, 探讨了稀土元素地球化学与自然环境突变的关系。结果表明, 各剖面的 $\delta\text{Eu}$ 、 $\delta\text{Ce}$ 、 $\Sigma\text{LREE}/\Sigma\text{HREE}-\Sigma\text{REE}$ 、 $\text{Eu}/\Sigma\text{REE}-\Sigma\text{LREE}/\Sigma\text{HREE}$ 、球粒陨石标准化曲线图解和 La-Th-Sc 三元图解一致反映了界线事件的存在及界线时期稀土元素的地球化学特征与环境突变的关系。同时, 通过对 3 条剖面稀土元素地球化学特征与标准剖面的对比研究, 认为 P/T(二叠系/三叠系)界线事件时期环境不仅受中酸性火山作用的影响, 还可能受(碱性)基性—超基性或地外溅射物的影响。研究结果为从元素地球化学的角度探讨这一重要地质时期的突变事件提供了新的资料。

**关键词:**二叠系/三叠系界线; 粘土岩; 稀土元素地球化学; 川北

中图分类号: P534.46; P534.51; P588.22

文献标志码: A

文章编号: 1671-2552(2008)03-0380-08

Gan Y, Yu L S, He M Y, Zhang Y, Liu F, Wang Y T, Que W. REE geochemistry of claystone at the Permian-Triassic boundary in the Jiangyou-Guangyuan area, northern Sichuan, China and its geological implications. *Geological Bulletin of China*, 2008, 27(3): 380-387

**Abstract:** In this paper, the Permian-Triassic boundary (PTB) sections of Jiangyou, Gunchaipo, Guangyuan Yangjawan and Shangsi in northern Sichuan are selected for the INAA (instrumental neutron activation analysis) analysis of the REE geochemistry of claystone samples. Through a comparative study of the REE abundances, chondrite-normalized distribution pattern and characteristic parameters of claystone samples from three PTB sections, the paper explores the relationship between REE geochemistry and sudden environmental change at the PTB. The results demonstrate that the  $\delta\text{Eu}$ ,  $\delta\text{Ce}$ ,  $\Sigma\text{LREE}/\Sigma\text{HREE}-\Sigma\text{REE}$ ,  $\text{Eu}/\Sigma\text{REE}-\Sigma\text{L}/\Sigma\text{H}$  and chondrite-normalized REE distribution patterns and La-Th-Sc ternary discrimination diagrams for claystone at the three sections all reflect the occurrence of the boundary event and the relationship between the REE geochemistry and sudden environmental change. In addition, through a comparative study of the REE geochemistry of the three PTB sections and standard section, the authors think that the environment during the period of the PTB event was affected not only by intermediate-acid volcanism but also possibly by (alkaline) basic-ultrabasic rocks or ejectas of volcanoes or an extraterrestrial planet. The research results provide new evidence for the study of the catastrophic event of this important geological period in the element geochemical context.

**Key words:** Permian-Triassic boundary; claystone; REE geochemistry; northern Sichuan

收稿日期: 2007-06-07; 修订日期: 2008-01-07

基金项目: 四川省教育厅自然科学基金重点项目《古生代中生代环境突变的元素地球化学研究》(编号: 2005A154)资助。

作者简介: 甘媛(1982-), 女, 实验师, 在读硕士, 地球化学专业。E-mail: ganyuan@cdut.cn

通讯作者: 于林松(1980-), 男, 在读硕士, 地球化学专业。E-mail: scan\_yls@yahoo.com.cn

古生代—中生代之交作为显生宙地质史上最重大的转折期,发生了称之为“显生宙危机”(McAlester, 1973)的生物大灭绝事件<sup>[1]</sup>。该时期地质演变的规模、起因及特点是地学界一直探讨的热点课题之一。目前,对这一时期海相地层的层序、海生生物群的变化和地质事件的研究已有深入<sup>[2]</sup>。随着分析测试技术的提高,对PTB(二叠系/三叠系界线)剖面的研究更多地集中在探讨事件终极成因<sup>[3-7]</sup>、沉积与古环境<sup>[8-9]</sup>、撞击与构造研究<sup>[10-11]</sup>等方面;界线粘土岩的研究多偏重于海洋酸化/残余酸事件<sup>[6,12-13]</sup>、矿物和同位素/同位素测年<sup>[7,14-19]</sup>的研究,而对于微量元素及稀土元素地球化学较深入的探讨略显不足。

稀土元素作为化学行为相似、溶解度普遍较低的一族元素,在风化、剥蚀、搬运、再沉积和成岩作用过程中均会发生元素分馏,对揭示泥质岩的物源、古环境、古气候等具有重要意义。沉积岩中稀土元素的含量及其配分的差异主要受源区化学风化、搬运、沉积及可能的突发事件过程中的交换反应等因素的影响,许多研究者运用稀土元素探讨沉积岩的物源、形成条件及环境特征,取得了一些重要进展<sup>[20-23]</sup>。本文尝试利用稀土元素标准配分曲线、特征参数图解,结合La-Th-Sc三元图解,在对比研究的基础上,探讨界线时期粘土岩的稀有元素地球化学特征及其地质意义。

## 1 样品采集与分析

二叠纪—三叠纪之交,中国华南川北地区地层连续沉积,岩相古地理面貌无明显变化,特别有利于

对二叠系—三叠系界线事件环境变化和省区生物集群绝灭事件的查证研究。

样品采自川北广元上寺(SS)、杨家湾(YJ)和江油马角坝滚柴坡(GCP)PTB剖面,均为界线粘土岩样品(图1)。所谓的P/T(二叠系/三叠系)界线粘土层指的是界线部位上二叠统长兴组顶部包括伊利石、蒙脱石、伊-蒙混层等在内的含少量高岭石及碎屑的粘土岩层,不包括三叠系飞仙关底部的泥岩。有关粘土岩的岩性及产出特征前人已有详细的论述<sup>[23-25]</sup>。样品采集原则:在P/T界线上二叠统长兴组的顶部,分别按粘土岩的产出层位逐层地连续取样,其中包括3处界线地层剖面的各层及混层粘土岩。共采集样品21个(图2)。其中,上寺粘土岩取样4件(经成都理工大学扫描电镜室分析,认为SS05相当于李子舜等<sup>[26]</sup>的27b层),按产出层位自上(T)而下(P)编号为:SS01~SS06;杨家湾剖面取样9件,按产出层位自上而下编号为:YJ01~YJ08;江油滚柴坡剖面取样8件,按产出层位自下而上编号为:GCP01~GCP07。3条剖面粘土层厚度(粘土层跨越范围)在20~90 cm之间,上寺较薄,分层少,杨家湾较厚且层数多。通过野外实测取样和室内对样品的分析,可建立与长兴标准剖面、上寺剖面附近的岩性对比柱(图2)。3条剖面与标准剖面间近似的时序关系如图2所示。

样品的中子活化分析在成都理工大学地学核技术重点实验室中子活化分析室进行。样品预处理及实验简述:将野外密封包装的样品风干后,无污碎样并过200目筛;用TG332A型微量分析天平(分度值

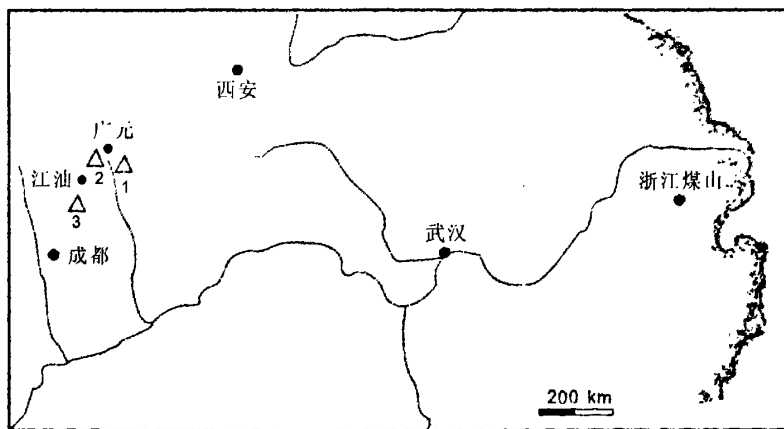


图1 川北PTB(二叠系—三叠系界线)剖面粘土岩取样位置简图

Fig.1 Sampling location of PTB (Permian-Triassic boundary) claystone in northern Sichuan

1—广元上寺;2—广元杨家湾;3—江油滚柴坡

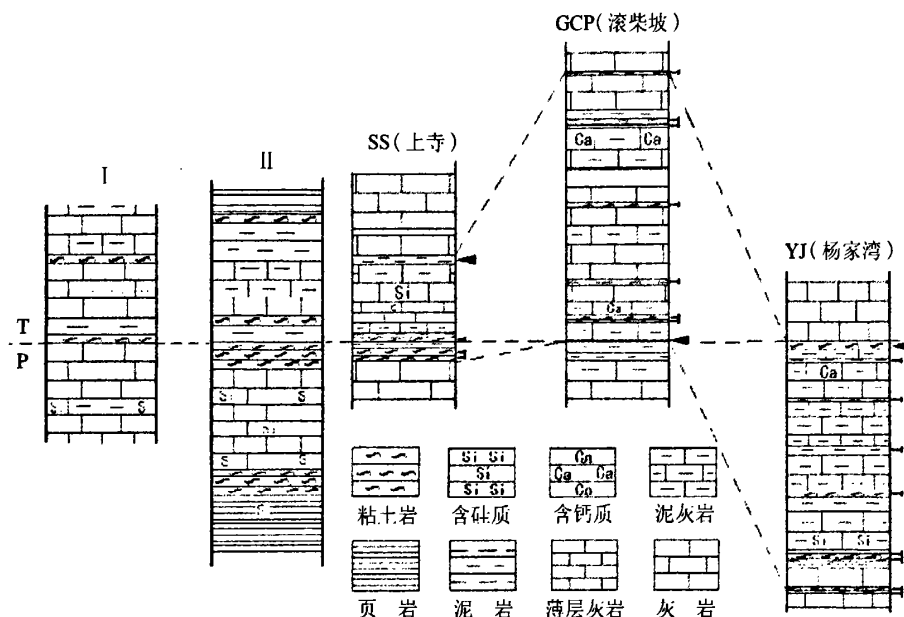


图2 标准剖面与川北3条剖面岩性对比及取样位置

Fig.2 Lithologic correlation between the standard section and three lithologic sections in northern Sichuan and sampling location

I—浙江长兴标准剖面(据参考文献[26]绘制); II—四川广元上寺剖面(据参考文献[27]绘制);

◄为剖面的01号样品点位置; ▴为取样位置; 水平虚线为最初取样时界线粘土的上下限

0.01 mg)差重法称取30 mg粘土岩样品装入聚乙烯小袋,并用高纯铝箔包好,送中国核动力研究院游泳池式实验型反应堆进行热中子辐射(热中子积分注量为 $1 \times 10^{18} \text{ n/cm}^2$ );测试标样采用中国一级地质成分分析标准物质GBW07108(GSR6)和美国NIST的标准物质1633a(煤飞灰)做参考标准和质量监控,采用相对法测量。数据处理由成都理工大学开发的SAQC软件完成。

## 2 分析与探讨

### 2.1 稀土元素的含量及分布特征

从表1可以看出,川北3条界线剖面的稀土元素总体上具有以下几个特点:①稀土元素总量的变化范围较大, $\Sigma \text{REE}$ 介于 $96.4319 \times 10^{-6} \sim 1712.5782 \times 10^{-6}$ 之间,多数样品的稀土元素总量在峨眉山玄武质岩石的 $\Sigma \text{REE}$ ( $78.8 \times 10^{-6} \sim 344.3 \times 10^{-6}$ )范围内,超过大陆拉斑玄武岩的一般上限,且 $(\text{La}/\text{Lu})_N$ 比值为5.6~16.31,总体已基本落于碱性玄武岩相应比值的范围内(5.4~28.4, Culler等,1984)<sup>[28]</sup>。②上寺和滚柴坡剖

面样品的稀土元素总量和单个稀土元素含量都无明显异常变化,而杨家湾剖面样品的稀土元素总量变化较大,且部分层位存在典型异常。③代表轻重稀土元素分馏程度的特征量; $(\text{La}/\text{Sm})_N$ 的变化范围在2.57~7.9034之间,均值为4.263,较周瑶琪等<sup>[29]</sup>(1989)的测定值(3.38~5.68)和均值(4.17)略有偏大,但两者都大于同时期非界线粘土岩的均值(2.71),表明取样区域环境上存在差异; $(\text{Gd}/\text{Yb})_N$ 均值为1.20511,相对前人研究无明显异常。特征参数 $\delta \text{Eu}$ 、 $\delta \text{Ce}$ 既有一致又有不同,反映了P/T之交自然环境的突变与地质事件的一致性。

### 2.2 稀土元素标准化曲线

采用Masuda-Coryell图解法(Masuda,1962; Coryell,1963),以球粒陨石中稀土元素的平均含量为标准,将样品进行标准化处理(图6中 $K=\text{Sample}/\text{CI}$ , CI值:赫尔曼,1971<sup>[30]</sup>)。

图3至图6呈现出轻、重稀土元素明显分异的现象,可能的原因是:自晚二叠世早期以来,华南地区处于火山活动频发期,物源中有相当数量的火山碎

屑,而火山碎屑或火山灰的硅质成分对稀土元素,尤其是重稀土元素有一定的稀释作用,从而导致该时期轻、重稀土元素分异明显;其次,所选的PTB剖面粘土岩质纯,矿物成分主要为伊利石、蒙脱石、伊—蒙混层及少量高岭土、玻屑/碎屑物质等,颗粒细小,这些物质无疑决定了它们能更充分地吸附稀土元素;再者,由于半径 $R_{(LREE^{3+})} > R_{(HREE^{3+})}$ ,易被吸附,有利于重稀土元素留聚,形成了轻稀土元素特别富集的特点。

其中,图3与图5粘土岩球粒陨石标准化REE曲线变化相对稳定,反映了事件时期一致连续沉积作用。而图4广元杨家湾标准化REE曲线型式由右倾型→平坦型变化,自YJ06-1~YJ08  $\Sigma$ REE右倾有渐降的趋势,LREE降低速率大于HREE,并呈现出较强的Eu异常,这可能与该时期稀土元素多源体系的影响程度有关,或可能与连续的陨击作用有关<sup>[30]</sup>;再者,YJ01~YJ05样品的稀土元素配分型式较平坦,呈

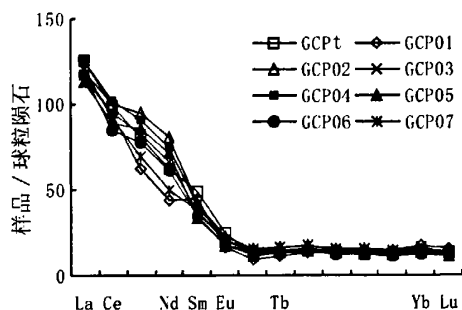


图3 江油滚菜坡PTB粘土岩球粒陨石标准化REE型式  
Fig.3 Chondrite-normalized REE patterns of PTB claystone at Gunchaipo, Jiangyou

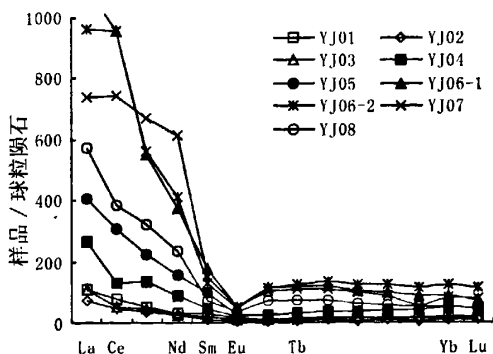


图4 广元杨家湾PTB粘土岩球粒陨石标准化REE型式  
Fig.4 Chondrite-normalized REE patterns of PTB claystone at Yangjiawan, Guangyuan

弱Eu异常,接近于同时期的四川金沙江带玄武岩稀土元素配分模式,具有与MORB类似的稀土元素配分型式,又与月球高地绿色玻璃稀土元素配分模式类似<sup>[31]</sup>。图6为本文3条剖面与李子舜等<sup>[27]</sup>、周瑶琪等<sup>[29]</sup>研究的界线粘土岩数据的比较,反映了数据的可信度;它们分异程度的相似性之高,也反映出界线时期地质事件的普遍性及其地质环境性质的一致性。

### 2.3 稀土元素参数图解

稀土元素的一些特征参数或组合图解常被用来判断现代和古沉积物的构造背景或物源区的性质。现分述如下。

(1)从表1与图7的相关对比可知,Eu的总量变化区间为 $0.343 \times 10^{-6} \sim 3.84 \times 10^{-6}$ ,3条剖面粘土岩Eu的均值( $1.6015 \times 10^{-6}$ )大于俄罗斯地台古生代页岩的均值( $1.27 \times 10^{-6}$ ,巴拉晓夫等,1976),介于海岛及大陆型拉斑玄武岩( $1.50 \times 10^{-6}$ )与大陆玄武岩( $1.87 \times$

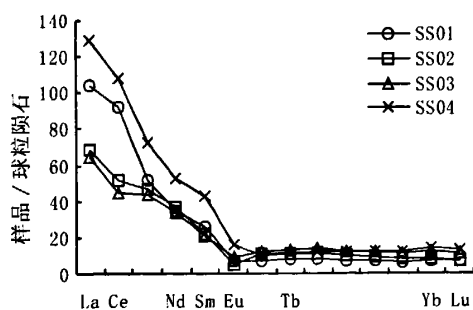


图5 广元上寺PTB粘土岩球粒陨石标准化REE型式  
Fig.5 Chondrite-normalized REE patterns of PTB claystone at Shangsi, Guangyuan

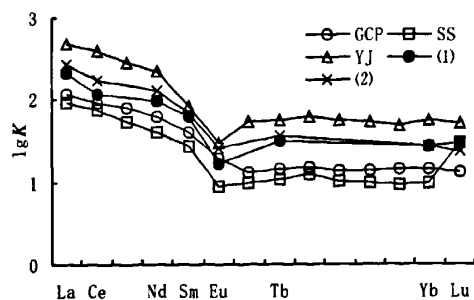


图6 PTB剖面粘土岩均值球粒陨石标准化REE型式  
Fig.6 Chondrite-normalized REE patterns of claystone at three PTB sections

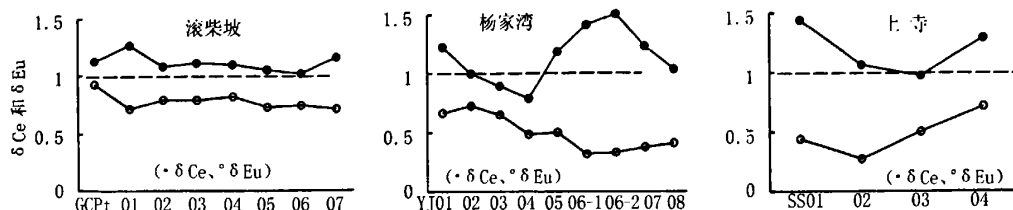
(1)上寺10个界线样品均值,据参考文献<sup>[27]</sup>  
(2)23个界线粘土岩样品均值,据参考文献<sup>[29]</sup>

表1 二叠系—三叠系界线剖面粘土岩样品的稀土元素及Th、Sc分析结果  
Table 1 Analytic data of REE and Th and Sc in claystone samples  
from the Permian-Triassic boundary section

元素	GCP01	GCP02	GCPt	GCP03	GCP04	GCP05	GCP06	GCP07	SS01	SS02	SS05
La	37.2	38.3	40.2	37.4	40.2	36.2	37.5	38.5	33.5	21.8	20.8
Ce	87.8	94.3	92.8	89.5	95.5	83.7	79.7	86.3	86.5	48.9	41.7
Nd	26.4	48.2	37.2	40	44.4	42.9	36.7	30.2	20.8	22.2	20.5
Sm	8.9	8.28	9.87	7.27	8.11	6.64	6.87	7.45	5.22	4.34	4.1
Eu	1.19	1.63	1.81	1.48	1.51	1.27	1.24	1.38	0.485	0.343	0.645
Tb	0.566	0.815	0.64	0.791	0.704	0.732	0.648	0.822	0.378	0.54	0.658
Yb	3.32	2.79	2.52	3.03	2.83	2.48	2.38	2.84	1.26	1.54	2.23
Lu	0.486	0.411	0.406	0.384	0.389	0.354	0.35	0.426	0.228	0.225	0.34
Sc	18.6	18.4	16	18.3	18.7	17.2	13.4	17.8	8.4	7.7	10.7
Th	22.3	12.7	10.5	13.7	14.4	12.5	10.2	14	32.5	39.5	43.4
ΣLREE	169.0101	202.0533	191.5794	185.5882	200.6337	181.0103	171.4021	172.1502	152.6999	103.1896	92.979
ΣHREE	15.8911	18.7792	15.4822	18.851	17.0864	16.7997	15.2765	19.004	8.679	11.7698	15.1246
ΣREE	184.9013	220.8325	207.0616	204.4392	217.7201	197.81	186.6786	191.1542	161.3789	114.9593	108.1036
δEu	0.7085	0.7945	0.9247	0.7903	0.8131	0.7286	0.7494	0.7067	0.436	0.2786	0.4967
δCe	1.2649	1.0901	1.1324	1.1186	1.0986	1.0444	1.0233	1.1619	1.4468	1.0658	0.9630
(La/Lu) <sub>N</sub>	7.9242	9.6473	10.2506	10.0830	10.6985	10.5865	11.0920	9.3562	15.2110	10.0305	6.3333
(La/Sm) <sub>N</sub>	2.6392	2.9207	2.5717	3.2482	3.1298	3.4423	3.4460	3.2630	4.0522	3.1716	3.2033
(Gd/Yb) <sub>N</sub>	0.7214	1.3766	1.1638	1.2029	1.1352	1.3939	1.2652	1.3615	1.4213	1.7139	1.3933
ΣL/ΣH	10.6355	10.7594	12.3742	9.845	11.7423	10.7746	11.22	9.0586	17.5942	8.767320	6.147535

元素	SS06	YJ01	YJ02	YJ03	YJ04	YJ05	YJ06-1	YJ06-2	YJ07	YJ08
La	41.4	35.6	22.8	35.5	84.4	130	353	309	236	184
Ce	102	75.1	41.8	51.1	120	290	900	900	700	360
Nd	31.4	19.8	15.1	16.6	54.4	94.5	225	247	368	140
Sm	8.49	6.73	2.36	3.98	9.48	19.9	35.9	25.9	30.5	14.7
Eu	1.18	1.11	0.517	0.762	1.37	2.04	3.72	3.28	3.84	2.83
Tb	0.549	0.693	0.37	0.623	1.51	1.54	5.9	6.3	5.39	3.64
Yb	2.57	3.25	1.66	3.51	10.2	10	16.9	24.1	16.2	10.2
Lu	0.403	0.532	0.343	0.651	1.41	1.42	2.24	3.6	2.41	1.5
Sc	13.7	13.7	5.5	8.8	17.8	7.5	7.4	7.4	12.1	8.7
Th	19	17.7	4.3	11.9	13.4	53.7	99	92.3	21.9	5.8
ΣLREE	193.2184	144.4574	86.9785	113.3761	285.6513	563.144	1584.049	1552.803	1418.973	740.0443
ΣHREE	14.1257	17.8654	9.45340	17.3406	44.9557	45.1027	128.5292	150.6179	119.3388	78.9487
ΣREE	207.3441	162.3228	96.4319	130.7166	330.607	608.2468	1712.578	1703.4209	1538.312	818.993
δEu	0.714	0.6716	0.7197	0.644	0.4907	0.4974	0.3179	0.3287	0.3743	0.4038
δCe	1.2914	1.2262	1.0054	0.8865	0.7868	1.186	1.4162	1.5002	1.2227	1.0245
(La/Lu) <sub>N</sub>	10.6351	6.9277	6.8816	5.6454	6.1969	9.4777	16.3145	8.8860	10.1378	12.6991
(La/Sm) <sub>N</sub>	3.0790	3.3400	6.1001	5.6319	5.6214	4.1248	6.2086	7.5330	4.8857	7.9034
(Gd/Yb) <sub>N</sub>	0.9456	0.9436	0.9951	0.7571	0.609	0.6385	1.7049	1.2049	1.6093	1.7504
ΣL/ΣH	13.67850	8.0859	9.2008	6.5382	6.3541	12.4858	12.3244	10.3096	11.8903	9.3737

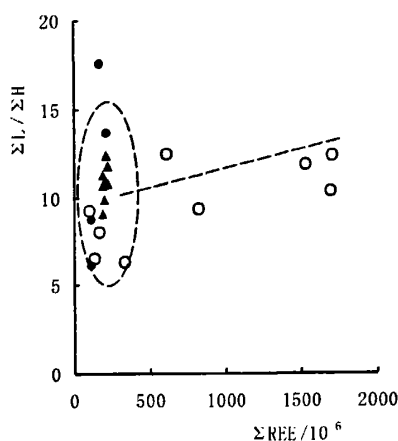
注：成都理工大学地球核技术省重点实验室中子活化分析室测试；元素含量10<sup>-6</sup>

图7 3条PTB剖面粘土岩的 $\delta\text{Eu}$ 和 $\delta\text{Ce}$ 比较Fig.7  $\delta\text{Eu}$  vs.  $\delta\text{Ce}$  of claystone at three PTB sections

$10^{-6}$ , 弗瑞等, 1968<sup>[32]</sup>)之间, 高值出现在杨家湾剖面并超过加拿大魁北克页岩的均值( $2.4 \times 10^{-6}$ )。样品  $\delta\text{Eu} < 1$  (0.20786~0.9247), 均值为 0.5995, 属中等亏损, 在某种程度上继承了火山喷发岩的特征; Eu 明显亏损部分 ( $\delta\text{Eu} < 0.5$ ) 为杨家湾和上寺剖面的部分层位, 表明晚二叠世受大规模陆源火山事件造成的弱酸性和还原条件对风化剥蚀的影响,  $\text{Eu}^{3+}$  可还原成  $\text{Eu}^{2+}$  并与  $\text{REE}^{3+}$  发生分离。同时, 接近界线时期的二叠系岩层变薄、泥质增多、黄铁矿含量高岩性特征也证明该时期可能处于海水不通畅的还原性环境。

对  $\delta\text{Ce}$  而言,  $\delta\text{Ce}$  的变化范围为 0.7868~1.5002, 均值为 1.1407, 明显地继承了三叠系火山岩的特征, 并与大陆拉斑玄武岩的特征相似, 这很可能与大陆板块内部物质组成的再分配有关; 而在 GCP06、SS05、YJ02 和 YJ03 样品中所出现的  $\delta\text{Ce}$  负异常与沉积物中的  $\delta\text{Ce}$  负异常相吻合, 据此推测, 当时火山活动时, 火山玻璃可能经过了一个高温氧化的短暂过程, 从而使  $\text{Ce}^{3+}$  氧化成  $\text{Ce}^{4+}$  并与  $\text{REE}^{3+}$  发生分馏造成负异常, 海水对产生  $\delta\text{Ce}$  负异常可能也有一定贡献。

(2) 图8反映了  $\Sigma\text{L}/\Sigma\text{H}$  ( $\Sigma\text{LREE}/\Sigma\text{HREE}$ ) 分馏程度与  $\Sigma\text{REE}$  之间的关系, 在纵轴方向 ( $\Sigma\text{L}/\Sigma\text{H}$ : 轻稀土元素/重稀土元素) 3条剖面样品的数值总体变化不大, 显现了 P/T 界线时期相似的沉积环境特征。在横轴方向上 ( $\Sigma\text{REE}$ ), 广元上寺和江油滚柴坡 P/T 界线粘土岩样品 REE 总量变化范围不大, 分别为  $108.1036 \times 10^{-6} \sim 207.3441 \times 10^{-6}$  和  $184.9013 \times 10^{-6} \sim 220.8325 \times 10^{-6}$ 。各剖面界线粘土岩样品投点相对集中于图8左方的虚线框之内。而杨家湾界线粘土岩 REE 总量变化幅度较大 ( $96.4319 \times 10^{-6} \sim 1712.5782 \times 10^{-6}$ ), 高于中酸性火山岩的  $\Sigma\text{REE}$ , 接近于高碱性玄武岩<sup>[32]</sup>或(碱性)幔源物质<sup>[33]</sup>, 且其稀土元素的配分模式与三叠系火山灰的模式相近。此外,  $\Sigma\text{L}/\Sigma\text{H}$  具有

图8 川北PTB剖面粘土岩的 $\Sigma\text{REE}-\Sigma\text{L}/\Sigma\text{H}$ 图Fig.8  $\Sigma\text{REE}-\Sigma\text{L}/\Sigma\text{H}$  diagram of claystone at the PTB sections in northern Sichuan  
▲滚柴坡(GCP); ●上寺(SS); ○杨家湾(YJ)

随  $\Sigma\text{REE}$  增加而大致增加的趋势, 既表明了该区部分层位(样品 YJ05~YJ08)稀土元素的异常富集, 又预示了该地区有可能受到了其他高稀土元素源的影响。

(3)  $\text{Eu}/\Sigma\text{REE}(\times 100)-\Sigma\text{L}/\Sigma\text{H}$  散点图可以直观地反映稀土元素的组成特征<sup>[32]</sup>。图9中3条剖面的投点相对集中(图9左侧虚线框内), 与澳大利亚后太古代平均页岩(PAAS)和上陆壳(UCC)的值较为接近。这既反映了上陆壳沉积的稀土元素的组成特征, 又表明了界线地质事件时期古环境状况的总体一致性; 同时, 落点既与二叠纪玄武岩有一定的差别, 又与部分三叠系火山岩的关系密切。表明 P/T 界线时期部分沉积物可能受来自同性质火山岩的风化作用的影响。

Savoy等<sup>[20]</sup>为了研究泥质岩提出了 La-Th-Sc 三

元判别图(图10),划分出被动大陆边缘沉积物(PM)、与岩浆弧有关的沉积物(MAR)、海洋岛弧碱性玄武岩(OIAB)和后太古代澳大利亚页岩沉积物(PAAS)中的La、Th和Sc的分布范围。从研究区界线粘土岩样品的三元投点图可看出,样品的投点既分散又相对集中。GCP剖面样品点集中于与岩浆弧有关的沉积物区(B、D重合区),既体现了典型的沉积特性,又表明界线时期存在着火山物质的加入。YJ与SS剖面样品的落点相对零散,除少量样品投点分布于与岩浆有关的沉积物区外,其余区域的样品点表明可能的风化剥蚀或其他影响使2处沉积物在沉积过程中存在异常,其中YJ剖面样品作为La异常出现。以上对界线样品的分析,体现了界线时期受火山活动影响的同时沉积特性,又暗含着各区域环境的不一致性。晚

二叠世早期以来,扬子地台西缘的川西地区火山活动强烈,形成了由玄武岩、安山岩及中基性火山碎屑岩组成的若干火山岩带,这一体系直到中三叠世才发育为完整的沟-弧-盆体系。这一体系过程可能影响到攀西、四川盆地及滇桂黔地区<sup>[24]</sup>,因此二叠系/三叠系界线时期伴随(中)基性火山物质的加入,源区可能存在元素异常。

### 3 结 论

(1)对川北3条P/T界线剖面界线粘土岩的稀土元素地球化学研究结果表明,各剖面的粘土岩具有较好的可对比性。它们的稀土元素配分模式均为轻稀土元素富集、重稀土元素贫化,具有中到大的Eu异常和小的Ce异常。然而,广元杨家湾剖面稀土元素的配分模式呈没有分异的平坦型,结合镜下矿物观察分析,认为具有月球冲击溅射物的特性,有进一步研究的必要。

(2)通过对3条剖面REE丰度的分析,认为P/T界线事件不仅受中酸性火山作用的影响,还可能与碱性基性—超基性岩或地外溅射物的作用有关。

(3)各条剖面的 $\delta\text{Eu}$ 、 $\delta\text{Ce}$ 、 $\Sigma\text{L}/\Sigma\text{H}-\Sigma\text{REE}$ 、 $\text{Eu}/\Sigma\text{REE}-\Sigma\text{L}/\Sigma\text{H}$ 、球粒陨石标准化图解和La-Th-Sc三元图解的对比研究都一致地反映了中生代与古生代P/T之交的地质事件中稀土元素的地球化学特征,表明P/T之交发生的环境突变事件与地质作用具有密切的因果关系,是地质作用导致了环境的突变,以致生物大灭绝。

最后,综合以上分析,推测P/T界线导致生物灭绝的一种可能是,界线时期持续的大规模的不同性质的火山活动或地外事件引起的环境蠕变效应(Creeping effect)。这也符合Catherine等<sup>[39]</sup>最近的相关研究结果。

致谢:在成文过程中,李巨初和尹观教授给予热情的鼓励和帮助;王红军、罗改、黄午兴等协助处理样品,在此一并表示感谢。

#### 参考文献:

- [1] 齐文同.事件地层学概论[M].北京:地质出版社,1990.
- [2] 彭元桥,高勇群,杨逢清,等.南非陆相二叠系—三叠系界线研究进展[J].地质科技情报,2006,25(1):1-8.
- [3] Basu A R, Petaev M I, Poreda R J, et al. Chondritic meteorite fragments associated with the Permian-Triassic boundary in Antarctica[J]. Science, 2003, 302: 1388-1392.

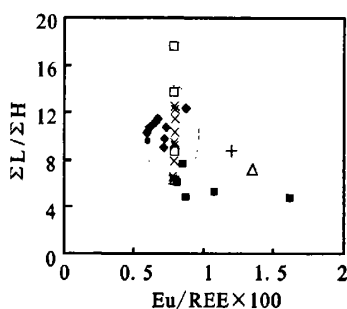


图9 粘土岩Eu/ΣREE-ΣLREE/ΣHREE散点图<sup>[24]</sup>

Fig.9 Plot of Eu/ΣREE vs. ΣLREE/ΣHREE for claystone

◆:GCP;□:SS;×:YJ;■:T(三叠纪火山岩);●:UCC;○:PAAS;  
+:辉绿岩;△:玄武岩(二叠纪火山岩)

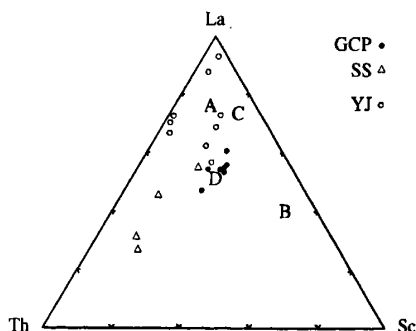


图10 粘土岩La-Th-Sc三元判别简图<sup>[24]</sup>

Fig.10 La-Th-Sc ternary discrimination diagrams for claystone

A—被动大陆边缘沉积物;B—与岩浆弧有关的沉积物;  
C—海洋岛弧碱性玄武岩;D—后太古代澳大利亚页岩沉积

- [4]Nielsen J K, Shen Yanan. Evidence for sulfidic deep water during the late Permian in the east Greenland basin[J]. *Geology*, 2004,32:1037-1040.
- [5]Xie Shucheng, Pancost R D, Yin Hongfu, et al. Two episodes of microbial change coupled with Permo-Triassic faunal mass extinction[J]. *Nature*, 2005, 434:494-497.
- [6]梁汉东. 二叠纪末期海洋硫酸化环境灾变事件:煤山剖面岩石矿物证据[J]. *科学通报*, 2002,47(10):784-788.
- [7]梁汉东,梁言慈. 中国煤山剖面事件界线层粘土中石膏化生物化石碎屑初探[J]. *科学技术与工程*, 2004,4(3):183-186.
- [8]经雅丽,张克信,林启祥,等. 浙江长兴煤山下三叠统和龙山组、南陵湖组沉积地球化学特征与古环境意义[J]. *地质科技情报*, 2005,24(1):35-40.
- [9]王永标,童金南,王家生,等. 华南二叠纪末大绝灭后的钙质微生物岩及古环境意义[J]. *科学通报*, 2005,50(6):552-558.
- [10]傅恒,李雪兰,邝碧湘. 天文事件与二叠纪末联合古陆解体[J]. *沉积与特提斯地质*, 2004,24(2):101-105.
- [11]张华. 撞击地层学及其研究进展[J]. *地球科学进展*, 2005,20(9):961-969.
- [12]梁汉东,梁言慈. 中国煤山剖面二叠系/三叠系界线附近白粘土中残余酸的发现与意义[J]. *科学技术与工程*, 2004,4(1):7-11.
- [13]Liang Handong. End Permian catastrophic event of marine acidification by hydrated sulfuric acid: mineralogical evidence from Meishan section of South China[J]. *Chinese Science Bulletin*, 2002,47:1393-1397.
- [14]南君亚,刘育燕. 浙江煤山二叠—三叠系界线剖面有机和无机碳同位素变化与古环境[J]. *地球化学*, 2004,33(1):9-19.
- [15]Newton R J, Pevitt E L, Wignall P B, et al. Large shifts in the isotopic composition of seawater sulphate across the Permo-Triassic boundary in northern Italy[J]. *Earth and Planetary Science Letters*, 2004,218:331-345.
- [16]Mundil R, Ludwig K R, Metcalfe I, et al. Age and timing of the Permian mass extinctions:U/Pb dating of closed-system zircon[J]. *Science*, 2004,305:1760-1763.
- [17]黄思静,吴素娟,孙治雷,等. 中生代海水铍同位素演化和古海洋事件[J]. *地学前缘*, 2005,12(2):133-141.
- [18]姜尧发,唐跃刚,代世峰. 浙江煤山二叠系—三叠系界线附近黄铁矿及其硫同位素组成研究[J]. *地质学报*, 2006,80(8):1202-1207.
- [19]蔡厚安,梁汉东,张俊. 中国煤山剖面P—T界线附近几类铁质颗粒物的发现及其表征[J]. *地质学报*, 2006, (2):235.
- [20]Lauret E Savoy, Ross K Stevenson, Eric W Mountjoy. Provenance of Upper Devonian-Lower Carboniferous miogeosynclinal strata, southeastern Canadian Cordillera: Link between tectonics and sedimentation[J]. *Jour. Sedimentary Research*, 2000, 70(1):181-193.
- [21]刘锐娥,卫孝峰,王亚丽,等. 泥质岩稀土元素地球化学特征在物源分析中的意义[J]. *天然气地球科学*, 2005,16(6):788-791.
- [22]张沛,郑建平,张瑞生,等. 塔里木盆地塔北隆起奥陶系—侏罗系泥岩稀土元素地球化学特征[J]. *沉积学报*, 2005,23(4):740-746.
- [23]金若谷,沈桂梅,须湘官,等. 四川广元二叠系—三叠系界线粘土岩沉积特征及成因探讨[J]. *岩石矿物学杂志*, 1986,2:107-118.
- [24]黄思静. 四川重庆中梁山P/T界线粘土岩层中非粘土组分的研究[J]. *沉积学报*, 1993,11(3):105-112.
- [25]张素新,喻建新,杨逢清,等. 黔西滇东地区浅海、滨海及海陆交互相二叠系—三叠系界线附近粘土岩研究[J]. *矿物岩石*, 2004,24(4):81-86.
- [26]杨遵仪,殷鸿福,吴顺宝,等. 华南二叠—三叠系界线地层及动物群[M]. 北京:地质出版社,1987.
- [27]李子舜,詹立培,戴进业,等. 川北陕南二叠—三叠纪生物地层及时间地层学研究[M]. 北京:地质出版社,1989.
- [28]黄开年,杨瑞英,王小春,等. 峨眉山玄武岩微量元素地球化学的初步研究[J]. *岩石学报*, 1988,4:49-60.
- [29]周瑶琪. 二叠三叠系界线事件研究[M]. 北京:石油大学出版社, 2005.
- [30]陈德潜,陈刚. 实用稀土元素地球化学[M]. 北京:冶金工业出版社, 1990.
- [31]张克信. 二叠—三叠纪过渡期灾变事件研究进展[J]. *地质科技情报*, 1991,10(3):37-41.
- [32]刘英俊,曹励明. 元素地球化学导论[M]. 北京:地质出版社,1987.
- [33]路凤香. 地幔岩石学[M]. 武汉:中国地质大学出版社,1989.
- [34]四川省地质矿产局. 四川省区域地质志[M]. 北京:地质出版社, 1991:308-369.
- [35]Catherine M P, David J B. Bryozoan paleoecology indicates mid-Phanerozoic extinctions were the product of long-term environmental stress[J]. *Geology*, 2007, 35(11):995-998.



## 学特征及其地质意义

作者: [甘媛](#), [于林松](#), [何明友](#), [张玥](#), [刘峰](#), [王玉婷](#), [阙微](#), [GAN Yuan](#), [YU Lin-song](#),  
[HE Ming-you](#), [ZHANG Yue](#), [LIU Feng](#), [WANG Yu-ting](#), [QUE Wei](#)  
作者单位: [成都理工大学核技术与自动化工程学院和材料与化学化工学院, 四川, 成都, 610059](#)  
刊名: [地质通报](#) **ISTIC** **PKU**  
英文刊名: [GEOLOGICAL BULLETIN OF CHINA](#)  
年, 卷(期): 2008, 27(3)

## 参考文献(35条)

1. [张沛;郑建平;张瑞生](#) [塔里木盆地塔北隆起奥陶系-侏罗系泥岩稀土元素地球化学特征](#)[期刊论文]-[沉积学报](#) 2005(04)
2. [刘锐娥;卫孝峰;王亚丽](#) [泥质岩稀土元素地球化学特征在物源分析中的意义](#)[期刊论文]-[天然气地球科学](#) 2005(06)
3. [Lauret E Savoy;Ross K Stevenson;Eric W Mountjoy](#) [Provenance of Upper Devonian-Lower Carboniferous miogeosynclinal strata, southeastern Canadian Cordillera:Link between tectonics and sedimentation](#) 2000(01)
4. [经雅丽;张克信;林启祥](#) [浙江长兴煤山下三叠统和龙山组、南陵湖组沉积地球化学特征与古环境意义](#)[期刊论文]-[地质科技情报](#) 2005(01)
5. [梁汉东;梁言慈](#) [中国煤山剖面事件界线层粘土中石膏化生物化石碎屑初探](#)[期刊论文]-[科学技术与工程](#) 2004(03)
6. [梁汉东](#) [二叠纪末期海洋硫酸化环境灾变事件:煤山剖面岩石矿物证据](#)[期刊论文]-[科学通报](#) 2002(10)
7. [王永标;童金南;王家生](#) [华南二叠纪末大绝灭后的钙质微生物岩及古环境意义](#)[期刊论文]-[科学通报](#) 2005(06)
8. [Xie Shucheng;Pancost R D;Yin Hongfu](#) [Two episodes of microbial change coupled with Permian/Triassic faunal mass extinction](#)[外文期刊] 2005
9. [Nieken J K;Shen Yanan](#) [Evidence for sulfidic deep water during the late Permian in the east Greenland basin](#)[外文期刊] 2004(12)
10. [Basu A R;Petaev M I;Poreda R J](#) [Chondritic meteorite fragments associated with the Permian-Triassic boundary in Antarctica](#)[外文期刊] 2003(5649)
11. [Catherine M P;David J B](#) [Bryozoan paleoecology indicates midPhanerozoic extinctions were the product of long-term environmental stress](#)[外文期刊] 2007(11)
12. [四川省地质矿产局](#) [四川省区域地质志](#) 1991
13. [路凤香](#) [地幔岩石学](#) 1989
14. [刘英俊;曹励明](#) [元素地球化学导论](#) 1987
15. [张克信](#) [二叠-三叠纪过渡期灾变事件研究进展](#) 1991(03)
16. [陈德潜;陈刚](#) [实用稀土元素地球化学](#) 1990
17. [周瑶琪](#) [二叠-三叠系界线事件研究](#) 2005
18. [黄开年;杨瑞英;王小春](#) [峨眉山玄武岩微量元素地球化学的初步研究](#)[期刊论文]-[岩石学报](#) 1988
19. [李子舜;詹立培;戴进业](#) [川北陕南二叠-三叠纪生物地层及时间地层学研究](#) 1989
20. [杨遵仪;殷鸿福;吴顺宝](#) [华南二叠-三叠系界线地层及动物群](#) 1987
21. [张素新;喻建新;杨逢清](#) [黔西滇东地区浅海、滨海及海陆交互二叠系-三叠系界线附近粘土岩研究](#)[期刊论文]-

矿物岩石 2004(04)

22. 黄思静 四川重庆中梁山P/T界线粘土岩层中非粘土组分的研究 1993(03)
23. 金若谷; 沈桂梅; 须湘官 四川广元二叠系-三叠系界线粘土岩沉积特征及成因探讨 1986(02)
24. 蔡厚安; 梁汉东; 张俊 中国煤山剖面P-T界线附近几类铁质颗粒物的发现及其表征[期刊论文]-地质学报 2006(02)
25. 姜尧发; 唐跃刚; 代世峰 浙江煤山二叠系-三叠系界线附近黄铁矿及其硫同位素组成研究[期刊论文]-地质学报 2006(08)
26. 黄思静; 吴素娟; 孙治雷 中生代海水锶同位素演化和古海洋事件[期刊论文]-地学前缘 2005(02)
27. Mundil R; Ludwig K R; Metcalfe I Age and timing of the Permian mass extinctions: U/Pb dating of closed-system zircon 2004
28. Newton R J; Pevitt E L; Wignall P B Large shifts in the isotopic composition of seawater sulphate across the Permo-Triassic boundary in northern Italy[外文期刊] 2004(3-4)
29. 南君亚; 刘育燕 浙江煤山二叠-三叠系界线剖面有机和无机碳同位素变化与古环境[期刊论文]-地球化学 2004(01)
30. Liang Handong End Permian catastrophic event of marine acidification by hydrated sulfuric acid: mineralogical evidence from Meishan section of South China[期刊论文]-Chinese Science Bulletin 2002(16)
31. 梁汉东; 梁言慈 中国煤山剖面二叠系/三叠系界线附近白粘土中残余酸的发现与意义[期刊论文]-科学技术与工程 2004(01)
32. 张华 撞击地层学及其研究进展[期刊论文]-地球科学进展 2005(09)
33. 傅恒; 李雪兰; 邝碧湘 天文事件与二叠纪末联合古陆解体[期刊论文]-沉积与特提斯地质 2004(02)
34. 彭元桥; 高勇群; 杨逢清 南非陆相二叠系-三叠系界线研究进展[期刊论文]-地质科技情报 2006(01)
35. 齐文同 事件地层学概论 1990

本文链接: [http://d.g.wanfangdata.com.cn/Periodical\\_zgqydz200803010.aspx](http://d.g.wanfangdata.com.cn/Periodical_zgqydz200803010.aspx)