

河南济源大峪槐疙塔岭二叠—三叠系元素 地球化学特征及古环境

徐莉¹⁾, 张成君³⁾, 贾松海¹⁾, 张纪明¹⁾, 吕君昌²⁾, 潘泽成¹⁾, 张海青¹⁾, 阎国顺¹⁾

1) 河南省地质博物馆, 郑州, 450016;

2) 中国地质科学院地质研究所, 国土资源部地层与古生物重点实验室, 北京, 100037;

3) 兰州大学地质科学与矿产资源学院, 兰州, 730000

内容提要: 本文对河南济源盆地大峪槐疙塔岭二叠系上石盒子组(P_3sh)、孙家沟组(P_3s)和三叠系刘家沟组(T_1l)剖面岩石样品进行了元素、频率磁化率、碳酸盐以及总有机质等的分析研究, 结果表明在二叠系孙家沟组(P_3s)底部济源动物群化石层、以及三叠系刘家沟组(T_1l)底部界线(P/T)附近, 其微量和常量元素发生了较明显的变化。化石层中 Ba, Cr, Hf, Nb, Th, Ti, V, Y, Tl, Zn, Cu, Ga, Pb, Ni, La, Rb, Nd, 以及 K_2O , Al_2O_3 , Fe_2O_3 含量相对较高, Zr, W, Sr, Bi, Co, Ce, 以及 SiO_2 , Na_2O 含量较低, MgO, CaO, Mn 则没有明显的变化。Ba, Hf, Nb, Th, Ti, V, Y, W, K_2O , Al_2O_3 , SiO_2 , Na_2O , Bi, Fe_2O_3 , Ni, Co, La, Nd, Ce, 及有机碳含量在三叠系底部含量明显上升, Cu, Ga, Pb, Tl, Zn, Cr, Zr, Sr, MgO, CaO, 以及岩石频率磁化率 X_{fd} 、碳酸盐含量则明显下降。该剖面不仅记录了二叠—三叠纪的生物灭绝事件, 而且有明显的二叠—三叠系界线, 事件及界线的形成可能与沉积环境和古气候有关, 水体的变浅、炎热气候和风化作用加强可能是直接的原因。石盒子组(P_3sh)主要为河流—三角洲沉积环境, 古气候相对温暖湿润; 孙家沟组(P_3s)为三角洲平原相, 前期和后期有强烈风化作用, 并且炎热多雨。中期则水平面上升, 水下三角洲前缘砂质沉积为主; 三叠系刘家沟组(T_1l)则水体进一步扩张, 气温相对下降。

关键词: 济源盆地; 二叠—三叠系; 元素; 元素比; 古环境

显生宙以来地球环境发生了 5 次比较显著的生物灭绝事件, 而二叠纪—三叠纪之交的生物灭绝事件则是最重要的一次事件, 全球大约 90% 的海洋生物和 70% 的陆生脊椎生物灭绝, 并且持续到早三叠世漫长时期之后地球上生物才开始恢复, 因而对这一灾难性的生物灭绝事件的研究成为了目前关于地球上生命起源和演化研究的热点。许多学者对这一特征的生物灭绝事件的时间、生物类型和数量、过程等进行了广泛的研究, 中国浙江煤山二叠系—三叠系剖面成为国际标准层型及点得到了更为广泛的研究(Zhou Lei et al., 1988; Xie Shucheng et al., 2007)。Erwin 等(2002)对二叠纪末的生物灭绝事件做了较为全面的综述, 事件的单幕(Jin Y G et al., 2000)到两幕特征(Xie Shucheng et al., 2005; Yin Hongfu et al., 2012)也得到了共识。对于事

件发生的原因尽管到目前为止仍有很多疑问, 通过大量海相地层的研究认为古、中生代之交的生物大灭绝与地外物体撞击、大面积岩浆或者地幔柱活动、全球气候变化、海水后退等有关。殷鸿福等(2013)对这次生物大灭绝事件特征进一步证实为全球性事件, 并与全球地形、气候、风向、洋流、地层等同步进行, 提出了“超大陆聚合效应”的观点。对这次古、中生代之交的生物大灭绝事件记录的研究不仅通过直接对生物种属进行统计研究(Song Haijun et al., 2011), 而且对全球比较典型的二叠系—三叠系剖面从稳定同位素组成(Chen Jinshi et al., 1991; Haas et al., 2006; Hermann et al., 2010; Korte et al., 2010)、元素特征(柴之芳等, 1986; Kato et al., 2002)、生物标志化合物(Wang Chunjiang, 2007; Grice et al., 2005; Xie Shucheng et al., 2005)、生

注: 本文为河南省国土资源厅地质遗迹保护项目(豫财建办[2009]520)、地质矿产科技攻关项目(豫财招标采购[2009]61号8号)和(豫财招标采购 2011-622 号-2)、国家自然科学基金(41272022)资助的成果。

收稿日期: 2013-04-19; 改回日期: 2014-06-12; 责任编辑: 黄敏。

作者简介: 徐莉, 女, 1966 年生, 博士, 教授级高级工程师。主要从事地质矿产、地层古生物、地质遗迹保护研究。Email: xuli.312@163.com。通讯作者: 张成君, 1966 年, 教授, 博士生导师。兰州大学地质科学与矿产资源学院, 主要从事岩石地球化学和第四纪环境化学研究。Email: cjzhang@lzu.edu.cn。

物化石种类 (Shen Shuzhong et al., 1999; Chen Zhongqiang et al., 2005; Chen Jun et al., 2009) 等方面进行了全面深入的研究。

然而目前由于海相地层分布广泛和连续,因此二叠系—三叠系地层研究也相对较多,陆相二叠系—三叠系地层较少,并且陆相地层相对于海相地层的连续性较差、无特征的海相生物等,因而研究相对较少 (De Kock et al., 2004; Peng Yuanqiao et al., 2006), 但从中国新疆准噶尔盆地、澳大利亚 Bowen 盆地和 Sydney 盆地、俄罗斯地台东部至乌拉尔山西坡,以及南非的 Karoo 盆地二叠系—三叠系地层发育良好,并且陆相生物化石丰富,尤其是 Karoo 盆地研究较多, P-Tr 界线也得到了 $\delta^{13}\text{C}$ 地层的支持 (MacLeod et al., 2000)。地球化学剖面的分析对了解沉积地层物质来源及沉积特征有较好的指示作用。目前对世界各地二叠—三叠系剖面附近层位进行了大量的同位素、元素分析研究,不仅认识到界线的碳同位素组成负漂移,而且对 Ir 事件的认识也越来越清楚。本文试图通过对中国河南济源盆地二叠系—三叠系沉积剖面的岩性特征、元素组成等分析,揭示该地区二叠纪—三叠纪时期的环境、地层演变,以及是否有生物大灭绝的特征。

1 研究区地质背景

河南济源盆地有发育的二叠系—三叠系陆相地层,界线十分清楚,沉积较为连续,是研究二叠纪—三叠纪时期地球上古环境演变的有利材料。本文研究剖面位于河南省济源市大峪镇的济源凹陷内 (图

1)。研究区主要出露地层有二叠系、三叠系、侏罗系、新近系以及第四系地层 (图 2)。济源凹陷位于南华北盆地的西北边缘,介于中条山和太行山与 EW 走向的嵩其隆起之间。主要为中、新生代沉积岩,盆地主要格局形成于早第三纪。济源盆地基底为太古代到早元古代的结晶岩系和中上元古代和古生代沉积岩,三叠纪、早中侏罗世、晚侏罗—早白垩世形成构造改造后的盆地,早第三纪为张性断陷盆地。盆地经历了印支运动、燕山运动、喜山运动的改造 (张功成, 1997)。二叠纪以浅水三角洲、河流和陆缘近海湖泊体系为主;三叠纪则主要发育河流和湖泊体系 (陈世悦, 2000), 盆地南缘在古、中生代为武汉—南京深海环境 (Xie Shucheng et al., 2010)。

河南省在大地构造上跨华北板块南部和扬子板块北缘的秦岭—大别造山带,中、南部为南华北盆地的主体 (徐汉林等, 2004)。华北地块南部晚石炭世—三叠纪的盆地演化与其南侧秦岭造山带的造山作用密切相关,是伴随着秦岭造山带的隆升而沉降的,并接受了来自秦岭造山带的陆源碎屑物质。华北地块南部晚古生代至三叠纪沉积盆地经历了由陆表海盆地至湖泊盆地的演化过程。早—中三叠世时期,河南省的构造演化主要受控古特提斯构造域和古亚洲构造域 (在后期可能有古太平洋构造域的参与) 的共同作用;晚三叠世时期,由于扬子板块加剧向北俯冲,导致秦岭洋的最后关闭,最终拼接到欧亚板块的南缘。在强大挤压力作用下,结束了华北、华南长期南北对峙的格局。

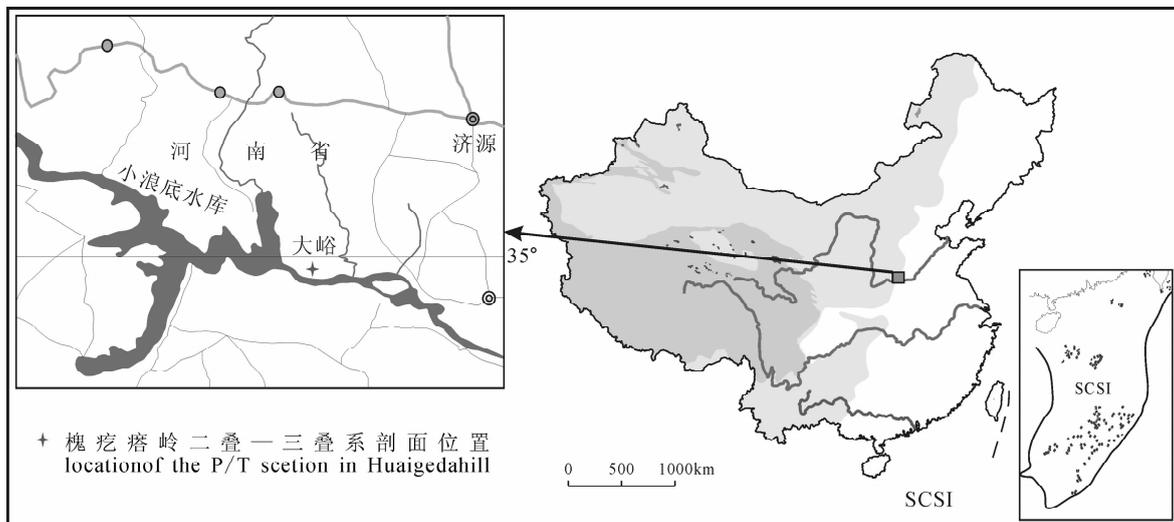


图 1 河南济源盆地大峪槐疙塔岭二叠—三叠系剖面地理位置

Fig. 1 The location of the Permian-Triassic section in the Huaigedahill of Dayu Town in the Jiyuan Basin, Henan Province

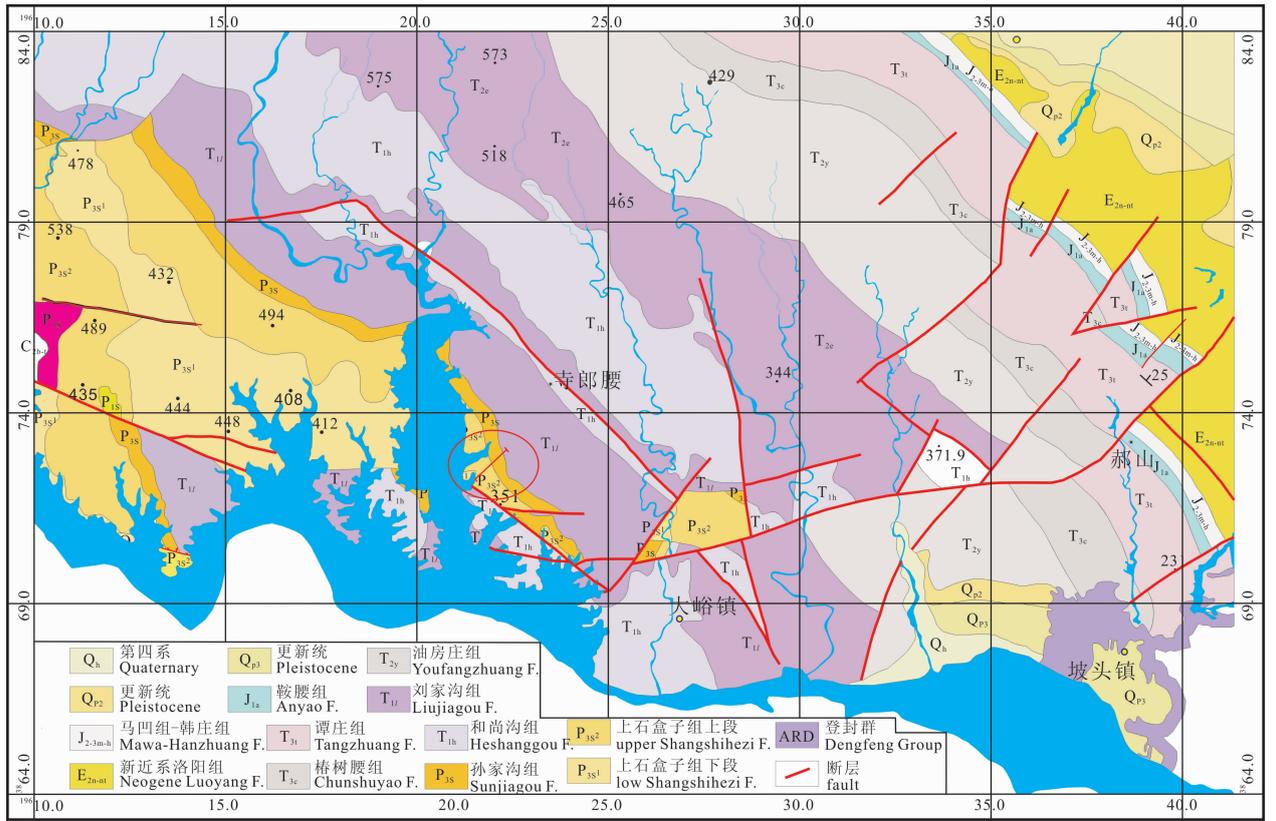


图 2 河南济源盆地研究区地质图(据河南省区域地质志改编,1989)

Fig. 2 The geological map of Jiyuan Basin in Henan Province (modified from Regional Geology of Henan Province, 1989)

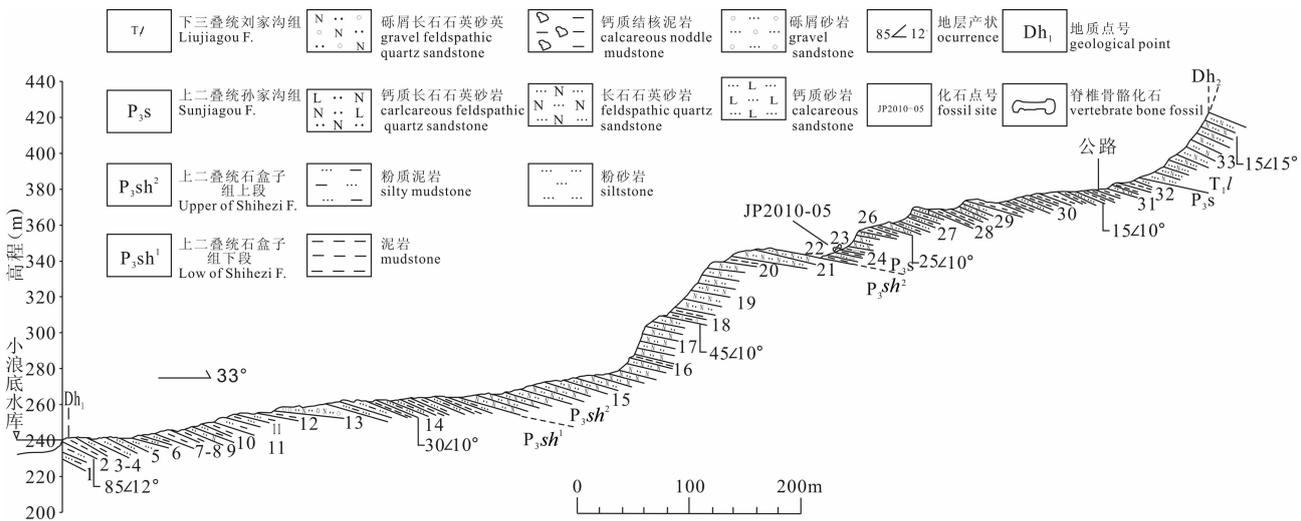


图 3 河南济源盆地大峪槐疙塔岭二叠—三叠系剖面

Fig. 3 The Permian-Triassic section at the Huaigeda hill of Dayu Town in the Jiyuan Basin, Henan Province

2 大峪 P-T 界线剖面

本文研究的大峪槐疙塔岭二叠—三叠系剖面位于河南济源西南部的小浪底水库北侧。笔者所实测层段主要包括了二叠系石盒子组(P_{3sh}, 1~21层)、孙家沟组(P_{3s}, 22~32层)和三叠系刘家沟组

(T₁) (33层), 剖面实测地层真厚度大约 330m(图 3)。石盒子组(P_{3sh})岩性特征下部为紫红色泥岩过渡到灰黄色粉砂岩和灰绿色泥岩, 灰绿色泥岩与灰黑色泥岩(煤线)为互层(7层); 向上过渡到灰绿色细粒长石石英砂岩; 顶部又过渡到紫红色粉砂质泥岩夹灰绿色细粒长石石英砂岩。石盒子组(P_{3sh})与



图 4 河南济源盆地大峪槐疙瘩岭二叠—三叠系地层及界线

Fig. 4 The Permian-Triassic stratum and boundary at the studied Huaigeda hill of Dayu Town in the Jiyuan Basin of Henan Province

(a)—研究区大峪槐疙瘩岭二叠—三叠系地层界线; (b)—研究剖面二叠—三叠系地层界线
(a)—Permian-Triassic boundary in Huaigeda hill of Dayu Town; (b)—Permian-Triassic boundary

孙家沟组(P_3s)呈整合接触。孙家沟组(P_3s)以紫红色泥岩为主,上部夹灰白色中细粒长石石英砂岩、细砂岩;下部紫红色泥岩中有大量脊椎动物化石为特征(22~24层,JP2010-05)。孙家沟组(P_3s)与早三叠统刘家沟组(T_1l)地层野外观察呈平行不整合接触(图4),刘家沟组(T_1l)以浅红色中—厚层粉砂质细粒长石石英砂岩,夹砾屑(内碎屑)中细粒长石石英砂岩。

孙家沟组底部古脊椎动物骨骼和牙齿化石主要产于紫红色含钙质泥岩和含砾细砂岩内,该化石层为主要的地层时代标志层。1963年最早由杨钟健(1979)在该地发现保存不太完好的脊椎动物化石,经鉴定主要包括毕氏蜥类、锯齿龙类、恐头兽类、丽齿兽类和犬齿兽类在内的两栖、爬行2大类5类6属8种,并认为是一个动物群,称之为“济源动物群”。并根据野外观察,认为化石层位属于石千峰统下的石盒子统上部。李锦玲(2000)进一步研究后认为,该动物群除无法证实恐头兽类存在外,毕氏蜥类、锯齿龙类、犬齿兽类和丽齿兽类等都是该动物群的可能成员。它们是中国晚二叠世地层中分布的三大生物群之一。

3 样品采集及分析

笔者2011年及2012年两次赴槐疙瘩岭二叠—三叠系剖面进行了详细研究,并按照从老到新的顺序一共采集了101块新鲜岩石样品(其中有8块平行样),这些样品主要集中于上石盒子组顶部到P-T界线之间地层序列。回到室内后,对样品进行了碳酸盐含量、总有机碳含量(TOC)以及元素和频率磁化率 X_{fd} 等分析测试。

碳酸盐含量分析采用粉碎的岩石样品与稀盐酸反应,测定产生的 CO_2 体积,与标准碳酸盐比较,利用气体状态方程计算碳酸盐的百分含量,分析误差 $\leq 2\%$ 。总有机碳含量(TOC)利用重铬酸钾滴定法,分析误差 $\leq 0.5\%$ 。实验分析在兰州大学资源环境学院环境科学实验室进行。

金属元素分析采用X荧光光谱分析法,用荷兰产PW2403 X荧光光谱分析仪进行常量和痕量元素分析。与此同时,将磨细的岩石样品称取重量2g左右,用保鲜膜包紧后装入磁学专用样品盒中压实,采用Bartington MS2磁化率仪进行样品的低频磁化率、高频磁化率测量,然后计算频率磁化率。所有分析均在兰州大学教育部西部资源环境重点实验室完成。

4 样品分析结果

微量和常量元素分析结果见图5和表1。分析结果表明在二叠系孙家沟组(P_3s)底部济源动物化石层、以及三叠系刘家沟组(T_1l)底部界线(P/T)附近,其微量和常量元素发生了较明显的变化。自化石层向上,地层中Ba, Cr, Hf, Nb, Th, Ti, V, Y, Tl, Zn, Cu, Ga, Pb, Ni, La, Rb, Nd, 以及 K_2O , Al_2O_3 , Fe_2O_3 含量先上升,后下降,至孙家沟组(P_3s)上部含量又开始上升;而Zr, W, Sr, Bi, Co, Ce, 以及 SiO_2 , Na_2O 含量在化石层降低,到孙家沟组(P_3s)中部地层含量上升,在随后的上部地层含量下降。而MgO, CaO, Mn则没有明显的变化。

在二叠系与三叠系界线(P/T)附近, Ba, Hf, Nb, Th, Ti, V, Y, W, K_2O , Al_2O_3 , SiO_2 , Na_2O , Bi, Fe_2O_3 , Ni, Co, La, Nd, Ce, 及有机碳含量在三叠系底部含量明显上升, Cu, Ga, Pb, Tl, Zn, Cr, Zr, Sr, MgO, CaO, 以及岩石频率磁化率 X_{fd} 、碳酸盐含量则

表 1 河南济源盆地大峪槐疙瘩岭二叠—三叠系元素和频率磁化率、碳酸盐和有机质含量分析结果

Table 1 The analysis results of elements, frequency dependent susceptibility, carbonate and organic matter contents for the Permian-Triassic section in the Dayu Town, Jiyuan Basin, Henan

元素	P ₃ sh ₁	P ₃ sh ₂	P ₃ s	T ₁ l
Ba	409(412~538)/4	457(254~866)/6	1025(175~7331)/63	405(172~1019)/18
Bi	35(LLD~70)/4	175(66~298)/6	45(LLD~166)/63	28(4~41)/18
Ce	127(99~152)/4	146(121~193)/6	73(LLD~140)/63	80(9~143)/18
Co	84(32~155)/4	197(77~339)/6	51(9~195)/63	46(27~100)/18
Cr	54(41~76)/4	21(7~43)/6	74(7~1049)/63	54(22~74)/18
Cu	23(10~38)/4	10(3~32)/6	27(3~141)/63	19(15~28)/18
Ga	22(16~30)/4	10(6~14)/6	13(LLD~26)/63	LLD(LLD)/18
Hf	9(4~11)/4	5(1~8)/6	3(LLD~11)/63	7(LLD~10)/18
La	79(56~106)/4	56(44~75)/6	50(3~71)/63	40(14~56)/18
Mn	611(324~1246)/4	353(130~609)/6	2589(143~10210)/63	1289(344~5762)/18
Nb	15(9~21)/4	7(4~10)/6	10(LLD~20)/63	17(13~21)/18
Nd	69(51~104)/4	50(27~78)/6	57(11~148)/63	42(18~63)/18
Ni	24(16~28)/4	14(9~21)/6	29(7~49)/63	21(11~28)/18
Pb	33(12~78)/4	17(13~22)/6	23(LLD~104)/63	5(LLD~5)/18
Rb	61(28~94)/4	96(31~206)/6	107(3~321)/63	72(15~142)/18
Sr	94(50~121)/4	42(16~83)/6	98(12~274)/63	114(86~164)/18
Th	21(16~25)/4	15(6~21)/6	17(6~37)/63	LLD(LLD)/18
Ti	5967(5781~6300)/4	2959(1017~4176)/6	4052(567~6385)/63	3389(724~4930)/18
Tl	3(LLD~3)/4	4(LLD~5)/6	4(LLD~7)/63	LLD(LLD)/18
V	76(46~98)/4	33(6~58)/6	96(18~219)/63	65(16~119)/18
W	243(49~490)/4	1179(369~1958)/6	142(LLD~327)/63	142(18~412)/18
Y	41(LLD~49)/4	15(1~27)/6	28(LLD~53)/63	20(12~25)/18
Zn	104(72~135)/4	69(45~90)/6	112(41~218)/63	50(13~62)/18
Zr	374(130~545)/4	174(77~256)/6	134(13~345)/63	296(52~458)/18
Fe ₂ O ₃	6.4(3.8~9.1)/4	3.7(2.2~6.3)/6	4.8(0.9~8.8)/63	3.9(1.1~5.6)/18
SiO ₂	68.0(63.9~69.7)/4	77.3(63.9~85.0)/6	51.6(6.1~82.4)/63	49.0(15.6~61.0)/18
Al ₂ O ₃	17.9(14.3~20.0)/4	11.5(7.8~17.9)/6	13.5(1.7~20.6)/63	11.4(3.0~16.2)/18
MgO	0.8(0.5~1.2)/4	0.6(0.3~0.9)/6	6.2(0.5~46.1)/63	1.9(0.7~3.4)/18
CaO	1.7(0.8~2.3)/4	0.5(0.2~1.1)/6	19.0(0.5~70.5)/63	14.5(6.2~37.7)/18
Na ₂ O	1.0(0.6~1.5)/4	1.4(0.4~2.4)/6	0.5(0.1~2.4)/63	1.1(0.4~1.7)/18
K ₂ O	2.4(1.5~3.6)/4	3.5(1.3~6.8)/6	4.0(0.9~7.0)/63	2.0(0.6~3.3)/18
CaCO ₃	1.2(0.2~1.8)/4	0.4(0.3~1.0)/6	22.7(0.2~84.2)/63	19.3(3.2~55.2)/18
TOC	1.5(0.5~3.2)/4	0.4(0.3~0.5)/6	0.4(0.1~0.7)/63	1.0(0.3~1.7)/18
X _{fd}	3.8(1.8~4.8)/4	3.3(1.8~4.9)/6	6.2(1.2~4.9)/63	2.9(0.7~5.2)/18

注:Ba—Zr 单位为 $\times 10^{-6}$; Fe₂O₃—X_{fd} 单位为 %。数据表示为:平均值(范围值)/样品数。

明显下降。

5 讨论

二叠系孙家沟组(P₃s)地层中微量和常量元素变化较大,在下部化石层和上部地层中以富亲石元素和亲铜元素为主要特征,K₂O,Al₂O₃,Fe₂O₃含量上升;中部地层则有相反的变化趋势。而在二叠系—三叠系界线之上刘家沟组(T₁l)下部地层元素组成则发生了较大的变化,亲石元素和亲铁元素含量上升,亲铜元素含量下降,同时岩石频率磁化率及碳酸盐含量下降。其中,岩石频率磁化率在 P-Tr 界线附近降低明显,与彭元桥等(2000)对中国华南一些二叠系—三叠系界线剖面进行的频率磁化率测

量结果相似。磁化率是磁性矿物的直接反应,间接指示了古气候特征。本文中频率磁化率在 P-Tr 界线附近明显变化与 Fe₂O₃ 的变化规律一致,但在“济源动物群”化石层附近 Fe₂O₃ 含量也较高,但是频率磁化率则没有明显的变化,表明铁磁性矿物的类型可能不同,主要原因可能与沉积环境类型的差异有关。

元素组成特征表明,济源盆地大峪槐疙瘩岭二叠—三叠系剖面在“济源动物群”和界线附近岩石中微量和常量元素普遍有较明显的变化,尤其是指示氧化—还原环境元素(Ce、Mn、Fe、V)、指示食腐生物元素(Ba、Zn、V)(Fio et al., 2010)在“济源动物群”化石层和二叠—三叠系界线有明显的变化特征,

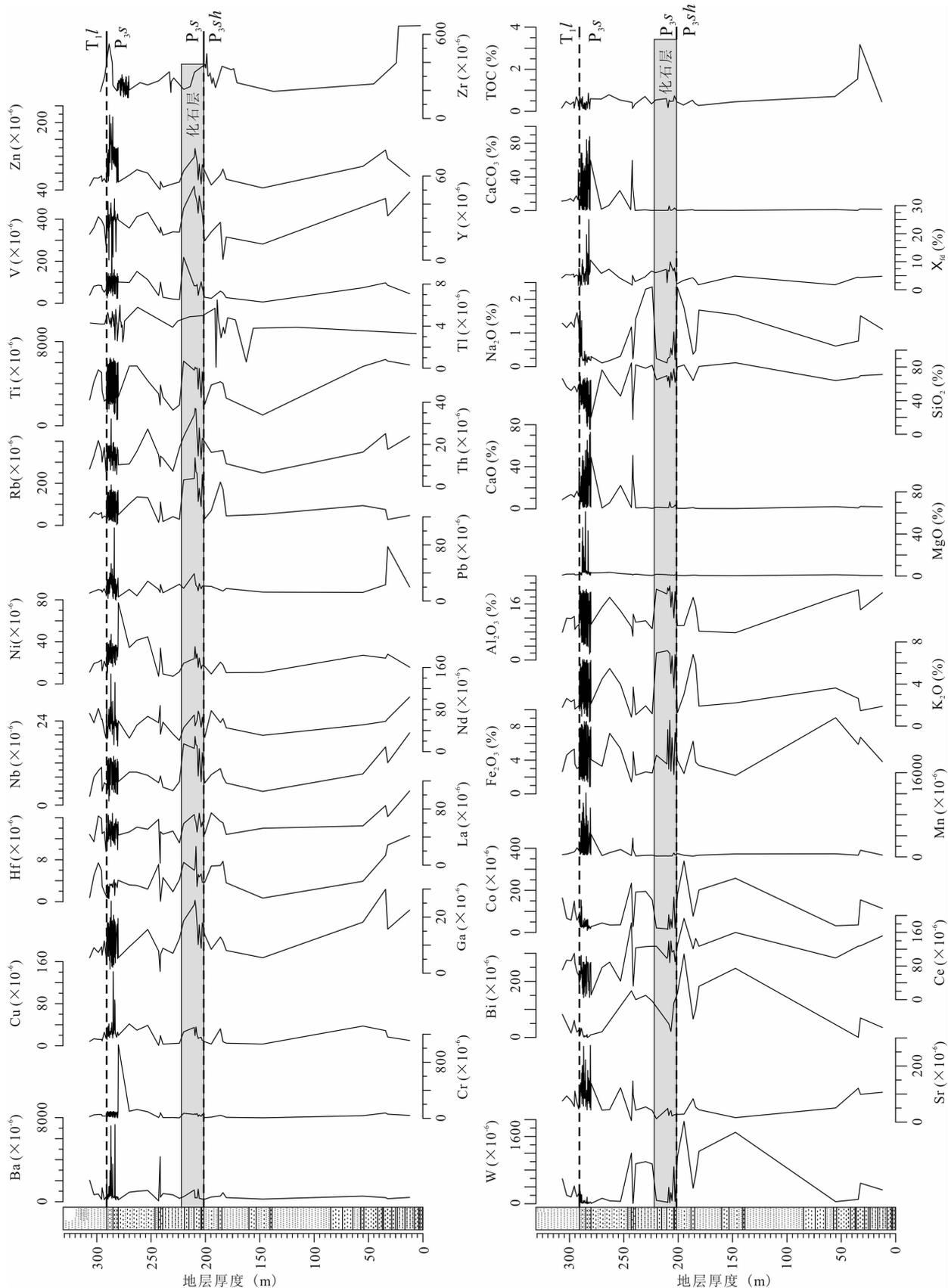


图 5 河南济源盆地大峪槐疙瘩岭二叠—三叠系剖面元素、频率磁化率、碳酸盐和有机质含量演化图

Fig. 5 Diagram of elements, frequency dependent susceptibility, carbonate and organic matter contents for the Permian-Triassic section in the Dayu Town, Jiyuan Basin of Henan Province

表明本文剖面在这 2 个比较特征的时段不仅沉积环境特征发生了较大变化,而且食腐生物元素也指示了生物群落的大量灭绝,与世界各地该时期的演化特征一致,进一步说明其二叠—三叠纪生物大灭绝的全球性特征。对克罗地亚(Fio et al., 2010)、斯洛文尼亚(Dolenec et al., 2001)、中国藏南龙西山(吴明清等, 1996)、川北江油—广元(甘媛等, 2008)、包括浙江长兴煤山在内的一些中国南方二叠—三叠系界线剖面(Zhou Lei et al., 1988; 周瑶琪等, 1991; Kaiho et al., 2006)的元素分析表明,在界线附件稀土元素还是其它主、微量元素都发生了明显的变化,并且硫同位素组成均反映出还原环境特征。浙江煤山剖面 P/Tr 界线之下有一特征的粘土层,与周围沉积岩相比,微量元素成分以富含 K, Cs, Hf, Ta 和 Th, 以及高度富含 Fe(45%)和亲铜元素 Zn, As, Se 和 Sb, 而贫 Na, V, Cr, Mn 和 Co 为特征,说明粘土的酸性火山喷发物形成的蚀变火山灰来源(Zhou Lei et al., 1988)。殷鸿福(1994)、殷鸿福等(2006)总结了国内外二叠—三叠系界线研究结果,西伯利亚的通古斯暗色岩和峨眉山玄武岩大火山岩省,以及特提斯洋及泛大洋西岸火山岩分布(Yang Jianghai et al., 2012)、中国华南大范围火山灰层的分布(Xie Shucheng et al., 2010)表明二叠系—三叠系之交存在广泛强烈的火山活动,甚至遍及全球(Renne et al., 1995)。而柴之芳等(1986)对浙江长兴二叠系—三叠系界线剖面元素分析,发现亲铁元素 Ni, Co, Fe, 以及亲硫元素的 As, Sb 和 Cu 与 Ir, Os 等元素有类似的同步富集现象,因此认为 P/T 的生物灭绝是由地外物质撞击所引起的,后期也得

到一些学者的支持(Becker et al., 2001, 2004; Kaiho et al., 2001),并且是由石陨石撞击,而不是铁陨石(Palme, 1982)。本文剖面中并没有发现有火山凝灰岩或者酸性火山岩,而主要是由沉积砂岩、泥岩等组成,具有从化石层到界线沉积岩性由底部砂岩变为以紫红色泥岩为主特征,沉积环境发生了较大变化。野外考察和剖面测量时发现,二叠系石盒子组(P_3sh)岩性以灰绿色细粒长石石英砂岩为主,有明显的流动水体形成的板状交错、槽状交错和斜层理等沉积构造特征。孙家沟组(P_3s)以紫红色泥岩为主,下部的化石层为紫红色泥岩,中部为灰白色中细粒长石石英砂岩、细砂岩,砂岩中也见有明显的流动水体形成的斜层理等构造特征。沉积岩性可能反映出水体变浅的氧化环境,为浅水或三角洲平原陆上环境。早三叠统刘家沟组(T_1l)为浅红色中—厚层粉砂质细粒长石石英砂岩,见有板状交错和斜层理等沉积构造类型,表明水体逐渐加深。在化石层到二叠—三叠系界线附近该地区水体的变化控制了沉积环境的变化,而生物的生存也明显与环境有关。该地区生物的灭绝是否与当时由于火山活动或者其它原因引起的水体酸化,或者 CO_2 浓度升高,以及水体变浅的原因是否与殷鸿福等(2013)提出的“超大陆聚合效应”而引起全球海水水位下降有直接联系等还需进一步认识。

沉积岩元素组成特征可以进行物源的判别。由于 Zr, Hf, Ta 和 Th 在风化过程中的不活动性使得它们成为酸性火山岩的可靠指示剂(Zhou Lei et al., 1988),因此,一般通过 Hf 和 Th 这两个特征元素的分析来判断岩浆的来源,来自同一个岩浆源的

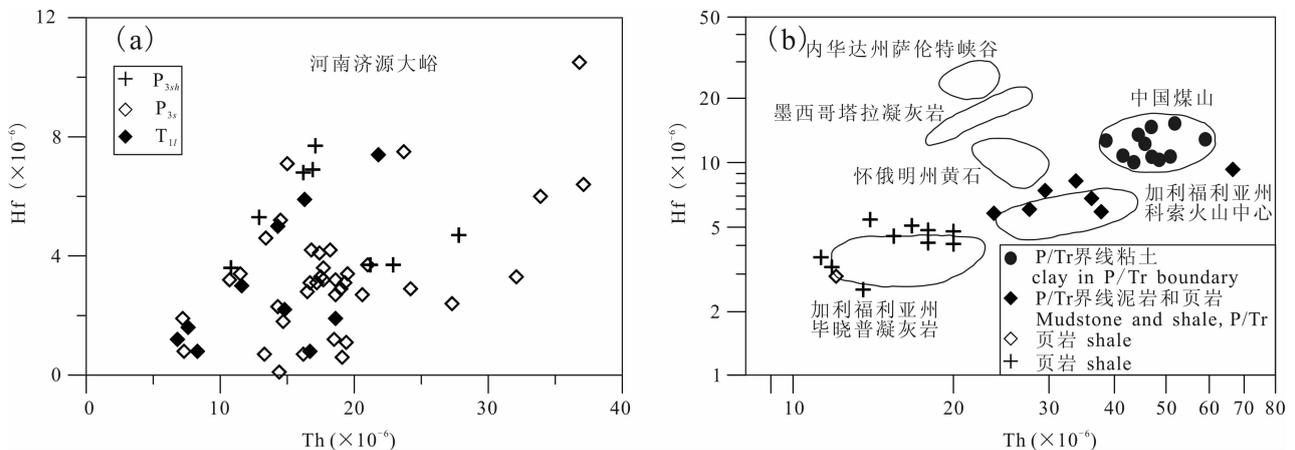


图 6 河南济源大峪槐圪塔岭剖面(a)及浙江煤山 T/P 界线、国外典型火山成因岩石(b, Zhou Lei et al., 1988) Th-Hf 特征图

Fig. 6 Th and Hf characteristics of the Huaigeda hill section in Henan Jiyuan Basin, Henan (a) and Zhejiang Meishan in China and typical magmatites in oversea (b, Zhou Lei et al., 1988)

物质都集中分布在一个小区域内。Zhou Lei 等(1988)对煤山剖面 P/Tr 界线浅色粘土分析结果显示 Hf 和 Th 集中在一狭窄的区域内,表明它们来自同一岩浆源(图 6b)。然而,济源盆地大峪槐疙瘩岭二叠—三叠系剖面二叠系石盒子组(P_3sh)、孙家沟组(P_3s)和三叠系刘家沟组(T_1l)地层岩石 Hf 和 Th 相关性分析则出现分散分布特征(图 6a),并且二叠系石盒子组(P_3sh)、孙家沟组(P_3s)和三叠系刘家沟组(T_1l)地层岩石中 Hf 和 Th 有相同的分布,这表明济源盆地大峪槐疙瘩岭二叠系到三叠系有相同的沉积物源。砂岩或者砂岩—泥岩的主元素可以用来判断沉积物的物质来源,通过对本文二叠—三叠系剖面的元素双变量图解分析(图 7),大致可以判断出该地层二叠系到三叠系主要来源于被动大陆边缘、活动大陆边缘以及大陆岛弧的特征(Bhatia, 1983; Roser et al., 1986),表明物源与大陆边缘关系密切,并具有多物源特征。

沉积环境的变化往往与古气候环境有直接的联系,由于一些元素比值以及稀土元素分布特征值可以指示古气候和古沉积环境特征,因此,通过对地层中特征元素比值的分析可以判断济源盆地在二叠纪—三叠纪时期的古环境演变历史。图 8 为济源盆地大峪槐疙瘩岭二叠—三叠系剖面特征元素比值及元素 Y 的分布模式。

Rb/Sr 比的变化可以作为反映流域物理化学风化强度的指标(Jin Zhangdong et al., 2001)。由于 Rb 和 Sr 地球化学性质的明显差异,在雨水或地表

径流淋滤过程中,具有较大离子半径的 Rb 被粘土矿物大量吸附而保留在原地。相比之下离子半径较小的 Sr 则主要以游离态形式被地表水或地下水带走,使风化产物中 Rb/Sr 升高。随着风化程度的增强,风化残留中 Rb/Sr 值明显增加,并且 Rb/Sr 比值大小与风化程度之间呈正相关关系;相应地,化学风化率的增大会使更多的 Sr 进入沉积盆地,从而使其沉积盆地中沉积物的 Rb/Sr 变小。通常在湖泊中沉积物的 Sr/Ca 比值通常代表了水体的水化学特征(Kelts et al., 1990),与水体盐度成正相关关系。但是,在济源盆地大峪槐疙瘩岭晚二叠世发生的生物化石层表现为异常高的 Rb/Sr 和低的 Sr/Ca 比值,说明大量的 Sr 元素的流失。代表了该时期强烈的风化作用,并且伴随有较强的降水对地层的淋滤作用。紫红色的泥岩指示了强氧化环境特征。

铝硅酸盐在风化作用下一般转变为粘土矿物,如伊利石、蒙脱石和高岭石等,只有在极端湿热的条件下,如热带、亚热带湿润炎热的情况下,粘土矿物才能进一步发生红土化作用,使粘土矿物再分解,硅、铝分离,硅随水迁移,而铝则在原地堆积形成风化最终产物为铝土矿。铁是受氧化还原作用影响比较大的元素,在氧化环境中,二价铁极易被氧化为三价铁在原地发生淀积。因此,沉积物中硅铝率 $w(\text{SiO}_2)/w(\text{Al}_2\text{O}_3)$ 和硅铝铁率 $w(\text{SiO}_2)/w(\text{Fe}_2\text{O}_3 + \text{Al}_2\text{O}_3)$ 可以很好的反映古气候状况(吴艳宏等, 2004)。从图 6 中 $\text{SiO}_2/\text{Al}_2\text{O}_3$ 和 $\text{SiO}_2/(\text{Fe}_2\text{O}_3 + \text{Al}_2\text{O}_3)$ 的比值也可以说明济源盆地大峪槐疙瘩岭

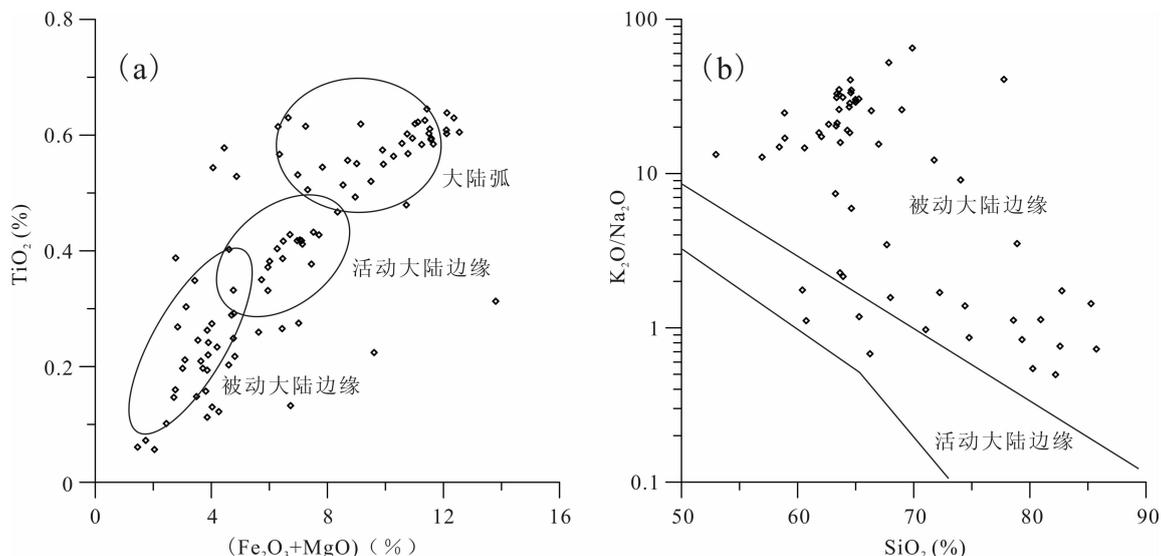


图 7 河南济源大峪槐疙瘩岭二叠—三叠系剖面砂岩主元素双变量图解(解释据 a: Bhatia, 1983; b: Roser et al., 1986)

Fig. 7 Major element ratio correlation of sandstones in the Permian-Triassic section in the Dayu Town, Jiyuan Basin, Henan (a after Bhatia, 1983; b after Roser et al., 1986)

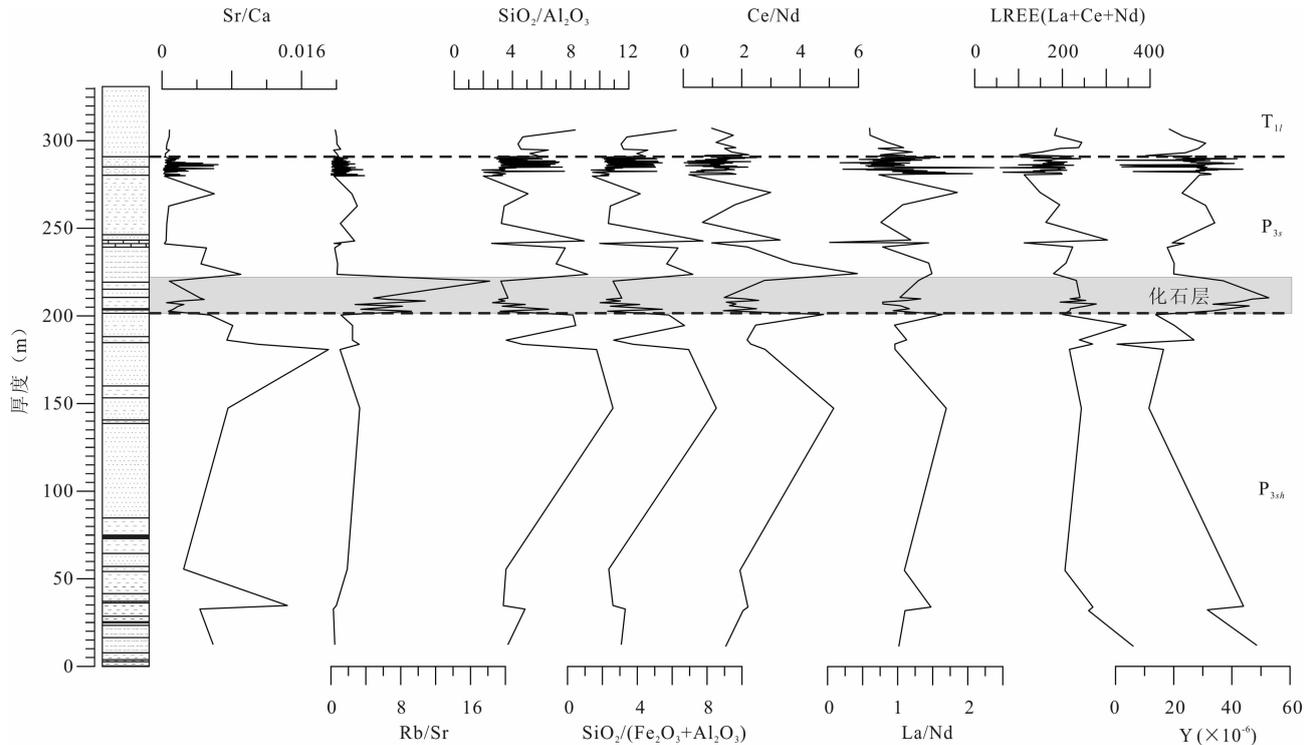


图 8 河南济源盆地大峪槐疙塔岭二叠—三叠系剖面元素比值变化特征

Fig. 8 The ratio change characteristics of elements for the Permian-Triassic section in the Dayu Town, Jiyuan Basin, Henan

晚二叠世—早三叠世水体变浅, Al 和 Fe 则由于强风化作用在风化残余物中富集, 大量 Fe_2O_3 的存在也说明强氧化环境条件。

由于岩石在风化作用过程中, 铈(Ce)、镧(La)和钕(Nd)的迁移能力不同, 因此, 稀土元素不仅可以反映出风化作用的阶段, 而且 Ce/Nd 和 La/Nd 的比值也可以作为风化作用的标志。岩石在风化过程中, 早期碱性阶段轻镧元素 La-Nd 富集, Y、Ce 以及少量的重镧元素 Er-Lu 的排出。该阶段主要是轻镧元素的富集, 风化产物中 Ti、Nb、Zr 等元素富集; 而在风化作用的酸性阶段, 稀土元素的迁移有相反的情况, 即 La 的大量带出, 而中镧(Sm-Ho)和重镧元素及 Y 在风化壳中富集。因此, 在风化壳形成过程中, 排泄水首先含 Y 和重镧元素, 然后以 La 为主; 风化残余物转变为粘土时, 以中及轻镧元素聚集为特征。风化作用过程中 REE 分配的一般情况是碎屑物质相对富含轻稀土元素, 并以吸附状态存在, 而河水溶解主要为重镧元素和 Y (张虎才, 1997)。在济源盆地大峪槐疙塔岭晚二叠世生物化石层 Ce/Nd 和 La/Nd 比值低、轻稀土元素含量中等, 而 Y 则有明显的异常高含量特征(达到 50×10^{-6}), Ti、Nb、Zr 等元素异常高含量(图 3)。根据稀土元素以及 Y 元素的迁移规律, 该阶段可能属于

风化作用较强的酸性阶段, 并且异常高的 Y 含量表明化石层非水下沉积相, 而属于地表生浅水环境。这与通过 Rb/Sr、Sr/Ca、 $\text{SiO}_2/\text{Al}_2\text{O}_3$ 和 $\text{SiO}_2/(\text{Fe}_2\text{O}_3 + \text{Al}_2\text{O}_3)$ 比值代表的环境特征一致, 气候炎热。保存的不太完好的主要包括毕氏螈类、锯齿龙类、恐头兽类、丽齿兽类和犬齿兽类在内的脊椎动物化石研究认为是近距离冲积形成(杨钟健, 1979; 李锦玲, 2000)。从化石保存情况得出的结论与元素分析结果比较一致, 说明该阶段风化作用较强。

在济源盆地大峪槐疙塔岭晚二叠世生物化石层之上层段(剖面中大约 220~240m)为灰白色中细粒长石石英砂岩、细砂岩, 该层段元素地球化学特征与化石层相反, 有较高的 Sr/Ca 比值和较低的 Rb/Sr 比值, 表明沉积盆地汇的 Sr 富集。而此阶段代表水下沉积环境的岩石特征也可以从低 Y 含量和 Fe_2O_3 、 Al_2O_3 迁移得到证明, 表明此阶段为流动水下沉积环境。

在二叠纪末期过渡到三叠纪的沉积物界线, 不仅元素含量、磁化率、碳酸盐含量等发生较大的变化(图 5), 而且元素比值也表现出明显的不同(图 8)。其中, Sr/Ca 和 Rb/Sr 比值均降低, 而 $\text{SiO}_2/\text{Al}_2\text{O}_3$ 和 $\text{SiO}_2/(\text{Fe}_2\text{O}_3 + \text{Al}_2\text{O}_3)$ 比值先降后升, 稀土和 Y 元素含量也表现为先降后升再降的特征, 但比二叠

纪时期含量下降。岩石也主要以中—厚层粉砂质细粒长石石英砂岩为主。这些特征表明,从二叠纪末到三叠纪研究区沉积环境发生了较大的变化,以水体逐步扩大为特征。不仅 Sr、Y、Fe₂O₃、Al₂O₃ 大量迁移,而且 Rb,以及稀土元素也大量迁移。

总体上,研究区在晚二叠至早三叠世期间,水体从浅到逐渐加深的过程,气候炎热潮湿,具有较强的风化作用。沉积环境和古气候的共同作用不仅造成了研究区生物的大量灭绝,而且在沉积地层上形成了明显的界线。

6 结论

(1)从济源盆地大峪槐疙瘩岭二叠—三叠系剖面元素分布特征表明,济源盆地该时期地层中主要元素、微量元素均发生了明显的变化,特别是代表氧化还原元素(Ce、Mn、Fe、V)和生物元素(Ba、Zn、V)、以及磁化率、碳酸盐含量等变化较为明显。并且反映出该地区二叠—三叠系与世界各地一样发生了生物灭绝事件,并形成了明显的二叠—三叠系界线,事件及界线的形成可能与沉积环境和古气候有关,水体的变浅、炎热气候和风化作用加强可能是直接的原因。Sheldon(2006)对南极 Graphite 峰二叠—三叠系剖面主元素和稀土元素的分析表明,在晚二叠到早三叠世期间发生了强烈的风化作用,导致了 P-Tr 界线的形成。

(2)分析结果表明,济源盆地大峪槐疙瘩岭二叠纪到三叠纪的环境演变过程中,二叠系石盒子组(P_{3sh})主要为河流—三角洲沉积环境,以水下沉积为主,古气候相对温暖湿润;孙家沟组(P_{3s})前期和后期均以紫红色泥岩,代表了强烈风化作用的长时间暴露的三角洲平原相,并且炎热多雨,易容元素大量流失为特征。中期则水平面上升,水下三角洲前缘砂质沉积为主;三叠系刘家沟组(T_{1l})则水体进一步扩张,水体加深,元素的迁移作用加强。

致谢:硕士生樊荣、赵琦、李军、胡晓兰、任雅琴等同学协助进行样品分析,对匿名评审专家的宝贵建议,以及本文编辑的辛勤细致工作,在此一并致以诚挚谢意!

参 考 文 献

柴之芳,马淑兰,毛雪瑛,孙亦因,徐道一,张勤文,杨正宗. 1986. 浙江长兴二叠系/三叠系界线剖面的元素地球化学特征. 地质学报,60(2): 139~150.
陈世悦. 2000. 华北地块南部晚古生代至三叠纪沉积构造演化. 中国矿业大学学报,29(5): 536~540.

甘媛,于林松,何明友,张玥,刘峰,王玉婷,阙微. 2008. 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. 地质通报,27(3): 380~387.
河南省地质矿产局. 1989. 河南省区域地质志. 北京: 地质出版社.
李锦玲. 2000. 中国最原始的低等四足类动物群. 中国科学(D辑),30(3): 2789~283.
彭元桥,童金南,Hansen H J,Guang R Shi. 2000. 华南二叠—三叠系界线处的磁化率特征及其对比意义. 华南地质与矿产,2: 22~28.
吴明清,陈楚震. 1996. 藏南聂拉木县色龙西山二叠—三叠系界线剖面微量元素地球化学. 自然科学进展,6(2): 223~221.
吴艳宏,李世杰,夏威夷. 2004. 可可西里苟仁错湖泊沉积物元素地球化学特征及其环境意义. 地球科学与环境学报,26(3): 64~68.
徐汉林,赵宗举,吕福亮,杨以宁,汤祖伟,孙国忠,徐云俊. 2004. 南华北地区的构造演化与含油气性. 大地构造与成矿学,28(4): 450~463.
杨钟健. 1979. 河南济源—新晚二叠世动物群. 古脊椎动物与人类,17(2): 99~113.
殷鸿福,鲁立强. 2006. 二叠系—三叠系界线全球层型剖面—回顾和进展. 地学前缘(中国地质大学(北京)),13(6): 257~267.
殷鸿福,宋海军. 2013. 古、中生代之交生物大灭绝与泛大陆聚合. 中国科学: 地球科学,43(10): 1539~1552.
殷鸿福. 1994. 二叠系—三叠系研究的进展. 地球科学进展,9(2): 1~10.
张功成. 1997. 济源凹陷盆地结构构造特征与油气勘探前景. 断块油气田,4(5): 5~11.
张虎才. 1997. 元素表生地球化学特征及理论基础. 兰州: 兰州大学出版社,133.
周瑶琪,柴之芳,毛雪瑛,马淑兰,马建国,孔屏,何锦文. 1991. 中国南方二叠—三叠系界线地层元素地球化学及其启示. 地质论评,37(1): 51~65.
Becker L, Preda R J, Hunt A G, Bunch T E, Rampino M. 2001. Impact event at the Permian-Triassic boundary: evidence from extra terrestrial noble gases in fullerenes. Science,291: 1530~1533.
Becker L, Poreda R J, Basu A R, Pope K O, Harrison T M, Nicholson C, Lasky R. 2004. Bedout: a possible end-Permian impact crater off shore of northwestern Australia. Science,304: 1469~21476.
Bhatia M R. 1983. Plate tectonics and geochemical composition of sandstones. Journal of Geology,91: 611~627.
Chen Jinshi, Chu Xuelei, Shao Maorong, Zhong Hua. 1991. Carbon isotope study of the Permian-Triassic boundary sequences in China. Chemical Geology (Isotope Geoscience Section),89: 239~251.
Chen Zhongqiang, Kaiho K, George A D. 2005. Early Triassic recovery of the brachiopod faunas from the end-Permian mass extinction: A global review. Palaeogeography Palaeoclimatology Palaeoecology,224: 270~290.
Chen Jun, Beatty T W, Henderson C M, Rowe H. 2009. Conodont biostratigraphy across the Permian-Triassic boundary at the

- Dawen section, Great Bank of Guizhou, Guizhou Province, South China; Implications for the Late Permian extinction and correlation with Meishan. *Journal of Asian Earth Sciences*, 36: 442~458.
- De Kock M O, Kirschvink J L. 2004. Paleomagnetic Constraints on the Permian-Triassic Boundary in Terrestrial Strata of the Karoo Supergroup, South Africa; Implications for Causes of the End-Permian Extinction Event. *Gondwana Research*, 7(1): 175~183.
- Dolenc T, Lojen S, Ramovš A. 2001. The Permian-Triassic boundary in Western Slovenia (Idrija Valley section): magnetostratigraphy, stable isotopes, and elemental variations. *Chemical Geology*, 175: 175~190.
- Erwin D H, Bowring S A, Jin Yugan. 2002. End-Permian mass extinctions: A review. *Geological Society of America Special Paper*, 356: 363~383.
- Fio K, Spangenberg J E, Vlahović I, Sremac J, Velić I, Mrinjek E. 2010. Stable isotope and trace element stratigraphy across the Permian-Triassic transition; A redefinition of the boundary in the Velebit Mountain, Croatia. *Chemical Geology*, 278: 38~57.
- Grice K, Twitchett R J, Alexander R, Foster C B, Looy C. 2005. A potential biomarker for the Permian-Triassic ecological crisis. *Earth and Planetary Science Letters*, 236: 315~321.
- Haas J, Demény A, Hips K, Vennemann T W. 2006. Carbon isotope excursions and microfacies changes in marine Permian-Triassic boundary sections in Hungary. *Palaeogeography Palaeoclimatology Palaeoecology*, 237: 160~181.
- Hermann E, Hochuli P A, Bucher H, Vigran J O, Weissert H, Bernasconi S M. 2010. A close-up view of the Permian-Triassic boundary based on expanded organic carbon isotope records from Norway (Trøndelag and Finnmark Platform). *Global and Planetary Change*, 74: 156~167.
- Jin Y G, Wang Y, Wang W, Shang Q H, Cao C Q, Erwin D H. 2000. Pattern of marine mass extinction near the Permian-Triassic boundary in South China. *Science*, 289: 432~436.
- Jin Zhangdong, Wang Sumin, Shen Ji, Zhang Enlou, Ji Junfeng, Li Fuchun. 2001. Weak chemical weathering during the Little Ice Age recorded by lake sediments. *Science in China (Series D)*, 44(7): 652~658.
- Kaiho K, Kajiwara Y, Nakano T, Miura Y, Kawahata H, Zaki K, Ueshima M, Chen Zhongqiang, Shi Guang R. 2001. End-Permian catastrophe by a bolide impact: evidence of a gigantic release of sulfur from the mantle. *Geology*, 29: 815~818.
- Kaiho K, Chen Zhongqiang, Kawahata H, Kajiwara Y, Sato H. 2006. Close-up of the end-Permian mass extinction horizon recorded in the Meishan section, South China; Sedimentary, elemental, and biotic characterization and a negative shift of sulfate sulfur isotope ratio. *Palaeogeography Palaeoclimatology Palaeoecology*, 239: 396~405.
- Kato Y, Nakao K, Isozaki Y. 2002. Geochemistry of Late Permian to Early Triassic pelagic cherts from southwest Japan; implications for an oceanic redox change. *Chemical Geology*, 182: 15~34.
- Kelts K, Talbot M. 1990. Lacustrine carbonates as geochemical archives of environmental change and biotic/abiotic interactions. In: Tilzer M M, Serruya C (Eds.). *Large Lakes*. Berlin: Springer-Verlag, 288~315.
- Korte C, Kozur H W. 2010. Carbon-isotope stratigraphy across the Permian-Triassic boundary: A review. *Journal of Asian Earth Sciences*, 39: 215~235.
- MacLeod K G, Smith R M H, Koch P L, Ward P D. 2000. Timing of mammal-like reptile extinctions across the Permian-Triassic boundary in South Africa. *Geology*, 28: 227~230.
- Palme H. 1982. Identification of projectiles of large terrestrial impact craters and some implications for the interpretation of Ir-rich Cretaceous/Tertiary boundary layers. *Geology Society of America (Special paper)*, 190: 223~233.
- Peng Yuanqiao, Yu Jianxin, Gao Yongqun, Yang Fengqing. 2006. Palynological assemblages of non-marine rocks at the Permian-Triassic boundary, western Guizhou and eastern Yunnan, South China. *Journal of Asian Earth Sciences*, 28: 291~305.
- Renne P R, Zhang Zichao, Richards M A, Basu A R. 1995. Synchrony and causal relations between Permian-Triassic boundary crisis and Siberian flood volcanism. *Science*, 269: 1413~1416.
- Roser B P, Korsch R J. 1986. Determination of tectonic setting of sandstone-mudstone suites using SiO₂ content and K₂O/Na₂O ratio. *Journal of Geology*, 94: 635~650.
- Sheldon N D. 2006. Abrupt chemical weathering increase across the Permian-Triassic boundary. *Palaeogeography Palaeoclimatology Palaeoecology*, 231: 315~321.
- Shen Shuzhong, Jin Yugan. 1999. Brachiopods from the Permian-Triassic boundary beds at the Selong Xishan section, Xizang (Tibet), China. *Journal of Asian Earth Sciences*, 17: 547~559.
- Song Haijun, Wignall P B, Chen Zhongqiang, Tong Jinnan, Bond D P G, Lai Xulong, Zhao Xiaoming, Jiang Haishui, Yan Chunbo, Niu Zhijun, Chen Jing, Yang Hao, Wang Yongbiao. 2011. Recovery tempo and pattern of marine ecosystems after the end-Permian mass extinction. *Geology*, 39: 739~742.
- Wang Chunjiang. 2007. Anomalous hopane distributions at the Permian-Triassic boundary, Meishan, China-Evidence for the end-Permian marine ecosystem collapse. *Organic Geochemistry*, 38: 52~66.
- Xie Shucheng, Pancost R D, Yin Hongfu, Wang Hongmei, Evershed R P. 2005. Two episodes of microbial change coupled with Permo/Triassic faunal mass extinction. *Nature*, 434: 494~497.
- Xie Shucheng, Pancost R D, Huang Xianyu, Jiao Dan, Lu Liqiang, Huang Junhua, Yang Fengqing, Evershed R P. 2007. Molecular and isotopic evidence for episodic environmental change across the Permo/Triassic boundary at Meishan in South China. *Global and Planetary Change*, 55: 56~65.
- Xie Shucheng, Pancost R D, Wang Yongbiao, Yang Hao, Wignall P B, Luo Genming, Jia Chengling, Chen Lin. 2010. Cyanobacterial blooms tied to volcanism during the 5 M. y. Permo-Triassic

biotic crisis. *Geology*, 38: 447~450.

Yang Jianghai, Cawood P A, Du Yuansheng, Huang Hu, Huang Hongwei, Tao Ping. 2012. Large Igneous Province and magmatic arc sourced Permian-Triassic volcanogenic sediments in China. *Sedimentary Geology*, 261~262: 120~131.

Yin Hongfu, Xie Shucheng, Luo Genming, Algeo T J, Zhang Kexin.

2012. Two episodes of environmental change at the Permian-Triassic boundary of the GSS section Meishan. *Earth-Science Reviews*, 115: 163~172.

Zhou Lei, Kyte F T. 1988. The Permian-Triassic boundary event: a geochemical study of three Chinese sections. *Earth and Planetary Science Letters*, 90(4): 411~421.

Element Geochemistry and Palaeoenvironment of Permian-Triassic Stratum in the Huaigeda Hill of Dayu Town Jiyuan Basin, Henan Province

XU Li¹⁾, ZHNAG Chengjun³⁾, JIA Songhai¹⁾, ZHANG Jiming¹⁾, LÜ Junchang²⁾, PAN Zecheng¹⁾, ZHANG Haiqing¹⁾, YAN Guoshun¹⁾

1) *Henan Geological Museum, Zhengzhou, 450046;*

2) *Institute of Geology, Chinese Academy of Geological Sciences, Beijing, 100037; Key Lab of Stratigraphy and Paleontology, Ministry of Land and Resources of China, Beijing 100037;*

3) *School of Earth Sciences & Key Laboratory of Mineral Resources in Western China (Gansu Province), Lanzhou university, Lanzhou, 730000*

Abstract

Rock samples collected from Permian Shangshihezhi Formation (P_3sh) and Sunjiagou Formation (P_3s) and Triassic Liujiagou Formation (T_1l) in the Huaigeda hill of Dayu Town in the Henan Jiyuan Basin had been analyzed and studied according to the elements, frequency dependent susceptibility, carbonate and organic matter contents. It was shown that trace and macroelement in the bottom of Jiyuan Fauna fossil stratum in Permian Sunjiagou Formation (P_3s) and near P-Tr boundary in the bottom of Triassic Liujiagou Formation (T_1l) had changed greatly. Elements Ba, Cr, Hf, Nb, Th, Ti, V, Y, Tl, Zn, Cu, Ga, Pb, Ni, La, Rb, Nd, and K_2O , Al_2O_3 , Fe_2O_3 had high content in the fossil stratum, but elements Zr, W, Sr, Bi, Co, Ce, and SiO_2 , Na_2O had low content, MgO, CaO, Mn kept stable a little. Elements Ba, Hf, Nb, Th, Ti, V, Y, W, K_2O , Al_2O_3 , SiO_2 , Na_2O , Bi, Fe_2O_3 , Ni, Co, La, Nd, Ce and organic matter content had increased obviously from the Triassic bottom, but elements Cu, Ga, Pb, Tl, Zn, Cr, Zr, Sr, MgO, CaO, and frequency dependent susceptibility, carbonate content decreased greatly. This P-Tr section not only recorded the end-Permian mass extinction, but also had an obvious P-Tr boundary. It is shown that event and boundary formation had a closed-correlation with deposition environments and palaeoclimate at that time. The directive reason to form event and boundary were the shallow water and warm climate and high chemical weathering. The sediment face was the river-delta environment with warm and wet during the Shangshihezhi Formation (P_3sh). And delta plain face during Sunjiagou Formation (P_3s), had very strong weathering and extremely hot and rainy at the early and end periods. But water level in this basin rose a little to make sandy sediments forming in the front of delta. Waterbody had continued to expand during Triassic Liujiagou Formation (T_1l) with a relatively falling temperature.

Key words: Jiyuan Basin; Permian-Triassic System; element; ratios of elements; palaeoenvironment