doi:10.3799/dqkx.2012.S1.010

川东华蓥二叠系一三叠系界线地层 地质事件与元素地球化学响应

周 刚1,郑荣才1*,罗 平2,郑 超3,蔡家兰3,文华国1

1. 油气藏地质及开发工程国家重点实验室,成都理工大学,四川成都 610059

2. 中国石油勘探开发研究院,北京 100083

3. 中国石油西南油气田分公司重庆气矿,重庆 400021

摘要:以华蓥山涧水沟 PTB 界线地层剖面为例,对地层学界长期争论但始终没有得到解决的全球性地质难题 PTB 界线进行 了地质、地球化学等方面的探讨,可从该剖面中识别出生物地层和岩性地层两类T/P界线,两者相距约 4.56 m,所有的海平面 下降、生物绝灭、火山喷发和古海洋由正常海向非正常的高 Sr 海转化等复杂地质事件,都发生在两类 T/P 界线之间.Fe、Mn、 Sr 微量元素和 C、O 稳定同位素的规律性变化和相关控制因素也都出现在两类 T/P 界线之间,证明元素地球化学特征对 PTB 界线地层中所出现的各种复杂地质事件都具有良好的响应.

关键词:华蓥山;二叠一三叠界线;海平面下降;生物绝灭;火山;地球化学;地层学.

中图分类号: P534.46; P534.51; P588.22 文章编号: 1000-2383(2012)S1-0101-10 收稿E

收稿日期: 2011-09-01

Geological Events and Their Geochemical Responses of the Permian-Triassic Boundary, Huaying, Eastern Sichuan

ZHOU Gang¹, ZHENG Rong-cai^{1*}, LUO Ping², ZHENG Chao³, CAI Jia-lan³, WEN Hua-guo¹

1. State Key Laboratory of Oil and Gas Reservoir Geology and Exploitation, Chengdu University of Technology, Chengdu 610059, China

2. Research Institute of Petroleum Exploration and Development, Beijing 100083, China

3. Chongqing Gas Field of Southwest Oil and Gas Company of CNPC, Chongqing 400021, China

Abstract: Based on the case study of Jianshuigou outcrop in Huaying Mountains, the geological and geochemical identifications of Permian-Triassic Boundary (PTB), an unresolved geological problem which has been the focus of debate, are discussed in this paper. Two different types and layers of PTB, biostratigraphical PTB and lithostratigraphical PTB are identified from Jianshuigou PTB section in the present study. The distance between them is 4, 56 m, and all of complex geological events, such as sea level drops, biotic mass extinctions, volcanic eruptions and the conversion of Sr content in paleocean from normal to abnormal (with higher Sr content) etc., occurred between the two Permian-Triassic boundaries. Evolution curves of Fe, Mn, Sr content, δ^{13} C and δ^{18} O are established at Jianshuigou PTB section, and their regular changes and related controlling factors are tightly bound with the complex geological events. Therefore, all the complex geological events have good correlation with the geochemical features.

Key words: Huayingshan; Permian-Triassic boundary; sea-level drops; biotic extinctions; volcanic; geochemistry; stratigraphy.

华蓥山涧水沟二叠系-三叠系界线(PTB)地层 剖面位于四川省华蓥市东北5km处(图1).其中包 括华蓥山地区在内的有关中国南方三叠系/二叠系 (T/P)界线性质讨论在地层古生物学界非常热烈. 有的学者认为晚二叠世长兴阶生物礁之上存在短暂 的沉积间断(Kershaw *et al.*, 1999; 吴亚生等, 2003; 吴亚生等, 2006a, 2006b; Ezaki *et al.*, 2003; 刘建波等, 2007), 是扬子地块浅水台地型 PTB 剖面的典型代表, 如 Ezaki *et al.* (2003) 在其详 细描述的华莹山东湾剖面中指出, 不排除在生物礁

基金项目:国家自然科学基金资助项目(No. 40872082).

作者简介:周刚(1984一),男,博士研究生,沉积学专业,E-mail: zhougang29@126.com.*通信作者:郑荣才,E-mail: zhengrc@cdut.edu.cn



图 1 剖面位置 Fig. 1 Location of the section 1. 公路; 2. 行政区域界线; 3. 市县; 4. 镇; 5. 剖面位置

上面的白云石化微生物岩与其下的海百合灰岩之间 存在一个短暂的沉积间断或暴露事件的可能.有的 学者认为华蓥山 T/P 界线是整合接触的,没有海退 而露出地表的陆相环境显示(张遴信等,1981;杨 遵仪等,1987;吴顺宝等,1988;崔莹等,2009).自 从 Wignall and Hallam(1992,1996)提出二叠纪末 生物大绝灭是 T/P 连续沉积过程中由海平面大幅 度快速上升引发海洋缺氧事件的观点之后,许多学 者支持此观点(Isozaki,1997; Kershaw *et al.*, 1999; Kershaw *et al.*,2002).但吴亚生等(2003, 2006a, 2006b)在重庆老龙洞、贵州紫云、江西修水 等地发现了众多海平面下降的证据,对中国南方 T/P界线的整合性质及其相关的二叠纪末海平面大 幅度快速上升引起生物集群绝灭的原因提出了质疑. 针对 T/P 界线是否存在发生海平面下降、海平面变 化性质和二叠纪末生物集群绝灭原因等问题,笔者选 取华蓥山涧水沟 PTB 界线地层剖面先后进行了 3 次 实地考察和采样,发现了重要的海平面下降证据,并 依据界线地层岩石薄片描述、牙形石鉴定以及 Fe、 Mn、Sr 微量元素和 C、O 稳定同位素分析结果,较为 深入地讨论了 PTB 界线位置、海平面变化、生物大绝 灭原因和 Fe、Mn、Sr 微量元素和 C、O 稳定同位素对 界线地层内各种地质事件的地球化学响应特征.

1 PTB界线地层剖面描述

本次研究的涧水沟 PTB 界线地层剖面仅厚 12.76 m(图 2),剖面测量范围从长兴组顶部礁滩相 灰岩开始,向上测至下三叠统飞仙关组下部薄层泥 质灰岩为止,自下而上细分为 12 层,描述如下:

第1层,大于1.00m,为灰褐、褐灰色块状骨架 海绵礁灰岩.

第2层,厚2.60m,为褐灰色块状泥晶海绵障



图 2 川东华蓥涧水沟剖面二叠系一三叠系界线地层综合柱状图

Fig. 2 Comprehensive column of Permian-Triassic boundary in Jianshuigou section, Huaying, eastern Sichuan



图 3 涧水沟二叠系-三叠系界线地层岩石薄片显微照片

Fig. 3 Microphotographs of thin sections for the P-T boundary section at Jianshuigou, Sichuan 显微照相都为单片光; a. 层 2.碎裂状泥晶生物碎屑海绵灰岩(一); b. 层 3上部,泥晶棘屑含云灰岩,含绿藻、瓣鳃、腕足、有孔虫,绿藻、有孔虫,选择性白云石化; c. 层 4下部,泥晶白云岩,结构不均匀,保存有菌藻丝体,反映有微生物作用; d. 层 4上部,泥粉晶白云岩,含腹足化石; e. 层 8,黄铁矿质泥晶海百合灰岩,生屑间充填的黄铁矿含量 8%; f. 层 9 渗滤豆

积礁灰岩(图 3a).

第3层,厚1.80m,为礁坪生屑滩相的灰白色 泥晶含云球粒生屑灰岩(图3b).生屑以海百合和有 孔虫为主,次为介形虫、腹足类、瓣鳃类、苔藓虫等, 顶部为一个波状起伏的侵蚀面,侵蚀面上溶蚀孔洞 发育,内充填少量陆源碎屑.包括1~3层在内,都属 于长兴组顶部礁、滩相沉积;下部海绵礁灰岩沉积环 境水深大致为10~20m(吴亚生和范嘉松,2000), 向上逐渐变浅,至顶部过渡为礁坪生屑滩和遭受大 气水溶蚀的古暴露面.该古暴露面也系生物地层划 分方案中T/P界线所在位置(详见后述).

第4层,厚1.10m,为浅灰色中层含生屑泥一粉 晶白云岩,生屑主要为腹足类、一些丝状的菌类 (图 3c)和介形虫(图 3d)等,薄片中含有1%的草莓状 黄铁矿,顶面也为一凹凸不平的古暴露面(图 4a).

此层的沉积相类型众说不一.如 Reinhardt (1988)认为属于潮上蒸发环境; Wignall and Hallam(1996)对重庆老龙洞生物礁之上的 PTB 剖面沉 积相进行了专门研究,根据生物和沉积特点,认为该 层白云石化灰岩代表了较深水贫氧环境,并逐一否 定了 Reinhardt(1988)提出的潮上蒸发环境证据; Kershaw *et al*.(1999)对该剖面进行了研究,提出这 套白云石化灰岩是一种微生物岩,并认为这种微生 物岩是水下成因的;在 Ezaki *et al*.(2003)对华莹山 东湾剖面的描述中,也认为这套泥一粉晶白云石化 灰岩也为深水成因的微生物岩.涧水沟剖面生物礁 上的白云石化泥一粉晶灰岩中生物含量稀少,仅出



图 4 涧水沟二叠系一三叠系界线地层内古暴露面特征 Fig. 4 Ancient expose face feature of the P-T boundary section at Jianshuigou, Sichuan

a. 露头照片,层4和5之间的古暴露面;b. 发育在层9内的渗滤豆 照片;c. 左边照片方框的近拍,其中m为渗滤豆,n为灰绿色泥晶基 质,可见渗滤豆由基质为灰绿色的泥晶包覆

现少量腹足类和一些丝状菌藻类化石,草莓状的黄 铁矿含量可达1%,所以此层属于较深水贫氧环境 中形成的微生物岩.

第5层,发育于凹凸不平第4层顶部,厚仅 0.08m,为褐黄色粘土岩(图4a),对第4层顶部风 化残留物质X射线衍射分析结果,其矿物组分包括 有石英(44.7%)、针铁矿(47.1%)、锐钛矿(2.2%) 和粘土矿物(6.0%).其中粘土矿物由40%的伊利 石和60%的高岭石组成,表明该粘土岩成因属于风 化残留的古土壤层,可代表一次持续时间较长的较 大规模海平面下降和古暴露事件.

第6层,厚0.28m,为灰色残余生屑粉晶灰岩, 生屑含量低,侧向岩性变化较大,属于开阔台地潮 坪沉积.

第7层,厚0.50m,为灰绿色含凝灰质残余生 屑粉晶灰岩,生屑含量低且难以辨认,岩石松软破碎,属于相对较深水的开阔台地潮下低能带沉积.

第8层,厚1.20m,为灰色中薄层含凝灰质和 黄铁矿质的残余生屑粉晶灰岩(图3e),生物碎屑全 由海百合组成,属于开阔台地浅滩沉积.此层在准同 生期曾遭受大气水强烈淋滤改造,一度为富集氧化 铁的残积型铁质海百合灰岩,其成因标志为沿暴露 期形成的粒间溶孔和溶缝充填有大量氧化铁组分. 成岩期虽然大部分铁质组分被黄铁矿交代,局部形成 鸡蛋大的结核状黄铁矿,但仍保存有完好的大气水溶 蚀组构和残留有少量氧化铁(褐铁矿)胶结物组分.

第9层,厚1.40m,层位与华蓥天池镇剖面T/P 界线附近的粘土层相当(胡作维等, 2008),但岩性特 征上有较大异同性:相似性表现为两剖面相同层位都 以富含粘土为显著特征. 据胡作维等(2008)研究,粘 土层主要由规则混层伊利石-蒙脱石矿物组成,其原 始母质主要为火山物质;差异性表现为天池镇剖面 T/P界线附近的相同层位为一套厚约 1.60 m 较深水 相的、含燧石结核的泥质灰岩,且夹5层数厘米厚的 由火山物质蚀变而成的粘土层组合,其中5个粘土层 具有自下而上厚度加大的特点. 而涧水沟剖面的相同 层位主要为一套成因与持续暴露和大气水淋滤有关 的褐灰-灰绿色泥灰质渗滤豆层(或豆状钙质泥岩). 其中渗滤豆呈球形, 直径 0.8~1.5 cm, 由均匀的微晶 方解石组成,同心圈层结构清晰(图 3f);豆内常包裹 有介壳和藻类化石,成团分布(图 4b, 4c). 渗滤豆之 间的基质由泥晶方解石与粘土矿物混合组成(其中的 粘土矿物是否属于火山物质蚀变物还需进一步研 究).古暴露面和渗滤豆的出现,说明此层形成于海平 面大幅度下降期和具有强烈的大气水淋滤和溶蚀作 用.因此,在传统的岩性地层单元划分方案中,将该层 的顶面作为 T/P 界线所在位置,与下部 3、4 层之间 生物地层 T/P 界线并不重合,二者的间距为 4.56 m, 涧水沟 PTB 界线地层剖面中的重要地质事件都出现 在 4.56 m 的间距范围内.

第10层至第12层,自下而上分别为厚0.85m、 以岩性和岩相突变方式平行不整合超覆在9层顶部 古暴露面上的深灰色薄层泥质灰岩(10层),厚 0.95m的灰褐色薄层含泥质灰岩(11层)和厚 1.00m的褐色薄层含泥灰岩(12层).此3层连续沉 积,是飞仙关组一段底部典型的薄板状泥灰岩组合, 属于较深水潮下低能带沉积,是早三叠世初期快速 海侵条件下的区域性沉积超覆作用产物.

2 界线地层的牙形石特征和层位标定

在本剖面第2层底部、第3层距顶0.8m处、第 4层距顶0.1m处和第7层底部4处分别取牙形石 样,编号分别为Y1、Y2、Y3、Y4.经分析,各编号样 品都富含牙形石化石.其中Y1和Y2所产牙形石有 Clarkina changxingensis (图5a,5b)、Clarkina carinata、Hindeodus ellisoni、Hindeodus typicalis 等,以及一些未定器官属种的枝形分子.从岩性看, 当时沉积环境水体突然变浅,牙形石数量明显减少, 但依然是以Clarkina 属为特征的长兴阶牙形石组 合.由于本层段与下伏地层岩性和牙形石面貌基本 相同,而与上覆地层岩性和牙形石面貌截然不同,因 此,确定本层段层位同下伏地层,属于长兴组上段 Clarkina de flecta-C. changxingensis 牙形石组合 带(蒋武, 1988).

Y3 和 Y4 样品均含数量丰富的单一 Hindeodus parvus(图 5c)牙形石,在国际地层委员会 2000 年通过的、国际地质科学联合会 2001 年批准的二叠 系一三叠系界线划分方案中,以 Hindeodus parvus 的首现作为划分二叠系一三叠系界线的标志,其全 球界线层型剖面和点(GSSP)位于我国浙江长兴煤 山 D 剖面第 27c 层的底部(童金南, 2001; 殷鸿福



图 5 涧水沟二叠系一三叠系界线地层内牙形石化石 Fig. 5 Conodont fossil of the P-T boundary section at Jianshuigou, Sichuan

a,b. Clarkina changxingensis 长兴克拉克牙形石,Y2;c. Hindeodus parous 小欣德齿牙形石,Y3

和鲁立强,2006).本剖面 Hindeodus parvus 产于 第4层上部至第7层,首现点位于第4层距顶部 0.1 m处,因此,第4层上部至第7层被确定为 Hindeodus parvus带,层位相当于四川盆地飞仙关 组一段底部(蒋武等,2000),与下扬子地区下青龙 组底部和浙江长兴煤山D剖面殷坑组27层同带名 (Yin et al.,2001;张克信等,2009),年代归属下 三叠统殷坑阶(全国地层委员会,2002)或印度阶 (Amos,2000)底部.

作为全球性 T/P 界线的层型剖面,煤山剖面牙 形石生物地层学研究非常深入细致,建立了5个可 用于全球性对比的牙形石带(张克信等,2009),包 括:Clarkina changxingensis 带(第 23 层及以下地 层)、Clarkina yini 带(第 24 层)、Clarkina meishanensis 带(第 25-27b 层)、Hindeodus parvus 带 (第 27c 层)和 Isarcicella staeschei 带(第 27d-28 层),各带以化石名称命名,以化石分子的首现为底 界.本剖面共识别出 Clarkina changxingensis 带 (厚度大于3.86 m,3 层及以下地层)和 Hindeodus parvus 带(厚度大于 0.8 m, 第 4-7 层及以上地层) 2个牙形石带(图 2),与浙江长兴煤山剖面对比,未 见 Clarkina yini 带和 Clarkina meishanensis 带. 可 能的原因有两个:①漏采了含此2个牙形石带的地 层样品;②依据第3层和第4层之间发育有古暴露 面,暴露面两侧地层的岩性单一,而2个地层之间的 岩性差异很大,因此,可确定整个第3层属于 Clarkina changxingensis 牙形石带,第4层属于 Hindeodus parous 牙形石带. 在涧水沟剖面(或华蓥山地区)对应 第3、4层之间的古暴露面可能对应于 Clarkina yini 带和 Clarkina meishanensis 带 2 个牙形石带的地层. 本项目研究偏向于第2种原因,并认为暴露和侵蚀作 用是造成本剖面缺失上述2个牙形石带地层的原因, 因此,该暴露面对应于生物地层的 T/P 界线.

3 界线地层的地质事件

3.1 PTB 界线海平面下降期次和证据

T/P之交海平面下降事件的存在与否是一个 正在热烈争论的探索性问题,国际上以 Heydara et al. (2003)有关 PTB 海平面下降的文章为代表,在 Ezaki et al. (2003) 描述的华莹山东湾剖面中,指出 了发育在生物礁上面的白云石化微生物岩(相当于 本文第4层)与其下的海百合灰岩(相当于本文第3 层)之间可能存在一个短暂的沉积间断或暴露事件 (Ezaki et al., 2003),但其后国内外都有文章否定 Heydara et al. (2003)提出的有关 PTB 全球海平面 下降的证据(Wignall and Hallam, 1996; Fang, 2005).本文以实测涧水沟剖面为代表,证明在华蓥 山地区 PTB 剖面至少存在 3 次海平面下降事件,并 且每一次海平面下降事件都形成了具有一定规模的 古暴露面(或古岩溶面).

第1次海平面下降事件发生在第3层与第4层 之间,证据主要有3点:①暴露面两侧的地层在岩性 和岩相特征上有巨大差异;②对应该古暴露面缺失 *Clarkina yini*带和*Clarkina meishanensis*带2个 牙形石带地层;③在第3层顶部古暴露面的位置,普 遍发育有古喀斯特化现象,如在老龙洞剖面相当层 位古暴露面上的岩溶洞穴深度可达1m多,充填有 外来的黄绿色泥岩(吴熙纯等, 1990).

第2次海平面下降事件,发生在第4层末期,对 该层顶面淡黄色物质X射线衍射分析(主要矿物包 括石英44.7%、针铁矿47.1%、锐钛矿2.2%和粘 土矿物6.0%.其中粘土矿物包括40%的伊利石和 60%的高岭石)以及分布在第4层顶部古暴露面上 厚0.08m的古土壤层,证明该层位发生过较大规模 和持续时间较长的海平面下降事件与暴露风化和残 积作用.

第3次海平面下降事件,发生在第9层末期,证 据也主要有3点:①包括第8层和第9层在内,自上 而下都遭受了强烈的大气水风化淋滤改造作用,其 中第8层一度为铁质富集的残积灰岩层,成岩期发 生强烈黄铁矿化后才形成现今的黄铁矿质残余生屑 粉晶灰岩,而在第9层中发育有成团分布的渗滤豆; ②第9层顶部为凹凸不平的古暴露面;③在相当于 第9层顶的岩性地层单元 T/P 界线附近,华南各地 广泛发育的粘土层中普遍含有 6×10⁴ 双锥石英、锆 石、磷灰石、长石晶屑、玻屑等火山物质(胡作维等, 2008),可进一步证明海平面下降是在区域性(乃至 全球性)火山强烈喷发活动的背景中进行的(殷鸿福 等, 1989).

3.2 二叠系一三叠系之交生物大灭绝原因探讨

T/P之交生物经受了大的绝灭是公认的重大 地质事件,目前流行的观点主要有4种:小行星(彗 星)碰撞学说、火山事件、缺氧事件和海洋硫酸化环 境灾变.

1988年吴顺宝对华蓥山二叠系-三叠系生物 绝灭方式进行了深入研究,得出了如下几点重要认 识:①大量生物绝灭(或消失)发生在 T/P 界线之 下,至T/P界线处又有一次小规模生物绝灭事件; ②少数生物越过这一条重要的绝灭线,但越过T/P 界线的距离并不远,当完全进入三叠纪后依然很快 绝灭;③越过两系界线后于早三叠世逐渐绝灭的少 数生物主要为二叠纪型的小个体腕足类、头足类、三 叶虫、牙形石及有孔虫等属种;④大量生物绝灭原因 不可能由外星体撞击事件引起,而可能与频繁的火 山喷发事件有关.

本文研究的涧水沟剖面生物绝灭事件得到了许 多与吴顺宝相同的线索,如二叠纪末期大规模的生 物绝灭事件发生在第3层和第4层之间的生物地层 T/P界线之下,大部分二叠纪正常底栖生物在该界 线之下消失,是生物大绝灭的主要时期.从这条重要 的绝灭线到第4层内,生物处于低潮阶段,一些二叠 纪型的小个体腕足类、少量牙形石、有孔虫及个别三 叶虫等孓遗分子可延续到相当岩性地层 T/P 界线 之下的第8层,少数属种可延续到第9层后再次发 生小规模的生物绝灭事件,但越过此岩性地层 T/P 界线的第10-12层中,所有的二叠纪型的小个体孓 遗生物完全绝迹(Wignall and Hallam, 1996;吴顺 宝,1988).

综上所述,研究区 PTB 界线地层海平面下降事 件并不是一蹴而就的,而是一个海平面频繁下降和 上升的交替过程,每一次海平面下降事件形成的暴 露过程,水深变化都至少有 50 m 的幅度(Wignall and Hallam, 1996;吴亚生和范嘉松, 2000),在本 次的研究中也得以证实,特别是从第 3 层顶部暴露 面开始至第 9 层暴露面,伴随每一次海平面下降都 有渐趋频繁且强烈的火山喷发活动,据此可确定全 球性海平面大幅度下降和火山喷发事件是造成二叠 纪生物绝灭的复合原因.

4 界线地层的元素地球化学响应特征

地球化学特征在反映沉积环境各方面特征的研 究中具有重要意义,在T/P之交海平面下降和生物 绝灭等事件中,Fe、Mn、Sr 微量元素和C、O稳定同 位素地球化学都有对应的响应特征.

4.1 样品分析和结果

对界线地层内所有用于分析的样品都进行了薄 片鉴定和阴极发光检测,所有样品仅具弱的阴极发 光.借助双目镜对用于同位素分析的样品进行了细 致的分选,尽可能地回避方解石脉和亮晶方解石胶 结物.样品经挑选后粉碎至 200 目,缩分成 4 份,除 1份留作备用外,另外3份分别用作 Fe、Mn、Sr 含 量和δ¹³C、δ¹⁸O测试,样品测试结果综合于表1中.

4.2 涧水沟剖面 PTB 界线地层元素地球化学响 应特征

4.2.1 PTB 界线地层的 Fe、Mn、Sr 元素地球化学 响应 PTB 界线地层范围内所取样品的 Fe、Mn、Sr 含量变化(图 2)有如下特点:①相比于长兴组和飞 仙关组正常海相微晶灰岩 Fe 含量(分别为 0.134%、0.113%)(郑荣才等,2008),本项目界线 地层的样品 Fe 含量具极低值(仅为正常海相微晶 灰岩的 1/10)、极高值(为正常海相微晶灰岩 10 倍 以上)2类异常现象.其中低值出现在第2-3层,Fe 含量为 0.023%~0.038%,与该时期为正常浅海 礁、滩相沉积环境相适应;高值出现在第4-12层, 其中第 4-9 层为 Fe 含量剧烈增高区(0.44%~ 1.80%,局部可高达12%),该层段对应于2种类型 T/P界线之间的3次海平面下降事件.古暴露面上 不溶残渣中铁含量出现极高值的主要原因无疑与海 平面大幅度下降引起的暴露和风化残积作用有关, 如第5层下部含有大量铁的水合物针铁矿,第8层 曾为残积型铁质海百合灰岩.第 10-12 层为 Fe 的 高含量稳定区(1.62%~3.28%),这主要是因为早 三叠世广泛海侵条件下,大量富铁锰的陆源泥质和 凝灰质组分带入沉积环境中,造成薄层泥质灰岩中 铁质含量高. ②Mn 含量也具有自下而上大幅度增 高的变化趋势,其中第2-3层为平稳的极低值区 (0.0092%~0.0027%),与正常浅海环境相适应. 第4-9 层总体为 Mn 含量向上增高的过渡区,表现 为第4层Mn含量急剧增高到0.026%,第4-8层 为较高值平稳区(0.019%~0.026%),第9层 Mn 含量急剧增高到 0.052%;其中 Mn 含量增高的原 因应该与火山物质的加入和大气水溶蚀双重因素有 关. 第 10 - 12 层为高值平稳区(0.054%~ 0.066%),其高值原因与大量富铁锰的陆源泥质和 凝灰质组分带入沉积环境有关. ③Sr 含量较高至很 高,具自下而上大幅度增高的变化趋势,其中第2-3 层为相对平稳的较低值区(0.041%~0.080%), 依然与正常浅海环境相适应.第4-9 层为 Sr 含量 大幅度增高过渡区(0.05%~0.14%),高的 Sr 含量 与该层段处在频繁而强烈的大气水溶蚀期,理论上 与应该出现 Sr 含量贫化的现象相悖;其合理的解释 为该时期火山活动频繁,由于火山物质活动带入大 量 Sr,从而掩盖了大气水溶蚀对 Sr 的贫化作用.第 10-12层为稳定高值区(0.11%~0.15%),可能与 表1 样品的采样位置、Mn、Fe、Sr 含量和 δ^{13} C, δ^{18} O 值

Table 1 Sampling location, Mn, Fe, Sr content and δ^{13} C, δ^{18} O for the samples						
样号	采样位置	微量元素含量(%)			$\mathbb{N}^{13}C_{}(\mathbb{V})$	s180 (0/)
		Mn	Fe	Sr	0*** CPDB(700)	0~~ OPDB (700)
Ht6	12 层中部	0.0580	2.440	0.150	-0.14 ± 0.009	-6.20 ± 0.030
Ht5	11 层中部	0.0660	1.620	0.140	-0.18 ± 0.036	-6.31 ± 0.012
Ht4	10 层底部	0.0540	3.280	0.120	-0.08 ± 0.055	-6.06 ± 0.023
Ht3	9 层中部	0.0520	1.800	0.140	0.13 ± 0.060	-6.28 ± 0.043
Ht2	8 层中部	0.0190	1.240	0.110	0.76 ± 0.053	-6.43 ± 0.028
Hp3	4 层距顶 0.4 m 处	0.0260	0.440	0.050	2.58 ± 0.011	-6.05 ± 0.028
Hp2	3 层距顶 0.2 m 处	0.0027	0.023	0.080	3.78 ± 0.018	-5.27 ± 0.017
Hp1	2 层底部	0.0092	0.038	0.041	3.76 ± 0.034	-4.60 ± 0.034

注:C、O同位素由西南大学地理科学学院地球化学与同位素实验室分析完成,仪器为 Delta V Plus+Kiel IV Carbonate Device, δ^{13} C 分析 误差为 0.006~0.042, δ^{18} O 分析误差为 0.009~0.043; Fe, Mn, Sr 含量由中国地质科学院矿产综合利用研究所分析测试中心分析,测试仪器 为 2000DV,检测依据为 JY/T015-1996《感耦等离子体原子发射光谱方法通则》,分析结果以单元素含量表示,检测限 0.001%,误差 0.002%.

地层中富含 Sr 的火山物质组分和陆地植被大大减 少导致风化作用增强等因素有关.据 Pitman(1978) 总结的海平面变化曲线与海底扩张速率之间的关 系,发现二者基本是同步的,即海平面上升期是海底 高速扩张期,也是洋脊火山活动强烈时期,将大量深 源 Sr 带入海洋而造成碳酸盐沉积物具有高 Sr 异 常.因此,第4 层至第9 层 Sr 含量大幅度增高的变 化趋势,与区域上渐趋强烈的火山喷发活动是相 适应的.

综上所述, 涧水沟 PTB 界线地层剖面 Fe、Mn、 Sr 含量变化趋势(图 2), 与剖面中所发生的海平面 下降、火山喷发和 T/P 之交由二叠纪正常海向早三 叠世异常高 Sr 海转化等事件有良好的对应关系, 可 作为 PTB 界线地层海平面下降事件和火山喷发活 动渐频渐强的地球化学标志.

4.2.2 δ¹³C 的 PTB 界线地层地球化学响应 作为 全球界线层型剖面,浙江长兴煤山剖面是 PTB 碳同 位素变化研究程度最高的剖面之一(曹长群等, 2002;黄俊华等,2007).最近 Xie *et al.*(2007)的研 究结果证明 δ¹³ C_{PDB}在 PTB 附近出现 2 次缓慢负偏, 即从第 23 层的 4.8‰逐渐降低到第 26 层的0.4‰,以 及从第 28 层的 1.4‰逐渐降低到第 34 层的-1.3‰.

代表浅水 PTB 界线地层的涧水沟剖面碳酸盐 岩 δ^{13} C 具有相似性,特点为 δ^{13} C_{PDB}总体变化范围在 3.78‰~-0.18‰之间(表 1,图 6),在 PTB 界线地 层范围内总体呈逐渐减小的变化趋势,原因无疑与 二叠纪末生物大绝灭事件有关,但同时也受到了界 线地层内 3 次较大幅度的海平面下降影响,碳同位 素剖面特征为:第 2-3 层(*Clarkina changxingensis* 带)为相对高值的平稳期, δ^{13} C 稳定分布在 3.76‰~3.78‰之间;第 4 层为快速下降期(*Hind*-



图 6 涧水沟剖面与煤山剖面 ∂¹³ C_{PDB} 对比



eodus parvus 带),δ¹³C从第3层的3.78‰快速下降 到第4层的2.58‰,该时期不仅对应于PTB界线 地层第1次海平面下降和生物大绝灭事件,而且也 对应于生物地层T/P界线的重要转折期;第4-8 层为剧烈下降期,δ¹³C从2.58‰下降到0.76‰,期 间包含了PTB界线地层的第2次海平面下降和火 山喷发事件,以及全球性的生物低潮期,越过生物地 层T/P界线的二叠纪型小个体生物大部分在该时 期绝迹;第9层为剧烈下降期,δ¹³C从第8层的 0.76‰进一步下降到0.13‰,不仅对应于火山喷发 活动的持续期和 PTB 界线地层第 3 次海平面下降 事件,同时也是对应于岩性地层 T/P 界线和最重要 的 T/P 古海洋环境的转折期;第 10-12 层为相对 低值的平稳期,δ¹³ C 值稳定分布在-0.08% ~ -0.18‰之间,与研究区开始进入稳定的较深水沉 积环境和全球生物进入大萧条期的背景相适应.

4.2.3 δ¹⁸O 的 PTB 界线地层地球化学响应 研究 区 PTB 界线地层剖面内碳酸盐岩 δ¹³O 组成范围为 -4.60‰~-6.43‰,平均值为-5.90‰,特征如 下:第2-3 层为相对平稳期,δ¹³O 稳定分布在 -4.60‰~-5.27‰之间;第3-4 层为快速下降 期,δ¹³O由-5.27%下降至-6.05%,下降幅度为 14.79%,对应 PTB 界线地层的第1次海平面下降、 生物大绝灭事件和生物地层 T/P 界线的重要转折 期;第4-8 层为缓慢下降期,δ¹³O由-6.05‰下降 至一6.43‰,对应 PTB 界线地层的第2次海平面下 降和火山喷发事件,以及全球性生物低潮期;第8-9 层为该 PTB 界线地层的最低值期, d¹³ O 分布在 -6.43‰~-6.28‰之间,不仅对应于火山喷发活 动的持续期和 PTB 界线地层第 3 次海平面下降事 件,同时也对应于岩性地层 T/P 界线和最重要的 T/P 古海洋环境的转折期;第 10-12 层为折向小 幅度的缓慢上升期,δ¹³O分布在相对稳定的-6. 06‰~-6.31‰之间,与该时期研究区进入较深水 的稳定沉积环境和全球性生物进入大萧条期的背景 也相适应.

5 结论

(1)华蓥山涧水沟 PTB 界线地层剖面中可识别 出 2 个不同类型和层位的 T/P 界线:其一为位于第 3 层与第 4 层之间的生物地层 T/P 界线,界线之下 产 Clarkina changxingensis 牙形石,之上产 Hindeodus parvus 牙形石为标志;其二为位于第 9 层与第 10 层之间的岩性地层 T/P 界线,以界线之下发育有 海平面频繁下降事件及其相关暴露面、古土壤和渗滤 豆层,其上被飞仙关组一段薄板状泥质灰岩沉积超覆 为标志,2 个 T/P 界线之间的距离约 4.56 m.

(2)在华蓥山涧水沟 PTB 界线地层剖面中,所 有的复杂地质事件,如海平面下降、生物绝灭、火山 喷发和正常海向高 Sr 异常海转化等地质事件都发 生在 2 个 T/P 界线之间.

(3) T/P 之交的海平面下降和生物绝灭事件并 不是一蹴而就的,而是分阶段进行的,至少可识别出 3个期次:第1次海平面下降事件发生在第3层与 第4层之间的生物地层T/P界线处,以古暴露面为 标志,也是二叠纪生物大绝灭事件的发生期;第2次 海平面下降事件发生在相当于第5层古土壤层的形 成期,该时期也是区域上开始进入火山喷发活动期 和二叠纪孓遗生物绝灭期;第3次海平面下降事件 发生在第9层与第10层之间,以第9层出现渗滤豆 层和古暴露面为标志,并伴随着区域性火山广泛喷 发事件和二叠纪孓遗生物的完全绝迹,以及随之而 来的早三叠世的广泛海侵和生物大萧条期.

(4)综合涧水沟 PTB 界线地层剖面中的海平面 下降、生物绝灭、火山喷发和正常海向高 Sr 异常海 转化等地质事件的相互关系,生物大绝灭主要原因 既与渐频渐强的火山事件有关,也与全球性海平面 频繁下降晚于早三叠世急剧上升有关.

(5)Fe、Mn、Sr 微量元素和 C、O 稳定同位素的 规律性变化和相关的控制因素也都出现在 2 个 T/P 界线之间,反映微量元素和稳定同位素地球化学特 征对研究区 PTB 界线地层的海平面下降、生物绝 灭、火山喷发和正常古海洋向高 Sr 古海洋转化等地 质事件都有良好的响应.可确定华南海域在晚二叠 世属于正常古海洋,而早三叠世则属于生物大萧条 期的高 Sr 古海洋,PTB 界线地层恰处于正常古海 洋向高 Sr 异常古海洋过渡的转化期.

(6)基于长期以来 T/P 之交是否存在全球性海 平面下降事件的争论,有无可能因海平面下降幅度 有限(约50m的水深范围内),其下降事件在相对较 浅的开阔台地礁、滩相沉积区反映更为强烈和明显 (如华蓥山涧水沟 PTB 界线剖面),在较深水相的开 阔台地潮下、斜坡和盆地的连续沉积区,因水深缺乏 直接暴露证据而忽略了海平面下降事件的存在(如 华蓥山天池镇 PTB 界线剖面),这是一个非常值得 进一步思考的科学问题.

致谢:项目研究过程和样品分析测试过程中,得 到了中石油勘探开发研究院张兴阳高工、罗忠高工、 宋金民博士、翟秀芳硕士,中国地质大学(北京)景秀 春讲师,成都理工大学张兵博士后、陈浩如博士、郑 博硕士的帮助,在此一并表示衷心的感谢!

References

Amos, S. , 2000. International stratigraphic guide (Second Edition). Translated by Jin, Y. G., Rong, J. Y. Geological Publishing House, Beijing, 161–162 (in Chinese).

China Commission on Stratigraphy, 2002. Explanatory notes to

the regional chronostratigraphic (geochronologic) scale, Geological Publishing House, Beijing (in Chinese).

- Cui, Y., Liu, J. B., Ezaki, Y., 2009. Fluctuations of stable carbon isotopes around the Permian-Triassic boundary in Huaying of Sichuan, South China; its characteristics and biogeochemical origin. Acta Scientiarum Naturalium Universitatis Pekinensis, (3):95-105 (in Chinese with English abstract).
- Ezaki, Y., Liu, J. B., Adachi, N., 2003. Earliest Triassic microbialite micro-to megastructures in the Huaying area of Sichuan Province, South China: implications for the nature of oceanic conditions after the End-Permian extinction. *Palaios*, 18 (4): 388 - 402. doi: 10. 1669/ 0883-1351(2003)018<0388</p>
- Fang, Z. J., 2005. Comment on "Permian-Triassic boundary interval in the Abadeh Section of Iran with implications for mass extinction: part 1-sedimentology" by Heydari, E., Hassanzadeh, J., Wade, W. J., and Ghazai, A. M. Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology, 193 (3 – 4):405-424, doi: 10.1016/j. palaeo. 2004. 11.021
- Heydara, E., Hassanzadeh, J., Wade, W. J., et al., 2003. Permian-Triassic boundary interval in the Abadeh Section of Iran with implications for mass extinction: part 1-sedimentology. *Palaeogeography*, *Palaeoclimatology*, *Palaeoecology*, 193(3-4):405-423. doi:10.1016/ S0031-0182(03)00258-X
- Hu,Z. W., Huang, S. J., Gao, X. Y., et al., 2008. Clay minerals in the clay beds near the Permian/Triassic boundary at Huaying Mountain, eastern Sichuan, China: their types and origin. *Geological Bulletin of China*, 27(3): 374-379 (in Chinese with English abstract).
- Huang, J. H., Luo, G. M., Bai, X., et al., 2007. The organic fraction of the total carbon burial flux deduced from carbon isotopes across the Permo-Triassic boundary at Meishan, Zhejiang Province. Earth Science—Journal of China University of Geosciences, 32(6):767-773 (in Chinese with English abstract).
- Isozaki, Y., 1997. Permo-Triassic boundary superanoxia and stratified superocean; records from lost deep sea. Science, 276:235-238. doi:10.2307/3515193
- Jiang, W., 1988. Research on Permian conodonts in Sichuan basin and its significance to oil and gas. Journal of Southwest Petroleum Institute, 10(2):1-9 (in Chinese with English abstract).
- Jiang, W., Luo, Y. Q., Lu, Y. Q., et al., 2000. The lower Triassic conodonts and its significance to oil and gas exploration in Sichuan basin. Acta Micropalaeontogica Sinica, 17(1): 99-109 (in Chinese with English abstract).

- Kershaw, S., Guo, L., Swift, A., et al., 2002. Microbialites in the Permian-Triassic boundary interval in Central China: structure, age and distruction. *Facies*, 47:83-90. doi:10.1007/BF02667707
- Kershaw, S., Zhang, T., Lan, C., 1999. A microbiolite carbonate crust at the Permian-Triassic boundary in South China, and its paleoenvironmental significance. *Paleogeography*, *Paleoclimatology*, *Paleoecology*, 146: 1 – 18. doi:10.1016/S0031-0182(98)00139-4
- Liu, J. B., Ezaki, Y., Yang, S. R., et al., 2007. Age and sedimentology of microbialites after the End-Permian mass extinction in Luodian, Guizhou Province. *Journal of Palaeogeog*raphy, 9(5):473-486 (in Chinese with English abstract).
- Pitman, W. C. III., 1978. Relationship between eustacy and stratigraphic sequence of passive margins. Geol. Soc. America Bull., 89: 1389 – 1430. doi: 10. 1130/0016 – 7606(1978)89<1389</p>
- Reinhardt, J. W., 1988. Uppermost Permian reefs and Permo-Triassic sedimentary facies from the southeastern margin of Sichuan basin, China. *Facies*, 18:231-288. doi: 10.1007/BF02536802
- Tong, J. N., 2001. Boundary stratotype and significant event of Permian-Triassic system. Earth Science—Journal of China University of Geosciences, 26(5): 446-448 (in Chinese with English abstract).
- Wignall, P. B., Hallam, A., 1992. Anoxia as a cause of the Permian-Triassic mass extinction: facies evidence from Northern Italy and the Western United States. *Paleo*geography, *Paleoclimatology*, *Paleoecology*, 93(1-2): 21-46. doi:10.1016/0031-0182(92)90182-5
- Wignall, P. B., Hallam, A., 1996. Facies change and the End-Permian mass extinction in S. E. Sichuan, China. *Palaios*, 11:587-596. doi:10.2307/3515193
- Wu, S. B., Li, Q., Wang, W. W., 1988. Characteristics of stratigraphical and faunal changes near the Permo-Triassic boundary in the Huaying area, Sichuan Province, *Geoscience*, 2 (3):375-385 (in Chinese with English abstract).
- Wu, X. C., Liu, X. Z., Yang, Z. L., et al., 1990. Formation of reef-bound resevoirs of upper Permian Changing Formation in East Sichuan. *Oil & Gas Geology*, 11(3): 283-297 (in Chinese with English abstract).
- Wu, Y. S., Fan, J. S., 2000. Paleoecology of calcisponges (Inozoans, Thalamid Sponges, Sclerosponges). Acta Palaeontologica Sinica, 9(4): 544 – 547 (in Chinese with English abstract).
- Wu, Y. S., Fan, J. S., Jin, Y. X., 2003. Emergence of the Late Permian Changhsingian reefs at the end of the Permian. Acta Geologica Sinica, 3(77):289-298 (in Chi-

nese with English abstract).

- Wu, Y. S., Jiang, H. X., Liao, T. P., 2006. Sea-level drops in the Permian-Triassic boundary section at Laolongdong, Chongqing, Sichuan Province. Acta Petrologica Sinica, 22(9):2405-2412 (in Chinese with English abstract).
- Wu, Y. S., Yang, W., Jiang, H. X., et al., 2006. Petrologic evidence for sea-level drop in Latest Permian in Jiangxi Province, China and its meanings for the mass extinction. Acta Petrologica Sinica, 22(12): 3039-3046 (in Chinese with English abstract).
- Xie, S. C., Pancost, R. D., Huang, J. H., et al., 2007. Changes in the globle carbon cycle occurred as two episodes during the Permian-Triassic crisis. *Geology*, 35 (12): 1083-1086. doi:10.1130/G24224A.1
- Yang, Z. Y., Yin, H. F., Wu, S. B., et al., 1987. Formation and lineages near the Permian-Triassic boundary in South China. Geological Publishing House, Beijing (in Chinese).
- Yin, H. F., Huang, S. J., Zhang, K. X., et al., 1989. Volcanism at the Permian-Triassic boundary in South China and its effects on mass extinction. *Acta Geological Sinica*, 63(2): 169-181 (in Chinese with English abstract).
- Yin, H. F., Lu, L. Q., 2006. A review on the global stratotype section and point of the Permian-Triassic boundary. *Earth Science Frontiers*, 13(6):257-267 (in Chinese with English abstract).
- Yin, H. F., Zhang, K. X., Tong, J. N., et al., 2001. The global stratotype section and point (GSSP) of the Permian-Triassic boundary. *Episodes*, 24 (2): 102 – 114. doi:CNKI:ISSN:0253-4959.0.2007-01-000
- Zhang, K. X., Lai, X. L., Tong, J. N., et al., 2009. Progresses on study of conodont sequence for the GSSP Section at Meishan, Changxing, Zhejiang Province, South China, Acta Palaeontologica Sinica, 48(3): 474-486 (in Chinese with English abstract).
- Zhang, L. X., Wu, W. S., 1981. Permian in Huaying-Sichuan Province, Journal of stratigraphy, 5(3):190—196 (in Chinese).
- Zheng, R. C., Shi, J. N., Luo, A. J., et al., 2008. Comparative study on geochemical behaviors of dolomite reservoirs in Northeast Sichuan basin. *Natural Gas Industry*, 28 (11):16-21 (in Chinese with English abstract).

附中文参考文献

- Amos,S.,2000.国际地层指南(第二版).金玉玕,戎嘉余, 译.北京:地质出版社,161-162.
- 曹长群,王伟,金玉,2002. 浙江煤山二叠系-三叠系界线附 近碳同位素变化. 科学通报,47(4): 302-306.
- 崔莹,刘建波,江崎洋一,2009.四川华蓥二叠系一三叠系界

线剖面稳定碳同位素变化特征及其生物地球化学循环 成因.北京大学学报,(3):95-105.

- 胡作维,黄思静,郜晓勇,等,2008. 川东华蓥山二叠系/三叠 系界线附近粘土层中粘土矿物的类型及成因. 地质通 报,27(3): 374-379.
- 黄俊华,罗根明,白晓,等,2007. 浙江煤山 P/T 之交碳同位 素对有机碳埋藏的指示意义. 地球科学——中国地质 大学学报,32(6): 767-773.
- 蒋武,1988.四川盆地二叠系牙形石研究及其油气意义.西南 石油学院学报,10(2):1-9.
- 蒋武,罗玉琼,陆廷清,等,2000.四川盆地下三叠统牙形刺及 其油气意义.微体古生物学报,17(1):99-109.
- 刘建波,江崎洋一,杨守仁,等,2007.贵州罗甸二叠纪末生物 大灭绝事件后沉积的微生物岩的时代和沉积学特征. 古地理学报,9(5):473-486.
- 全国地层委员会,2002.中国区域年代地层(地质年代)表说 明书,北京:地质出版社.
- 童金南,2001. 二叠系-三叠系界线层型及重大事件. 地球科
 学一中国地质大学学报,26(5): 446-448.
- 吴顺宝,李庆,王薇薇,1988.四川华蓥山二叠纪与三叠纪之 交沉积特征及动物群变化.现代地质,2(3):375-385.
- 吴熙纯,刘效曾,杨仲伦,等,1990. 川东上二叠统长兴组生物 礁控储层的形成.石油与天然气地质,11(3): 283-297.
- 吴亚生,范嘉松,2000. 钙质海绵之古生态. 古生物学报,9 (4): 544-547.
- 吴亚生,范嘉松,金玉轩,2003.晚二叠世末的生物礁出露及 其意义.地质学报,3(77):289-298.
- 吴亚生,姜红霞,廖太平,2006a. 重庆老龙洞二叠系-三叠系 界线地层的海平面下降事件. 岩石学报,22(9): 2405-2412.
- 吴亚生, Yang, W., 姜红霞, 等, 2006b. 江西修水二叠纪一三 叠纪界线地层海平面下降的岩石学证据. 岩石学报, 22 (12): 3039-3046.
- 杨遵仪,殷鸿福,吴顺宝,等,1987.华南二叠系一三叠系界线 地层及动物群.北京:地质出版社.
- 殷鸿福,黄思骥,张克信,等,1989.华南二叠纪一三叠纪之交的火山活动及其对生物绝灭的影响.地质学报,63(2): 169-181.
- 殷鸿福,鲁立强,2006. 二叠系一三叠系界线全球层型剖 面──回顾和进展. 地学前缘,13(6): 257-267.
- 张克信,赖旭龙,童金南,等,2009.全球界线层型华南浙江长 兴煤山剖面牙形石序列研究进展.古生物学报,48(3): 474-486.
- 张遴信,吴望始,李渭娟,等,1981.四川华蓥山的二叠系.地 层学杂志,5(3):190-196.
- 郑荣才,史建南,罗爱君,等,2008. 川东北地区白云岩储层地 球化学特征对比研究. 天然气工业,28(11):16-21.