

二叠纪—三叠纪之交全球海平面变化研究

黎虹玮^{1,2} 李飞^{1,2} 胡广^{1,2} 谭秀成^{1,2,3} 李凌^{1,2,3}

(1.油气藏地质及开发工程国家重点实验室 西南石油大学 成都 610500;2.四川省天然气地质重点实验室 成都 610500;
3.中国石油碳酸盐岩储层重点实验室—沉积与成藏分室 西南石油大学 成都 610500)

摘要 二叠纪—三叠纪界线附近的全球海平面变化是当前沉积学研究的热点和难点问题,其与当时的显生宙最大规模生物灭绝事件存在一定关联,具有重要的研究意义。然而二叠纪—三叠纪界线附近的全球海平面变化存在较多争议,受单剖面或区域范围内相对海平面变化研究程度的制约,在缺乏从沉积学角度的综合对比研究的情况下,可能会影响对全球海平面变化过程与持续时间的判识。综述了二叠纪—三叠纪界线附近的海平面变化研究进展,整合了多位学者的研究剖面、主要观点及认识,梳理了全球海平面变化的主要观点(“上升论”和“下降—上升论”),包括其各自的发展历程、代表剖面及海平面变化识别特征、海平面上升/下降的原因以及海平面变化与生物灭绝的关系等,并在此基础上,探讨了二叠纪—三叠纪全球海平面变化研究过程中产生争议的原因。本文旨在为二叠纪—三叠纪界线(PTB)附近海平面变化研究提供线索,同时为研究全球 PTB 地质事件发生的背景及差异性原因提供基础证据。

关键词 二叠纪—三叠纪界线 全球海平面变化 暴露标志 生物灭绝事件

第一作者简介 黎虹玮 女 1991年出生 硕士研究生 储层沉积学 E-mail: lihw1023@163.com

通讯作者 李飞 男 助理研究员 E-mail: feinan_li@163.com

中图分类号 P736 **文献标识码** A

0 引言

二叠纪—三叠纪之交的生物大灭绝(约2.52亿年前)是地质历史上最为瞩目的地质事件,造成超过90%的海洋无脊椎动物灭绝^[1]。关于这次事件的起因众说纷纭,目前认为可能与西伯利亚溢流玄武岩的喷发有密切关系^[2]。对这段时期内包括高温^[3-4]、缺氧^[5-6]、海洋酸化^[7-9]、强烈陆缘风化^[10]等重大环境异常事件的研究已较为深入;二叠纪—三叠纪界线(PTB)附近的全球海平面变化可能与生物灭绝事件存在直接或间接关联,同样具有重要的研究意义。然而界线附近的全球海平面变化研究存在较多争议,受单剖面或小区域范围内海平面变化研究程度的制约可能是重要原因之一,因为区域性的海进和海退可能属于相对海平面变化,可能受盆地基底升降、沉积物供给速率、可容空间、气候等影响,不等同于全球(绝对)海平面变化,要提出全球海平面变化的观点,需要有全球范围内多个剖面的对比。在PTB海平面变化事件研究中,由于研究剖面位置分散,受海平面变化标志性证据多解性和古地貌差异影响,小区域范围

的相对海平面变化存在差异,在缺乏从沉积学角度的综合对比研究的情况下,难以对全球海平面变化的过程与时限进行判识。因此,本文综述了全球二叠纪—三叠附近海平面变化的研究进展,整合了多位学者的研究位置、研究观点或认识,梳理了全球海平面变化的主要观点(“上升论”和“下降—上升论”),包括其发展历程、代表剖面及海平面变化识别特征、海平面上升/海平面下降原因以及海平面变化与生物灭绝的关系等,在此基础上,分析了全球海平面变化研究过程中产生争议的原因,以期为PTB附近全球海平面变化研究提供线索,同时为研究全球PTB地质事件发生的背景及差异性提供基础证据。

1 二叠纪—三叠纪界线附近全球海平面变化的主要观点

上世纪60—80年代,Newell^[11]首先提出海洋生物大灭绝与海平面下降存在关联,从定性的角度上认为海洋生物的锐减与陆缘海的减少有密切关系,Schopf^[12]和Simberloff^[13]则从定量的角度研究了二叠纪末大灭绝时生物种类与生存区域的关系,指出海平

面下降导致的栖息地丧失增加了灭绝的可能性,他们的研究表明早二叠世浅海区生物栖息地约占43%,而到晚二叠世仅占13%,到三叠纪早期,全球浅海区生物栖息地又增加至34%。Holser^[14]也认为大灭绝与大规模海平面下降有关,并指出当时海平面下降达280 m,速率为60 m/Ma。但通过仔细核对早期文献的生物地层工作,发现其二叠纪末最后一个地层年代为Djufian^[12](对应华南板块吴家坪阶^[15]),地层系统缺乏华南板块的长兴阶沉积,即90年代以前的学者所提出的海平面下降实际上指的是晚二叠世早期的吴家坪期海平面下降,而不是长兴期末期的海平面下降(下文1.2.1将详述)。

真正关于二叠纪—三叠纪界线附近全球海平面变化的研究始于上世纪90年代,先后经历了“上升论”的盛行以及之后的“下降—上升论”观点的逐步确立。下文主要对这两个观点进行了总结梳理。

1.1 上升论

1.1.1 观点的发展历程及代表剖面

上世纪90年代,海平面下降导致物种栖息地丧失的观点受到以Wignall和Hallam等为代表的学者的质疑^[16-19]。Twitchett^[19]指出物种—地域关系中,特定地点栖息环境的多样性比栖息地面积更重要,其次,全球变冷和冰川期造成的海平面下降(如奥陶纪末灭绝事件),水温的下降比陆棚面积的丧失更可能是灭绝机制。Hallam^[16]首次提出二叠纪末海平面上

升过程中底层缺氧海水的上涌可能是造成生物灭绝的重要机制,之后,Wignall等发表了多篇文章^[17-18,20-22],主要涉及意大利、巴基斯坦盐岭地区、藏南、华南板块重庆地区的浅水相PTB剖面(图1、表1),认为全球二叠纪末—早三叠世为连续的海平面上升,灭绝线和PTB都位于海侵层序中,灭绝事件与最大海泛面(MFS)紧密相关而不是与层序界面(SB)相关,PTB在灭绝线之上或在灭绝段内。连续海平面上升观点得到了一些学者的支持^[23-29](图1、表1),该观点的提出主要基于如下两点:①识别出以暴露面或侵蚀面为特征的层序界面,但早期生物地层工作认为生物灭绝事件发生在层序界面之上的海侵沉积中,即层序界面所代表的海平面下降不能归属于PTB附近发生的事件,故未对该期海平面下降事件予以关注,并得出PTB附近为海平面上升的结论^[17-18,21,30];②未能在界线地层附近识别出近地表暴露证据或对近地表暴露的证据有其他解释,PTB附近多为海平面上升导致的岩性岩相突变区间^[7,16,20,23-24,26,28-29,31-36]。总的来说,早期PTB附近海平面上升论观点的盛行主要是对层序界面附近地层的研究尚不深入,导致海平面下降事件未能引起重视。

1.1.2 海平面上升的原因

对于二叠纪末海平面上升的原因尚无定论,仅有少数学者提出了一些假说,假说主要包括:①Hallam

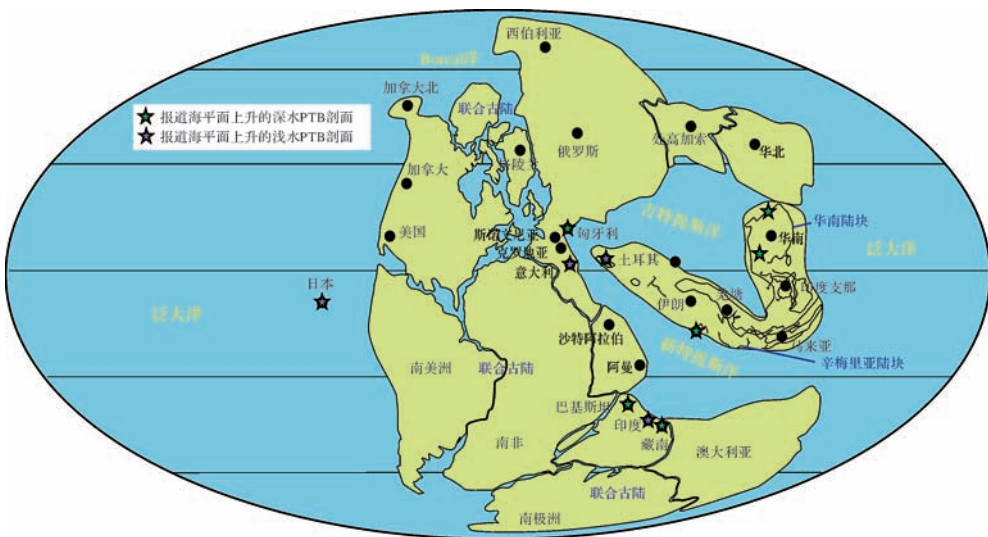


图1 晚二叠世—早三叠世全球古地理图(据 Scotese^[37],有改动)及报道海平面上升观点的PTB地层剖面位置

Fig.1 Late Permian to early Triassic global paleogeographic map (revised from Scotese^[37]) and PTB stratigraphic sections which have been reported sea level rise

表 1 已报道的 PTB 附近海平面上升的剖面及其海平面上升证据

Table 1 Sections which have been reported sea level rise near PTB and the relevant evidence

| 序号 | 剖面位置 | 沉积相 | 海平面上升证据 | 资料出处 |
|----|--|---------------|--|--|
| 1 | 意大利, Dolomites 地区 | 浅水台地 | PTB 附近为连续鲕粒灰岩沉积, 内部未识别出沉积间断, 鲕粒灰岩底部侵蚀面远低于 PTB, 不属于 PTB 事件 | Noé, 1987; Baud <i>et al.</i> , 1989; Hallam, 1989; Wignall 和 Hallam, 1992; Sholger <i>et al.</i> , 2000 |
| 2 | 匈牙利, Bükk Mountains 和 the Transdanubian Range. | 斜坡 | 界线黏土底部未见明显侵蚀, 界线黏土富含黄铁矿 | Haas <i>et al.</i> , 2007 |
| 3 | 土耳其, Taşkent | 开阔台地 | ①截断面之下为潮下环境而不是潮间带环境, 没有向上变浅旋回; ②等厚环边胶结物指示了海洋潜流带环境, 未见指示大气淡水渗流带环境的新月形或重力悬垂胶结物; ③截断面之下的生屑灰岩里的狭盐性动物的存在指示沉积环境为正常盐度的海洋环境; ④碳同位素负偏都在截断面之上, 而截断面之下没有显示反映大气淡水型负偏; 故将截断面解释为海底侵蚀面。也有学者解释为缝合线 | Payne <i>et al.</i> , 2007; Kershaw <i>et al.</i> , 2007; |
| 4 | 伊朗南部 South Pars 气田 (现今波斯湾) | 浅水等斜缓坡 | PTB 附近为连续向上变深旋回, 未见明显层序界面 | Insalaco <i>et al.</i> , 2006 |
| 5 | 重庆: 老龙洞, 凉风垭, 文兴场, 斑竹园, 涧水沟, 东湾 | 开阔台地, 生物礁, 礁间 | 长兴阶顶部缺乏岩溶现象或古土壤, 或者淡水组构, 可能只是代表相的突变生屑灰岩或生物礁与上覆微生物岩为向上深序列, 微生物岩内部见缝合线而非侵蚀面 | Wignall <i>et al.</i> , 1996; Kershaw <i>et al.</i> , 1999; 2002; 2007 |
| 6 | 贵州南盘江地区, 娘排, 大文, 和平 | 开阔浅潮下 | 具体证据同土耳其, 截断面为海底侵蚀面; 或生屑灰岩与微生物岩以缝合线接触 | Payne <i>et al.</i> , 2007; Kershaw <i>et al.</i> , 2007 |
| 7 | 巴基斯坦盐岭地区 | 斜坡 | PTB 附近为连续沉积的、向上变深的 Kathwai 白云岩, 没有证据显示海退。这段白云岩之下的 Chhidru 组顶部有干裂缝, 但该海退事件不属于 PTB 附近事件 | Wignall <i>et al.</i> , 2003 |
| 8 | 印控克什米尔地区, Pahlgam 和 Guryul Ravine | 开阔台地 | PTB 之下由浅水碳酸盐岩砂沉积快速转变为深水陆棚的泥灰岩沉积, 未见明显侵蚀 | Brookfield <i>et al.</i> , 2003; Algeo <i>et al.</i> , 2007 |
| 9 | 西藏 Selong, Tulong, Qubu | 开阔台地 | Coral bed 向上变深为较低能环境的叠层石层 | Wignall <i>et al.</i> , 2003 |
| 10 | 日本 Takachiho | 浅海 | 具体证据同土耳其, 截断面为海底侵蚀面 | Payne <i>et al.</i> , 2007 |

et al.^[30] 认为二叠纪末泛大洋海底岩石圈超级地幔柱隆起会产生相对陆架边缘的海平面上升, 但是二叠纪末的洋壳多由于俯冲下沉或大陆增生而消亡^[38], 因此构造方面的假说难以得到验证; ②Kidder 等^[27] 基于全球温度上升观点 (西伯利亚火山喷发释放大量二氧化碳、界线地层附近碳同位素负偏可能意味着海底天然气水合物中甲烷的释放、以及高纬度地区寒带煤系森林的快速灭亡等), 提出表层水与底层水升温导致了海洋热扩张, 伴随陆地风化作用加强, 森林蓄水层被破坏, 冰川融化等, 在联合大陆中纬度地区可能形成良好的海平面上升记录。

1.1.3 海平面上升与生物灭绝事件

“持续上升论”观点认为生物灭绝事件与海平面上升过程中的缺氧事件有关, 缺氧事件开始于中二叠统末期的泛大洋和局部盆地, P-T 之交时缺氧已经广泛分布, 除巴基斯坦盐岭、西藏南部和马达加斯加岛

以外的多个盆地、内斜坡和陆棚剖面都有显示^[6]。缺氧事件得到了较多学者的支持^[5, 39-40], 但也有学者指出 PTB 附近的缺氧并不是主要灭绝机制^[19, 41-42], 虽然有的剖面观察到局部的动物群灭绝于缺氧事件, 而物种多样性的快速下降总是在缺氧事件刚开始时期^[2], 因此, 缺氧事件可能主要与早三叠世初期第二幕生物灭绝有关 (对应 *Isarcicella isarcica* 牙形石带底)^[2], 其可能在延缓三叠世生物复苏过程中扮演了更重要的角色^[19, 41-42]。

1.2 下降—上升论

1.2.1 观点的发展历程与代表剖面

上世纪 80 年代后期至本世纪初, 部分国外学者对 PTB 剖面进行了详细的岩石学与沉积学研究, 报道了 PTB 附近海平面下降的证据^[43-51], 但是这些报道都是基于单个剖面或者区域范围内几个剖面的研究, 没有上升到全球海平面变化的讨论。早在 1991

年,杨遵仪^[52]等便提出过华南地区存在海退,长兴末期经历了海平面下降—上升旋回,但没有给出海平面下降的明确证据,2003年,国内学者吴亚生等报道了贵州紫云地区长兴末期多个剖面生物礁的近地表暴露证据,并将贵州地区的海平面下降事件与意大利的PTB剖面 and 上扬子盆地的深水PTB沉积进行了类比论证,明确提出了晚二叠世末即长兴期末存在全球(绝对)海平面下降,并指出这可能是引发二叠纪末生物集群灭绝的因素之一^[53];同年,Wu和Fan根据潮坪白云岩和溶蚀证据,对彼此相隔较远的生物礁(贵州紫云和湖北利川)进行了海平面下降幅度的定量计算,结果表明不同地区海平面下降幅度相似,指出海平面变化是海平面绝对下降而不是相对下降,二叠纪末特提斯海域的海平面至少下降了89.3 m^[54]。此后,世界范围内尤其是特提斯海域关于二叠纪—三叠纪界线附近的海平面下降的证据得到了广泛报道^[35,55-88](图2、表2),一些学者已对全球多条PTB剖面的海平面变化对比进行了精细研究^[63,89-91],二叠纪—三叠纪之交存在全球海平面下降已逐步成为主流观点。

二叠纪末期海平面下降事件形成了一个三级层序的Ⅱ型层序界面(SB2)^[89],即在浅水区以暴露剥蚀为特征,向深水方向过渡为假整合或整合接触,具体表现为:①浅水环境(开阔台地相、蒸发台地相、生物礁相、缓坡相)中识别出的PTB海平面下降证据,以向上变浅沉积序列、不整合界面及产物(侵蚀面、冲刷面、古土壤、风化壳、钙结壳)、渗流组构(重力悬垂胶结物、示顶底构造、渗流粉砂)、古岩溶现象(岩溶垮塌角砾岩、溶沟、溶蚀孔洞和洞穴堆积物、去白云石化作用)、潮坪白云岩及其伴随的藻纹层、鸟眼构造、帐篷构造、干裂缝、石膏假晶等潮上带构造为识别特征;②深水环境(深水台缘相、斜坡相和盆地相)则主要以沉积相的突然向上变浅为识别标志,具体包括深水动物群向浅水动物群的转变,富硅质沉积转变为碳酸盐岩沉积,或者富泥质沉积以及陆源碎屑在垂向上增加等。早期,Yin *et al.*^[89]认为该Ⅱ型层序界面(SB2)代表的沉积间断位于 *Clarkina yini*—*C. meishanensis* 牙形石带之间,最新的资料来自 Yin *et al.*^[91]对华南板块20余条PTB剖面的高分辨率牙形石生物地层研究,其研究结果表明华南地区广泛存在海平面下降,扬子台地和湖南—贵州—广西盆地中的小型孤立台地经历了5~10万年的沉积间断,间断时间对应 *C. meishanensis* 至 *Hindeodus changxingensis* 牙形石

带(对应煤山剖面24e—26层顶),并将全球海平面下降持续时间修订为与华南板块等时。由此,本文依据 Yin *et al.*^[91]的最新的牙形石分带及海平面下降导致的沉积间断时间,对表2中重要的PTB剖面校正后进行了对比(图3)。

实际上二叠纪末期海平面下降主要发育于特提斯地区^[92],特提斯海域存在一个独特的海水进退历史,该区域在长兴期总体为一个海平面上升过程,在长兴晚期经历了一个快速的海平面下降,层序界面之上是一很薄的(0.3~5.0 m)、以初始海泛面(TS)为顶界的陆棚边缘体系域(SMST)沉积,在个别地貌高地可能缺失SMST沉积,海侵体系域沉积(TST)直接覆盖在SB2之上,SMST和初始TST沉积以泥晶灰岩、粒泥灰岩、泥粒灰岩、鲕粒灰岩、微生物岩等低能或较低能环境沉积产物为特征,与SB2之下的高水位体系域(HST)的生屑云岩、鲕粒云岩、泥晶云岩等高能浅水环境沉积物形成明显的岩性转变(图3),反映了层序界面之上的新一期海平面上升事件,SMST和初始TST沉积中常包含二叠型牙形石(*H. changxingensis*, *C. taylorae*)以及少量腕足类、蜓和有孔虫等^[93],而以牙形石 *H. parvus* 的首现确定的二叠纪—三叠纪年代地层界线(PTB)一般位于初始海泛面(TS)之上几厘米至几米处,因此,长兴末期即已发生海平面上升事件,特提斯海域在长兴期内部经历了海平面上升—下降—上升的旋回^[52,89,94]。而现已查明西欧、北美、俄罗斯、冈瓦纳大陆及北部高纬度地区(Boreal 海域,加拿大北极区、格陵兰岛、西伯利亚等)(图2A)在晚二叠世经历的海平面变化旋回为吴家坪期海平面下降—长兴末期海平面上升,不存在长兴期内部的海平面变化,海平面低潮期形成Ⅰ型层序界面(SB1),直到晚长兴期才发生海平面上升,即SB1之下的HST沉积为吴家坪阶硅质岩和灰岩(含吴家坪阶古生物),而SB1之上的低水位体系域(LST)沉积为晚长兴期页岩与粉砂岩,其上发育代表TST的黏土岩和粉砂岩,三叠纪标志牙形石 *H. parvus* 首现于TS之上数厘米,因此,只有SB1之上的地层可与特提斯海域进行对比^[89],在欧美等非海相沉积区,主要表现为对先期沉积间断面的叠加或改造^[95]。

1.2.2 海平面下降—上升的原因

目前二叠纪末海平面下降的原因主要有两种观点:

(1) 泛大陆聚合导致的海平面下降

彭元桥等^[97]和殷鸿福等^[94]提出晚二叠世是泛

大陆与泛大洋的全盛时期,这样一个高山深盆时期导致海水从大陆架回归盆内,形成了二叠纪末全球性海平面下降并影响气候^[94]。在全球各大陆聚合的总背景下,特提斯海域内一系列的小板块从冈瓦纳古陆裂解,并向欧亚大陆靠拢,形成特提斯海多岛洋体系,这里可能不断有小型洋中脊产生,海水涌向大陆架,导致特提斯海域在晚二叠世发生海平面上升,直到长兴期晚期才发生海平面下降,由此构成了特提斯海域独特的海平面上升—下降旋回^[97]。

(2) 全球变冷,海水热收缩导致的海平面下降

Shen *et al.*^[63]指出新特提斯海域发生灭绝事件之前的气候是寒冷的(冷水环境牙形石 *Vjalovognathus* sp. 和 *Merrillina* sp.,冷水腕足),Farabegoli 和 Perri^[81]等在 Shen *et al.*^[63]观点的基础上提出全球变冷,热收缩导致了海平面下降。吴亚生等^[76, 98]对华南板块多条浅水 PTB 剖面生物灭绝方式的研究表明,主灭绝事件中温暖环境的生物礁、蜓类、钙藻等突然灭绝,可能与全球变冷有关,并导致海洋总体积缩小,从而引

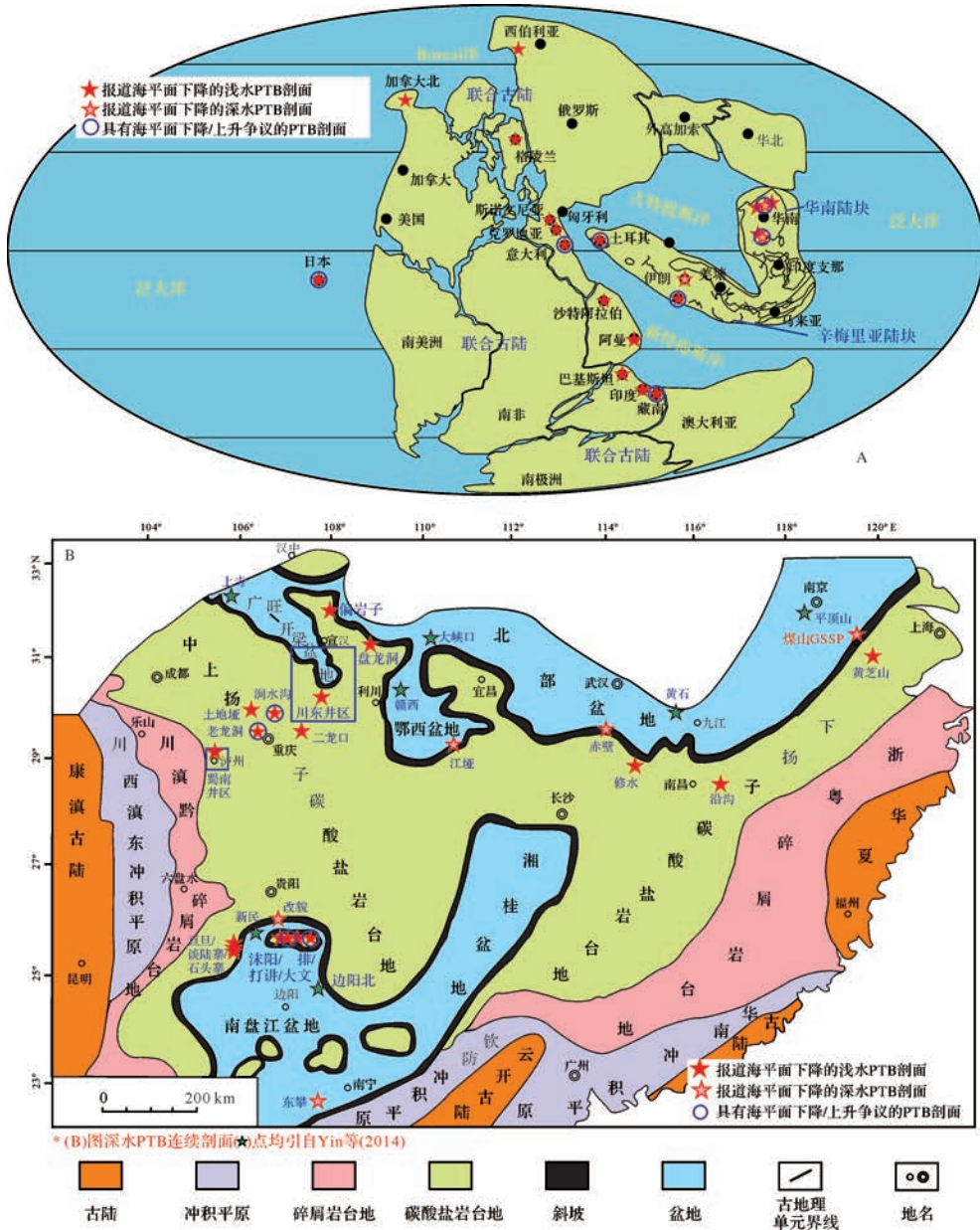


图 2 A.晚二叠世—早三叠世全球古地理图(据 Scotese^[37],有改动)及报道海平面下降的 PTB 地层剖面位置;B.晚二叠世—早三叠世华南板块古地理图(据冯增昭等^[96],有改动)及重要的 PTB 地层剖面位置

Fig.2 A. Late Permian to early Triassic global paleogeographic map (revised from Scotese^[37]) and PTB stratigraphic sections which have been reported sea level fall; B. Late Permian to Early Triassic South China paleogeographic map (revised from Feng, *et al.*^[96]) and important PTB stratigraphic sections

表2 已报道的PTB附近海平面下降的剖面及海平面下降证据

Table 2 Sections which have been reported sea level fall near PTB and the relevant evidence

| 序号 | 剖面位置 | 沉积相 | 海平面下降证据 | 海平面 下降次数 | 资料出处 |
|----|-----------------------------|------------|--|-------------|---|
| 1 | 重庆土地垭 | 生物礁 | 生物礁顶部是潟湖相的藻屑沉积,其上为潮坪沉积,最顶部为一个喀斯特面(覆盖着复合多种矿物碎屑黏土层) | 1 | Reinhardt, 1988; Flügel 和 Reinhardt, 1989 |
| 2 | 重庆老龙洞 | 生物礁之上的微生物岩 | 侵蚀面,干裂缝,PTB 上下 0.4 m | 2 | 吴亚生等, 2006b; 姜红霞等, 2007; 刘丽静等, 2014 |
| 3 | 重庆涧水沟 | 生物礁 | 三个古暴露面(古岩溶面),一次位于 PTB 之下(主灭绝时期),两次在 PTB 之上(最后一次暴露面对应第二幕灭绝期) | 3 | 周刚等, 2012 |
| 4 | 重庆盘龙洞 | 生物礁 | 暴露浅滩白云岩,并发生大气淡水溶蚀作用,见喀斯特角砾岩 | 1 | 马永生等, 2005 |
| 5 | 重庆二龙口 | 开阔台地 | 长兴组顶部风化壳,古岩溶(垂直溶沟、大型溶洞、顺层岩溶) | 1 | 黎虹玮等, 2015 |
| 6 | 重庆偏岩子 | 生物礁 | 长兴组顶部礁盖发育顺层岩溶、垂直溶沟、岩溶角砾 | 1 | 黎虹玮等, 2015 |
| 7 | 重庆川东井区 | 生物礁、礁间 | 长兴组上部溶洞、溶沟、岩溶角砾、花斑状岩溶系统、铝土质泥岩 | 1 | 黎虹玮等, 2015 |
| 8 | 重庆蜀南井区 | 开阔台地 | 大量钻具放空现象,岩芯上见大量的溶沟、溶缝、溶洞及岩溶角砾,长兴组顶部古岩溶不整合 | 1 | 罗冰等, 2010 |
| 9 | 贵州罗甸沫阳 | 生物礁、开阔台地 | 非礁相发育不连续面(侵蚀面、缝合线)、生物礁见岩溶垮塌角砾岩、溶蚀孔洞、洞穴堆积物 | 1 | 李飞等, 2012 |
| 10 | 贵州罗甸大文 | 开阔潮下 | 冲刷面或剥蚀面 | 1 | 刘建波等, 2007 |
| 11 | 贵州紫云 | 生物礁 | 长兴阶末为 HST 的海平面快速下降期,有大量的次生孔隙 | 1 | 陆永潮等, 1999 |
| 12 | 贵州紫云; 亘旦、谈陆寨、石头寨 | 生物礁 | 生物礁顶部发育蒸发潮坪白云岩,藻纹层、鸟眼构造、干裂缝、溶蚀崩塌角砾岩、石膏假晶等 | 1 | 吴亚生等, 2003; Wu <i>et al.</i> , 2003; Wu <i>et al.</i> , 2010 |
| 13 | 贵州娘排 | 开阔浅潮下 | 侵蚀面(或为水下溶蚀) | 1 | Kershaw <i>et al.</i> , 2007; Ezaki <i>et al.</i> , 2008; Collin <i>et al.</i> , 2009 |
| 14 | 贵州改貌 | 开阔浅潮下 | 长兴组生屑灰岩与大陆组硅质岩之间的风化壳 | 1 | Yang <i>et al.</i> , 2012 |
| 15 | 贵州打讲 | 开阔浅潮下 | 喀斯特风化面 | 1 | Jiang <i>et al.</i> , 2014 |
| 16 | 江西修水 | 开阔台地 | 碳酸盐颗粒表面形成褐铁矿,树枝状微生物岩顶部去白云石化灰岩,一次位于 PTB 之下(第一幕灭绝时期),一次在 PTB 之上 | 2 | 吴亚生等, 2006a; Wu <i>et al.</i> , 2014 |
| 17 | 江西沿沟 | 开阔台地 | 不整合面 | 1 | Sun <i>et al.</i> , 2012 |
| 18 | 湖北利川 | 生物礁 | 生物礁白云岩化 | 1 | Wu <i>et al.</i> , 2003 |
| 19 | 湖北赤壁 | 深水台缘 | 早长长期以黑色含放射虫的海绵骨针硅质岩沉积为主,晚期则相变为富含底栖有孔虫化石的硅质团块或硅质条带灰岩 | 1 | 邓宝柱等, 2015 |
| 20 | 浙江黄芝山 | 开阔台地 | 古剥蚀面(风化壳) | 1 | 陈军等, 2008; 杜永灯等, 2009 |
| 21 | 浙江煤山 | 斜坡 | 层序界面波状起伏,低凹处充填薄的褐铁钙质泥岩和较多被磨蚀的生物屑,界面上下微相不连续,界面之下岩层具反粒序层理 | 1 | 张克信等, 1996; Yin <i>et al.</i> , 2007; 曹长群等, 2007 |
| 22 | 湖南慈利 | 深水盆地 | 沉积环境由深水盆地突然转变为浅水台地,生物类群也由大陆组顶部的深水类群放射虫—海绵骨针组合变为大陆组底部的浅水类群棘皮类—双壳类—藻类组合 | 1 | 郑全峰等, 2013 |
| 23 | 广西东攀 | 深水盆地 | 陆源碎屑向上增加,硅质岩向上变为泥岩,深水盆地放射虫向上消失,大量腕足出现 | 1 | 张凡等, 2006, 2007; Feng <i>et al.</i> , 2007; Yin <i>et al.</i> , 2007 |
| 24 | 克罗地亚 Velebit 地区 | 开阔台地—蒸发台地 | 侵蚀面,主量、微量、稀土元素在界面处高度富集,反映了陆源硅质碎屑的大量注入 | 1 | Fio <i>et al.</i> , 2010 |
| 25 | 斯洛文尼亚 Brsnina | 蒸发台地 | 界线黏土,主、微量元素在界线之上的地层高度富集,反映了陆源硅质碎屑的大量注入,沉积环境由界线之下的缺氧(深灰色云岩)转换为界线之上的富氧(红色碎屑岩与云岩, Th/U 值小于 2) | 1 | Dolenec <i>et al.</i> , 2005 |
| 26 | 意大利 Dolomites 地区 | 开阔台地 | 不整合面,示顶底构造(一次对应煤山剖面 24 顶,一次对应煤山剖面 26 层) | 2 | Farabegoli 和 Perri, 1998; Farabegoli <i>et al.</i> , 2007; Farabegoli and Perri, 2012 |
| 27 | 土耳其西 Taurus 山脉地区, CürükDagh | 开阔台地 | 二叠系顶部发育鲕粒灰岩的变浅序列,顶部发育渗流成岩作用,鲕粒强烈重结晶 | 1 | Baud 和 Cirilli, 1997; Baud <i>et al.</i> , 2005 |
| 28 | 土耳其 Taurides 中部, | 开阔浅潮下 | 二叠系顶部发育鲕粒灰岩的变浅旋回,最顶部鲕粒灰岩发生重结晶, P—T 界线为不整合面 | 1 | Ünal <i>et al.</i> , 2003 |
| 29 | 伊朗中部 Abadeh | 深水盆地 | 由二叠纪顶部的富氧深水沉积(红色结核状泥岩)变为三叠纪底部同沉积碳酸盐扇状胶结物层,其上为重结晶的鲕粒灰岩 | 1 | Heydari <i>et al.</i> , 2003 |

(续表)

| 序号 | 剖面位置 | 沉积相 | 海平面下降证据 | 海平面下降次数 | 资料出处 |
|----|----------------------------|--------|--|---------|--------------------------------------|
| 30 | 伊朗南部 South Pars 气田 (现今波斯湾) | 浅水等斜缓坡 | 不整合面,超盐环境、大气淡水环境胶结物、白云岩化、铸模孔。由界面之下的潮上带云岩转变为界面之上的潮下带颗粒岩 | 多次 | Rahimpour-Bonab <i>et al.</i> , 2009 |
| 31 | 沙特阿拉伯中部 | 缓坡 | 界线黏土(古土壤),被侵蚀的植物碎片(陆源搬运) | 1 | Elton <i>et al.</i> , 2016 |
| 32 | 阿曼 WadiSahtan | 开阔台地 | 红色界线页岩(发育帐篷构造,潮上带角砾) | 1 | Richoz <i>et al.</i> , 2010 |
| 33 | 巴基斯坦盐岭地区 | 开阔台地 | 干裂缝、侵蚀面,沉积相向上变浅;浅潮下砂岩变为更开放的潮间砂屑碳酸盐岩,砂屑总量向上增加,化石含量向上减少,最顶部有淡水影响和潮坪沉积,陆源碎屑增加 | 1 | Baud, 1996; Mertmann, 2004 |
| 34 | 西藏 Selong, Tulong, Qubu | 开阔台地 | 钙结壳 | 1 | Shen <i>et al.</i> , 2006 |
| 35 | 日本南部 Takachiho | 浅海 | 二叠系顶部颗粒灰岩和泥晶灰岩白云岩化,白云岩化程度向上增强 | 1 | Sano <i>et al.</i> , 1997 |

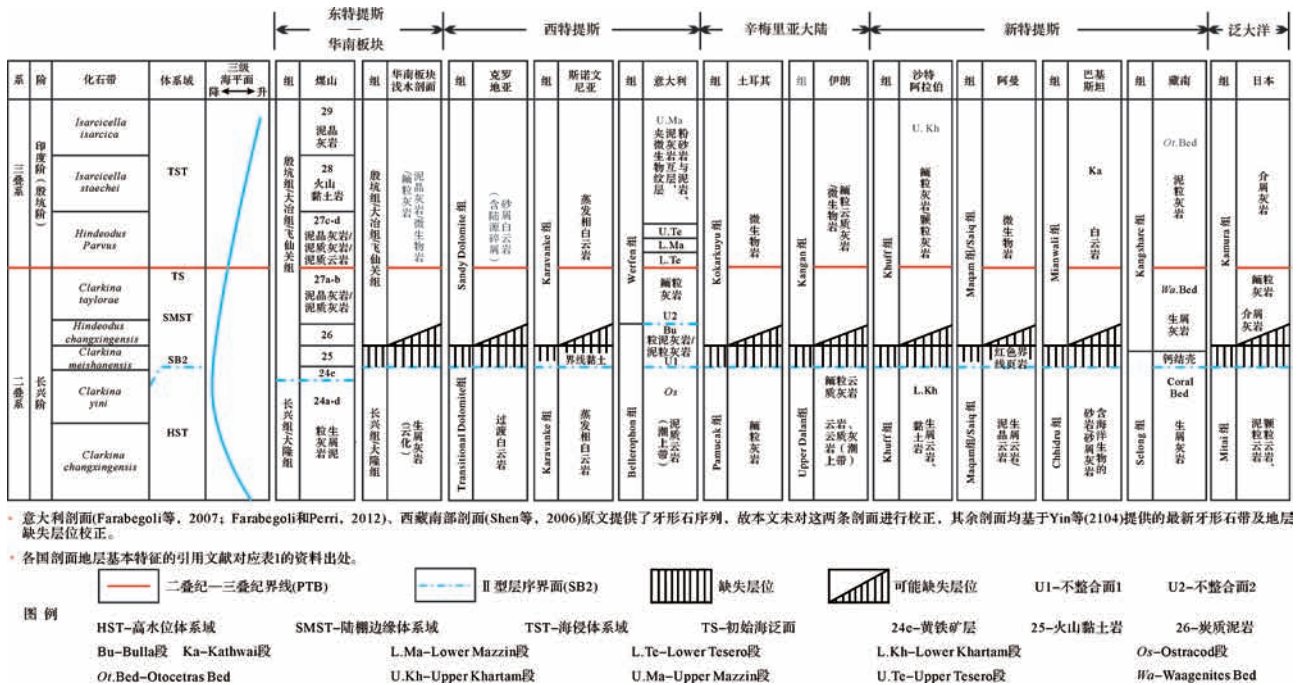


图 3 重要 PTB 剖面简化地层对比图

Fig.3 Simplified correlation of important PTB stratigraphic sections

发了海平面下降。田力^[99]指出二叠纪末强烈的火山喷发产生的气候效应,即快速降温(“火山冬天”)与长期缓慢升温的过程,可以与海平面的快速下降(千年级别)与缓慢上升(百万年级别)对应。但由于降温时间太短很难留下地层记录,或者采样分辨率太低,亦或其他原因,目前该降温事件并没有得到牙形石氧同位素的数据支持。

二叠纪末海平面上升的原因可能与 1.2.2 中所述类似,即可能是由于全球变暖导致的海洋热扩张所致。

1.2.3 海平面下降—上升旋回与生物灭绝事件

目前对特提斯海域的大部分剖面的研究表明,第

一幕灭绝事件与二叠纪末全球海平面下降一致^[45,50,81,84,89,98,100],致使四射珊瑚、蜓、三叶虫、长身贝、石燕贝等灭绝^[52,89,101],海平面下降导致大量陆表海消失,导致许多底栖生物的栖息地消失,或使陆棚海地区被分割且面积缩小,造成生物群过分拥挤,生存竞争加剧首先导致了某些窄生境型生物的绝灭,生物链遭受重创,最终必然影响其他生物的生存与发展^[97]。由于第一幕灭绝事件与二叠纪末全球海平面下降一致,因此可以认为二叠纪末海平面下降事件应归属 PTB 事件。但也有剖面显示灭绝事件发生在海平面下降界线之上的海侵体系域内,如 Hallam *et al.*^[30]指出意大利 Dolomite 地区 Siusi 剖面的灭绝线

位于不整合面之上的鲕粒层内,他还指出巴基斯坦盐岭地区的灭绝段在 Baud *et al.*^[45]所报道的侵蚀面之上的 Kathwai 白云岩段内;Shen *et al.*^[63]指出西藏色龙、巴基斯坦盐岭、克什米尔灭绝段位于 SB 之上的 TST 段内。Yin *et al.*^[89,102]的研究对上述两种灭绝情况作出了解释(图4),指出第一幕灭绝事件与海平面低潮期(SB)一致(对应煤山剖面 24e 层底),第二幕灭绝事件(主要是二叠纪孑遗生物的灭绝)发生于海平面上升期(TST)(对应煤山剖面 28 层顶)(图4)。

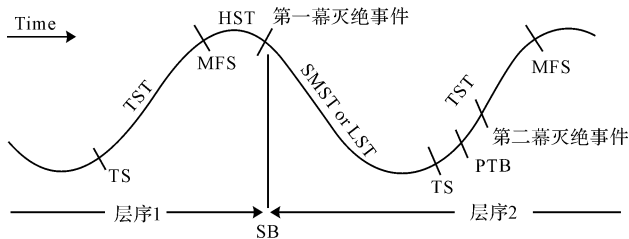


图4 两幕灭绝事件与SB及随后的TS的关系
(修改自 Yin, *et al.*, 2007)

PTB.二叠纪—三叠纪界线;SMST.陆棚边缘位体系域;LST.低水位体系域;TST.海平面上升体系域;HST—高水位体系域;TS.初始海泛面;MFS.最大海泛面;SB.层序界面;Time.时间进程

Fig.4 Two extinctions in relation to the SB and the succeeding TS (revised from Yin, *et al.*, 2007)

2 全球海平面变化差异分析

关于全球海平面变化出现较多争议的原因,相对海平面变化研究程度可能是一个重要因素,具体包括两个方面:①针对同一地区甚至同一剖面(如意大利、巴基斯坦、华南板块浅水碳酸盐岩台地、藏南、土耳其等,图2)的相对海平面变化研究常常得出相反的结论,这主要是不同学者对海平面变化标志性证据的解释有差异导致的,而多条剖面标志性证据的理解差异可能会影响对全球海平面变化的判识;②各个研究区位置分散,由于区域性古地貌(古海拔)差异,造成等时的全球海平面下降事件在不同剖面上的沉积记录不同,即不同剖面相对海平面变化存在差异,在缺乏从沉积学角度的综合对比研究的情况下,可能会影响对全球海平面变化过程持续时间的判识。

2.1 对海平面变化标志性证据的解释存在差异

对海平面变化标志性证据的理解存在差异是造成浅水相PTB剖面相对海平面变化存在争议的主要原因,即表现为对海平面下降论观点中的海平面下降标志的有其他解释,主要包括如下几点:

2.1.1 缝合线

在华南板块四川—重庆地区,PTB地层长兴组灰岩与微生物岩之间以及与微生物岩内部的地层接触关系形成了两类观点,有的学者认为其为侵蚀面^[61,103],另一些学者则认为这些都是缝合线^[73],Kershaw *et al.*^[104]指出多条PTB剖面(重庆华莹、重庆东湾剖面、四川盆地西北鱼洞子剖面、贵州熊排剖面、土耳其Cürük Dag剖面等)发育多条缝合线,强调压溶的普遍存在,缝合线的发育影响了判断侵蚀面是海底溶蚀还是近地表侵蚀,使古环境研究受到阻碍,因此,在野外识别PTB附近侵蚀面时,应慎重恢复缝合线之前的接触情况或者寻找缝合线发育较弱的界线剖面。

2.1.2 海洋酸化导致的海底侵蚀

Payne *et al.*^[7]对华南板块贵州、土耳其、日本三个地区的PTB剖面的沉积相、微观组构、C同位素、胶结物等综合分析认为,二叠纪顶部生屑灰岩侵蚀面为与海洋酸化有关的海底侵蚀面。这一观点提出后受到了诸多质疑^[73,79,104-105],这些学者认为从二叠纪末的超饱和到灭绝事件层的不饱和再到微生物岩的超饱和,如此短时间内碳酸盐饱和度的快速转换在岩石学和碳同位素曲线上尚未有明确的证据^[73,79,106];最新的研究基于地球化学分析从钙同位素^[8]、硼同位素^[9]等方面对二叠纪—三叠纪之交的海洋酸化进行了论证,很多学者在报道近地表侵蚀面时,也指出不排除水下溶蚀的可能^[71,91],如Farabegoli *et al.*^[81]认为意大利两处深潮下环境的PTB剖面中平行不整合面的形成可能与酸性大气淡水注入和酸雨直接入海有关。但Payne *et al.*^[7]和Lehrmann^[36]关于酸化海洋水下溶蚀的证据都是基于缺乏近地表暴露证据的反证,缺乏水下溶蚀的直接岩石学证据,目前这一理论还存在争议。

2.1.3 微生物岩

Reinhardt *et al.*^[43]和吴亚生等^[53]认为华南板块重庆地区生物礁顶部是潟湖相的藻屑沉积,其上为潮坪沉积,最后为喀斯特面(覆盖着复合多种矿物碎屑的黏土层),代表晚二叠纪末期的海平面下降。但Wignall *et al.*^[20]以及Kershaw *et al.*^[23-24]认为礁之上的潮坪白云岩可能是微生物岩,代表较深水、贫氧的环境,此层之上的薄层泥晶灰岩,含草莓状黄铁矿和贫氧动物群Claraia和Planolites,代表更加缺氧的环境,界线地层内不存在出露和喀斯特化的证据,并认为是海水加深和缺氧环境导致了生物集群绝灭。

此外, Wignall *et al.*^[22] 在西藏南部色龙 PTB 剖面中也描述了一层“叠层石”层, 但 Shen *et al.*^[63] 认为该层为纹层状钙结壳, 其发育渗流特征, 钙结壳从顶向下形成了钟乳石或微型钟乳石结构, 钙结壳内的角砾为绿灰色粉砂质页岩碎屑, 不是来自附近的层位, 可能指示了 LST 时期阶段性小型海平面下降导致的暴露和再改造, 因此钙结壳底部标志着层序界面, 其上的 Waagenites Bed 至 Otoceras Bed 记录了岩相的快速向上变深, 由 Waagenites Bed 的海百合茎颗粒岩向上变为 Otoceras Bed 的薄层、含压溶缝的泥粒岩, 生物扰动向上变弱, 黄铁矿向上变多, 反映了 PTB 之下的初始海泛。

2.2 区域性古地貌(古海拔)差异

在全球海平面下降等时的背景下^[81], 不同地区的沉积间断时间、海平面下降次数实际各不相同, 这可能主要受区域性古地貌(古海拔)的影响^[61,80](图 5), 古地貌高的开阔台地礁、滩相区和台地边缘相区最先受到海平面下降影响^[61], 地层暴露、地表被剥蚀, 水体越浅沉积间断时间越长, 或出现多次高频低幅海平面下降事件; 而古地貌低的深水相的开阔台地潮下、斜坡和盆地等连续沉积区, 可能表现为整合接触或假整合接触、沉积相的变浅或无变化、深水动物群转变为浅水动物群等, 未见暴露证据或牙形石带间断^[80-81,91,99]。

2.2.1 深水 PTB 剖面对海平面下降事件的响应

东特提斯海域华南板块深水相与浅水相 PTB 剖面同时存在(图 2B), 为 PTB 海平面变化对比研究提供了良好的基础, 海平面下降事件在浅水相表现为近地表暴露和沉积间断, 而多数深水相剖面表现为 PTB 连续沉积(图 2B, 引自 Yin *et al.*^[91])。世界范围其他地区深水相 PTB 剖面的“海平面上升”现象, 可能是

受区域性构造沉降、沉积物供给、气候等影响导致的相对海平面上升, 也可能是缺乏对二叠纪末海平面下降事件进行系统研究的结果。来自华南板块的深水相剖面(湖北赤壁剖面^[87]、浙江煤山剖面^[55,67,89]、湖南慈江垭剖面^[84]、广西东攀剖面^[62,64,68,89])报道了海平面下降的证据, 因此, 深水剖面对全球海平面下降可能也是有所响应的, 其主要应通过沉积相、岩相的垂向变化及不同环境古生物组合的垂向变化综合分析识别。

2.2.2 浅水 PTB 剖面对海平面下降事件的响应

在全球海平面下降等时的背景下, 受区域性古地貌(古海拔差异), 不同剖面沉积记录中的沉积间断时间存在差异。有的剖面在晚二叠世可能处于地貌高地, 其沉积间断时间可以跨越 1 到 3 个牙形石带, 如贵州罗甸大文剖面^[65] 和贵州打讲剖面^[99] 的沉积间断缺失多达三个牙形石带(*C. meishanensis*—*C. taylorae* 带)。而有些浅水剖面可能由于不具有明显正地貌凸起, 海平面下降造成的沉积—成岩响应较弱, 沉积间断可能小于 1 个牙形石带^[63,72], 由于研究精度较低或采用间距较宽导致的海平面下降事件未被识别常常是引起争议的又一重要原因之一, 如意大利 Dolomite 山脉地区的 PTB 浅水台地剖面的两个不整合面的沉积间断时间均小于一个牙形石带^[69,81], 早期研究在较低的研究精度下多未能识别^[16-17,31-33,107]; 此外, 意大利附近的斯诺文尼亚 PTB 剖面也出现了类似现象^[59], 其 P-T 岩石地层界线主要表现为 1 cm 厚的界线黏土, 未见明显的侵蚀, Dolenc *et al.*^[59] 主要通过主、微量元素在界线之上的地层高度富集(反映了陆源硅质碎屑的大量注入)以及沉积环境由界线之下的缺氧环境(深灰色云岩)转换为界线之上的富氧环境(红色碎屑岩与云岩, Th/U

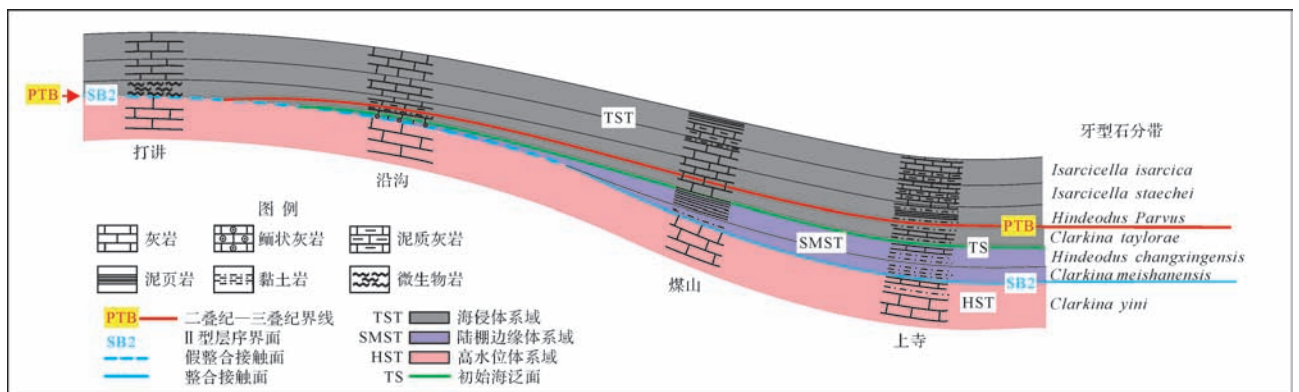


图 5 打讲—沿沟—煤山—上寺 PTB 剖面简化地层对比图(修改自田力, 2015)

Fig.5 Simplified correlation of Dajiang-Yangou-Meishan-Shangsi PTB stratigraphic sections (revised from Tian, 2015)

值大于2)得出海平面发生下降的结论。

3 结论

(1) Hallam 在 1989 年首次提出二叠纪末海平面上升过程中底层缺氧海水的上涌可能是造成生物灭绝的重要机制后,以 Wignall 等学者为代表“上升论”得到了较多支持,该观点的提出主要是由于认为层序界面与围绕生物灭绝事件的相关 PTB 事件无关或在 PTB 附近未识别出层序界面,对层序界线附近地层缺乏深入研究导致海平面下降事件未能引起重视。

(2) 自吴亚生等在 2003 年提出二叠纪—三叠纪之交存在全球海平面下降后,多条剖面(主要在特提斯海域)PTB 界线之下的海平面下降证据被广泛报道,二叠纪末存在海平面下降已成为主流观点。二叠纪末海平面下降形成了一个三级层序的 II 型层序界面(SB2),其常与第一幕生物灭绝界线一致,因此该海平面下降事件应归属于 PTB 事件。层序界面之上的陆棚边缘体系域(SMST)和初始海侵体系域(TST)沉积物中常包含二叠级子遗生物,三叠纪标志牙形石一般出现在 TST 底界之上几厘米或数十厘米处,说明二叠纪末即已发生了海平面上升,由此构成了 PTB 附近的“下降—上升”旋回。

(3) 目前关于 PTB 附近海平面变化的原因尚无定论,海平面下降可能与泛大陆聚合有关,海平面上升则可能与全球变暖导致的海洋扩张有关。

(4) 全球 PTB 海平面变化研究过程中产生争议的原因,主要受单剖面或小区域范围内相对海平面变化研究进展制约,具体包括两个方面:①对海平面变化标志性证据的解释存在差异,导致同一地区甚至同一剖面的相对海平面变化得出相反的结论,多条剖面的标志性证据解释差异可能会影响对全球海平面变化的判识;②在全球海平面下降等时的背景下,由于研究区位置分散,区域性古地貌(古海拔)存在差异,造成海平面下降事件在不同剖面上的沉积记录不同,浅水相区以暴露剥蚀和表生岩溶作用广泛发育为主,形成的沉积间断时间较长,而深水相区为整合接触或假整合接触,未见暴露证据或牙形石带间断。

致谢 中国科学院地质与地球物理研究所吴亚生老师以及三位评审专家对本文提出了宝贵的修改意见与建议,在此深表感谢。

参考文献 (References)

1 Erwin D H. Extinction: How Life on Earth Nearly Ended 250 Million

Years Ago[M]. Princeton, NJ: Princeton University Press, 2006.

- 2 Bond D P G, Wignall P B. Large igneous provinces and mass extinctions: an update[J]. Geological Society of America Special Papers, 2014, 505: 29-55.
- 3 Joachimski M M, Lai Xulong, Shen Shuzhong, et al. Climate warming in the latest Permian and the Permian-Triassic mass extinction[J]. Geology, 2012, 40(3): 195-198.
- 4 Cui Ying, Kump L R. Global warming and the end-Permian extinction event: proxy and modeling perspectives[J]. Earth-Science Reviews, 2015, 149: 5-22.
- 5 Isozaki Y. Permo-Triassic boundary superanoxia and stratified superocean: records from lost deep sea[J]. Science, 1997, 276(5310): 235-238.
- 6 Wignall P B, Twitchett R J. Extent, duration, and nature of the Permian-Triassic superanoxic event[J]. Geological Society of America Special Papers, 2002, 356: 395-413.
- 7 Payne J L, Lehmann D J, Follett D, et al. Erosional truncation of uppermost Permian shallow-marine carbonates and implications for Permian-Triassic boundary events[J]. Geological Society of America Bulletin, 2007, 119(7/8): 771-784.
- 8 Payne J L, Turchyn A V, Paytan A, et al. Calcium isotope constraints on the end-Permian mass extinction[J]. Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America, 2010, 107(19): 8543-8548.
- 9 Clarkson M O, Kasemann S A, Wood R A, et al. Ocean acidification and the Permo-Triassic mass extinction[J]. Science, 2015, 348(6231): 229-232.
- 10 Algeo T J, Chen Z Q, Fraiser M L, et al. Terrestrial-marine teleconnections in the collapse and rebuilding of early Triassic marine ecosystems[J]. Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology, 2011, 308(1/2): 1-11.
- 11 Newell N D. Revolutions in the history of life[J]. Geological Society of America Special Papers, 1967, 89: 63-92.
- 12 Schopf T J M. Permo-Triassic extinctions: relation to sea-floor spreading[J]. The Journal of Geology, 1974, 82(2): 129-143.
- 13 Simberloff D S. Permo-Triassic extinctions: effects of area on biotic equilibrium[J]. The Journal of Geology, 1974, 82(2): 267-274.
- 14 Holser W, Magaritz M. Events near the Permian-Triassic boundary[J]. Modern Geology, 1987, 11(2): 155-180.
- 15 金玉珩,尚庆华,曹长群. 二叠纪地层研究述评[J]. 地层学杂志, 2000, 24(2): 99-108. [Jin Yugan, Shang Qinghua, Cao Changqun. A review of Permian stratigraphy[J]. Journal of Stratigraphy, 2000, 24(2): 99-108.]
- 16 Hallam A. The case for sea-level change as a dominant causal factor in mass extinction of marine invertebrates[J]. Philosophical Transactions of the Royal Society B: Biological Sciences, 1989, 325(1228): 437-455.
- 17 Wignall P B, Hallam A. Anoxia as a cause of the Permian/Triassic mass extinction: facies evidence from northern Italy and the western United States[J]. Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology, 1992, 93(1/2): 21-46.

- 18 Wignall P B, Hallam A. Griesbachian (Earliest Triassic) palaeoenvironmental changes in the Salt Range, Pakistan and southeast China and their bearing on the Permo-Triassic mass extinction [J]. *Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology*, 1993, 102 (3/4): 215-237.
- 19 Twitchett R J. The palaeoclimatology, palaeoecology and palaeoenvironmental analysis of mass extinction events [J]. *Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology*, 2006, 232(2/3/4): 190-213.
- 20 Wignall P B, Hallam A. Facies change and the end-Permian mass extinction in S.E. Sichuan, China [J]. *Palaaios*, 1996, 11(6): 587-596.
- 21 Wignall P B, Kozur H, Hallam A. On the timing of palaeoenvironmental changes at the Permo-Triassic (P/TR) boundary using conodont biostratigraphy [J]. *Historical Biology*, 1996, 12(1): 39-62.
- 22 Wignall P B, Newton R. Contrasting deep-water records from the upper Permian and lower Triassic of south Tibet and British Columbia; evidence for a diachronous mass extinction [J]. *Palaaios*, 2003, 18(2): 153-167.
- 23 Kershaw S, Zhang Tingshan, Lan Guangzhi. A microbialite carbonate crust at the Permian-Triassic boundary in South China, and its palaeoenvironmental significance [J]. *Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology*, 1999, 146(1/2/3/4): 1-18.
- 24 Kershaw S, Guo Li, Swift A, et al. Microbialites in the Permian-Triassic boundary interval in central China: structure, age and distribution [J]. *Facies*, 2002, 47(1): 83-89.
- 25 Erwin D H, Bowring S A, Jin Yugan. End-Permian mass extinctions; a review [J]. *Geological Society of America Special papers*, 2002, 356: 363-383.
- 26 Brookfield M E, Twitchett R J, Goodings C. Palaeoenvironments of the Permian-Triassic transition sections in Kashmir, India [J]. *Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology*, 2003, 198(3/4): 353-371.
- 27 Kidder D L, Worsley T R. Causes and consequences of extreme Permo-Triassic warming to globally equable climate and relation to the Permo-Triassic extinction and recovery [J]. *Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology*, 2004, 203(3/4): 207-237.
- 28 Algeo T J, Hannigan R, Rowe H, et al. Sequencing events across the Permian-Triassic boundary, Guryul Ravine (Kashmir, India) [J]. *Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology*, 2007, 252(1/2): 328-346.
- 29 Haas J, Demény A, Hips K, et al. Biotic and environmental changes in the Permian-Triassic boundary interval recorded on a western Tethyan ramp in the Bükk Mountains, Hungary [J]. *Global and Planetary Change*, 2007, 55(1/2/3): 136-154.
- 30 Hallam A, Wignall P B. Mass extinctions and sea-level changes [J]. *Earth-Science Reviews*, 1999, 48(4): 217-250.
- 31 Noé S U. Facies and paleogeography of the marine Upper Permian and of the Permian-Triassic boundary in the Southern Alps (Bellerophon formation, Tesero Horizon) [J]. *Facies*, 1987, 16(1): 89-141.
- 32 Baud A, Magaritz M, Holser W T. Permian-Triassic of the Tethys; carbon isotope studies [J]. *Geologische Rundschau*, 1989, 78(2): 649-677.
- 33 Scholger R, Mauritsch H J, Brandner R. Permian-Triassic boundary magnetostratigraphy from the Southern Alps (Italy) [J]. *Earth and Planetary Science Letters*, 2000, 176(3/4): 495-508.
- 34 Insalaco E, Virgone A, Courme B, et al. Upper Dalan Member and Kangan Formation between the Zagros Mountains and offshore Fars, Iran; depositional system, biostratigraphy and stratigraphic architecture [J]. *GeoArabia*, 2006, 11(2): 75-176.
- 35 Kershaw S, Li Yue, Crasquin-Soleau S, et al. Earliest Triassic microbialites in the South China block and other areas; controls on their growth and distribution [J]. *Facies*, 2007, 53(3): 409-425.
- 36 Lehrmann D J, Bentz J M, Wood T, et al. Environmental controls on the genesis of marine microbialites and dissolution surface associated with the end-Permian mass extinction; new sections and observations from the Nanpanjiang Basin, South China [J]. *PALAIOS*, 2015, 30(7): 529-552.
- 37 Scotese C R. Atlas of middle & late Permian and Triassic paleogeographic maps [J]. *Paleomap Projection*, 2014, 3-4: 49.
- 38 Hallam A. Discussion on oceanic plateau formation; a cause of mass extinction and black shale deposition around the Cenomanian-Turonian boundary [J]. *Journal of the Geological Society*, 1999, 156(1): 208.
- 39 Hotinski R M, Kump L R, Najjar R G. Opening Pandora's Box; the impact of open system modeling on interpretations of anoxia [J]. *Paleoceanography*, 2000, 15(3): 267-279.
- 40 Song Haijun, Wignall P B, Tong Jinnan, et al. Geochemical evidence from bio-apatite for multiple oceanic anoxic events during Permian-Triassic transition and the link with end-Permian extinction and recovery [J]. *Earth and Planetary Science Letters*, 2012, 353-354: 12-21.
- 41 Erwin D H. The Permo-Triassic extinction [J]. *Nature*, 1994, 367(6460): 231-236.
- 42 Kozur H W. Some aspects of the Permian-Triassic boundary (PTB) and of the possible causes for the biotic crisis around this boundary [J]. *Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology*, 1998, 143(4): 227-272.
- 43 Reinhardt J W. Uppermost Permian reefs and Permo-Triassic sedimentary facies from the southeastern margin of Sichuan Basin, China [J]. *Facies*, 1988, 18(1): 231-287.
- 44 Flügel E, Reinhardt J. Uppermost Permian reefs in Skyros (Greece) and Sichuan (China); implications for the late Permian extinction event [J]. *PALAIOS*, 1989, 4(6): 502-518.
- 45 Baud A, Atudorei V, Sharp Z. Late Permian and early Triassic evolution of the northern Indian margin; carbon isotope and sequence stratigraphy [J]. *Geodinamica Acta*, 1996, 9(2/3): 57-77.
- 46 Sano H, Nakashima K. Lowermost Triassic (Griesbachian) microbial bindstone-cementstone facies, southwest Japan [J]. *Facies*, 1997, 36(1): 1-24.
- 47 Baud A, Cirillis S, Marcoux J. Biotic response to mass extinction; the lowermost Triassic microbialites [J]. *Facies*, 1997, 36(1): 238-242.
- 48 Farabegoli E, Perri M C. Permian/Triassic boundary and early Triassic of the Bulla section (southern Alps, Italy); lithostratigraphy, facies and conodont biostratigraphy [J]. *Giornale di Geologia*, 1998, 60

- (Spec Issue): 292-311.
- 49 Heydari E, Hassanzadeh J, Wade W J, et al. Permian-Triassic boundary interval in the Abadeh section of Iran with implications for mass extinction; Part 1-Sedimentology[J]. *Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology*, 2003, 193(3/4): 405-423.
 - 50 Ünal E, Altiner D, Yilmaz I Ö, et al. Cyclic sedimentation across the Permian-Triassic boundary (central Taurides, Turkey) [J]. *Rivista Italiana di Paleontologia e Stratigrafia*, 2003, 109(2): 359-376.
 - 51 Mertmann D. Evolution of the marine Permian carbonate platform in the Salt Range (Pakistan) [J]. *Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology*, 2003, 191(3/4): 373-384.
 - 52 杨遵仪, 吴顺宝, 殷红, 等. 华南二叠: 三叠纪过渡期地质事件 [M]. 北京: 地质出版社, 1991. [Yang Zunyi, Wu Shunbao, Yin Hong, et al. Permo-Triassic Events of South China[M]. Beijing: Geological Publishing House, 1991.]
 - 53 吴亚生, 范嘉松, 金玉珩. 晚二叠世末的生物礁出露及其意义 [J]. *地质学报*, 2003, 77(3): 289-296. [Wu Yasheng, Fan Jiasong, Jin Yugan. Emergence of the Late Permian Changhsingian reefs at the end of the Permian [J]. *Acta Geologica Sinica*, 2003, 77(3): 289-296.]
 - 54 Wu Yasheng, Fan Jiasong. Quantitative evaluation of the sea-level drop at the end-Permian: based on reefs [J]. *Acta Geologica Sinica*, 2003, 77(1): 95-102.
 - 55 张克信, 童金南, 殷鸿福, 等. 浙江长兴二叠系—三叠系界线剖面层序地层研究 [J]. *地质学报*, 1996, 70(3): 270-281. [Zhang Kexin, Tong Jinnan, Yin Hongfu, et al. Sequence stratigraphy of the Permian-Triassic boundary section of Changxing, Zhengjiang [J]. *Acta Geologica Sinica*, 1996, 70(3): 270-281.]
 - 56 陆永潮, 李思田, 叶洪波, 等. 海平面升降变化对贵州紫云礁体生长的控制 [J]. *地球科学*, 1999, 24(6): 585-589. [Lu Yongchao, Li Sitian, Ye Hongbo, et al. Effect of sea level changes on Ziyun Reef accretion in Guizhou province, China [J]. *Earth Science*, 1999, 24(6): 585-589.]
 - 57 马永生, 牟传龙, 郭彤楼, 等. 四川盆地东北部飞仙关组层序地层与储层分布 [J]. *矿物岩石*, 2005, 25(4): 73-79. [Ma Yongsheng, Mu Chuanlong, Guo Tonglou, et al. Sequence stratigraphy and reservoir distribution of Feixianguan Formation in northeastern Sichuan [J]. *Journal of Mineralogy and Petrology*, 2005, 25(4): 73-79.]
 - 58 Baud A, Richoz S, Marcoux J. Calcimicrobial cap rocks from the basal Triassic units: western Taurus occurrences (SW Turkey) [J]. *Comptes Rendus Palevol*, 2005, 4(6/7): 569-582.
 - 59 Dolenc M. The Permian Triassic boundary in the Karavanke Mountains (Brsnina section, Slovenia): the ratio of Th/U as a possible indicator of Changing redox conditions at the P/T transition [J]. *Materials and Geoenvironment*, 2005, 52(2): 437-445.
 - 60 吴亚生, Yang Wan, 姜红霞, 等. 江西修水二叠纪—三叠纪界线地层海平面下降的岩石学证据 [J]. *岩石学报*, 2006, 22(12): 3039-3046. [Wu Yasheng, Yang Wan, Jiang Hongxia, et al. Petrologic evidence for sea-level drop in latest Permian in Jiangxi province, China and its meanings for the mass extinction [J]. *Acta Petrologica Sinica*, 2006, 22(12): 3039-3046.]
 - 61 吴亚生, 姜红霞, 廖太平. 重庆老龙洞二叠系—三叠系界线地层的海平面下降事件 [J]. *岩石学报*, 2006, 22(9): 2405-2412. [Wu Yasheng, Jiang Hongxia, Liao Taiping. Sea-level drops in the Permian-Triassic boundary section at Laolongdong, Chongqing, Sichuan province [J]. *Acta Petrologica Sinica*, 2006, 22(9): 2405-2412.]
 - 62 张凡, 冯庆来, 蒙有言, 等. 广西柳桥深水相二叠系/三叠系界线剖面有机碳同位素地层学对比研究及事件响应 [J]. *现代地质*, 2006, 20(1): 42-48. [Zhang Fan, Feng Qinglai, Meng Youyan, et al. Stratigraphy of organic carbon isotope and associated events across the Permian/Triassic boundary in the Dongpan deep-water section in Liuchiao area, Guangxi, South China [J]. *Geoscience*, 2006, 20(1): 42-48.]
 - 63 Shen Shuzhong, Cao Changqun, Henderson C M, et al. End-Permian mass extinction pattern in the northern peri-Gondwanan region [J]. *Palaeoworld*, 2006, 15(1): 3-30.
 - 64 张凡, 冯庆来, 何卫红, 等. 广西东攀 P—T 界线深水相剖面与煤山剖面地层学对比 [J]. *地质科技情报*, 2007, 26(1): 41-45. [Zhang Fan, Feng Qinglai, He Weihong, et al. Multidisciplinary stratigraphy correlation of the Permian-Triassic boundary between Dongpan deep-water environment section, Guangxi and Meishan section [J]. *Geological Science and Technology Information*, 2007, 26(1): 41-45.]
 - 65 刘建波, 江崎洋一, 杨守仁, 等. 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 [J]. *古地理学报*, 2007, 9(5): 473-486. [Liu Jianbo, Yoichi E, Yang Shouren, et al. Age and sedimentology of microbialites after the end-permian mass extinction in Luodian, Guizhou province [J]. *Journal of Palaeogeography*, 2007, 9(5): 473-486.]
 - 66 姜红霞, 吴亚生, 袁生虎. 重庆二叠—三叠系界线地层的干裂缝和侵蚀面及其意义 [J]. *高校地质学报*, 2007, 13(1): 53-59. [Jiang Hongxia, Wu Yasheng, Yuan Shenghu. Dessication cracks and erosional surface in the Permian-Triassic boundary section in Chongqing [J]. *Geological Journal of China Universities*, 2007, 13(1): 53-59.]
 - 67 曹长群, 郑全锋. 浙江煤山 D 剖面二叠系长兴组高精度岩石地层 [J]. *地层学杂志*, 2007, 31(1): 14-22. [Cao Changqun, Zheng Quanfeng. High-resolution lithostratigraphy of the Changhsingian stage in Meishan section D, Zhejiang [J]. *Journal of Stratigraphy*, 2007, 31(1): 14-22.]
 - 68 Feng Qinglai, He Weihong, Gu Songzhu, et al. Radiolarian evolution during the latest Permian in South China [J]. *Global and Planetary Change*, 2007, 55(1/2/3): 177-192.
 - 69 Farabegoli E, Perri M C, Posenato R. Environmental and biotic changes across the Permian-Triassic boundary in western Tethys: the Bulla parastratotype, Italy [J]. *Global and Planetary Change*, 2007, 55(1/2/3): 109-135.
 - 70 陈军, Henderson C M, 沈树忠. 浙江黄芝山剖面二叠—三叠系界线附近的牙形类序列及其地层对比 [J]. *古生物学报*, 2008, 47(1): 91-114. [Chen Jun, Henderson C M, Shen Shuzhong. Conodont succession around the Permian-Triassic boundary at the Huangzhishan section, Zhejiang and its stratigraphic correlation [J]. *Acta Palaeontologica Sinica*, 2008, 47(1): 91-114.]

- 71 Ezaki Y, Liu Jianbo, Nagano T, et al. Geobiological aspects of the earliest Triassic microbialites along the southern periphery of the tropical Yangtze Platform: initiation and cessation of a microbial regime [J]. *PALAIOS*, 2008, 23(6): 356-369.
- 72 杜永灯,张磊,王伟洁,等. 浙江湖州黄芝山剖面长兴组顶部古剥蚀面的识别及其地质意义[J]. *地质论评*, 2009, 55(4): 503-508. [Du Yongdeng, Zhang Lei, Wang Weijie, et al. Paleo weathering crust at the top of the Changxing Formation in Huangzhishan section, Huzhou, Zhejiang, and its geological significance[J]. *Geological Review*, 2009, 55(4): 503-508.]
- 73 Collin P Y, Kershaw S, Crasquin-Soleau S, et al. Facies changes and diagenetic processes across the Permian-Triassic boundary event horizon, Great Bank of Guizhou, South China: a controversy of erosion and dissolution[J]. *Sedimentology*, 2009, 56(3): 677-693.
- 74 Rahimpour-Bonab H, Asadi-Eskandar A, Sonei R. Effects of the Permian-Triassic boundary on reservoir characteristics of the south Pars gas field, Persian Gulf[J]. *Geological Journal*, 2009, 44(3): 341-364.
- 75 罗冰,谭秀成,李凌,等. 蜀南地区长兴组顶部岩溶不整合的发现及其油气地质意义[J]. *石油学报*, 2010, 31(3): 408-414. [Luo Bing, Tan Xiucheng, Li Ling, et al. Discovery and geologic significance of paleokarst unconformity between Changxing Formation and Feixianguan Formation in Shunan area of Sichuan Basin[J]. *Acta Petrologica Sinica*, 2010, 31(3): 408-414.]
- 76 Wu Yasheng, Jiang Hongxia, Fan Jiasong. Evidence for sea-level falls in the Permian-Triassic transition in the Ziyun area, South China[J]. *Geological Journal*, 2010, 45(2/3): 170-185.
- 77 Richoz S, Krystyn L, Baud A, et al. Permian-Triassic boundary interval in the Middle East (Iran and N. Oman): progressive environmental change from detailed carbonate carbon isotope marine curve and sedimentary evolution[J]. *Journal of Asian Earth Sciences*, 2010, 39(4): 236-253.
- 78 Fio K, Spangenberg J E, Vlahović I, et al. Stable isotope and trace element stratigraphy across the Permian-Triassic transition: a redefinition of the boundary in the Velebit Mountain, Croatia[J]. *Chemical Geology*, 2010, 278(1/2): 38-57.
- 79 李飞,吴夏. 贵州沱阳剖面二叠纪末浅水沉积特征及其古环境意义[J]. *沉积学报*, 2012, 30(4): 679-688. [Li Fei, Wu Xia. Characteristics and palaeoenvironmental significances of shallow-marine sediments in the latest Permian, Moyang Section, Guizhou[J]. *Acta Sedimentologica Sinica*, 2012, 30(4): 679-688.]
- 80 周刚,郑荣才,罗平,等. 川东华蓥二叠系—三叠系界线地层地质事件与元素地球化学响应[J]. *地球科学*, 2012, 37(增刊1): 101-110. [Zhou Gang, Zheng Rongcai, Luo Ping, et al. Geological events and their geochemical responses of the Permian-Triassic boundary, Huaying, eastern Sichuan[J]. *Earth Science*, 2012, 37(Suppl.1): 101-110.]
- 81 Farabegoli E, Perri M C. Millennial physical events and the end-Permian mass mortality in the western Palaeotethys: timing and primary causes[M]//Talent J A. *Earth and Life*. Netherlands: Springer, 2012: 719-758.
- 82 Yang Bo, Lai Xulong, Wignall P B, et al. A newly discovered earliest Triassic chert at Gaimao section, Guizhou, southwestern China[J]. *Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology*, 2012, 344-345: 69-77.
- 83 Sun Dongying, Tong Jinnan, Xiong Yanlin, et al. Conodont biostratigraphy and evolution across Permian-Triassic boundary at Yangou Section, Leping, Jiangxi Province, South China[J]. *Journal of Earth Science*, 2012, 23(3): 311-325.
- 84 郑全锋,丁奕,曹长群. 湖南慈利江垭剖面二叠系—三叠系界线层序的沉积微相类型、沉积环境和海平面变化[J]. *岩石学报*, 2013, 29(10): 3637-3648. [Zheng Quanfeng, Ding Yi, Cao Changqun. Microfacies, sedimentary environment and sea-level changes of the Permian-Triassic boundary succession in the Jiangya section, Cili County, Hunan province[J]. *Acta Petrologica Sinica*, 2013, 29(10): 3637-3648.]
- 85 Jiang Haishui, Lai Xulong, Sun Yadong, et al. Permian-Triassic conodonts from Dajiang (Guizhou, South China) and their implication for the age of microbialite deposition in the aftermath of the End-Permian mass extinction[J]. *Journal of Earth Science*, 2014, 25(3): 413-430.
- 86 黎虹玮,唐浩,苏成鹏,等. 四川盆地东部涪陵地区上二叠统长兴组顶部风化壳特征及地质意义[J]. *古地理学报*, 2015, 17(4): 477-492. [Li Hongwei, Tang Hao, Su Chengpeng, et al. Characteristics of weathering crust at top of the upper Permian Changxing Formation in Fuling area, eastern Sichuan Basin and its geological significance[J]. *Journal of Palaeogeography*, 2015, 17(4): 477-492.]
- 87 邓宝柱,余黎雪,王永标,等. 湖北赤壁二叠纪—三叠纪之交古海洋沉积环境演化[J]. *地球科学*, 2015, 40(2): 317-326. [Deng Baozhu, Yu Lixue, Wang Yongbiao, et al. Evolution of marine conditions and sedimentation during the Permian-Triassic Transition in Chibi of Hubei province[J]. *Earth Science*, 2015, 40(2): 317-326.]
- 88 Eltom H A, Abdullatif O M, Babalola L O, et al. Geochemical characterization of the Permian-Triassic transition at outcrop, central Saudi Arabia[J]. *Journal of Petroleum Geology*, 2016, 39(1): 95-113.
- 89 Yin Hongfu, Feng Qinglai, Lai Xulong, et al. The protracted Permian-Triassic crisis and multi-episode extinction around the Permian-Triassic boundary[J]. *Global and Planetary Change*, 2007, 55(1/2/3): 1-20.
- 90 王海峰,刘建波,江崎洋一. 贵州罗甸大文二叠—三叠系界线剖面海平面变化及其全球对比[J]. *北京大学学报:自然科学版*, 2012, 48(4): 589-602. [Wang Haifeng, Liu Jianbo, Yoichi E. Sea-level changes at the Dawen Permian-Triassic boundary section of Luodian, Guizhou province, South China: a global correlation[J]. *Acta Scientiarum Naturalium Universitatis Pekinensis*, 2012, 48(4): 589-602.]
- 91 Yin Hongfu, Jiang Haishui, Xia Wenchen, et al. The end-Permian regression in South China and its implication on mass extinction[J]. *Earth-Science Reviews*, 2014, 137: 19-33.
- 92 殷鸿福,童金南,丁梅华,等. 扬子区晚二叠世—中三叠世海平面变化[J]. *地球科学-中国地质大学学报*, 1994, 39(5): 627-632. [Yin Hongfu, Tong Jinnan, Ding Meihuan, et al. Late Permian-mid-

- dle Triassic sea level changes of Yangtze platform[J]. *Earth Science - Journal of China University of Geosciences*, 1994, 19(5): 627-632.].
- 93 殷鸿福. 二叠系—三叠系研究的进展[J]. *地球科学进展*, 1994, 9(2): 1-10. [Yin Hongfu. Advancements of Permian and Triassic research[J]. *Advance in Earth Science*, 1994, 9(2): 1-10.]
- 94 殷鸿福, 宋海军. 古、中生代之交生物大灭绝与泛大陆聚合[J]. *中国科学(D辑): 地球科学*, 2013, 43(10): 1539-1552. [Yin Hongfu, Song Haijun. Mass extinction and Pangea integration during the Paleozoic-Mesozoic transition[J]. *Science China (Seri.D): Earth Sciences*, 2013, 43(10): 1539-1552.]
- 95 覃建雄, 曾允孚, 陈洪德, 等. 西南地区二叠纪层序地层及海平面变化[J]. *岩相古地理*, 1998, 18(1): 19-35. [Qin Jianxiong, Zeng Yunfu, Chen Hongde, et al. Permian sequence stratigraphy and sea level changes in southwestern China [J]. *Sedimentary Facies and Palaeogeography*, 1998, 18(1): 19-35.]
- 96 冯增昭, 杨玉卿, 金振奎, 等. 中国南方二叠纪岩相古地理[J]. *沉积学报*, 1996, 14(2): 3-12. [Feng Zengzhao, Yang Yuqing, Jin Zhenkui, et al. Lithofacies Paleogeography of the Permian of South China[J]. *Acta Sedimentologica Sinica*, 1996, 14(2): 3-12.]
- 97 彭元桥, 殷鸿福. 古—中生代之交的全球变化与生物效应[J]. *地学前缘*, 2002, 9(3): 85-93. [Peng Yuanqiao, Yin Hongfu. The global changes and bio-effects across the Paleozoic-Mesozoic transition[J]. *Earth Science Frontiers*, 2002, 9(3): 85-93.]
- 98 Wu Yasheng, Yuan Xiaohong, Jiang Hongxia, et al. Coevality of the sea-level fall and main mass extinction in the Permian-Triassic transition in Xiushui, Jiangxi Province, southern China [J]. *Journal of Palaeogeography*, 2014, 3(3): 309-322.
- 99 田力. 华南古、中生代之交碳酸盐岩相区生物—环境演变[D]. 北京: 中国地质大学, 2015. [Tian Li. Reconstruction of the biotic and environmental changes during Paleozoic-Mesozoic transition of carbonate facies in South China [D]. Beijing: China University of Geosciences, 2015.]
- 100 刘丽静, 姜红霞, 吴亚生, 等. 中国南方晚二叠世—早三叠世礁区生物群落演替序列与古环境变化——以四川盆地东北部盘龙洞剖面为例[J]. *中国科学(D辑): 地球科学*, 2014, 44(4): 617-633. [Liu Lijing, Jiang Hongxia, Wu Yasheng, et al. Community replacement sequences and paleoenvironmental changes in reef areas of South China from Late Permian to Early Triassic exemplified by Panlongdong section in northeastern Sichuan Basin [J]. *Science China (Seri.D): Earth Sciences*, 2014, 44(4): 617-633.]
- 101 沈树忠, 朱茂炎, 王向东, 等. 新元古代—寒武纪与二叠—三叠纪转折时期生物和地质事件及其环境背景之比较[J]. *中国科学(D辑): 地球科学*, 2010, 40(9): 1228-1240. [Shen Shuzhong, Zhu Maoyan, Wang Xiangdong, et al. A comparison of the biological, geological events and environmental backgrounds between the Neoproterozoic-Cambrian and Permian-Triassic transitions [J]. *Science China (Seri.D): Earth Sciences*, 2010, 40(9): 1228-1240.]
- 102 Yin Hongfu, Xie Shucheng, Luo Genming, et al. Two episodes of environmental change at the Permian-Triassic boundary of the GSSP section Meishan [J]. *Earth-Science Reviews*, 2012, 115(3): 163-172.
- 103 Ezaki Y, Liu Jianbo, Adachi N. 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 [J]. *Palaios*, 2003, 18(4/5): 388-402.
- 104 Kershaw S, Crasquin S, Li Y, et al. Microbialites and global environmental change across the Permian-Triassic boundary: a synthesis [J]. *Geobiology*, 2012, 10(1): 25-47.
- 105 Wignall P B, Kershaw S, Collin P Y, et al. Erosional truncation of uppermost Permian shallow-marine carbonates and implications for Permian-Triassic boundary events: comment [J]. *Geological Society of America Bulletin*, 2009, 121(5/6): 954-956.
- 106 Kershaw S, Crasquin S, Li Yue, et al. Ocean acidification and the end-Permian mass extinction: to what extent does evidence support hypothesis? [J]. *Geosciences*, 2012, 2(4): 221-234.
- 107 Wignall P B, Twitchett R J. Oceanic anoxia and the end Permian mass extinction [J]. *Science*, 1996, 272(5265): 1155-1158.

A Review of Studies on Global Changes of Sea Level Across the Permian Triassic Boundary

LI HongWei^{1,2} LI Fei^{1,2} HU Guang^{1,2} TAN XiuCheng^{1,2,3} LI Ling^{1,2,3}

(1. State Key Laboratory of Oil and Gas Reservoir Geology and Exploitation, Southwest Petroleum University, Chengdu 610500, China;

2. Sichuan Key Laboratory of Gas Geology, Chengdu 610500, China)

3. Branch of Deposition and accumulation, Key Laboratory of Carbonate Reservoir, China National Petroleum Corporation, Chengdu 610500, China;

Abstract: The issue on sea-level changes across the Permian-Triassic boundary (PTB) has been disputed by the sedimentologists for a long time. It may also have relation with the largest mass extinction event during the transition of Permian-Triassic. However, it is not quite clear about the process and mechanism of the change of sea level in light of previous studies from local- and small-scale materials. The lack of reliable evidence from integrated perspectives would go against the identification of the process and duration of global sea-level variation. In this study, we systematically reviewed the literatures on the issue of sea-level changes during the transitions of Permian-Triassic, and summarized the main views including: (1) successive transgression, and (2) regression and following quick transgression. This study also compiled the development processes of these two different views, sedimentary features in diagnostic sections, the possible reasons of sea-level rise/fall, as well as the relationship between mass extinction and sea-level changes. Meanwhile, the causes of dispute on sea-level changes in the PTB were discussed preliminarily from available evidence. The aim of this study is to provide some clues to further recognize the process of sea-level changes during the PTB, and to provide substantial evidence to understand the background of global sea-level changes during the Permian-Triassic transition.

Key words: Permian-Triassic boundary; sea-level change; sub-aerial exposure; mass extinction event