

陕西镇安西口石炭-二叠系界线剖面筳类生物多样性与高频海平面变化^{*}

张海军^① 王训练^{②**} 丁 林^① 夏国英^③ 王 雷^②

(① 中国科学院青藏高原研究所, 北京 100085; ② 中国地质大学地球科学与资源学院, 北京 100083;

③ 天津地质矿产研究所, 天津 300170)

摘要 研究海平面变化与生物多样性及其演化之间的耦合关系, 对于进一步认识地球环境变化对生物演化的影响、探索地史时期的生命-环境协同演化规律具有重要意义. 对陕西镇安西口地区晚石炭世逍遥期至早二叠世隆林期筳类化石的地层分布资料进行了定量分析, 探讨了筳类物种分异度与相对海平面变化之间的关系. 从总体上看, 研究区的筳类动物群物种数在这一时期经历了一次快速的上升和一次明显的下降. 在石炭-二叠纪之交, 筳类物种分异度骤然增加, 是一次极为明显的生物辐射事件, 代表假希瓦格筳亚科的新生. 结合层序地层和海平面变化研究表明, 筳类的物种分异度与其在旋回层序中的产出位置关系密切, 受海平面特别是高频海平面变化控制明显. 在海平面快速上升形成的高频旋回下部单元, 筳类物种分异度小, 首现和末现物种数也较少; 在海平面缓慢下降形成的高频旋回上部单元, 筳类物种分异度增大, 首现和末现物种数也较多. 在三级层序的初始海泛面和最大海泛面等关键界面上, 筳类的物种分异度较低, 其上物种数呈增加趋势; 在三级层序内部, 海进体系域中筳类物种分异度不大, 而在高位体系域中筳类物种分异度增大. 二级海平面升降与高级别筳类单位的盛衰对应关系较为明显.

关键词 筳类 物种分异度 层序地层 海平面变化 石炭-二叠系界线 陕西镇安

化石是生物发生、发展、衰亡乃至灭绝的最直接记录. 利用化石记录研究地质历史时期的生物多样性及其演化是古生物学的基本目标之一^[1]. 近几十年来, 通过对显生宙海洋无脊椎动物全球数据库的建立, 确定了生物多样性的变化曲线, 提出了地球历

史上的几次生物大灭绝, 使得地史时期生物多样性和生物集群灭绝等方面的研究成为古生物学领域的一个研究热点^[2~9]. 筳类动物地理分布广泛、形态演化迅速, 是石炭-二叠纪时期海洋无脊椎动物中的一个重要类群. 研究筳类动物群物种分异度及其变化

收稿日期: 2004-12-07; 接受日期: 2005-11-23

^{*} 国家自然科学基金(批准号: 40172014)和中国科学院知识创新工程重要方向(批准号: KZCX3-SW-143)资助项目

^{**} 联系人, E-mail: wxl@cugb.edu.cn

过程, 对于认识海相无脊椎动物在石炭-二叠纪演化过程、演化形式具有重要的意义^[4,10]. 近年来, 一些研究者依据中国华南丰富的筳类化石及地层资料, 建立了该地区筳类化石复合标准序列, 在筳类动物的演化形式、各类群分异度变化的差异、灭绝速率、灭绝过程、筳类不同类群在灭绝过程中的差异等方面的研究中, 取得了一系列的重要成果^[11~14].

地球表层是一个大气圈、水圈、岩石圈和生物圈相互作用的系统, 地史时期生物的演化与其当时所处的地球环境密切相关. 海平面的持续、周期性升降变化可导致众多海洋环境条件发生变化, 必将对海洋生物的生存与演化产生一定影响. 自Newell^[15]以来, 海平面变化与大的集群绝灭事件之间的关系引起了人们的注意^[16~21]. 通常认为, 海退导致海洋陆架面积减小, 生物生存压力增大, 从而引起生物集群绝灭; 而快速海进引起海洋缺氧, 也可导致海洋生物大规模绝灭^[22,23]. Walliser^[24]也认为, 许多全球性“生物事件”与大范围海侵-海退旋回之间有着不可分割的联系. 这些研究在论述生物多样性与层序地层及海平面变化关系时, 通常涉及范围较广, 时间跨度较大, 生物化石资料多为科或属一级的, 层序地层及海平面变化多引用综合的全球海平面变化, 而小区域的详细研究很少见到, 单剖面具体实例更是鲜见报道. 最近, 刘家润等^[25]分析了贵州盘县火铺镇中二叠世茅口期海平面变化对筳类动物群构成及演替的影响后认为, 相对海平面变化幅度和速率是造成筳类动物群面貌改变的重要因素.

研究海平面变化与海洋生物多样性及其演化之间的耦合关系, 对于进一步认识地球环境变化对生物演化的影响、探索地史时期的生命-环境协同演化规律具有重要的意义. 陕西镇安西口石炭-二叠系界线剖面地层发育良好, 筳类动物化石丰富, 研究系统深入, 为我们探讨筳类演化与层序地层及海平面变化的关系提供了一个难得的实例. 选择单个连续剖面的数据进行统计分析, 排除了大区域综合资料可能出现的一些统计偏差, 有利于进一步补充验证大区域综合资料所揭示的生物多样性及其变化规律, 同时也更适合具体地探讨筳类物种分异度与海平面变化的确切关系. 在前人详细的生物地层学和沉积

学研究的基础上, 本文将首先对研究区筳类生物的物种分异度、首现数和末现数等参数进行统计分析, 总结剖面上各种参数的变化规律, 识别出主要筳类生物演化事件, 然后将其置于层序地层格架中分析对比, 最后探讨筳类生物多样性与海平面变化的关系.

1 地质背景和工作方法

陕西镇安西口石炭-二叠系界线剖面(包括三里冲剖面及石门垭东、西侧剖面)是中国海相石炭-二叠系界线典型剖面之一(图 1). 剖面厚 259~342 m, 由巨厚层或块状碳酸盐岩组成, 沉积连续, 化石丰富, 出露极佳. 剖面生物地层特别是筳类生物地层研究程度很高, 许多学者^[26~33]曾对该剖面进行过详细研究, 积累了大量的实际资料. 前人的工作为我们进一步的深入研究打下了坚实基础, 但他们的研究多侧重于属种描述和生物地层分带工作, 而定量的分析研究并不多见. 按最新的年代地层划分方案^[33], 陕西镇安西口石炭-二叠系界线剖面由下而上划分出上石炭统逍遥阶、“下杨家河阶”和下二叠统“上杨家河阶”、“范家河阶”、“垭口阶”及隆林阶. 其中, “下杨家河阶”、“上杨家河阶”、“范家河阶”和“垭口阶”分别相当于中国区域年代地层表^[34]中的紫松阶的底部、下部、中部和上部.

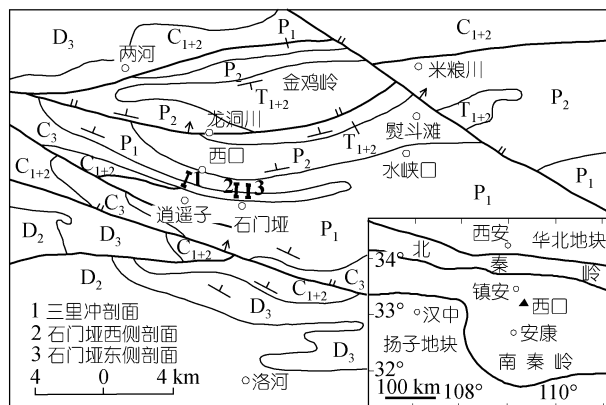


图 1 陕西镇安西口一带地层分布和剖面位置图

最近, 张海军等^[35,36]对该剖面的碳酸盐岩微相及沉积环境、层序地层及海平面变化进行了详细研

究. 沉积学研究表明, 陕西镇安西口石炭-二叠系界线剖面碳酸盐岩可划分出含生物碎屑灰泥灰岩、生物碎屑粒泥灰岩、生物碎屑泥粒灰岩、生物碎屑颗粒灰岩、团块颗粒灰岩和核形石颗粒灰岩等 6 种主要的微相类型. 它们主要形成于开阔台地浅滩、滩间、台地边缘浅滩及藻丘等沉积环境, 基本上相当于 Wilson^[37] 沉积模式的 6~7 相带. 在野外观察的基础上, 通过详细的微相特征分析, 确定碳酸盐岩沉积过程中的水动力状况和相对水深变化趋势, 识别出低能潮下型碳酸盐旋回 A1, A2 及高能浅滩型碳酸盐旋回 B1, B2 两类四种高频旋回 31 个. 根据这些高频旋回在 一 剖面上的有序叠置型式, 将镇安西口地区的上石炭统逍遥阶至下二叠统隆林阶划分出 12 个四级层序和 5 个 II 型三级层序地层单元. 需要说明的是, 由于陕西镇安西口石炭-二叠系界线剖面沉积连续, 无明显的暴露和地层缺失, 层序界面表现为整合的地层界面, 因此, 本文采用殷鸿福等^[38] 和王训练^[39] 的意见, 将层序分界置于初始海泛面处. 在详细的生物地层格架内, 这些沉积层序及其相应的海平面变化与黔南同期地层的相关研究成果之间具有较好的对应关系^[36].

野外工作中首先找到前人^[30~33] 的化石采样点,

再系统详测剖面, 并进行全剖面采样. 室内以夏国英等^[32,33] 的生物地层资料为基础同时参考其他研究成果^[26~31], 对研究区筳类化石的地层分布资料进行了详细整理, 并分别按化石带、厚度及采样点对筳类属种的物种分异度、首现数和末现数进行了统计计算. 对筳类动物群的物种分异度等演化参数进行各种对比、分析, 识别出可能的生物演化事件并确定其发生的相应层位. 将系统的筳类采样点统计数据置于层序地层格架中, 分析、对比各级旋回层序内部及其关键界面的筳类物种数; 在此基础上, 总结筳类化石的地层分布规律, 探讨筳类动物群演化与各级海平面变化关系.

2 筳类演化事件——分异度及其变化

经统计, 陕西镇安西口三里冲剖面筳类共计 29 属(包括亚属)298 种(包括亚种), 划分为 13 个筳类化石带^[33]. 其中逍遥阶下部的 MO(全称见表 1, 下同)、TA 和 TS 带总共有 13 m, 不宜单独统计, 本文将其合并为一个化石带参加统计, 并将其命名为 TR 带^[32]. 三里冲剖面及西口地区的各化石带的筳类物种分异度、首现物种数、末现物种数及厚度如下表所列(表 1).

表 1 陕西镇安西口地区筳类动物群物种分异度统计

年代地层	筳类化石带		三里冲剖面				西口地区	
	全称	简称	物种分异度	首现物种数	末现物种数	化石带厚度/m	物种分异度	化石带平均厚度/m
隆林阶	<i>Parmirina darvasica</i>	PV	2	2	2	46	55	41
	<i>Nagatoella-Darvasites</i>	ND	3	3	3	28	62	30
	<i>Mccloudia certa-Pamirina firma</i>	MF	8	6	8	24	51	20
紫	<i>Pseudofusulina urdalensis</i>	PU	22	15	21	68	48	75
	<i>Mccloudia regularis</i>	MPR	75	63	69	49	80	49
	<i>-Paraschwagerina fragosa</i>							
松	<i>-Robustoschwagerina xiaodushanica</i>	RV	36	31	26	14	48	11
	<i>Robustoschwagerina vesplicata</i>							
	<i>-Sphaeroschwagerina sphaerica</i>	SF	50	42	44	18	74	19
阶	<i>Sphaeroschwagerina moelleri</i>							
	<i>-Pseudofusulina foecunda</i>	PD	56	48	51	16	98	16
	<i>Pseudofusulina krotowi sphaerodea</i>							
	<i>-Dunbarinella</i>	OS	56	52	44	11	69	10
	<i>Occidentoschwagerina alpina</i>							
	<i>-O. postgallowayi</i>	PE	8	7	4	14	19	12
逍遥阶	<i>Pseudofusulina foecunda</i>							
	<i>-Eoparafusulina ferganensis</i>	TR	30	30	27	13	44	21
	<i>Triticites</i>							

研究发现,在三里冲剖面上,筳类物种分异度、首现物种数及末现物种数三者在同一化石带内部具有较好的正相关性. 高分异度动物群具有较高的物种新生和绝灭演化速率,反之,低分异度种群具有较低的物种演化速率(图 2). 这很可能暗示了整个筳类动物群的演化主要受环境因素控制. 生存环境适宜,筳类演化迅速,物种分异度、新生物种数及绝灭物种数均高;生态环境恶劣,筳类演化缓慢,物种分异度低,新生和绝灭物种数也少.

从总体上看,三里冲剖面及西口地区晚石炭世道遥期至早二叠世隆林期筳类动物群物种数经历了一次快速的上升和一次明显的下降,物种分异度曲线呈现出一个明显的峰值,与同期华南筳类动物群演化趋势基本一致^[13]. 研究区的筳类动物群在道遥期TR带和PE带物种数较低,从紫松期初期OS带开始迅速增加,在紫松期早期(PD带、SF带和RV带)一直保持相对稳定的高分异度状态,从紫松期中期MPR带开始筳类动物群物种分异度急剧下降,此后一直到隆林期PV带呈长期低迷状态(图 2 和 3).

在三里冲剖面上,晚石炭世道遥期至早二叠世隆林期(TR-PV 带)可分为两个筳类生物演化阶段,即TR-SF 带演化阶段和RV-PV 带演化阶段. 前者整体以筳类动物群新生为特征,后者整体以筳类动物群衰退为特征. 在前一阶段演化阶段,TR、PE 和 OS 带首现物种数大于末现物种数,表明动物群处于新生阶段,对应以 *Obsoletes*, *Montiparus* 及 *Pseudotriticites*

为标志的希瓦格筳科的新生和以 *Occidentoschwagerina* 为标志的假希瓦格筳亚科的新生;PD和SF带末现物种数大于首现物种数,表明动物群处于衰退阶段,对应以 *Triticites* 为代表的初期动物群衰退^[32]. 在后一阶段演化阶段,RV带首现物种数大于末现物种数,表明动物群再次处于新生阶段,对应以 *Sphaeroschwagerina* 和 *Robustoschwagerina* 为代表的动物群的新生;MPR和PU带及之后,末现物种数大于首现物种数,表明早二叠世动物群整体处于衰退阶段^[32](图 2).

进一步研究表明,以化石带为单位统计的筳类物种分异度变化规律与该化石带的厚度相关,如图 3(a)和 3(c)中的MPR和PU带,按化石带简单统计和按化石带单位厚度统计两种统计结果相差悬殊. 三里冲剖面上MPR带产出 75 种筳类,物种分异度居各化石带之首,其厚度为 49 m,单位厚度(本文按 10 m 统计,下同)上物种数为 15,在 11 个化石带中仅居第 6 位,处于中下水平. 考虑到剖面岩石为相对均一的浅水台地相灰岩,各化石带平均沉积速率基本上无显著差别,因此,本文认为去掉厚度(时间)因素可能更反映近真实情况^[40].

以紫松阶中部PU带底界为界,PU带之下三里冲剖面的筳类物种分异度与西口地区的筳类物种分异度变化趋势几乎完全一致,三里冲剖面上的筳类物种分异度占整个西口地区的筳类物种分异度的 69%(按化石带平均). PU 带之上,三里冲剖面的筳类

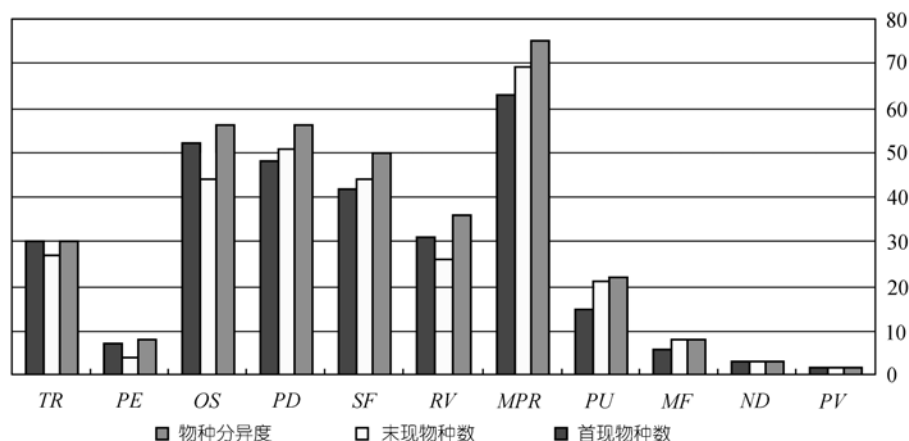


图 2 镇安西口三里冲剖面筳类动物群物种分异度的变化

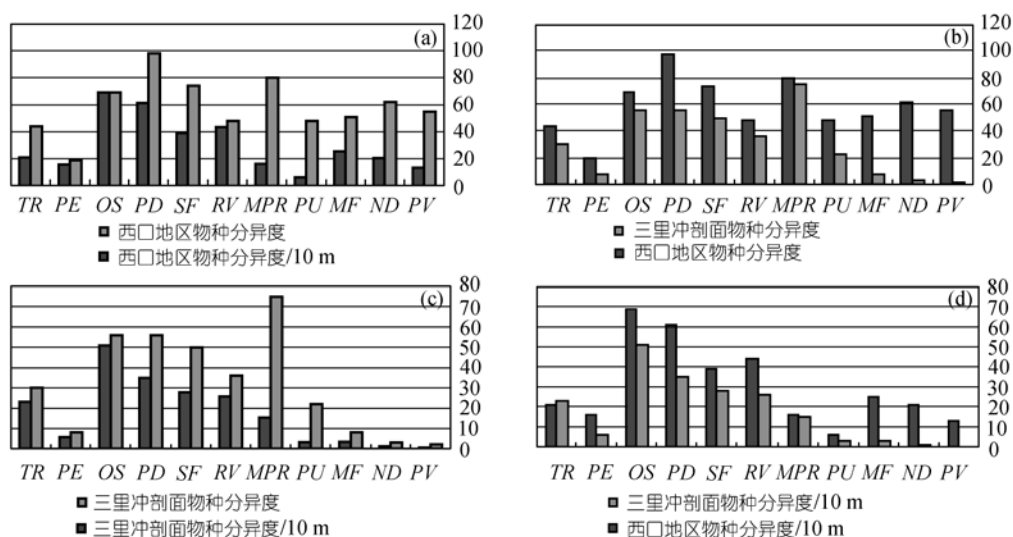


图3 镇安西口地区及三里冲剖面筳类动物群物种分异度的变化

物种分异度与西口地区的筳类物种分异度变化趋势明显不同,三里冲剖面上的筳类物种分异度仅占整个西口地区的筳类物种分异度的8%(按化石带平均)(图3(b), (d)).因此,PU带之下的三里冲剖面上的筳类物种分异度变化可以代表整个镇安西口地区的筳类物种分异度变化特征。

紫松期初期(即OS带)是物种分异度突然增加的时期。如果按照单位厚度上的物种分异度计算,OS带是物种分异度最大的层段。就物种增加的数量而言,OS带构成了研究区晚石炭世-早二叠世规模最大的筳类动物群辐射演化事件。如在西口地区,OS带内每10m的地层中筳类物种分异度达69种之多,而OS带之下的PE带仅为16种。这一特点在三里冲剖面表现更为突出。三里冲剖面OS带内每10m的地层中筳类物种分异度为51种,比其上仅次于它的PD带(35种)多16种,而其下的PE带仅为6种。在OS带之上,西口地区筳类物种分异度开始下降并一直持续到PA带(13种),其中仅在MF带出现小的起伏,但分异度仅达到26种(图3(d))。

3 筳类演化事件与海平面变化的关系

由前述可知,紫松阶中上部PU带之下的三里冲剖面的筳类物种分异度与镇安西口地区的筳类物种分异度变化趋势几乎完全一致,可以代表整个西口

地区的筳类物种分异度变化特征。下面以三里冲剖面TR-PU带的实际材料来探讨晚石炭世晚期-早二叠世早期陕西镇安西口地区筳类动物群物种分异度的变化与海平面变化的关系。

将按化石采集点^[32]统计的筳类物种分异度与层序地层综合柱状图^[36]并列于图4。研究发现,筳类化石的产出特征与碳酸盐岩微相类型联系密切。筳类物种分异度低的化石采集点,多数产在低能的灰泥质灰岩中;筳类物种分异度高的化石采集点,多数产在高能的颗粒质灰岩中。筳类物种分异度极高的化石采集点,无一例外地位于颗粒灰岩中。如分异度最高的化石采集点Qx21,产出高达27种筳类化石,保存于剖面第11层的典型颗粒灰岩中;仅次于的Qx47采集点,含24种筳类化石,产于第24层的高能颗粒灰岩中(图4)。进一步研究发现,三里冲剖面的筳类动物群产出与其在旋回层序中的相对位置关系密切,在沉积旋回的不同位置筳类的物种分异度明显不同。通常在高频旋回的下部单元,多为较深水低能的灰泥支撑灰岩,筳类物种分异度小,首现和末现物种数也较少;在高频旋回的上部单元,多为较浅水中高能的颗粒支撑灰岩,筳类物种分异度增大,首现物种数和末现物种数也较多。

镇安西口三里冲剖面的不同级别和各种类型的沉积旋回都是相对海平面变化控制下沉积作用的产

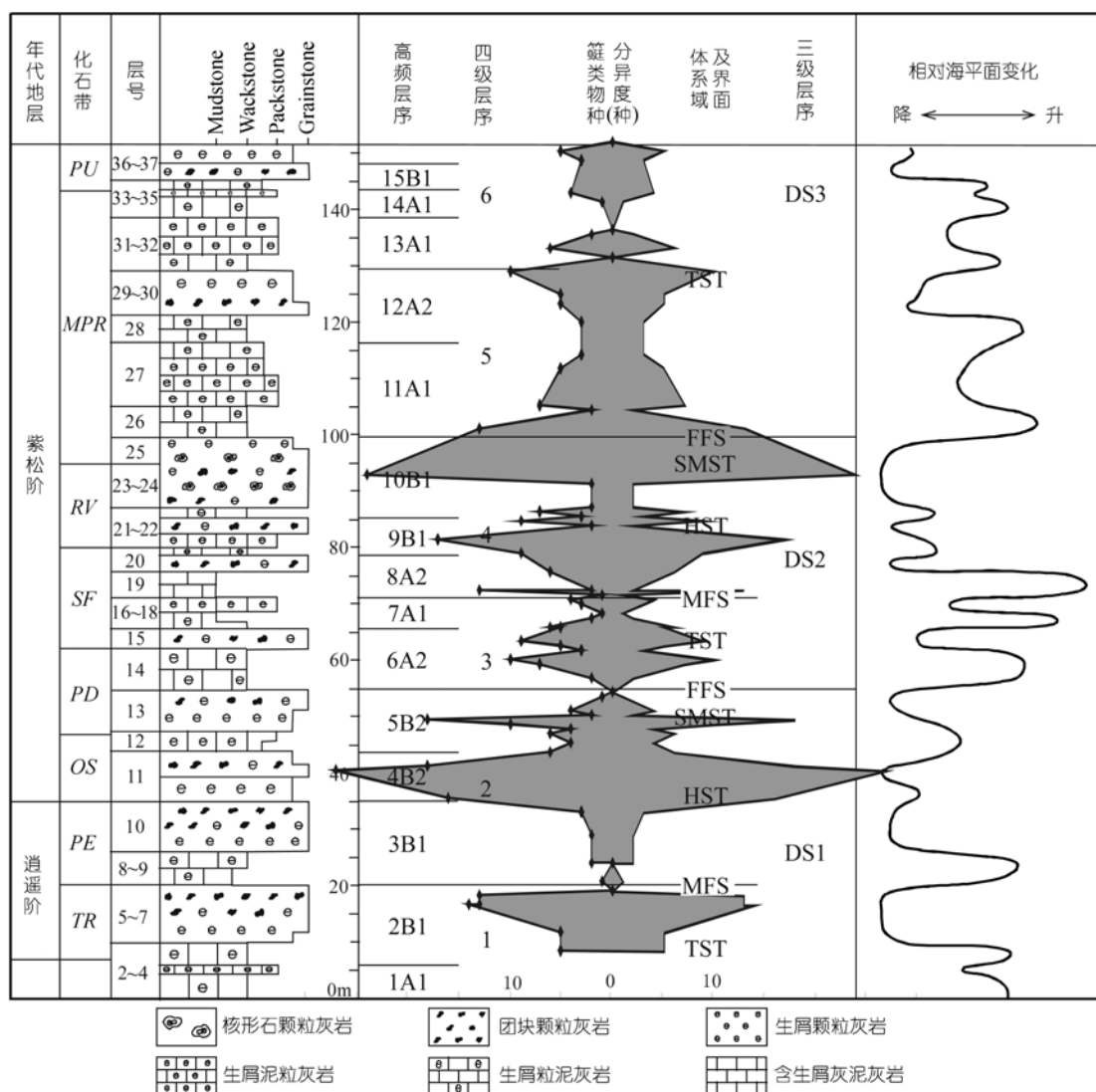


图 4 镇安西口三里冲剖面筳类动物群物种分异度的变化与海平面变化的关系

物。高频旋回是冰川型海平面震荡的产物，其时限大体相当于米兰科维奇的长偏心率周期。高频旋回在剖面上表现最为明显，其他级别的旋回层序都由高频旋回叠置而成，代表长时限相对海平面变化控制下沉积作用的产物¹⁾。筳类化石在剖面岩石中的产出与岩石在沉积旋回中的相对位置之间存在明显的对应关系，实质上表明研究区筳类动物群的产出受到相对海平面变化控制。事实上，海平面升降直接造成

浅海水深发生改变，从而导致浅海底栖生物的生活环境的诸多因素随之变化，如温度、盐度、含氧量、透光性、水动力条件、底质性质以及养料等。因此，从生态学角度考虑，海平面变化必然会对包括筳类动物在内的浅海底栖生物群的生存与演化产生重要的影响。在晚石炭世至早二叠世期间，冰川型海平面变化较为发育，这种高频海平面变化通常可分为海平面快速上升的早期阶段和海平面缓慢下降的晚期阶

1) 张海军. 陕西镇安西口石炭-二叠系界线剖面综合地层学研究. 中国地质大学(北京)博士学位论文, 2004

段^[41,42]。在陕西镇安西口地区的碳酸盐岩台地上,海平面快速上升时期(形成高频旋回的下部单元),筳类物种分异度小、首现和末现物种数也较少,反映当时海水突然加深,温度、含氧量等生态因素剧变,筳类难以及时适应。随后,海平面缓慢下降(形成高频旋回的上部单元),温度、含氧量等生态因素逐渐恢复正常,筳类的适应能力也有所增强,这样筳类进入快速演化阶段,物种分异度、首现物种数、末现物种数以及丰富度都迅速增加。

三级层序是由高频旋回有序叠置而成,代表长时限相对海平面变化控制下沉积作用的产物。既然高频海平面变化对筳类动物群的产出具有明显的控制作用,那么三级海平面变化与筳类动物群演化之间必然存在着某种客观联系。殷鸿福等^[38]在讨论层序地层界面和年代地层界线的关系时就涉及了海平面变化和生物演化的问题。王训练^[39,43,44]详细论述了三级层序及海平面变化与生物群演替的一般关系,他们认为:“层序界面上常常表现为生物的集群绝灭或急剧衰退,初始海泛面上通常表现为生物爆发式演化或重要的辐射演化,最大海泛面既不是一个生物集群绝灭面也不是一个生物爆发面,甚至不是一个重要的生物辐射面。在最大海泛面上通常仅会发生一些次级生物辐射演化事件。低位体系域或陆架边缘体系域形成阶段,生物稀少,分布范围小,而且大多都是前一个层序时期的残余分子;海进体系域形成阶段,生物逐渐繁盛,分布范围不断扩大,但一般没有重大演化事件发生;早期高位体系域形成阶段,生物依然保持繁盛;至晚期高位体系域形成阶段,生物逐渐衰退,分布范围不断缩小。”同时他们还发现,“首要标准类群首次出现的位置常不同程度的高于其所在层序的初始海泛面”,“从初始海泛面到首要标准类群首次出现这一段地层中没有标准类群化石出现”,并给出了4种可能的原因^[43,44]。

与王训练等^[44]的论述一致,在研究区镇安西口,通常在初始海泛面和最大海泛面等明显的三级层序关键界面上筳类的物种分异度较低,其上物种数呈不同程度的增加趋势。这很可能是由于筳类成种作用稍微滞后于相对快速的海平面上升。

与王训练等^[44]的总结有所不同,在研究区的海

进体系域中,筳类物种分异度不大,首现和末现物种数也较少;而在高位体系域中,筳类物种分异度增大,首现和末现物种数也较多。如三里冲剖面单个化石采集点物种分异度超过15的四次峰值全部位于层序的高位体系域内(图4)。这可能与研究区当时所处的沉积古地理位置有关。晚石炭世逍遥期至早二叠世隆林期镇安西口地区总体上属于相对开阔远岸的碳酸盐沉积环境,初始海进后海平面快速升高,碳酸盐生产速率受到一定抑制,海进体系域这种相对深水环境对底栖的筳类生存不利;而在高位体系域中,海进趋缓,碳酸盐生产速率恢复,两者可大体保持同步,形成很厚的碳酸盐沉积,这种环境对筳类生存较为适宜,因此,高位体系域中筳类物种分异度要比海进体系域中大。筳类动物群在三级层序内部的这种分布特点与其在高频旋回中的产出情形大体一致,但表现得不如高频旋回中明显。这很可能受控于当时的古气候背景,与冰室时期海平面变化的特点有关。在碳酸盐台地上,冰川型海平面变化具有幅度大、频率高的特点,而由其叠加形成的复合海平面反而不很明显^[41,42]。

二级层序及海平面变化与筳类动物群产出关系似乎较为明显。陕西镇安西口地区晚石炭世逍遥期-早二叠世隆林期整体为一个二级层序,在这个二级层序中筳类动物群物种数总体上经历了一次快速的上升和一次明显的下降,物种分异度曲线呈现出一个明显的峰值。二级层序及海平面变化与筳类动物群产出的这种对应关系在中国华南有很好的体现。华南的晚石炭世-早二叠世马平组为一个二级层序,在其上下界面,筳类物种分异度较低,而其内部,筳类动物群较为繁盛。在整个二级层序内部,大体上是一个假希瓦格筳动物群新生-繁荣-衰落的过程。同样,费伯格筳类和新希瓦格筳类的盛衰也分别与华南中二叠世栖霞组和茅口组二级海平面升降变化过程相对应。

筳类动物群产出与其在旋回层序中的位置密切相关,受相对海平面特别是高频海平面变化控制明显。这不是陕西镇安西口石炭-二叠系界线剖面的特有现象。很可能,海平面变化与海洋底栖生物之间的这种耦合关系在地质历史时期具有一定的普遍性,

是地史时期的生命-环境协同演化规律的一种具体表现形式. 高频旋回是剖面上最基本的旋回层序, 其他级别的旋回层序都由高频旋回叠置而成; 而物种是生物分类的基本单位. 因此, 高频海平面变化与筳类动物群物种分异度的关系很可能是露头尺度上生命-环境协同演化关系的一种基本形式; 而二级海平面变化与高级别筳类单位的对应关系, 很可能是海平面变化与海洋底栖生物之间在更高层次上耦合关系体现. 当然, 这一初步结论主要是根据陕西镇安西口石炭-二叠系界线剖面的有限材料得出的, 有待于今后更多的实际工作的检验.

4 结论

对陕西镇安西口石炭-二叠系界线剖面筳类化石的地层分布资料进行了定量分析, 统计数据研究表明: 在三里冲剖面上, 筳类物种分异度、首现物种数及末现物种数三者在同一化石带内部具有较好的正相关性. 以化石带为单位统计的筳类物种分异度变化规律与该化石带的厚度相关, 去掉厚度因素可能更反映真实情况. 从总体上看, 三里冲剖面及西口地区晚石炭世逍遥期至早二叠世隆林期筳类动物群物种数经历了一次快速的上升和一次明显的下降. 在西口地区的紫松阶底部 OS 带, 筳类物种分异度骤然增加, 是一次极为明显的生物辐射事件, 代表假希瓦格筳亚科的新生.

将研究区筳类化石采样点数据置于层序地层格架中, 进一步研究发现: 三里冲剖面的筳类动物群产出与其在旋回层序中的相对位置对应关系明显, 受到相对海平面变化的控制. 通常, 在海平面快速上升时期, 形成高频旋回的下部单元, 岩性多为较深水低能的灰泥质灰岩, 岩石中筳类物种分异度小, 首现和末现物种数也较少; 在海平面缓慢下降时期, 形成高频旋回的上部单元, 多为较浅水中高能的颗粒质灰岩, 岩石中筳类物种分异度增大, 首现物种数和末现物种数也较多. 在三级层序的初始海泛面和最大海泛面等关键界面上, 筳类的物种分异度较低, 其上物种数呈增加趋势, 在三级层序内部筳类动物群产出与其在高频旋回中的情形大体一致, 但表现得不如高频旋回中明显. 二级海平面变化与高级别筳类单

位的盛衰相对应关系较为明显. 很可能, 海平面变化与海洋底栖生物之间的这种耦合关系在地质历史时期具有一定的普遍性, 是地史时期的生命-环境协同演化规律的一种具体表现形式.

参 考 文 献

- 1 Smith A B. Large-scale heterogeneity of the fossil record: implications for Phanerozoic biodiversity studies. *Philosophical Transactions of the Royal Society B*, 2001, 356: 351~367[DOI]
- 2 Sepkoski J J Jr, Bambach R K, Raup D M, et al. Phanerozoic marine diversity and the fossil record. *Nature*, 1981, 293: 435~437[DOI]
- 3 Raup D M, Sepkoski J J Jr. Mass extinctions in the marine fossil record. *Science*, 1982, 215: 1501~1503
- 4 Jin Y G, Zhang J, Shang Q H. Two phases of the end-Permian mass extinction. *Canadian Society of Petroleum Geologists*, 1994, *Memoir* 17, 813~822
- 5 Shen S Z, Shi G R. Diversity and extinction patterns of Permian Brachiopoda of South China. *Historical Biology*, 1996, 12: 93~110
- 6 Rong J Y, Harper D A T. Brachiopod survival and recovery from the latest Ordovician mass extinctions in South China. *Geological Journal*, 1999, 34: 321~348[DOI]
- 7 Jin Y G, Wang Y, Wang W, et al. Pattern of Marine Mass Extinction Near the Permian-Triassic Boundary in South China. *Science*, 2000, 289: 432~436[DOI]
- 8 Rong J Y, Shen S Z. Comparative analysis of the end-Permian and end-Ordovician brachiopod mass extinction and survivals in South China. *Palaeogeogr Palaeoclimat Palaeoecol*, 2002, 188: 25~38[DOI]
- 9 Shen S Z, Shi G R. Paleobiological extinction patterns of Permian brachiopods in the Asian-western Pacific region. *Paleobiology*, 2002, 28(4): 449~463
- 10 Stanley S M, Yang X N. A Double Mass Extinction at the End of the Paleozoic Era. *Science*, 1994, 266: 1340~1344
- 11 杨湘宁, 周建平, 刘家润, 等. 二叠纪“茅口期”筳类动物的演化型式. *中国科学, D 辑*, 1999, 29(2): 129~136
- 12 杨湘宁, 施贵军, 刘家润, 等. “茅口期”筳类灭绝过程中的类群间差异. *中国科学, D 辑*, 2000, 32(2): 159~162
- 13 史宇坤, 杨湘宁. 华南早-中二叠世筳类物种分异度变化过程的统计验证. *中国科学, D 辑*, 2004, 34(11): 1041~1046
- 14 Yang X N, Liu J R, Shi G J. Extinction process and patterns of Middle Permian Fusulinaceans in southwest China. *Lethaia*, 2004, 37 (2): 139~147[DOI]
- 15 Newell N D. Revolutions in the history of life. *Geological Society of America Special Paper* 89, 1967, 63~91
- 16 Brett C E. Sequence stratigraphy, biostratigraphy and taphonomy in shallow marine environments. *Palaaios*, 1995, 10: 597~616

- 17 Holland S M. The stratigraphic distribution of fossils. *Paleobiology*, 1995, 21: 92~109
- 18 Schaaf A. Sea-level changes, continental shelf morphology, and global paleoecological constraints in the shallow benthic realm: a theoretical approach. *Palaeogeogr Palaeoclimat Palaeoecol*, 1996, 121: 259~271[DOI]
- 19 Brett C E. Sequence stratigraphy, paleoecology and evolution: biotic clues and responses to sea-level fluctuations. *Palaaios*, 1998, 13: 241~262
- 20 Gale A S, Smith A B, Monks N E A, et al. Marine biodiversity through the Late Cenomanian–Early Turonian: paleoceanographic controls and sequence stratigraphic biases. *J Geol Soc London*, 2000, 157: 745~757
- 21 Holland S M. The quality of the fossil record: a sequence-stratigraphic perspective. In: Erwin D H, Wing S L, eds. *Deep Time: Paleobiology's Perspective*. *Paleobiology*, 2000, 26(suppl): 148~163
- 22 Hallam A, Wignall P B. Mass extinctions and sea-level changes. *Earth-Science Reviews*, 1999, 48: 217~250[DOI]
- 23 Smith A B, Gale A S, Monks N E A. Sea-level change and rock-record bias in the Cretaceous: a problem for extinction and biodiversity studies. *Paleobiology*, 2001, 27: 241~253
- 24 Walliser O H. Global bio-events, in *Proceedings of the First International Meeting of the IGCP Project 216 "Global Biological Events in Earth History"*. Heidelberg: Springer-Verlag, 1986. 1~442
- 25 刘家润, 杨湘宁, 施贵军, 等. 茅口期相对海平面变化对鲢类动物群的影响--以贵州盘县火铺镇茅口组剖面为例. *古生物学报*, 2000, 39(1): 120~125
- 26 王国莲, 孙秀芳. 秦岭石炭二叠纪有孔虫及其地质意义. *地质学报*, 1973, 47(2): 137~178
- 27 丁培榛, 金同安, 孙秀芳. 东秦岭陕西镇安西口二叠系. *中国地质科学院西安地质矿产研究所所刊*, 1983, 第6号: 99~103
- 28 丁培榛, 金同安, 孙秀芳. 陕西镇安西口二叠纪地质旅行指南. *中国地质科学院西安地质矿产研究所所刊*, 1987, 第15号: 113~138
- 29 丁培榛, 金同安, 孙秀芳. 东秦岭陕西镇安西口地区二叠纪地层及动物群. *中国地质科学院西安地质矿产研究所所刊*, 1989, 第25号: 1~68
- 30 丁蕴杰, 夏国英, 李莉, 等. 东秦岭陕西镇安西口地区石炭系-二叠系界线及生物群. *中国地质科学院天津地质矿产研究所所刊*, 1991, 第24号: 1~202
- 31 丁蕴杰, 夏国英, 许寿永, 等. *中国石炭-二叠系界线*. 北京: 地质出版社, 1992. 1~170
- 32 夏国英, 丁蕴杰, 丁惠, 等. *中国石炭-二叠系界线层型研究*. 北京: 地质出版社, 1996. 1~200
- 33 夏国英, 丁蕴杰. 中国上石炭统上部及下二叠统海相地层中阶的划分. *中国地质*, 2002, 29(1): 20~29
- 34 全国地层委员. 中国区域年代地层(地质年代)表. *地层学杂志*, 2001, 25(增刊): 359~360
- 35 张海军, 王训练, 夏国英, 等. 陕西镇安西口石炭系/二叠系界线剖面碳酸盐岩微相特征与沉积环境的研究. *现代地质*, 2003, 17(4): 387~394
- 36 张海军, 王训练, 夏国英, 等. 陕西镇安西口石炭-二叠系界线剖面层序地层和相对海平面变化研究. *地质通报*, 2004, 23(4): 336~344
- 37 Wilson J L. *Carbonate facies in geological history*. Berlin, Heidelberg, New York: Springer-Verlag, 1975. 1~471
- 38 殷鸿福, 童金南. 层序地层界面与年代地层界线的关系. *科学通报*, 1995, 40(6): 539~541
- 39 王训练. 露头层序地层学研究的几个基本理论问题. *中国科学, D辑*, 1999, 29(1): 22~30
- 40 沈树忠, 张华, 李文忠. 古生物多样性统计中的偏差及其校正. *古生物学报*, 2004, 43(3): 433~441
- 41 Tucker M E, Wright V P. *Carbonate sedimentology*. Oxford: Blackwell Scientific Publications, 1990. 1~547
- 42 Wright V P, Vanstone S D. Onset of Late Palaeozoic glacio-eustasy and the evolving climates of low latitude areas: a synthesis of current understanding. *J. Geol Soc. London*, 2001, 158: 579~582
- 43 王训练. 从综合地层学的观点论全球界线层型剖面点(GSSP)的步骤和方法. *中国科学, D辑*, 2002, 32(5): 358~367
- 44 王训练, 苏文博. 选择全球界线层型剖面点(GSSP)的一个重要参考. *科学通报*, 1999, 44(18): 2008~2016