

文章编号:1004-7824(1999)04-0061-12

海平面及海平面变化综述

李祥辉, 张 洁

(成都理工学院 沉积地质研究所, 四川 成都 610059)

摘要:分析总结了海平面及海平面变化的有关问题,如相关概念及其关系的理解,海平面变化旋回等时性及可对比性,海平面升降曲线的表示方法、内容及绘制技术与原理,其升降幅度的量化计算和模拟,海平面变化成因的旋回级别、动态分异及成因标识,海平面变化对沉积盆地的影响等等。提出部分建议,包括理清海平面与海平面变化,海平面升降与振荡、波动,全球与相对、高频、复合海平面, T-R 旋回与海平面变化等概念;限定其概念的外延、内涵及其之间的关系,以及三、四级海平面变化旋回用于同一大陆或泛大陆的对比性;分清各种表示方法、技术的使用范围,相对水深曲线转换为海平面升降曲线过程中成岩作用、构造沉降、沉积(生产)速率的影响校正及定量模拟;在海平面变化旋回级次格架下结合两种思路进行成因分析;推荐相对海平面升降成因分析按曲线对比法→构造沉降→回剥法思路进行;建议加强海平面升降变化对盆地充填响应的研究;重视对沉积矿床的控制和大陆边缘地壳变形的反弹作用过程及定量模拟。

关键词:海平面;海平面变化;概念含义和关系;曲线方法;变化成因;充填响应

中图分类号:P512.32

文献标识码:A

海平面及海平面变化有着悠久的历史,但真正认识到海平面变化对人类自生的影响始于十七世纪,而对于地质历史时期的海平面变迁史则建立于更早的“水成说”。十八世纪 Lyell、Runeberg、Frisoni、Tellamed 的有关海平面概念及成因假说对后期研究有着深远影响。十九世纪末到本世纪初 Suess 的构造与充填海平面变化、Deli 的冰川海平面、Chamblin 的灾变海平面、Grabau 的全球海平面等假说标志着关于全球海平面变化认识的日趋成熟。60 至 70 年代,在本世纪上半叶大量实际工作基础上,海平面变化成因研究升华到了一个新的高度,提出了海平面振荡、水均衡、负荷模式、重力模式、洋脊扩张模式、全球海平面升降及地震海平面曲线概念等等。70 年代末至今,海平面变化研究进入了一个新的历史时期,除了在上述理论基础上补充发展外,在以下方面取得了重大进展:(1)层序地层学与海平面变化^[1];(2)全球海平面变化升降曲线样板^[2];(3)构造、全球海平面及沉积作用三位一体^[3];(4)活动构造背景下的海平面变化样式^[4];(5)天外撞击事件引起的全球海平面变化^[5];(6)海平面变化与古气候^[6];(7)海平面升降幅度的定量测定及海平面曲线模拟^[6];(8)与米兰柯维奇有关的高频海平面变化机制^[7];(9)海平面变化的稳定同位素及微量元素效应^[8];(10)海平面变化对

沉积盆地充填的影响及控矿作用等。这一时期出版的专著^[4,8-12]及大量的相关研究文献充分说明了海平面变化的研究成果,其理论之深入、内容之丰富、范围之广泛足以反映海平面变化研究是 80、90 年代地质学领域的一大热门学科和综合学科。

我国对海平面变化的研究起步较晚,80 年代末至 90 年代初仅有少量综述和编译性文章^[13-15],其后陆续才有一些研究实例。这一时期,《岩相古地理》、《地球科学》等专业杂志刊载了较多的相关论文,对海平面变化研究做出了重要贡献。综合起来,我国这方面的研究涉及四个方面:①层序地层与海平面变化;②海平面变化的稳定同位素响应;③生态地层与海平面变化;④复合海平面与高频海平面变化。显然,与国外相比较,国内研究的广度和深度都存在着较大差距。本文试图通过对我国在该领域尚未涉足和十分欠缺的几个方面分析和介绍,希望引起我们的重视,特别是海平面变化成因及对盆地充填响应的密切关注。

1 海平面、海平面变化与 T-R 旋回

海平面(sea-level) 海平面是指与海洋有关沉积盆地中液态水体与大气圈的交界面,亦即位于地壳之上的由大洋及与大洋相通的大陆海、海湾、海湖等构成的水圈与大气圈的交界面。古海平面(paleo-sea level)与现代海平面含义相同,它是在一定时间尺度上(例如 0.01Ma 以上)的平均海平面(average sea-level),以下均简称海平面。一般将海平面分为全球海平面(eustasy)和相对海平面(relative sea-level)两种类型,下与海平面变化概念一起介绍。

海平面变化(sea-level change) 海平面变化是指随时间迁移海平面相对于某一基准面发生的上下变动,海平面升降(sea-level rising-falling)则是海平面变化的具体体现,指一定时间范围内海平面变化的幅度、周期及其频率的总合。全球海平面变化(eustasy 或 global sea-level change)一词自 Suess (1888)创立以来广被引用,Mómer 先后对其定义做过两次修改^[16,17],并拓宽为“洋面变化”或不论成因的绝对海平面变动,换言之,指海平面相对于某一固定基准面(如地心)位置的变化,与局部因素无关^[18]。相对海平面变化(relative sea-level change)指海平面距海底或接近海底的某一基准面发生的相对位置迁移,与局部沉降或隆升、沉积速率关系密切^[18]。海平面波动及振荡并非十分专业的术语。海平面波动(sea-level fluctuation)在相关文献中出现频率仅次于海平面变化和升降,虽然没有专门定义,从英文单词(fluctuation)原意“连续反复地变化”理解,应用于第四级以上高频海平面变化似乎更贴切些。多数学者遵从于此,常用于高频或米兰柯维奇等词之后。不过,少数研究者并未严格区分这种差异,仍有 eustatic fluctuation 或 second-order fluctuation 这种用法,就像 eustatic sea-level 一样未加区分。海平面振荡(sea-level oscillation)概念相对而言在文献中出现频率较低,常与第四纪气候、冰川旋回或高分辨率合用。按照振荡的英文词(oscillation)原来含义“限制于两边或两端的规则变动”,如正弦波式或余弦波式,将海平面波动一词用于更高级如第五-七级的海平面变化较为合理。复合海平面(composite sea-level)原指在高一级海平面基础上叠加形成的低一级海平面,其作用在于将米级和千米级旋回桥连起来,为三级层序地层单元识别服务,并使低一级海平面变化可预测^[19]。推而广之,笔者建议任意低一级海平面均可由高一级海平面叠加复合而成,复合海平面及其变化可延伸到任意一级海平面(表 1)。

表 1 建议的海平面变化概念体系及其关系

海平面变化(sea-level change)						
全球海平面变化 (eustasy 或 global sea-level change)		相对海平面变化 (relative sea-level change)	高频海平面变化(high-frequency sea-level change)			
			海平面波动(fluctuation)		海平面振荡(oscillation)	
?		复合海平面变化(composite sea-level change)			?	
一 级	二 级	三 级	四 级	五 级	六 级	七 级

T-R 旋回(transgression-regression cycle) T-R 旋回与海平面变化密切相关,指一次加深事件开始到下一次加深事件开始之间的沉积记录^[20],主要靠海岸线的迁移来标定,理论上与海平面变化易于区分,而实际工作中二者用法往往相混,经常是将 T-R 旋回当作海平面升降来对待。我们知道,T-R 旋回的海岸线迁移是海平面变化、构造沉降/隆升、供给速率的函数,因此,T-R 旋回与海平面变化的关系视另外两个参数的情况而定。当构造沉降/隆升和供给速率保持不变时,T-R 旋回海岸线的迁移与海平面变化才成——对应关系(非线性关系!),即在此条件下在一定程度上代表海平面变化的规律。

如上所述,海平面变化的旋回性和级次性毋庸置疑,但其等时性及可对比性与层序地层单元一样还存在较大争议。目前受大陆拼合与解体、洋脊扩张控制的一级和二级海平面变化旋回全球同时性很大程度上经受了考验。争议的关键是三级乃至四级海平面变化及其对应的层序地层单元可对比性问题。认为具同时性可持全球对比的依据是建立在晚古生代北美和俄罗斯地台旋回对比^[21,22],以及 EXXON 石油公司对全球众多地震和露头剖面的层序地层研究后形成的中生代海平面升降曲线^[2]基础上。然而,世界各地许多层序地层工作者对各大陆显生宙不同时期被动边缘、克拉通、前陆盆地等海平面与层序地层的研究后提出了反对意见,其基点为:相对海平面变化是全球海平面变化、构造作用、供给速率(碳酸盐生产速率)的函数。这里,笔者同意后一种意见,即三、四级海平面变化旋回及其对应的层序地层单元在全球范围内进行对比是困难的,即使是部分时期、部分旋回在部分大陆可以对比,也与其时古地理格局、盆地性质相关,或者有某种内在联系。

问题 海平面及海平面变化有关概念含义和关系的理解尚有差异,海平面变化旋回等时性及可对比性存在分歧。

建议 将海平面与海平面变化,海平面升降与振荡、波动,全球与相对、高频、复合海平面,T-R 旋回与海平面变化等的概念理清,限定其概念的外延、内涵以及它们间的关系(参照表 1),注意三、四级海平面变化旋回用于同一大陆或泛大陆的可对比性。

2 海平面升降曲线表示及绘制方法

2.1 海平面升降表示方法

迄今为止,很少有人对海平面升降曲线的表示方法或形态类型进行总结。虽然这于其成因鉴定和定量分析无很大裨益,但通过比较使我们对其性质、动态、方法有所了解,便于利用。总体而言,海平面升降曲线的表现形式大致有平滑式、上超式、折线式、折滑式、T-R 箭头式、Fischer 式等六种(图 1,表 2)。

平滑式 平滑式是最常见的一种,从第一级到第七级均见大量实例。它可以进一步分为对称型、非对称型、浅滑型三种(图 1a)。对称型多出现于高频海平面升降模拟研究中,实

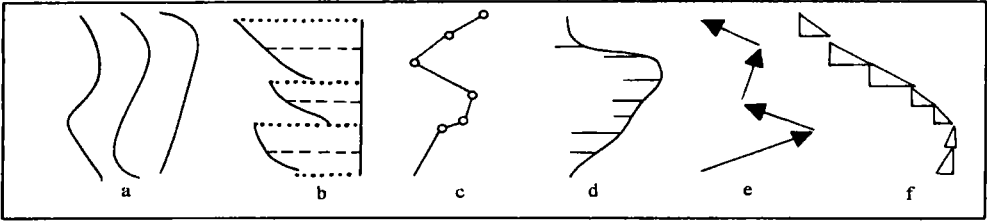


图 1 海平面升降的标示方法概略图

a. 平滑式;b. 上超式;c. 折线式;d. 折滑式;e. T-R 箭头式;f. Fischer 式

际研究过程则以非对称型占优势,这是地层记录的不完整性决定的。于是,有一个问题值得提出,长周期(低频)海平面升降曲线本质上应当是对称的正(余)弦波式,还是无规律的非对称式?如是前者,显生宙地质年龄表的绝对年龄值是否在理论上站得住脚?否则全球海平面升降曲线^[1,2]毫无意义。海平面升降的这种平滑式表示方法仍有许多反对者。

上超式 上超式反映了海平面 F(下降)拐点和 R(上升)拐点变化过程中滨线的迁移规律(图 1b), Haq 的海岸上超曲线^[2]是较为成功的例子。不过,上超曲线与海平面升降曲线并非等同,只有在一定条件下它们才有对应关系,且多数情况仅应用于和层序地层相关的三级海平面变迁史。

表 2 海平面升降曲线类型及其绘制方法对应简表

折线式		上超式		平滑式		折滑式		T-R 箭头式		Fischer 式	

折线式 该式是稳定同位素和微量元素反射的海平面升降曲线主要应用形式(图 1c)。限于同位素的应用前提,这种方式在中新生代的海平面变化研究中普遍采用,著名的 Miller 和 Fairbanks 的 $\delta^{18}\text{O}$ 同位素海平面升降曲线^[22]颇具代表性,古生代应用实例也很多。

折滑式 该式表面上与上超式相似,实则不然。一般它反映的是海平面上升期呈平滑状,下降时呈折线状(图 1d)。这种形式实例不多,相对而言在北美、俄罗斯地台及与冈瓦那有关发育晚古生代地层的地区应用较为满意^[20,21]。

T-R 箭头式 该式表现方式直观且简单,也较粗略(图 1e)。往往只能反映长周期低频的海平面升降大致趋势,如用于二级海平面升降旋回(超层序)、层序组等级别上^[23]。

Fischer 式 该式高频海平面升降旋回中应用十分广泛,例子不胜枚举。它主要是通过 Fischer 图解方式来恢复三级海平面升降旋回及其对应的层序地层单元。该方法目前我国已普遍使用^[19,24]。

此外,各种锯齿状测井曲线,在某种程度上对判断海平面升降有一定参考作用。

2.2 海平面升降曲线的绘制技术方法

海平面升降曲线的绘制技术方法或者说成因类型较多,归纳起来有测高曲线-古地理图

法、层序体系域法、海岸上超法、沉积相序法、群落生态位法、稳定同位素法、Fischer 图解法、回剥法、数学模拟法等(图 2, 表 2)。其中某些方法的海平面升降幅度定量计算已有较全面的总结^[1], 这里仅就各方法的原理和应用情况作一简单说明。

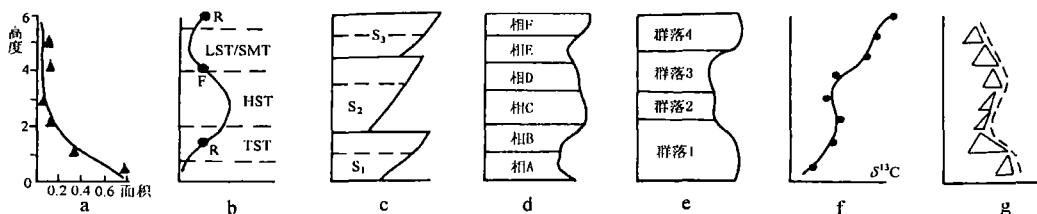


图 2 海平面升降曲线成因类型概略图

a. 测高曲线-古地理图法; b. 层序体系域法; c. 海岸上超法; d. 沉积相序法;
e. 群落生态位法; f. 稳定同位素法; g. Fischer 图解法

测高曲线-古地理图法 测高曲线表示各相邻等高线之间所夹陆地面积占该时期大陆总面积的百分比。其原理为:以现在地形测高曲线为工具来估计海平面相对于被海洋覆盖的大陆所上升的幅度,也即任意时间间隔内海洋向大陆的上超量可以在该期海相沉积层序的古地理图上用球积仪和等积投影求得(图 2a)。此方法主要适用于第四纪的有关海平面升降,近期业已在显生宙进行了探讨^[25]。相对而言,振幅定量程度可以达到很高,问题的关键是古地理图的准确性和编制原理的可靠性尚未很好解决。

层序体系域法 该法是现今海平面升降曲线的主要编制方法,集中应用于三级层序地层。因为从上一个 F 拐点 to 下一 F 拐点相对海平面升降过程会形成对应的 LST/SMT、TST (CS)、HST 记录(图 2b)。显然,它无法精确定量海平面升降的幅度,主要依靠各体系域沉积相序显示的相对水深来粗略估计。

海岸上超法 如上述海平面升降表示方法,其原理和应用情况与上超式相似(图 2c)。

沉积相序法 该序法这是海平面升降曲线绘制最常用的经典方法,简单实用。其原由是因为海平面升降变化会使沉积相序发生变化(图 2d),也有称之为沉积加积法的。虽如此,其缺陷亦不少,主要有三:升降幅度缺少量化标准或不统一,跳相或沉积间断时的海平面升降曲线难以表达,多数情况下去压实作用和构造沉降校正十分困难。

群落生态位法 本方法较为复杂,需要经过化石属种鉴定,统计计算分异度和丰富度,确定生态位。同样,随着海平面升降变化,将会造成物源供给速率、水体深浅的变动,从而造成群落的取代(图 2e)。该方法也是一种相对水深方法,较之沉积相序法精度有所提高,在生物广为发育的被动陆缘及其斜坡生态位可分为六级。应用该方法的实例并不多,我国仅在四川龙门山的泥盆系^[26]和扬子区的上二叠统一中三叠统^[27]有研究文献,国外近期也有少量代表^[28]。将生态位相对水深曲线转换为相对海平面升降曲线主要通过选择代表性剖面 and 剖面群在岩层厚度格架转变为年代格架基础上完成^[27],但其技术仍然需要探讨。

稳定同位素法 海平面升降会使海水中稳定同位素含量发生变化,并不同程度记录在相应的沉积物中。其绘制方法极为简单,只需将取样点测得的值直线连接起来即可。但是该方法不能定量反映海平面升降幅度,也不能准确说明相对水深变化,只能大致显示海平面变化趋势,加之采样、测试分析、成岩分馏作用的影响等限制,应谨慎使用。

Fischer 图解法 自 Fischer(1964)创建以来广为采用。受米兰柯维奇轨道旋回应力控制的海平面升降在沉积记录中有独特的响应,即常以浅水高频沉积旋回方式记录下来。Fischer 图解法简便的做法是以某一断面为起点,在选定的地层对象有确定时间延限前提下,按层数均分时间,根据岩层厚度不同作出的三角形状在时间维上的演变图(图 2)。此方法至今应用仍相当广泛^[19,24],但定量化还需经有关参数校正。

回剥法 该法为构造沉降法的一种,用于分析盆地沉降史和海平面升降变化。它建立在地壳均衡假说(isostasy)基础上,并发展成为一个基本沉降公式^[29]:

$$H_b = [(\rho_m - \rho_s)H_s + (\rho_m - \rho_w)H_w - \rho_m H_s] / (\rho_m - \rho_i)$$

ρ_m - 地幔密度, ρ_s - 沉积物的平均密度, ρ_w - 海水密度, ρ_i - 某一时期的沉积物密度, H_s - 现今准海平面上升为正时的海平面差值。该方法已有较全面的总结^[1],国外实例十分丰富^[29,30],国内偶可见之^[24]。鉴于图式内容复杂,此处不再述及。

数学模拟法 这一方法主要讨论海平面升降幅度、沉降/隆升量、沉积物供给速率、容纳空间之间的定量关系,其数学方程式复杂,参数项量较多,不属本文讨论范畴。不过近期与之有关的数学模拟应用已发展了多种模式,如多项式模型(polynomial model)^[31]、前置模拟法(forward modelling)^[32]、稳定参照系模式(stable frame of reference)^[6]、冈瓦那冰域量法(Gondwanan ice extent)、地层分解法(stratigraphic solution sets)^[33]、容纳空间与沉积供给比值法^[34]等。它们可穿插与其他各种方法中应用。但这些模拟方法都必须在某一相或几相参数保持不变和线性变化时进行。应注意活动大陆边缘上述参数往往是非线性的。

2.3 海平面升降频幅、规程样式

Vail 等^[35]和 Haq 等^[2]的显生宙和中新生代海平面升降曲线明显反映随地质时代的变化,其升降频率、幅度、规程样式也在改变。虽然我们意识中已经建立了长周期和短周期的概念,但深入研究海平面升降频幅、相位及规程的成果还不多见。

海平面升降频幅 龚一鸣等^[36]在研究黔桂地区泥盆纪海平面变化时提出,完成一次相对海平面升降时间可分为 $< 0.3\text{Ma}$ 、 $0.3 \sim 3\text{Ma}$ 、 $> 3\text{Ma}$ 三个段,分别称之为高、中、低频,其最高点与最低点间距离分别为 $< 3\text{m}$ 、 $3 \sim 60\text{m}$ 、 $> 60\text{m}$,分属低、中、高幅。地史时期这种尺度划分是否合适尚需研究讨论。作者认为, $< 3\text{m}$ 的波幅在现今地球表面每日皆是,所以地史时期的三级海平面升降频幅划分两级较为符合实际。就通常的沉积层序单元时限为 $1 \sim 5\text{Ma}$ 来说,完成一次相对海平面升降时间可分为 $1 \sim 2\text{Ma}$ 、 $2 \sim 5\text{Ma}$,即单位 10Ma 含 $5 \sim 10$ 、 $1 \sim 4$ 个海平面升降旋回时分别称之为高频、低频, > 10 个或 < 1 个则属四级以下和二级以上范畴。对于 II 型层序来说,相对海平面很少下降到外陆棚或深缓坡以下,由于内外陆棚界限一般在 $50 \sim 70\text{m}$ 间,因此,将完成一次相对海平面升降过程中最高点与最低点间距离亦可分为两级,即 $< 50\text{m}$ 和 $> 50\text{m}$ 时可分别称作低频、高频。

海平面升降规程 该规程是指海平面在一定时期内从初期到末期的升降变化过程和叠置样式,包括不同级别的海平面变化。实际工作中更多地涉及二级以上,特别是二级至四级。海平面升降规程的研究有助于沉积盆地演化、沉积体系控制及影响分析,也对区域性乃至全球性海平面变化对比提供帮助。龙门山泥盆纪这方面的研究实例揭示了由 14 个三级海平面升降旋回构成的 4 个准二级海平面升降旋回长期持续、频幅不定变化样式上升,反映了该区此时期同生构造活动较为强烈的特征。总之,海平面升降规程研究及其叠加原理有待深入研究。

问题 海平面升降曲线表示方法及绘制技术至今未予总结,内容和原理容易混淆。升降幅度的定量化计算和模拟研究方面国内十分欠缺。

建议 分清各种表示方法技术的使用范围,将相对水深曲线转换为海平面升降曲线过程中注意成岩作用、构造沉降、沉积(生产)速率的校正及定量模拟,三级海平面升降频幅二分方案值得深入讨论。

3 海平面变化成因及标识

3.1 海平面变化成因概述

海平面变化成因十分复杂,与沉积旋回成因及盆地动力学因素间有密切联系。通过对海平面变化成因的总结,有利于弄清其对沉积盆地充填的影响乃至控制作用,指导我们分析盆地充填史及其机制,为研究受海平面变化控制的沉积矿产,通常海平面变化成因分析有按海平面变化的旋回级别和海平面变化的动态因素两种思路,以下分作简要说明。

以旋回级别来论成因的在地质学界,尤其是层序地层和旋回地层工作者占多数,以 Brett^[37], Vail 等^[3]为代表,其主要观点是(表 3):第一、二级全球海平面变化与大洋盆地的体积变化有关^[5],造成其体积变化的关键因素是洋脊扩张、泛大陆的拼合与分解;第三级相对海平面变化则主要受控于冰川作用引起的全球海平面变化、沉积物供应(生产)速率、构造沉降/隆升三位一体,并深刻影响着容纳空间。层序地层学对此是做出了不可磨灭的贡献的。四级以上的海平面波动一方面由低一级的(复合)海平面变化控制,另一方面与地球系统有着紧密联系,包含地球轨道(米兰柯维奇旋回段)参数偏心率、岁差、斜率,地球自转,地球质量重新分配,地球磁场及月球的引力变化,从而引发气候、水文等地球表面因素的变更。第七级以上则更多地受太阳历与日历参数的影响。

表 3 不同海平面变化/沉积旋回的级次、对应的岩石和层序单元
及其可能的成因解释^[3,37]

级次	时限	岩石单元	层序地层单元	成因解释
一级	> 100Ma	超构造单元	巨/大层序	洋脊扩张、板块拼合与解体引起洋盆体积变化(构造运动、均衡作用)
二级	10 ~ 100Ma	超群、群	大/超层序,层序组	
三级	1 ~ 5Ma	超构造单元	层序	三位一体:(冰川-海水量均衡成因)全球海平面变化 + 构造沉降/隆升 + 沉积供给(生产)速率,调节容纳空间
四级	0.1 ~ 0.5Ma	超群、群	准(副)层序组	①地球轨道参数(米兰柯维奇旋回段)偏心率、岁差、斜率,②地球自转,③地球质量重新分配,④地球磁场的变化,⑤月球的引力变化
五级	0.01 ~ 0.05Ma	段、层	准(副)层序	
六级	1 ~ 10ka	亚段、亚层	韵律层序	
七级	< 0.1ka	层系(组)	季纹泥层序	太阳历与日历段旋回参数变化,气候成因等

从动态大地水准面变化因素来探讨海平面变化成因的则受到第四纪和海洋地质学研究者青睐,如 Mörner^[17], Emery 和 Anbrey^[10]。他们直接将海平面变化成因分为两大类(表 4):动态变化成因和垂直水平方向的大地水准面变化成因,进而分为海水量变化、海盆容积变化、大地水准面变化、动态海平面变化四种成因^[17],其下又细分多种因素(表 4)。

显然,单纯从某一种思路来分析有失偏颇,应在海平面变化旋回级次的框架上结合动态

因素。地层记录中的海平面变化成因分析者应吸取第四纪和海洋地质学的有关理论的营养,以补充不足。

3.2 海平面变化成因标识依据

海平面变化成因理论上易于接受,但要在实际沉积记录中寻找踪迹并非轻而易举。相对而言,第一、二级全球性海平面变化成因较为单一,难点仅在于洋脊扩张速率和洋盆体积的定量模型和理论依据;高频旋回的海平面变化成因虽然有分歧,即是地球轨道(米兰柯维奇旋回段)参数变化引起还是冰川作用为主,但构造背景相对稳定,呈线性变化;对于更高级别的大地水准面成因标识第四纪海平面变化研究中涉及颇多,新近的高分辨率层序地层学在地史时期的沉积记录中近十年来已开始广泛应用^[38],成果卓著。

三级海平面的相对变化一如大家所熟知是全球海平面变化、构造沉降、沉积供应(生产)的函数。对于活动大陆边缘来说,多数研究者同意构造成因为主的意见^[4],标识依据较为明显,如沉积物富含火山、岩浆成分,变形变质作用突出,当然,全球海平面变化、沉积供应速率也起重要作用,其关系业已有专著讨论^[4]。稳定边缘及克拉通的相对海平面变化成因鉴定方法主要有海平面升降曲线对比法、构造沉降-回剥法、地震信息法等。海平面升降曲线对比法一般是根据层序地层、沉积相、生态位等做出的相对海平面升降曲线,与 Vail 等及 Haq 全球海平面升降曲线进行对比,如相似则反映该区域的海平面变化主要受全球海平面变化控制,否则与区域构造沉降、沉积物供应速率有关。对于是构造沉降控制还是沉积物供应速率起主要作用则可通过构造沉降-回剥法来甄别,这方面已有不少研究文献,如 Gallagher 和 Lambeck 通过采用此方法对澳大利亚 Eromanga 盆地侏罗纪—白垩纪海平面变化研究后认为其成因以沉积物供应数量变化为主^[30]。地震信息法是通过盆地地震地层记录来完成的,即根据地震地层记录所编制的综合古应力曲线来反映应力变化情况,旨在弄清构造成因及其性质,此方法前人已有研究实例^[39]。

问题 海平面变化的成因较为复杂,有旋回级别和动态两种思路分异,成因标识在相对海平面变化一级是难点。

建议 在海平面变化旋回级次格架下结合两种思路进行成因分析,推荐相对海平面升

表 4 Mörner 的海平面变化成因级次简表^[17]

海平面变化	垂直—水平方向大地水准面变化	洋盆容积	构造型海平面升降	地球体积变化	
				构造运动	造山运动
					洋中脊生长
					板块构造运动
					海底沉降
					其它地球运动
				沉积物充填	
				均衡作用	局部均衡作用
					水均衡作用
					地内载荷调整
				冰川型海平面升降	
				沉积物中的水、湖水、云层、蒸发作用、岩浆水	

海水质量与海平面分布	大地水准面型海平面升降	重力波
		地轴倾斜
		地球自转速率
		大地水准面形态
		气象因素
动态变化	动态海平面变化	水文因素
		海洋因素

降的成因分析按曲线对比法→构造沉降→回剥法思路进行。通过沉积记录来寻找构造作用的海平面变化信息是可能的方向。

4 海平面变化引起的盆地响应

这里所说的海平面变化响应是指海平面升降过程对盆地可能产生的任何影响,可以是沉积环境参数变化,也可以是构造作用反弹、供给速率的增减,也可以是它们复合的影响。对于不同级别的海平面变化,沉积盆地的响应方式和结果会有所差异:一、二级变化主要影响盆地的面积、体积、充填量、海水的稳定同位素含量等,高频海平面波动更多地对韵律旋回沉积作用、沉积环境参数、生物属种的演替、微观气候等起控制作用。本文所要讨论的是指在构造沉降、供给速率保持稳定线型变化前提下的三级海平面相对变化响应,大致有对沉积作用、生物群落、稳定同位素、边缘地壳、沉积矿产等几方面的影响或控制。

4.1 海平面变化对沉积作用的影响

该影响涉及岩石地层单元的分布、沉积相的迁移、碳酸盐缓坡-台地的形成与演化、层序地层格架及界面性质、体系域的结构和发育、沉积类型、白云石化作用、海底胶结作用、河谷下切作用、深海充填作用等等方面。迄今为止,大量与层序地层相关的研究文献对前面五个方面的海平面升降响应已有全面深刻的总结^[17,40],后面几种也有不少论述。归纳起来认为:海平面下降在 LST 的形成过程中主要发生侵蚀作用,陆棚表面土壤化及碳酸盐台地喀斯特化,陆棚上河谷下切。当海平面下降幅度足够大至陆棚坡折以下时,以陆源碎屑为主的沉积背景条件下斜坡峡谷发育,海底主要充填粗粒的碎屑物质,常形成斜坡扇和海底扇,碳酸盐台地背景下则在斜坡带可堆积大量滑塌沉积,并强烈白云石化,产生淡水透镜体楔。混合体系中形成大量碳酸盐与陆源碎屑混合的沉积^[40];海平面上升,在 TST 和早 HST 形成过程中,盆地处于非补偿阶段,海胶结作用和深海溶解作用加强^[3],也可在混合体系中开始形成碳酸盐与陆源碎屑混合的沉积^[42],滨岸等浅海区域因波浪的冲洗形成底砾层常沉积在海侵面之上;海平面上升到凝缩层完成以后的 HST 形成期,陆源碎屑区表现为进积,碳酸盐区的生产则先后为加积和进积,并可形成不同的旋回成因类型和叠加形式,混积区仍以碳酸盐占优势^[41,42]。晚 HST 期许多特征与 LST 相似,如间歇暴露和大气强烈渗流的白云石化作用、喀斯特化、风化残积层等。

4.2 海平面变化对生物群落的控制作用

研究表明,容纳空间与生态空间之间有着直接联系^[28],因为后者随相变而迁移,相变又是海平面变化的直接响应。过去,在生态地层项目研究中提出了不少与海平面变化有关的新概念,如生态地层事件^[43]、生态地层趋势、生态沉积环境条件^[44]等,对反演和标识海平面变化有重要参考价值。我国一些学者对扬子西缘泥盆纪和扬子区二叠纪的生态地层研究后也发现,海平面的变化是造成生物群落取代(非演替)的主要原因^[26,45],即所谓的群落环境论。海平面升降实质上控制着群落生态位的变化,影响群落生活环境的各种参数,如海底底质特征、水体深度(光度和浑浊度)、营养源(物源成分)、海水盐度、水流状态等,从而破坏群落内部结构,影响群落分子组成,改变群落丰富度和分异度,导致群落的取代。此外,沉积学工作者还特别注意到海平面变化对生物礁群落生长方式的控制作用,一般认为,海平面上升过程生物礁生长方式为向海岸方向退积,下降过程中则呈进积方式生长。

4.3 海平面变化对稳定同位素产生的效应

海平面变化时,海水中的化学组成也在发生改变,其中能反映三级及其以下二级和准二级海平面升降的为稳定同位素值的偏移曲线。早在 80 年代初,据 $\delta^{34}\text{S}$ 、有机碳 $\delta^{13}\text{C}$ 年龄曲线绘制了显生宙相应的海平面升降曲线,而新生代 $\delta^{18}\text{O}$ 反映海平面变化趋势值曲线已广为接受^[22]。总结前人的研究成果,发现海平面升降与稳定同位素变化有如下关系:海平面上升, $\delta^{13}\text{C}$ 、 $\delta^{18}\text{O}$ 值均呈负偏变化,负值绝对值增加, $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ 则正偏,正值绝对值减小;海平面下降, $\delta^{13}\text{C}$ 、 $\delta^{18}\text{O}$ 值均呈正偏变化,负值绝对值减小, $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ 则负偏,正值绝对值增加。 $\delta^{13}\text{C}$ 、 $\delta^{18}\text{O}$ 值与 $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ 之间明显存在着“映像”关系。由此,它们的偏移一定程度上反映了海平面升降趋势。近年来对华南晚古生界的稳定同位素海平面变化效应研究^[46~48],表明这种对应关系如前所说更多地适用于三级及其以下二级和准二级海平面升降。

4.4 海平面变化对大陆边缘地壳的反弹作用

海平面升降对大陆边缘地壳变形的反弹作用以往注意不多。实际上其原理简单易懂。海平面上升使盆地海水充填量增加。而海平面下降(晚 HST 和 LST 形成)过程中,随着陆源物质的涌入盆地负荷量相应提高。海平面下降的另一方面会使陆棚或台地边缘接受侵蚀和剥蚀(卸荷作用),在斜坡及盆底沉积,即在地壳均衡作用支配下使盆地负荷重新分配。这种盆地负荷的增减或重新分配作用虽对大陆边缘地壳变形不起决定性控制,但在增减量比较大(间断时间长)的情况下可以使边缘地壳反弹,以至于产生挠曲。因此,在分析大陆动力学机制时不应忽略这一因素。目前,对该过程的实现及其定量化模拟国外已有较为深入的研究^[49],值得我们借鉴。

4.5 海平面变化对沉积型矿床的控制作用

海平面变化与沉积矿产形成的关系早已引起了人们注意,如煤层和生油层的堆积形成与全球海平面变化有着密切的联系。对其他固体矿产资源,海平面变化也起不同程度的影响或控制作用。研究结果显示,德国的 Meggen 和 Rammelsberg 等大型铅锌黄铁矿床的形成时期正好处于准二级海平面旋回上升的 Givetian 期^[50],华南泥盆纪的铅锌矿床成矿期也正好同步^[51]。磷灰石矿常形成于二级海平面旋回的上升期(间冰期),由于水位升高,高磷海水被带入盆地,在物理化学参数变化条件下沉淀富集成矿,我国西南地区震旦—寒武系磷块岩矿床即与此有关。再如,华南二叠纪大型风化残积型铝土矿床,即在海平面下降区域广泛暴露条件下形成。可见,密切注意海平面升降将为寻找有关沉积矿床具有指导作用。

问题 利用沉积记录来研究海平面变化重视程度很高,反过来其对沉积盆地的影响注意甚少。

建议 海平面升降变化过程的盆地响应中应特别加强,对沉积型矿床的控制和对大陆边缘地壳变形的反弹作用过程及定量模拟是一个重要方向,后者是一盲点,它可能为大陆边缘动力学研究提供一方面的思路。

承蒙王成善教授、郑荣才教授、田景春副教授及胡修棉同志对此文提出宝贵修改意见,在此表示感谢!

参考文献:

- [1] KENDALL C G St C and LERCHE I. The rise and fall[A]. WILGUS C K et al. Sea-level changes: an integrated approach[C]. SEPM Special Publication, 1988, 42, 3-17.
- [2] HAQ B U, HARDENBOL J and VAIL P R. Chronology of fluctuating sea levels since the Triassic[J]. Science, 1987, 235:1156-1167.
- [3] VAIL P R, AUDEMARD F et al. The stratigraphic signatures of tectonics, eustasy and sedimentology—an overview[A]. EINSELE G, RICKEN W and SEILACHER A. Cycles and Events in Stratigraphy[C]. Berlin: Springer-Verlag, 1991, 617-659.
- [4] MACDONALD D I M. Sedimentation, Tectonics and Eustasy: Sea-level Changes at Active Margins[C]. Spec. Publ. of the IAS. Oxford: Blackwell Scientific Publications, 1991, No.12, p518.
- [5] KENDALL C G St C, LEVINE P A, EHRLICH R. The enigma of third-order sea level cycles: a cosmic connection? [A]. HAQ B U. Sequence Stratigraphy and Depositional Response to Eustatic, Tectonic and Climatic Forcing[C]. Dordrecht: Kluwer Academic Publishers, 1995, 367-376.
- [6] SAHAGIAN D L and HOLLAND S M. Eustatic sea-level curve based on a stable frame of reference: preliminary results[J]. Geology, 1991, 19:1209-1212.
- [7] OSLEGER D and READ J F. Relation of eustasy to stacking patterns of meter scale carbonate cycles, Late Cambrian, U.S.A. [J]. Journal of Sedimentary Petrology, 1991, 61(7):1225-1252.
- [8] WILGUS C K et al. Sea-level changes: an integrated approach[C]. SEPM Special Publication, 1988, 42, p407.
- [9] Geophysics Study Committee, Commission on Physical Science and Resources, National Research Council. Sea-level change: studies in geophysics[C]. Washington D.C.: National Academic Press, 1990, p234.
- [10] EMERY K O and ANBREY D G. Sea-Levels, Land Levels and Tide Gauges[M]. New York: Springer-Verlag, 1991, p237.
- [11] EINSELE G, RICHEN W and SEILACHER A. Cycles and Events in Stratigraphy[C]. Berlin: Springer-Verlag, 1991, p955.
- [12] DOTT R H Jr. Eustasy, the historical ups and downs of a major geological concept[C]. Memoir, GSA, 1992, p180.
- [13] 张选阳. 层序地层学和海平面变化[J]. 岩相古地理, 1989, 1:1-10.
- [14] 李文汉, 谭康. 白垩纪的地层层序及海平面变化[J]. 岩相古地理, 1990, 6:52-59.
- [15] 杨瑞东, 傅锟. 古海平面变化研究的过去和现状[J]. 地质科技情报, 1990, 9(2):59-63.
- [16] MÖRNER N A. Eustasy and geoid changes[J]. Journal of Geology, 1976, 84: 123-151.
- [17] MÖRNER N A. Pre-Quaternary long-term changes in sea level[A]. DEVOY R J N. Sea Surface Studies: a Global View[C]. New York: Croom Helm, 1987, 242-263.
- [18] POSAMENTIER H W, SUMMERHAYS C P et al. Sequence Stratigraphy and Facies Associations[C]. Special Publication of IAS, Oxford: Blackwell Scientific Publications, 1993, 18:p644.
- [19] GOLDHAMMER R K, DUNN P A and HARDIE L A. Depositional cycles, composite sea-level changes, cycle stacking pattern and the hierarchy of stratigraphic forcing: examples from Alpine Triassic platform carbonates[J]. GSA Bulletin, 1990, 102: 535-562.
- [20] ROSS C A and ROSS J R P. Late Paleozoic sea levels and depositional sequences[A]. ROSS C A and HAMAN D. Timing and Depositional History of Eustatic Sequences: Constrains on Seismic Stratigraphy. Cushman Foundation for Foraminiferal Research [C]. Special Publication, 1987, 24: 137-149.
- [21] ROSS C A and ROSS J R P. Late Paleozoic depositional sequences are synchronous and worldwide[J]. Geology, 1985, 13:194-197.
- [22] MILLER K G and FAIRBANKS R G. Cainozoic $\delta^{18}O$ record of climate and sea level[J]. South African Journal of Science, 1985, 81: 248-249.
- [23] WANG Chengshan and LI Xianghui. Supersequences of the Phanerozoic in the Tethys Himalayas[A]. LIU Baojun and LI Sitian. Basin Analysis, Global Sedimentary Geology and Sedimentology[C]. Proceedings of the 30th IGC, Utrecht: VSP, 1997, 8: 275-293.
- [24] 赵玉光, 许效松, 刘宝瑞. 上扬子台地西缘峨眉地区三叠纪高频层序与海平面振荡研究[J]. 岩相古地理, 1996, 16

(1):1-18.

- [25] ALGEO T J and Seslavinsky K B. Paleozoic eustasy and continental hypsometry, reconstruction from paleocontinental flooding records[J]. *Eos, Transactions, AGU*, 1995, Suppl., 76(17): 52.
- [26] 李祥辉. 四川龙门山区早泥盆世 Emsian 期群落古环境分析[J]. *矿物岩石*, 1992, 12(3): 57-65.
- [27] 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*, 1994, 19(5): 627-632.
- [28] OLÓRIZ F, CARACUEL J E and RODRÍGUEZ F J. Using ecostratigraphic trends in sequence stratigraphy[A]. HAQ B U. *Sequence Stratigraphy and Depositional Response to Eustatic, Tectonic and Climatic Forcing*[C]. Dordrecht: Kluwer Academic Publishers, 1995, 59-86.
- [29] STECKLER M S and WATTS A B. Subsidence of the Atlantic-type continental margin of New York, *Earth Planet. Sci. Lett.* [J], 1978, 41: 1-13.
- [30] GALLAGHER K and LAMBECK K. Subsidence, sedimentation and sea-level changes in the Eromanga Basin, Australia[J]. *Basin Research*, 1989, 2: 115-131.
- [31] PINTER N and GARDNER T W. Construction of a polynomial model of glacio-eustatic fluctuation: estimating paleo-sea levels continuously through time[J]. *Geology*, 1989, 17: 295-298.
- [32] COLLIER R E L, LEEDER M R and MAYNARD J R. Transgressions and regressions, a model for the influence of tectonic subsidence, deposition and eustasy, with application to Quaternary and Carboniferous examples[J]. *Geological Magazine*, 1990, 127(2): 117-128.
- [33] HELLER P L, BURNS B A and MARZO M. Stratigraphic solution sets supply, subsidence, and sea level on transgressions and regressions[J]. *Geology*, 1993, 21: 747-750.
- [34] MUTO T and STEEL R J. Principles of regression and transgression, the nature of the interplay between accommodation and sediment supply[J]. *Journal of Sedimentary Research*, 1997, 67(6): 994-1000.
- [35] VAIL P R, MITCHUM R M and THOMPSON S. Seismic stratigraphy and global changes of sea-level, Part 3: Relative sea-level from coastal onlap[A]. PAYTON C W. *Seismic Stratigraphy Applications to Hydrocarbon Exploration*[C]. AAPG Memoir 26, 1977: 63-97.
- [36] 龚一鸣, 吴诒, 杜远生. 黔桂泥盆纪层序地层及海平面变化的频副速度和相位[J]. *地球科学*, 1994, 19(5): 575-586.
- [37] BRETT C E, GOODMAN W M and LODUCA S T. Sequences, cycles, and basin dynamics in the Silurian of the Appalachian Foreland Basin[J]. *Sedimentary Geology*, 1990, 69(3-4): 191-244.
- [38] HOWELL J A and AITKEN J F. High Resolution Sequence Stratigraphy: Innovations and Applications[C]. *Geol. Soc. Spec. Publ.*, The Geological Society of London, 1996, 104, p374.
- [39] LAMBECK K, CLOETINGH S and MCQUEEN H. Intraplate stresses and apparent changes in sea level: the barriers of northwestern Europe[C]. *Canadian Soc. Petr. Geol., Memoir* 12, 1987: 259-268.
- [40] WERMER P and POSAMENTIER H. Siliciclastic sequence stratigraphy: recent developments and applications[C]. AAPG Memoirs 58, 1994, p492.
- [41] HAQ B U. Sequence stratigraphy, sea level change, and significance for the deep sea[A]. MACDONALD D I M. *Sedimentation, Tectonics and Eustasy, Sea Level Changes at Active Margins*[C]. Special Publication of the IAS, 1991, 12: 3-39.
- [42] 李祥辉, 刘文均, 郑荣才. 川西前龙门山带早中泥盆世硅质碎屑与碳酸盐的混积相和混积层序[A]. 刘文均等. *四川龙门山区泥盆系(II)《层序地层》*[C]. 成都: 成都科技大学出版社, 1996: 46-61.
- [43] KAUFFMAN E G. High-resolution event stratigraphy: regional and global Cretaceous bioevents[A]. WALLISER O H. *Global Bioevents*[C]. New York: Springer-Verlag, 1986, 279-335.
- [44] OLÓRIZ F, MARQUES B and RODRIGUEZ-TOVAR F. Eustatism and faunal associations: example from the southern Iberian Margin during the Late Jurassic (Oxfordian-Kimmeridgian)[J]. *Ecologiae geologicae Helveticae*, 1991, 84(1): 83-106.
- [45] 陈源仁. 化石群落的演替[J]. *成都地质学院学报*, 1988, 15(1): 36-56.
- [46] 崔秉荃, 卢武长, 杨绍全. 上扬子石炭纪锶碳同位素和微量元素铝与海平面变化的关系[J]. *成都地质学院学报*, 1993, 20(3): 33-38.

(下转第 41 页)

Sequence stratigraphic cycles of the third member of the Dengloulou Formation in the Xujiaweizi subsidence, Daqing, northeastern China

ZHAO Guo-lian

(*Department of Reservoir Geophysics, Geophysical Institute of the Chinese Academy of Sciences, Beijing 100101, China*)

Abstract: The third member of the Dengloulou Formation is a prospect area for the oil and gas resources in the Xujiaweizi subsidence, Daqing, northeastern China. In this paper, the lithology and sedimentary facies are discussed, and sequence stratigraphic cycles and their systems tracts are discriminated on the basis of sedimentary facies, lithology and well logs. The classification has been verified by using Fischer's plots, which may be a potential tool for sequence analysis.

Key words: Xujiaweizi subsidence in Daqing; third member of the Dengloulou Formation; sedimentary facies; lithology; cycle; systems tract; Fischer's plot

(上接第 72 页)

- [47] 田景春. 中国南方二叠纪古海洋锶同位素演化[J]. 沉积学报, 1995, 13(4): 125 - 130.
- [48] 陈代钊, 陈其英. 泥盆纪海相碳酸盐岩碳同位素组成及演化[J]. 岩相古地理, 1995, 15(5): 22 - 28.
- [49] ROSS W C, HALLIWELL B A et al. Slope readjustment: a new model for the development of submarine fans and aprons[J]. *Geology*, 1994, 22: 511 - 514.
- [50] KREBS W. The geology of the Meggen ore deposits[A]. WOLF K H. Handbook of stratabound and stratiform ore deposits[C]. Amsterdam: Elsevier Scientific Publishing Company, 1981, 509 - 547.
- [51] 刘文均. 华南泥盆纪的沉积盆地特征沉积作用和成矿作用[J]. 地质学报, 1993, 67(3): 244 - 254.