

文章编号: 1000-0550(2017)05-0918-08

doi: 10.14027/j.cnki.cjxb.2017.05.005

沉积记录研究的现代过程视角

高抒

华东师范大学 河口海岸学国家重点实验室, 上海 200062

摘要 沉积记录是揭示地球演化的主要数据来源之一,地层学提供了宏观大尺度沉积记录的分析方法,而沉积学则提高了沉积记录的时空分辨率。但上述方法主要是针对沉积体系特征和现象信息的,而有关沉积体系过程和机制信息的提取还较为薄弱。通过评述现代过程在沉积记录研究中的定位,提出了新的科学问题。研究表明,基于现代过程研究的勘测性模拟是一种值得追求的方法。经典数值模拟依赖于未知变量与方程个数相同的控制方程,用实测数据作为验证材料,而勘测性模拟是控制方程加工作假说构成的体系,其模型输出指示了过程—产物关系。因此,通过现代沉积体系模拟及其与钻孔资料的对比,可以获取沉积记录所含的过程和机制信息。勘测性模拟也是地球久远时代沉积记录的潜在分析工具。

关键词 沉积记录;现代沉积环境;过程—产物关系;代用指标;过程—机制信息;勘测性模拟

第一作者简介 高抒,男,1956年出生,博士,教授,海洋地质学、海岸地质学、沉积学, E-mail: sga0@sklec.ecnu.edu.cn

中图分类号 P512.2 **文献标识码** A

0 引言

沉积记录是研究地球历史的重要载体。地球自从有了风化作用就产生了沉积物,至今松散沉积层和沉积岩约占地壳体积的10%,却覆盖了地球表面的约75%面积^[1]。

现代过程是指至今仍在形成之中的沉积体系的各种相关过程。根据系统论的观点,“过程”是指与一个系统相关联的所有因素、这些因素影响系统的方式(通过能量、物质或信息)、各个因素的相对重要性、以及因素间的相互作用;一个系统有多种表现,而每种表现必然与某个过程的组合有关,此种过程的组合称为该现象发生的“机制”。

现代过程有着不同的时间尺度。以物理过程为例,全新世高海面以来形成的潮滩、河口三角洲、沙坝—泻湖等沉积体系,其常态的影响过程包括陆架环流、潮汐、波浪、重力流等,极端事件过程有风暴、洪水、海啸等。因此,与这些沉积体系相关联的过程具有全新世的时间尺度^[2]。对于另一些沉积体系而言,如等深线流和深海扇沉积,现代过程的含义要扩大到全新世之前。等深线流沉积涉及洋盆尺度及洋盆之间的大尺度环流,在太平洋、印度洋、大西洋发生的热盐环流,由于其流速为 10^{-2} m/s量级,且环流路径很长,因此往返循环一次的时间尺度长达千年^[3-4]。也就是说,温盐环流过程在全新世以前已经是等深线

流沉积的主控过程了。深海扇是重力流作用的结果,像孟加拉扇那样规模的沉积体系,其形成也必然要超出全新世的时间范围^[5]。总体上,深海环境的“现代过程”扩展到了 10^4 a之外的时间尺度。

既然说到现代过程,就会涉及“将今论古”原理。实际上,现代过程给 Charles Lyell 的“均变说”提供了一个很好的科学注解。现代沉积特征是根据当前存在的环境得出的,因此人们不可能给不存在的环境给出一个“眼见为实”的沉积特征描述,但是人们可以推论,如果地层记录中出现了现代环境所不能解释的特征,那么就存在着与当今不同的沉积环境。全新世海面上升之后的一段时间,沙坝—泻湖海岸较为普遍,然而这种体系从地质学时间尺度上看是短暂存在的,随着沉积物充填和海岸地貌的演化,最终将不复存在^[6],但那时的人们不会因为这个原因说历史上从来没有过沙坝—泻湖体系,因为从沉积记录中人们可以确定其曾经存在的事实。因此,现代过程研究的意义之一,是可以从过去地层中寻找现今世界中缺失的沉积特征,恢复历史上曾经有过的沉积环境面貌。

本文试图通过对沉积记录研究的地层学和沉积学方法的理论分析,总结过去几十年来对现代沉积体系的相关物理、化学和生物过程的研究,论证沉积记录—现代过程关系方面需要重点研究的科学问题,并提出研究方案和技术路线的建议。

1 地层学方法

弄清地球的演化历史是地球科学的重要任务之一。因此,地层学成为一门地质学最早的分支学科,其目的是给地球历史建立起年代框架,如同历史学建立历史年表一样。人类的历史以朝代为主线,而地球历史以代表性的生物物种为主线,两者的共同点是需要确定时间的先后顺序,再以关键事件建立年代表。

生物地层学从沉积记录中提取相对年代信息。由于生物演化或新物种产生的时间尺度为1 Ma,因此沉积记录解译的时间分辨率也只能是这个尺度^[7]。地层先后顺序依据“上新下老”的原则来确定,即对于同一地点,除非地层发生倒转,应是上部地层为新,下部地层为老。虽然弄清地层中的生物化石门类是一项耗时巨大的工作,但利用生物化石的时间序列来建立地质年代表的原理却较为简单,主要物种的兴衰可以作为断代的标志,例如三叶虫的出现表示古生代的开始,而恐龙出现表示中生代的到来。

当然,学者们不会止步于生物化石的相对新老问题,他们还想获得绝对年龄信息,这是年代地层学的任务。由于物理学的发展,这个问题目前已经大致解决了^[8]。利用同位素衰变原理,可以测定沉积层的绝对年龄,而古地磁记录、特定事件的记录等成为间接的绝对年龄标记。

有了地层学技术,就可以进行地层对比。将年龄相同、化石特征相同、或具有相同标志的沉积层相联系,全球各地原先毫不相干的地层突然以非常有序的方式排列在一起,这不得不说是地层学的奇迹。有趣的是,在1 Ma年尺度下,地层的界线和年龄十分融洽地重合在一起,这是与生物进化尺度的巧合。

地层对比给我们提供了地球演化历史的宏观图景。在物理环境变化方面,从沉积记录中找到了大幅度气候变化的证据,如寒武纪的冰雪时期;发现在过去的6 Ga中海面变化有多种振幅和周期各不相同的旋回,其中规模最大的构造海面变化幅度达500 m量级,周期为1 Ga^[9];根据陆相、海相地层的研究,发现了海陆分布格局的巨变。在生物演化方面,弄清了从原核生物、真核生物、无脊椎动物、到鱼类、爬行类、哺乳类的演化进程,揭示了植物、动物从海洋拓展到陆地的过程,发现了地质历史时期的多次生物大爆发和大灭绝事件^[10]。

当我们想要获取更高分辨率的历史演化信息时,地层学方法的时空尺度变得不太相配。例如,第四纪

气候—海面变化涉及10万年乃至更短时间,全新世时期甚至不够地层学一个数据代表的时间尺度。以更小的时空尺度解释沉积记录,就产生了沉积学。实际上,沉积学是20世纪中期为了油气资源开发而发展起来的,在解决应用问题的同时,也给沉积记录理论的发展提供了机遇。

2 沉积学方法

2.1 沉积环境与沉积相

在沉积学文献中沉积相的内容占据重要地位。沉积相是指沉积记录的面貌,或者一定时空范围内形成的产物及其特征,包括沉积物粒度、沉积构造、地球化学组分、生物组分及其三维分布格局^[11]。

沉积相研究的结果即刻导致了对地层学“上新下老”原则的修订。在一个点上,“上新下老”依然成立,但涉及一个沉积体系时就不一定成立。例如,江苏海岸的现代潮滩沉积是全新世高海面以来形成的,在由陆向海的断面上,不同高程的沉积物属于同一年龄,高潮滩为泥质沉积,低潮滩为砂质沉积,在地层上这套沉积表现为厚度为2~4 m的泥质沉积覆盖于砂质沉积之上^[12]。按照地层学方法,潮滩沉积可表述为“上下两层,上层为泥质沉积、下层为砂质沉积”,隐含的意思是泥质沉积新于砂质沉积,而我们根据现代环境已经知道这是不对的。

按照沉积学原理,堆积体的年代取决于其在沉积环境中的部位,以及沉积体系演化的阶段。以潮汐河道系统为例,口门内外可能发育“潮流三角洲”,在许多情况下,涨潮流三角洲从形成到生长,其进程贯穿于整个纳潮海湾的充填过程;落潮流三角洲则不同,它形成后可能被后续的地貌演化所破坏,而在潮汐海湾充填完成后可能被冲刷殆尽。因此,这两类潮流三角洲会有不同的层序特征和堆积体的新老关系。纳潮海湾内还有潮滩,其形成过程与潮流三角洲不同,但也是潮汐河道体系的组成部分。因此,沉积学的任务是对各种不同的环境,给出沉积体系的时空演化模式^[13]。

这种模式通常表达为“沉积相”。如何实现?首先是针对特定环境不同部位的堆积体,获取粒度、物质组成、沉积构造等信息,建立环境—产物关系^[14-15],有时这种关系具有多解性。例如,涨潮流三角洲顶部沉积与海滩沉积可能相似,但是,当考虑多个相关联的堆积体时,这种不确定性就大大降低了,在考虑整个潮流三角洲体系时,其中与潮滩沉积相似

的部分将不会被误认为是海滩沉积。

对已知的现代环境的沉积相研究,可导致“相模式”的建立,即一定的沉积相组合必定与一定的沉积环境相匹配。如果沉积相特征为已知,则沉积环境类型也为已知,反之亦然。在这框架中,沉积相各个部分的年代关系或新老关系是明确的,每一个瞬时地貌面就是一个“等时间面”,不同的等时间面构成不同时期的地层界线或界面。显然,这些界面不可能是一个水平放置的平面,而必定是复杂的曲面。沉积学告诉我们,在大面积上不能按照钻孔中的物质的高程分布来确定新老关系;同理,从高分辨率的要求上看,孔内层序不能进行地层学意义上的层序对比,也没有“金钉子”。

基于沉积相分析,沉积记录的解译被扩展到环境演化的细节。海洋、海陆过渡带和陆地环境里形成的各种沉积体系从周边的地层总体中剥离出来,每个沉积体系都有一部演化历史^[16]。沉积记录的主要用途是提供沉积环境的特征和现象信息,但也有少数研究将系统过程与沉积特征相联系,例如深海沉积氧同位素与气候、海面变化的关系^[17]。

2.2 层序地层学

一些学者认为,沉积相分析以描述性方法为主,按照“具体情况、具体分析”的操作方式,不免缺乏整体上的逻辑性^[18]。他们认为,层序地层学方法更有逻辑性和可操作性,尤其是对于地震地层资料和钻孔资料的解译更为有效^[19]。

从字面上看,“层序地层学”像是地层学的分支,但从内涵上看它应是沉积学的分支。在20世纪50—70年代的海底油气资源勘探中,浅层地球物理探测技术被广泛应用,除钻孔记录需要沉积学解释之外,地层剖面仪产出的大量数据也需要沉积学解释。在三维空间里,地层剖面仪数据呈现了许多个界面,而在二维图像中则表现为地层内部的形态各异的界线。如何理解这些特征?按照地层学原理,将其解释为“不整合面”是最方便的,但难以获得更多的环境演化信息。按照沉积学的观点,则要分析每一个间断面、每一条界线的含义:间断是如何形成的、两个间断面之间发生了什么、产生什么层序、间断的时间尺度是多大、间断面之间层序的空间分布和新老关系如何、代表什么类型的环境?这些问题导致了层序地层学在20世纪60—70年代的诞生^[9,20],绝非偶然。

层序地层学的创立者们提出,地层剖面特征是由海面变化和沉积物供给这两个条件决定的,有了这两

个条件,地层剖面仪数据能够得到合乎逻辑的解释,上面的问题也就都好回答了^[20-21]。还有一个顺理成章的概念:因为回答这些问题要用地层剖面数据而不用沉积物样品,所以给出的答案不是沉积相,而是地震相。

层序地层学方法的最突出之点,是将层序特征与系统主控过程(海面变化和沉积物供给)相联系,并在此约束下得出沉积记录的其他过程和机制信息,如沉积间断的时间长度、沉积物收支、沉积记录的时空分布等。地震相与沉积相之间形成了相辅相成的关系,这是一个进步。另一方面,层序地层学也有其局限性,在分析流程上或多或少表现出“看图说话”的特点,即如果没有地层剖面数据,则地震相是什么样是难以预测的,物源和可容空间的关系也难以确定^[22]。层序地层学数据的多解性也在一定程度上存在^[23]。究其原因,是在层序地层学的理论体系中未能包含全部重要的现代过程如沉积物运输和堆积过程之缘故^[2]。

2.3 沉积动力学

虽然地层学、沉积学的理论框架已经部分地涉及到现代过程,然而从学科属性上看,系统化地处理现代过程的学科是沉积动力学。关于沉积物的动力学问题至少有三个学科的研究者给予了长期关注。水利学家将沉积动力学称之为“泥沙运动力学”,重点研究沉积物在流体环境下的起动、输运和堆积问题^[24],物理海洋学家关注细颗粒物质的通量和环境、生态效应问题^[25],而沉积学家则试图发现沉积体系与现代过程的关联性^[26-27]。

作为沉积学分支的沉积动力学重点关注现代过程,研究主题包括沉积物输运过程的定量刻画、过程与堆积产物的关系、以及沉积体系形成演化的宏观特征(如沉积层序的连续性、分辨率和保存潜力)等^[2,28]。

沉积物输运过程在河口、海岸、陆架区和陆坡、深海有很大不同。前者主要受潮流、波浪、河口环流与陆架环流的控制,潮流、波浪、浪流共同作用、河口环流的推移质和悬移质输运率公式被建立起来^[29],并在Delft-3D等数值模型中采用^[30-32]。总体上,此类输运过程导致沉积物的向岸输运,形成潮滩、潮流脊、潮汐汉道、河口湾、三角洲、砂砾质海滩沉积^[2]。陆架环流的输运效应主要是针对悬移质的,输运率的计算可结合物理海洋学观测和模拟来进行,河口之外形成的陆架泥质沉积是陆架环流的产物^[2]。陆架区域也

有沉积物重力流,是以河口逆重流和陆架底部浑浊层运动的形式出现的^[33-34],造成向海方向或横跨陆架的物质运输。陆架沉积物重力流对于三角洲前缘沉积、陆架泥质沉积有重要影响^[35]。

陆坡、深海的输运过程主要为深海环流和重力流。深海环境的现场观测难度大,虽然也付出了半个多世纪的巨大努力,但所获的观测数据相对较少,对深海环流和重力流过程及各自的产物等深线流沉积^[36-37]和浊流沉积等^[38-39]还需进一步研究。浊流是重力流的主要类型,形成的沉积体系规模巨大,目前的研究重点是发展新的现场观测方法,改进实验和数值模拟技术,加深过程—产物关系的认识^[40]。

在过程—产物关系上,地貌动力学也是一个重要的方面。地貌代表着瞬时的沉积面,如果地貌的时间序列为已知,则沉积层序也就确定了。海岸与陆架地貌形态和演化的模拟已从先前的基于沉积物收支的方法逐渐深入到基于过程和机制的方法^[41-43]。另一个与此相关、目前活跃的研究方向是实验地貌学。设计得当的小尺度、低成本实验可直观地给出重要过程^[44],再辅之以数值模型,通过实验室条件和现实条件下的模拟对照,能将实验模拟结果“翻译”为现实环境所涉及的时空尺度下的地貌格局,这可能是对传统工程物理模型方法的实质性改进。

关于沉积体系的宏观特征,按照物质守恒原理,任何有沉积物持续供给的稳定沉积环境都应形成连续的沉积记录。例如,将渤海东海宽广陆架上不同的全新世沉积体系按照年代顺序拼接起来,确定每个沉积体系的时间分辨率和持续形成时段,就能提高沉积记录的完整性^[45-46]。对于单个沉积体系而言,连续的沉积记录可能是有限的,基于沉积物滞留指数的长江河口三角洲模拟结果表明,在目前的条件下,三角洲的规模即将达到生长极限^[47],在地质记录中尚未发现比这个三角洲更大规模的堆积体^[16],似乎说明沉积体系生长的确受到了堆积过程本身的约束。

综上所述,研究者们已经建立起河口、海岸和陆架环境的沉积动力学现场观测方法和理论体系,如果原始地形、海面位置、沉积物来源为已知,则通过输运和堆积过程的计算和模拟,能够获得沉积物输运方向和强度、沉积速率、沉积体系演化、沉积记录的连续性、分辨率和保存潜力等信息^[2]。但是,迄今为止,沉积动力学还较少涉及沉积记录研究的核心问题,即沉积记录信息提取问题。

3 讨论

3.1 现代过程的沉积记录信息提取

从沉积记录中提取地球演化信息,是地层学、沉积学的共同点。正由于如此,有多部学术专著是将这两个分支放在一起介绍的^[7,48]。然而,由于地层学、沉积学的时间尺度和分辨率不同,两者在提取什么样的信息上是有不同侧重的。

地层学注重实物材料的获得,因而生物化石和岩芯的描述和分析成为研究重点,基本方法是用实物材料的存在来论证地球历史上有过的现象,例如用恐龙化石来说明中生代是爬行动物的世界。利用岩性和地球化学特征与环境的关系来提取环境信息,还是次要的,虽然也有过很多研究。沉积学却把地层学的次要方面上升为主要研究对象,要从沉积剖面、钻孔和地球物理记录中提取环境信息。基本方法是用现实环境中的相关关系解释沉积物堆积时的环境特征和因素,例如从沉积物中并不能直接看到海面变化,这一信息是基于氧同位素与海面位置的关系而获取的^[17]。根据沉积动力学的观点,地层学与沉积学的这层关系可以用现代过程来理解。在全新世尺度上,浅海沉积层可达数十米厚度,与古生代、中生代地层厚度相比,它的沉积速率是在是太高了,反过来也说明古老地层是有大部分缺失的,地层缺失既有沉积中断的原因,也有堆积后遭受侵蚀的原因。地层学以残缺记录为研究对象,所以要在全球尺度上勾画演化历程,沉积学以沉积环境为地层单元,所以就侧重环境信息。

按照地球系统科学的研究需求,地层学与沉积学的结合成为学科发展趋势。“深时”研究^[49]的实质,是要求用全新世环境征、过程和机制研究的尺度,去理解地质历史上的地层记录。古海洋学研究中处理沉积记录的方法,既是地层学的,也是沉积学的。环境特征的代用指标是关键,根据沉积记录中各种变量与环境参数的相关分析,可建立起两者之间的统计关系,有关古水深、古水温、古盐度、古生物生产、古气候等信息的提取就是基于这样的方法^[50-51]。然而,由于代用指标大多是根据相关分析而获得,因此其中所隐含的过程、机制信息是不够明确的,而如果不能完全地提取过程、机制信息,则难以深入研究地球环境演化的因果关系。要想从代用指标获得过程、机制完整信息,必须进行沉积记录形成的动力学研究。

所谓动力学方法,就是考虑物质和能量在系统边

界和内部的传输、转换、循环,进而预测系统行为的方法。具体而言,是要建立起一套方程组,使之能够刻画我们所关心的变量的时空变化。水动力学是一个经典的实例,根据质量守恒原理可推导出水体连续方程,再根据牛顿定律形成动量方程。所构成的方程有四个,与未知函数的个数相同(即水体密度和三个维度上的流速,均为时间和空间位置的函数),因而有解。

沉积记录形成的动力学是基于现代过程研究的。其思路是将沉积记录中的变量或信息与环境中的过程和机制相联系,利用动力学模拟建立起两者的定量关系。这里用来自江苏海岸的两个案例来说明这一“用过程研究结果指导过程信息提取”方法的含义。第一个案例是潮滩沉积层序的保存潜力。保存潜力是潮周期中形成的沉积层最终能够保存在地层中的概率,该变量不能从岩芯分析直接获得。但是,将保存潜力定义为潮周期中滩面冲淤强度的函数,就能根据潮间带沉积物输运、堆积过程的模拟,给出保存潜力的量值^[52]。第二个案例是潮滩细颗粒物堆积速率的控制机制问题。堆积速率可以用²¹⁰Pb方法测得,但它并不直接显示其值大小的理由。根据潮滩沉积动力学模拟结果,泥滩堆积速率受控于涨潮流悬沙浓度^[53],而后者决定于潮下带水域的潮流和地质分布格局^[54]。因此,堆积速率就与潮流流速、水深、细颗粒沉积物再悬浮等过程联系起来。

3.2 “勘测式”模型方法

动力学研究通常与模型相联系,但模拟结果的偏差经常引发对模型的质疑。这里要明确的概念是,模型是一件研究工具,输出结果是否正确,决定于模型本身的原理和输入数据^[55]。作为一件工具,它可以在使用中改进,但质疑工具是不合逻辑的,如同用机床加工产品,是否合格,要看工作流程是否正确,所用的材料是否符合要求,虽然机床本身也有改进的余地,但这只是在工具的意义上的说,说机床是否正确,没有什么意义。

与经典水动力学模型对比,沉积记录的动力学是不同的。首先,要模拟沉积记录隐含的过程和机制,经常出现的情形是未知函数的个数多于方程个数,使得方程组无解。一方面,在沉积动力学里,由于沉积物只有收支平衡方程(相当于水动力学中的连续方程)而无动量方程,因此方程数目就不够了。另一方面,在模拟中每增加一个自变量,就有可能在所添加的方程中加入多个新的表征系统过程的未知变量,使

得方程个数少于未知函数的个数。例如,海洋沉积的有机质含量在钻孔样品中易于测定,而影响有机质含量的因素却不止一个,如沉积物输运强度、堆积速率、水层生物生产、生物颗粒降解速率等,因此在有机质含量的质量守恒的一个方程中要加入不止一个新的变量,这些新变量是不能按照数值模拟的一般方法求解的。

其次,模拟所需的边界和初始条件是未知的。对于我们目前的海洋环境,有实测地形图或海图,再加上现场观测数据就可以确定模型的边界和初始条件。然而对于钻孔中沉积层序形成时的环境,这个任务就不那么容易了。

克服以上两点困难的可能出路之一,是采用控制方程加科学假说所构成的体系。对于未知变量多于方程个数的问题,可从一个简单、有解的模拟系统开始(如潮流模型),每引进一个沉积层序中的新变量,就对新变量的相关过程进行分析,形成该变量与其他变量之间关系的工作假说,直至方程个数满足要求。对于边界和初始条件问题,可用以沉积记录本身来恢复当时的水深、温度、盐度等条件,形成关于边界和初始条件的猜想或工作假说。将模型输出结果(通常为过程—产物关系)与沉积记录相对照,可对工作假说进行改进,经过反复迭代,模型与沉积记录之间可形成一个融洽的系统。

当方程个数欠缺时,就用模拟本身来寻找新的方程,这一方法可称为“勘测式”模拟方法。这就如同地质勘探,钻孔越多,约束条件也越多,对地层系统的了解越深。一旦新的方程得以确立,模型就有了进一步拓展的潜力,过去曾经有过的“一孔之见好解释、孔越多越难解释”的悖论将有望被克服。勘测性模拟一旦建立,也可称为地质历史时期沉积记录的潜在分析工具。这一方法在技术上需要突破的是如何形成与控制方程相配的工作假说。

3.3 生物过程的定量表达和控制方程

沉积记录的形成是物理、化学、生物过程共同作用的结果。物理和化学的控制方程较易根据物质和能量关系而建立,而生物过程如何表达,却是一个难题,这里讨论如何从工作假说导向生物方程建立的途径。

生物过程与物理、化学过程的最大不同,在于信息的传递。在沉积和地貌动力学中,往往根据生物体的存在(如底栖藻类、盐沼植被、红树林、珊瑚礁)来构建其影响的经验方程^[56-57]。但是,生物体存在的

过程和机制本身是被忽略的。仅靠“翻译”生物体的物质和能量传输功能,还不能完整反映生物信息的传输及其影响(如基因传递)。另一种处理方式是从现有的知识体系中寻找、刻画生物过程的数学表达方法,如生物信息熵、基因、自组织系统、数学生态等^[58-60]。

依靠大数据方法来寻找所需的关系式,这也是一种可能。例如,选取任意形式的数学函数,将其中的变量分为两类,一类是与生命体本身特征相关的,如贝类生物的介壳形态,另一类是表征外部环境因素的,如食物供给。通过相关分析,可以筛选出合适的数学表达式,用以判别生物过程的产物特征。而一旦实现这个目标,函数表达式中的环境参数就可以作为未知函数来对待,用以增加模拟体系的方程个数。

4 结语

本文对沉积记录研究的地层学、沉积学方法进行了回顾,并从现代过程视角提出了新的科学问题,总结如下:

(1) 地层学提供了宏观大尺度沉积记录的分析方法,而沉积学则提高了分析的时空分辨率。两种方法主要是针对特征和现象信息的,而有关过程和机制信息的提取还较为薄弱。

(2) 基于现代过程研究的勘测性模拟是控制方程加工作假说所构成的体系。经典数值模拟依赖于未知变量与方程个数相同的控制方程,而勘测性模拟的特点是针对控制方程不足、边界和初始条件未知的环境,通过工作假说的提出获得所需的方程,然后以模型输出方式给出沉积记录所含的过程和机制信息。

(3) 勘测性模拟方法在技术上需要突破的是如何形成与控制方程相配的工作假说。对于沉积体系形成中的生物过程,可依靠大数据等方法,通过分析筛选出合适的数学表达式,其中含有与生物本身特征相关的变量和表征外部环境因素的变量。

致谢 本项研究受到王成善院士主持的“沉积学发展战略研究”项目的支持,部分内容在“中国沉积学发展战略国际研讨会”(香山科学会议第571次学术讨论会,北京,2016年9月25—28日)进行了交流。谨此致谢。

参考文献(References)

- [1] Boggs S, Jr. Petrology of sedimentary rocks[M]. 2nd ed. Cambridge: Cambridge University Press, 2009: 6-8.
- [2] Gao S, Collins M B. Holocene sedimentary systems on continental shelves[J]. *Marine Geology*, 2014, 352: 268-294.
- [3] Talley L D, Reid J L, Robbins P E. Data-based meridional overturning streamfunctions for the global ocean[J]. *Journal of Climate*, 2003, 16(19): 3213-3226.
- [4] Lumpkin R, Speer K. Global ocean meridional overturning[J]. *Journal of Physical Oceanography*, 2007, 37(10): 2550-2562.
- [5] Curray J R, Moore D G. Growth of the Bengal deep-sea fan and denudation in the Himalayas[J]. *GSA Bulletin*, 1971, 82(3): 563-572.
- [6] Davis R A, Jr. Barrier island systems: a geologic overview[M]// Davis R A, Jr. *Geology of Holocene barrier island systems*. New York: Springer-Verlag, 1994: 1-46.
- [7] Nichols G. *Sedimentology and stratigraphy*[M]. 2nd ed. London: Wiley-Blackwell, 2009: 432.
- [8] Geyh M A, Schleicher H. Absolute age determination: physical and chemical dating methods and their application[M]. Berlin Heidelberg: Springer-Verlag, 1990: 503.
- [9] Sloss L L. Sequences in the cratonic interior of North America[J]. *GSA Bulletin*, 1963, 74(2): 93-114.
- [10] Barnosky A D, Matzke N, Tomiya S, et al. Has the Earth's sixth mass extinction already arrived? [J]. *Nature*, 2011, 471(7336): 51-57.
- [11] Hallam A. Facies interpretation and the stratigraphic record[M]. Oxford: W. H. Freeman, 1981: 291.
- [12] Gao S. Geomorphology and sedimentology of tidal flats[M]//Perillo G M E, Wolanski E, Cahoon D, et al. *Coastal wetlands: an integrated ecosystem approach*. Amsterdam: Elsevier, 2009: 295-316.
- [13] Boothroyd J C. Tidal inlets and tidal deltas[M]//Davis R A, Jr. *Coastal sedimentary environments*. 2nd ed. New York: Springer-Verlag, 1985: 445-532.
- [14] Reineck H E, Singh I B. *Depositional sedimentary environments* [M]. 2nd ed. Berlin: Springer-Verlag, 1980: 549.
- [15] Reading H G. *Sedimentary environments and facies*[M]. 2nd ed. Oxford: Blackwell Scientific Publications, 1986: 615.
- [16] Davis R A, Jr. *Depositional systems: a genetic approach to sedimentary geology* [M]. Englewood Cliffs, New Jersey: Prentice-Hall, 1983: 669.
- [17] Shackleton N J. Oxygen isotopes, ice volume and sea level[J]. *Quaternary Science Reviews*, 1987, 6(3/4): 183-190.
- [18] Miall A D. *The geology of stratigraphic sequences*[M]. 2nd ed. Berlin, Heidelberg: Springer-Verlag, 2010: 522.
- [19] Catuneanu O. *Principles of sequence stratigraphy* [M]. Amsterdam: Elsevier, 2006: 105-233.
- [20] Vail P R, Mitchum R M, Jr, Todd R G, et al. Seismic stratigraphy and global changes of sea level[M]//Payton C E. *Seismic stratigraphy: applications to hydrocarbon exploration*. Tulsa: American Association of Petroleum Geologists Memoir, 1977, 26: 49-212.
- [21] Nystuen J P. History and development of sequence stratigraphy

- [M]//Gradstein F M, Sandvik K O, Milton N J. Sequence stratigraphy: concepts and application. Amsterdam; Elsevier, 1998; 31-116.
- [22] Walker R G. Facies modeling and sequence stratigraphy[J]. Journal of Sedimentary Research, 1990, 60(5): 777-786.
- [23] Catuneanu O. Sequence stratigraphy of clastic systems: concepts, merits, and pitfalls[J]. Journal of African Earth Sciences, 2002, 35(1): 1-43.
- [24] Fredsøe J, Deigaard R. Mechanics of coastal sediment transport; advanced series on ocean engineering, volume 3[M]. Singapore: World Scientific, 1992; 369.
- [25] Uncles R J. Estuarine physical processes research; some recent studies and progress[J]. Estuarine, Coastal and Shelf Science, 2002, 55(6): 829-856.
- [26] Nittrouer C A, Austin J A, Field M E, et al. Continental margin sedimentation: from sediment transport to sequence stratigraphy (IAS Special Publication 37) [M]. Chichester: John Wiley, 2007; 560.
- [27] Milligan T G, Cattaneo A. Sediment dynamics in the western Adriatic sea: from transport to stratigraphy[J]. Continental Shelf Research, 2007, 27(3/4): 287-295.
- [28] 高抒. 海洋沉积动力学研究导引[M]. 南京: 南京大学出版社, 2013: 213-312. [Gao Shu. Introduction to marine sedimentary dynamics[M]. Nanjing: Nanjing University Press, 2013; 213-312.]
- [29] Dyer K R. Coastal and estuarine sediment dynamics[M]. Chichester: John Wiley, 1986; 342.
- [30] Papanicolaou A T N, Elhakeem M, Krallis G, et al. Sediment transport modeling review—current and future developments[J]. Journal of Hydraulic Engineering, 2008, 134(1): 1-14.
- [31] Yu Q, Wang Y W, Gao S, et al. Modeling the formation of a sand bar within a large funnel-shaped, tide-dominated estuary: Qiantangjiang estuary, China[J]. Marine Geology, 2012, 299-302: 63-76.
- [32] Zhu Q G, Wang Y P, Gao S, et al. Modeling morphological change in anthropogenically controlled estuaries [J]. Anthropocene, 2017, 17: 70-83.
- [33] Wright L D, Friedrichs C T, Kim S C, et al. Effects of ambient currents and waves on gravity-driven sediment transport on continental shelves[J]. Marine Geology, 2001, 175(1/2/3/4): 25-45.
- [34] Wright L D, Friedrichs C T. Gravity-driven sediment transport on continental shelves: a status report [J]. Continental Shelf Research, 2006, 26(17/18): 2092-2107.
- [35] Gao S, Liu Y L, Yang Y, et al. Evolution status of the distal mud deposit associated with the Pearl river, northern South China sea continental shelf[J]. Journal of Asian Earth Sciences, 2015, 114: 562-573.
- [36] Stow D A V, Faugères J C, Howe J A, et al. Bottom currents, contourites and deep-sea sediment drifts: current state-of-the-art [J]. Geological Society, London, Memoirs, 2002, 22(1): 7-20.
- [37] Rebesco M, Hernández-Molina F J, Van Rooij D, et al. Contourites and associated sediments controlled by deep-water circulation processes: state-of-the-art and future considerations [J]. Marine Geology, 2014, 352: 111-154.
- [38] Talling P J. On the triggers, resulting flow types and frequencies of subaqueous sediment density flows in different settings[J]. Marine Geology, 2014, 352: 155-182.
- [39] Postma G, Cartigny M J B. Supercritical and subcritical turbidity currents and their deposits: a synthesis [J]. Geology, 2014, 42(11): 987-990.
- [40] Stow D A V, Mayall M. Deep-water sedimentary systems: new models for the 21st century [J]. Marine and Petroleum Geology, 2000, 17(2): 125-135.
- [41] Paola C. Quantitative models of sedimentary basin filling[J]. Sedimentology, 2000, 47(S1): 121-178.
- [42] Hutton E W H, Syvitski J P M. *Sedflux* 2.0: an advanced process-response model that generates three-dimensional stratigraphy [J]. Computers & Geosciences, 2008, 34(10): 1319-1337.
- [43] Liu X J, Gao S, Wang Y P. Modeling the deposition system evolution of accreting tidal flats: a case study from the coastal plain of central Jiangsu, China[J]. Journal of Coastal Research, 2015, 31(1): 107-118.
- [44] Paola C, Straub K, Mohrig D, et al. The “unreasonable effectiveness” of stratigraphic and geomorphic experiments[J]. Earth-Science Reviews, 2009, 97(1/2/3/4): 1-43.
- [45] Gao S. Holocene shelf-coastal sedimentary systems associated with the Changjiang river: an overview [J]. Acta Oceanologica Sinica, 2013, 32(12): 4-12.
- [46] Gao S, Wang D D, Yang Y, et al. Holocene sedimentary systems on a broad continental shelf with abundant river input: process-product relationships [M]//Clift P D, Harff J, Wu J, et al. River-dominated shelf sediments of East Asian seas. Geological Society, London, Special Publications, 2015, 429: 231-268.
- [47] Gao S. Modeling the growth limit of the Changjiang delta [J]. Geomorphology, 2007, 85(3/4): 225-236.
- [48] Boggs S Jr. Principles of sedimentology and stratigraphy [M]. Columbus, Ohio: Merrill, 1987; 784.
- [49] 孙枢, 王成善. “深时” (Deep Time) 研究与沉积学 [J]. 沉积学报, 2009, 27(5): 792-810. [Sun Shu, Wang Chengshan. Deep time and sedimentology [J]. Acta Sedimentologica Sinica, 2009, 27(5): 792-810.]
- [50] Meyers P A. Organic geochemical proxies of paleoceanographic, paleolimnologic, and paleoclimatic processes [J]. Organic Geochemistry, 1997, 27(5/6): 213-250.
- [51] Wefer G, Berger W H, Bijma J, et al. Clues to ocean history: a brief overview of proxies [M]//Fischer G, Wefer G. Use of proxies in paleoceanography: examples from the South Atlantic. Berlin Heidelberg: Springer-Verlag, 1999: 1-68.
- [52] Gao S. Modeling the preservation potential of tidal flat sedimentary records, Jiangsu coast, eastern China [J]. Continental Shelf Research, 2009, 29(16): 1927-1936.
- [53] 王文昊, 高抒, 徐杨佩云, 等. 江苏中部海岸潮滩沉积速率特征

- 值的数值实验分析[J]. 南京大学学报(自然科学), 2014, 50(5): 656-665. [Wang Wenhao, Gao Shu, Xu Yangpeiun, et al. Numerical experiments for the characteristic deposition rates over the tidal flat, central Jiangsu coast[J]. Journal of Nanjing University (Natural Sciences), 2014, 50(5): 656-665.]
- [54] 徐琦琳, 高抒, 王文昊, 等. 典型潮汐水道悬沙浓度的潮控机理模拟分析[J]. 南京大学学报(自然科学), 2014, 50(5): 646-655. [Xu Qilin, Gao Shu, Wang Wenhao, et al. Simulation and analysis of the tidal control mechanism of suspended sediment concentrations in a typical tidal channel[J]. Journal of Nanjing University (Natural Sciences), 2014, 50(5): 646-655.]
- [55] 高抒. 海洋沉积地质过程模拟: 性质与问题及前景[J]. 海洋地质与第四纪地质, 2011, 31(5): 1-7. [Gao Shu. Numerical modeling of marine sedimentary processes: the nature, scientific problems, and prospect[J]. Marine Geology & Quaternary Geology, 2011, 31(5): 1-7.]
- [56] Widdows J, Brinsley M. Impact of biotic and abiotic processes on sediment dynamics and the consequences to the structure and functioning of the intertidal zone[J]. Journal of Sea Research, 2002, 48(2): 143-156.
- [57] Wang A J, Gao S, Chen J, et al. Sediment dynamic responses of coastal salt marsh to typhoon "KAEMI" in Quanzhou Bay, Fujian province, China[J]. Chinese Science Bulletin, 2009, 54(1): 120-130.
- [58] Kondo S, Miura T. Reaction-diffusion model as a framework for understanding biological pattern formation[J]. Science, 2010, 329(5999): 1616-1620.
- [59] Liu Q X, Doelman A, Rottschäfer V, et al. Phase separation explains a new class of self-organized spatial patterns in ecological systems[J]. Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America, 2013, 110(29): 11905-11910.
- [60] Grace J B, Anderson T M, Olf H, et al. On the specification of structural equation models for ecological systems[J]. Ecological Monographs, 2010, 80(1): 67-87.

Discover More Information from Sedimentary Records: Views Based on Contemporary Earth Surface Dynamic Processes

GAO Shu

State Key Laboratory for Estuarine and Coastal Research, East China Normal University, Shanghai 200062, China

Abstract: The purpose of this paper is to discuss and review the methodology of sedimentary record studies adopted in stratigraphy and sedimentology and to propose new research directions. Sedimentary records are the major data source for the study on earth's history, which are dealt with by stratigraphy and sedimentology, using macro-temporal scale and high resolution analyses, respectively. However, the information thus obtained is associated mainly with the characteristics of the deposits or the environment in which the deposits were formulated, with little information on the processes and mechanisms for the formation of the records. Here I propose a method of "prospective modeling" to extract the process and mechanism information from the sedimentary record. Classical numerical modeling is a system containing governing equations with the same number of unknowns, with the model output being calibrated against observations. In contrast, prospective modeling depends on a combination of governing equations and working hypotheses. The working hypotheses are evaluated against sedimentary records. As such, once established, the model output reveals the process-mechanism information in the sedimentary records. Prospective modeling may also serve as a potential tool for analyzing the stratigraphic records formed in the geological past.

Key words: sedimentary record; modern depositional environments; process-product relationship; correlation-based proxies; process-mechanism information; prospective modeling