

深时源—汇系统综合研究和沙垒田实例分析

朱筱敏¹, 刘强虎², 谈明轩³, 李顺利⁴, 陈贺贺⁵, 聂银兰¹

1. 中国石油大学(北京)地球科学学院, 北京 102249

2. 中国地质大学(武汉)资源学院, 武汉 430070

3. 河海大学海洋学院, 南京 210098

4. 中国地质大学(北京)能源学院, 北京 100083

5. 中国地质大学(北京)海洋学院, 北京 100083

摘要 【意义】源—汇系统研究是当今沉积地质学关注热点,其重建对理解区域构造、气候、海(湖)平面升降、物源供给、搬运通道和分散系统及其相互关系与规模性砂体预测均具有重要作用。【进展】源—汇系统可以根据时间尺度、成因机制、级次等要素进行分类,其主要研究内容包括物源体系、搬运通道及沉积体系研究。研究方法主要涉及碎屑矿物年代学定量示踪、源区地貌重建与定量古地貌分析、地貌比例关系分析、沉积物通量定量估算和地层正演模拟综合表征等;源—汇系统要素之间存在定量的收支平衡关系,基于收支平衡模型可预测砂体规模和有利储层分布。沙垒田地区源—汇系统研究表明,均一母岩组成与边界条件约束下汇水高差和汇水面积较大以及地形坡度较陡通常对应形成规模和厚度较大的扇体。【结论与展望】未来源—汇系统研究应加强基于盆地类型和成因的源—汇系统类型和级次划分,加强源—汇系统参数定量研究,不断提高深时源—汇系统要素表征精度,建立具有预测功能的深时源—汇系统要素耦合模型,有效预测砂体时空分布,不断实现多学科与多方法交叉融合,建立具有中国区域地质特色的源—汇系统模型。

关键词 深时源—汇系统;分类和要素表征;耦合关系模型;沙垒田凸起;发展趋势

第一作者简介 朱筱敏,男,1960年出生,博士,教授,沉积地质学、层序地层学与储层地质学,E-mail: xzmzhu@cup.edu.cn

中图分类号 P512.2 **文献标志码** A

0 引言

“源—汇系统”是指剥蚀区形成的风化剥落的颗粒沉积物和溶解物,经搬运通道输送至深海区域中沉积下来的整个体系^[1-3]。显然,将物源形成、搬运过程与沉积体系作为一个整体来研究,才能完整地认识地球表层的动力学过程及其演化。源—汇系统包含从汇水区(剥蚀区)、冲积—滨海平原区、浅海陆架区、大陆斜坡区及深海盆地等多个区带的地貌单元,需要对这些不同地貌区带的地形、水道或沟谷地貌及沉积体系开展定量或半定量的描述,探讨物理、生物和化学作用的剥蚀、搬运及沉积的动力学过程并进行模拟分析,明确源—汇系统不同构成要素的耦合关系^[2]。源—汇系统作为一个完整的体系蕴藏着地球表层动力学过程的沉积记录及地球表层对深部岩石圈动力学过程等方面的响应信息,其研究不仅有利于恢复源—汇系统要素的完整动力学过程,而

且对于沉积矿产勘探开发具有良好的预测作用。

源—汇系统的概念来自现代海洋沉积学研究。最近二十年引入到大陆边缘深时沉积系统研究领域,它强调依据剥蚀地貌与沉积地貌相互关系来分析沉积地质历史^[4]。近年来,许多重大地球科学研究计划都设立了关于源—汇系统的研究重点,如1998年美国国家自然科学基金会与其他学会提出的“大陆边缘科学计划(MARGINS Program Science Plans 2004)”,把从造山带物源区、冲积平原、浅海陆架,到深海盆地的源—汇系统列为近期四大重要研究领域之一^[5]。1999年欧洲各国结合国际大陆钻探计划(ICDP)和大洋钻探计划(ODP)发起了“EuroSTRATAFORM”计划。着重了解从源到汇的沉积系统,理解和模拟地中海和北大西洋边缘由河流经浅海陆架和峡谷到深海的无机和有机颗粒的搬运过程,确定沉积物搬运、通道和通量的时空变化特征

及其对沉积地层形成的作用和贡献^[6]。2003年,日本提出“亚洲三角洲演化与近代变化”的研究计划^[6]。近十年来,源—汇系统在大陆边缘沉积作用研究中得到高度重视,特别是聚焦青藏高原和亚洲大陆东缘开展源—汇系统研究;在陆相断陷盆地深时沉积体系研究中,聚焦源—汇系统驱动机制及地球动力学过程、陆相湖盆源—汇系统要素定量表征及其耦合关系、源—汇系统要素时空耦合控砂原理、沉积砂体和岩性油气圈闭预测等方面开展研究并取得了显著成果^[7-9]。

源—汇系统是通过沉积物搬运(路径)系统来建立剥蚀地貌与沉积地貌之间的物质变迁和交换关系的^[9]。源—汇系统不同要素的表征有利于建立剥蚀—搬运—沉积整个过程的定量响应关系(表1),使源—汇系统研究具有更高的定量性、准确性和预测性^[10]。

目前,源—汇系统研究已成为国际重大地质研究计划的重要课题,促进了多学科的广泛交叉和合作,取得了一系列重要进展,并为沉积地质资源的预测和高效勘探开发提供了新的思路。

1 源—汇系统划分及其特点

受不同地球动力学背景差异影响,不同类型沉积盆地剥蚀与沉积地貌存在明显差异,形成了各具特色的沉积体系和多样化的源—汇系统。显然,确定源—汇系统类型对于研究不同类型盆地的源—汇系统要素,建立反映沉积盆地特点的源—汇系统模型具有重要的地质意义。

1.1 时间尺度分类

根据研究时间尺度,可将源—汇系统划分为现代系统($10^0\sim10^3$ 年)、第四纪系统($10^3\sim2.5\times10^6$ 年)及深时系统($2.5\times10^6\sim10^8$ 年)^[11]。现代源—汇系统中物

源区、搬运区和沉积区的地形地貌、沉积记录等保存比较完整,沉积物通量受气候条件、洪水作用、人类活动及植被类型短期变化影响,各种参数比较容易获取,可建立多种地貌学参数比例关系及水力学参数比例关系的模型。第四纪源—汇系统主要受控于气候—基准面变化和构造运动,即物源区和搬运区的地形地貌相对固定,而沉积区随基准面(滨线迁移)变化,沉积通量主要受到米兰科维奇旋回、高频高幅海平面升降调控。与之相对,深时源—汇系统主要受控于长周期的构造运动及重大气候变化。因物源区保存不完整或根本未保存、边界条件的不确定性及地层记录不完整,使得深时源—汇系统的定量分析面临诸多挑战。然而,第四纪源—汇系统大部分沉积记录得到保存,仅少量地貌要素由于冰川活动、海平面升降和区域剥蚀作用存在一定缺失,可用来验证基于现代源—汇系统建立的各项地貌比例关系,为深时源—汇系统研究提供更可靠的依据^[12]。

1.2 成因机制分类

物源供给和地形坡度是驱动不同类型源—汇系统的关键因素。(1)物源供给是沉积砂体存在的物质基础。盆地边缘大型古陆、隆起区、古高地等物源区可长期持续为盆地提供长距离搬运到盆地内部的远源沉积物,即为盆外供源。近年来,石油勘探从凸起区转向凹陷区,从构造型圈闭转向岩性地层型圈闭,人们开始意识到盆内规模较小、遭受剥蚀时间较短的盆地内部或周缘的小型古高地、低凸起、凹中低隆等次级正向地貌单元也具有较好的供源能力并形成一定规模的沉积砂体。(2)地形坡度控制了沉积物入湖频率、搬运流态和搬运距离,是影响源汇过程的重要参数。缓坡地貌下发育的常年稳定水系可通过牵引流主导的方式持续性供给泥砂,在沉积区表现为粒度与含砂率相协调的特征;相反,陡坡背景下间歇

表1 陆相盆地源—汇系统要素表征内容及方法

Table 1 Element content and methods of characterizing source-to-sink system in a continental basin

要素	表征内容	表征方法
物源体系	母岩类型及风化能力	岩心薄片鉴定、岩石类型的化学风化速率序次及植物群落限定下风化剥蚀效能分析等
	古物源系统及构造属性	碎屑成分分析、重矿物分析、元素地球化学、碎屑锆石 U-Pb 年龄谱(基于蒙特卡洛统计逆向建模的 DZmix 算法)等
	古地貌恢复	地质年代学法、将近论古法、物源分析法、印模法、水文学法和沉积学法
	汇水单元刻画	通过古地貌图定量分析不同级次分水岭、汇水区面积、垂向高差和水系延伸长度以及形成的主要控制因素等
搬运体系	搬运通道类型	通过地震剖面识别搬运通道 V 型、U 型和 W 型等剖面形态,基于地震沉积学刻画搬运通道平面形态
	搬运通道定量表征	基于三维地震资料定量统计搬运通道的参数,包括宽度、深度、宽深比及截面积
沉积体系	沉积体系类型	岩心、测井和三维地震资料综合识别沉积相
	横向分布特征	现代沉积学、地震地层学和地震沉积学综合分析确定时空分布特征
	纵向演化规律	基于岩心沉积学、测井地质学和地震沉积学,确定沉积体系纵向演化规律

发育的山溪型河流往往以异重流为主的形式向沉积区呈脉冲式供源,表现为大套泥岩背景下出现事件性的砾岩沉积。

前人依据物源供给和地形坡度耦合关系已探索性划分不同类型源—汇系统。比如,(1)通过第四纪模拟和实验研究,将源—汇系统划分为“传送带”和“吸尘器”两种类型^[13]。“传送带”型为盆地边缘大型古陆稳定供源,盆外水系作为搬运通道,形成大型沉积体。“吸尘器”型由盆内下切谷提供少量沉积物并搬运至沉积区,形成小规模沉积体。(2)将源—汇系统划分为近源—陡坡—深水、远源—缓坡—深水和远源—缓坡—浅水三种类型^[14]。近源—陡坡—深水系统多发育于活动板块边界,水体深(>500 m),坡度陡,搬运通道短(<100 km),形成大规模沉积体;远源—缓坡—深水系统多发育于构造稳定的被动大陆边缘,水体深达千米级别,坡度平缓,汇水系统延伸距离为1 000~7 000 km,发育大陆级别河流供源和广阔的滨岸平原。远源—缓坡—浅水系统水体浅(10~100 m),坡度较缓,搬运路径延伸距离介于100~1 000 km,沉积物供给及其空间属性共同决定系统沉积特征^[15]。在“时空耦合”多^{说明:考虑前面加了一些字,在该段删除了几个字,利于排版}指导下,人们提出了隐蔽性物源的概念,在渤海海域识别并总结出典型的区域物源—盆源斜坡—三角洲砂体富集^{东侧和西侧}、块状断裂坡折带—扇三角洲砂体富集模式等8种富砂型源—汇系统^{其中东侧系统可划分为}^[7,16]。

1.3 级次分类

随着源—汇系统的研究逐渐向精细化和定量化转变,国内地质工作者尝试对源—汇系统开展精细解剖,分析内部的基础流域(水系)构成,划分源—汇系统级次。依据分水岭、分水线和脊线划分一级、二级和三级源—汇系统,比如将云南洱海“点苍山—洱海”现代源—汇系统划分为2个一级源—汇系统、19个二级源—汇系统和2个三级源—汇系统^[17]。

2 深时源—汇系统要素及表征方法

2.1 深时源—汇系统要素研究

深时源—汇系统的研究是从剥蚀区到沉积区的一体化研究,涉及构造地貌学、同位素年代学、层序地层学以及沉积学等多种学科的综合运用。深时源—汇系统不同要素的表征有助于建立剥蚀—搬运—沉积整个过程的定量响应关系,其研究内容主要包括物源体系、搬运通道以及沉积体系研究^[10]。

物源区是源—汇系统的根本要素和沉积物产出的物质基础。物源体系研究是在区域地质研究基础上,系统性开展母岩风化效能评价、母岩区碎屑物源分析与定量示踪、母岩区古构造恢复以及古地貌精细刻画等。

搬运通道是连接物源区和沉积区的输运纽带^[18],狭义上对应于物源区—沉积区的侵蚀/沉积型沟谷、构造变换带^{以及}其他类型输砂通道,广义上包含沉积物从源到汇搬运—沉积的所有载体^{以及}沉积物运输机制。因此,搬运通道研究并不局限于沟谷类型或者构造变换带的分类识别与精细解剖,而是整个沉积物路径系统的全面性、动态性以及系统性分析。

沉积体系是源区演化控制下物源供给、物质搬运及分散分配的综合响应,沉积响应继承了物源供给和搬运过程两者复杂性,同时也叠合了沉积区物质分配的复杂性^[15]。源—汇系统框架下的沉积体系研究内容包括依据层序地层学、沉积地质学、地震地层学和地震沉积学等多种理论与技术精细解剖不同类型沉积体系的分散样式,定量表征深时沉积体系发育形态与规模^[19],进而通过沉积体系的垂向演化特征解剖与对比分析,揭示深时源—汇系统的整体响应过程。

2.2 深时源—汇系统分析方法

2.2.1 碎屑矿物年代学定量示踪

碎屑矿物年代学示踪是深时源—汇系统重建相对有效与可靠的方法之一^[11]。由于锆石U-Pb激光剥蚀法获取数据相对较快,物源对比精确度较高,已被广泛运用于物源区风化产物示踪、古水系重建以及沉积物路径系统演化研究^[20]。碎屑锆石年龄谱与潜在源区结晶岩体年龄组成对比能够区分物源区物质组成的优势路径。近年来,碎屑锆石年代学分析在深时源—汇系统研究中主要表现为三个方面的进展:(1)大样本锆石年龄数据定量对比,提高了数据对比可信度,同时也达到识别次要物源的目的^[21];(2)锆石U-Pb与(U-Th)/He双定年技术的发展,以确定再旋回物源^[20];(3)锆石年龄谱的端元解析算法的不断改进,量化不同物源的相对贡献^[22]。由于母岩锆石产率存在差异性,从而在不同程度上影响物源定量示踪的研究结论。因此,近年来碎屑金红石、磷灰石、石榴石、独居石U-Pb定年方法在分析古水系方向与确定古水系演化方面也起到了积极作用^[23]。

2.2.2 源区地貌重建与定量古地貌分析

物源区原始古地貌恢复是深时源—汇系统重建的重要研究内容和方法。相比于沉积区而言,源区遭受长期的风化剥蚀(最终呈准平原化),其恢复难度较大。即使后期整个源区完全被上覆地层覆盖,所对应的残余古地貌也不一定完全适用于深时源—汇系统分析。一般地,在源区埋藏前最后阶段的残余古地貌最具参考价值^[24]。基于低温热年代学、沉积物回填以及古构造复原等相关技术方法能够定量重建物源区古地貌^[12]。基于物源区古地貌拾取,可分析古水系稳定性、预测沉积物通量变化,与沉积区的物质分配样式建立定量响应关系^[24]。

2.2.3 地貌比例关系分析

现代地貌学研究表明,无论地表过程如何演化,地貌形态总体上保存着某种相对稳定的耦合关系。利用“将今论古”的思想可将现代源—汇系统地貌学经验关系应用于深时源—汇系统多类型地貌单元规模的定量预测^[14]。地貌学比例关系研究最早仅限于汇水区内,而后扩展到从源到汇的多类型地貌单元的参数拟合分析中,例如水系长度与水系出口间距^[25]、水道长度与汇水面积或水道坡度^[26]、汇水面积与河道满岸形态^[27]、海底扇面积与陆坡长度^[28]等。深时源—汇系统要素耦合的研究方法应用于传统含油气盆地沉积体系分析中能够低成本、高效预测少井区/无井区有利储层分布特征,有助于提高油气勘探的成功率^[29]。

2.2.4 沉积物通量定量估算

沉积物通量定量估算是沉积区定量表征的重要研究内容之一,对于重建深时源—汇系统的信号传输过程具有重要的意义^[19]。目前定量分析方法主要建立在现代地貌学、水利学以及相关经验关系的研究基础上,其中以BQART模型法与支点法计算沉积物通量为代表^[30]。

BQART模型法是基于全球488条河流30多年水文数据,结合地貌参数统计成果建立,其适用表征96%现代河流体系的悬移载荷物质的通量变化^[31]。在层序地层学、古水系重建、古地貌恢复基础上,结合区域基岩分布特征以及古气候分析测试数据,即可估算深时“源—汇”系统的沉积物供给总量^[18]。目前BQART模型以及若干改进模型已被广泛应用于深时源—汇系统的沉积物通量估算分析,能够定量表征底床载荷和悬移载荷及其变化^[32-34]。

2.3 地层正演模拟综合表征

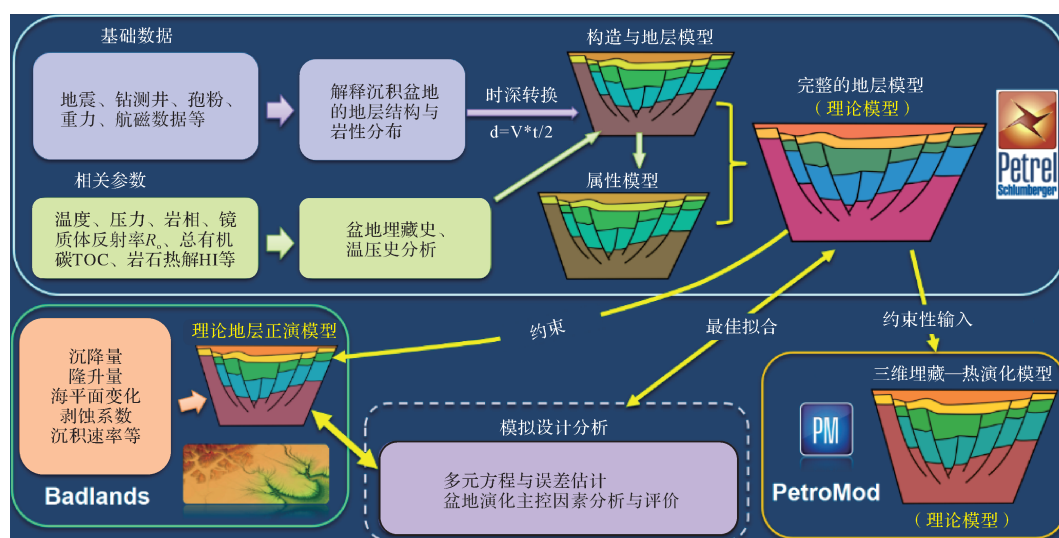
源—汇系统正演研究聚焦于环境信号变化及其对源—汇系统(源区动力演变和汇区沉积记录保存程度)的综合性影响,以系统表征源—汇系统的运转过程。

地层正演模拟研究方法包括物理模拟和数值模拟,是研究深时源—汇系统的重要手段。基于源—汇过程的物理模拟研究是将构造地貌沙箱模拟与水槽沉积学模拟结合起来,系统考虑物源区水系演变对搬运—沉积作用的影响。如通过设定降雨量、构造隆升与沉降速率参数,实时模拟源区山体的风化作用及水系迁移过程,并同时系统地、直观地分析汇区沉积物分散体系与建造样式,指示深时源—汇系统演变过程。随着计算机软硬件技术快速发展,基于源—汇过程的数值模拟研究已经逐渐从单一水动力扩散模型发展到地表过程模型与地球动力学模型的综合模拟阶段。古高程重建、古构造复原以及古气候模拟等多种研究方法也相继被纳入高精度地层模型的构建,为源—汇系统数值模拟研究提供了良好的地质参数约束^[35-37]。将含油气盆地沉积学、源汇地层正演模拟及含油气盆地模拟系统结合起来,能够为有利储层预测、含油气系统与油气潜力评价提供更为深入、有效的指导性建议(图1)^[38]。

3 源—汇系统形成发育的控制因素

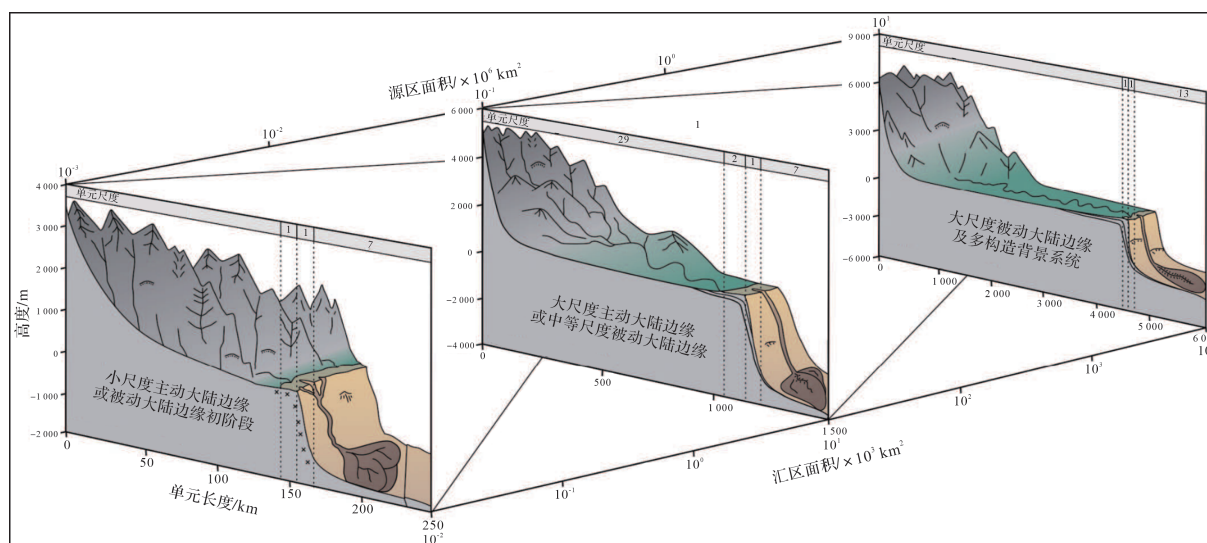
源—汇系统的形成发育包含从源到汇的多种过程:母岩发生机械—化学风化作用,产生成分、粒径、通量等不同的地质信号,借助多种搬运方式(水流、风力、重力等),以非线性的传递速度和输出频率,通过不同路径向沉积盆地汇聚,最终形成特征迥异的沉积物分散体系。由此可见,源—汇系统的形成与发育涉及要素多、影响因素复杂且反馈机制多样化。响应于构造作用、气候变化和海平面变化,沉积物搬运的动力学过程很少是平滑或连续的,导致其路径系统时常发生转向或间歇性储存,碎屑物质源—汇过程表现出复杂的路径轨迹和周期^[11,14,38-39]。

(1) 构造作用主控了不同类型源—汇系统的形成与发育^[38-39]。根据构成单元和发育构造背景的差异,源—汇系统可划分为迟滞型(Buffered)和瞬态型(Reactive)^[14]。迟滞型源—汇系统又称为三段式源—汇系统,多发育于被动大陆边缘等相对稳定的构造

图1 基于源汇过程的地层正演数值模拟与深时盆地模拟系统流程^[36]Fig.1 Workflow of source-to-sink stratigraphic forward modeling and deep-time basin modeling^[36]

背景中。该源—汇系统整体由造山带物源区、冲积平原和浅海大陆架、深海盆地三部分组成,其显著的特点是普遍发育广阔的冲积平原和大陆架^[14,39](图2)。瞬态型源—汇系统又称二段式源—汇系统,多发育于断陷盆地等活动型构造背景中。该源—汇系统整体由造山带物源区、深海平原两部分组成,缺乏较长的沉积物搬运路径,沉积物多直接由源区进入沉积区。构造背景决定了不同类型源—汇系统具有不同特点。例如在被动大陆边缘迟滞型源—汇系统中,冲积平原和浅海陆架能够不同程度地滞留沉积物,这决定了物源区沉积物通量的主要搬运方向和

初始卸载位置,深刻地影响着冲积平原下游的古地理特征、陆架边缘三角洲及深海扇的发育与演化;而瞬态型源—汇系统缺少滞留沉积物的区域,且其构造—地貌演化过程更为复杂,源—汇系统内地貌学参数相关性较弱^[14,38-40](图2)。在断陷盆地中,构造作用控制了横向汇水盆地在缓坡带和陡坡带的发育和演化。其中,汇水盆地的面积受控于拉伸过程中形成的构造斜坡长度^[41],汇水盆地的面积控制着水流和沉积物的年通量,进而控制了断陷盆地主控断层边缘冲积扇、扇三角洲和海(湖)底扇的面积。源—汇系统内断层破裂和褶皱生长控制了地貌的差异风

图2 主动与被动大陆边缘中源区面积、陆架宽度及盆底扇大小与斜坡长度的地貌学参数关系^[38]Fig.2 Geomorphological scale relationships for catchment, shelf and basin-floor segments for slope lengths of active- and passive-margin systems^[38]

化,进而造成局部范围的河流改道或合并,众多规模较小、相互独立的小型河流—湖泊源—汇系统主导了盆地充填;伴随断层分段连接过程,汇水盆地逐步成熟,相互独立的小型源—汇系统逐渐发育为大规模、整一的源—汇系统^[14,38-40]。

(2) 短期和长期时间尺度局部和区域性气候制约源—汇系统内沉积物时空分散过程^[9,17-22]。汇水盆地控制了沉积物输出的通量和频率,但是最终主要受控于气候因素,在 $10^0\sim 10^5$ 年短期尺度上尤为显著^[32,41]。气候变化对不同尺度源—汇系统的影响也取决于汇水盆地的发育规模。短期气候变化对小型源—汇系统内沉积物通量影响显著,对大型源—汇系统汇水盆地影响较小^[30,42]。短期气候变化迅速改变小尺度源—汇系统内沉积物剥蚀和外输过程的平衡,其响应时间可达 10^3 年尺度^[43];长期气候变化主导了大型源—汇系统汇水盆地输出的沉积物通量,其响应过程取决于源—汇系统内河流系统对气候变化的响应速度^[44]。研究显示,亚洲河流 $10^4\sim 10^6$ 年气候变化的周期对应河流响应于气候变化后在河口出现沉积物通量变化信号的时间^[45]。源—汇系统对气候变化的相对迟滞或迅速响应取决于风化剥蚀产率与风化产物输出速率之间的平衡^[45]。当气候变化引起的风化剥蚀产率与风化产物输出速率不平衡,则沉积物通量变化周期小于气候变化周期,此情况多发育瞬态型源—汇系统;反之,当沉积物通量变化周期大于气候变化周期时,则多发育迟滞型源—汇系统^[46-48]。

(3) 海平面变化对源—汇系统形成与发育的影响主要体现在对沉积物路径系统和沉积分散过程的

控制^[38,49]。通常情况下,海平面变化被归到气候对源—汇系统的影响中,但气候变化并非是海平面升降的唯一函数。海平面升降同时还受到构造作用、剥蚀地貌、沉积物供给通量等多方面的影响。海平面升降直接控制了源—汇系统在时间尺度上的特征演化:①海平面低位时期,物源区剥蚀碎屑经过水系搬运,其汇水盆地出口多位于海平面低位线处。此时海底峡谷体系头部可以直接接收汇水盆地的沉积信号,将其一对一地输送至深海平原^[39](图3);②海平面高位时期,海平面上升导致沉积动力过程复杂化,海底峡谷体系的头部则与汇水盆地分离。复杂的水动力作用及沉积物搬运机制(如沿岸流、等深流以及浊流等)促使沉积物在路径系统中滞留和再分配^[39](图3),使得源区的构造及气候信号在向深海盆地传输过程中发生改变,从而在一定程度上制约了深海沉积记录恢复古气候与古构造演化的可信度^[39,50]。自末次冰期以来,约 $50\times 10^6\text{ km}^3$ 的陆地冰盖融化,导致海平面上升约130 m^[51]。综上所述,海平面升降在不同周期尺度均可对源—汇系统内沉积物路径系统及沉积分散过程产生重要影响。

4 源—汇系统收支平衡与砂体预测

目前,源—汇系统的研究逐渐从定性研究过渡到源—汇系统各要素的定量分析以及砂体与其控制因素之间关系的定量研究^[7-8]。源—汇系统要素的定量表征与砂体定量预测正在深入探索之中,例如探索同生断裂作用对沉积充填的控制作用、古地貌恢

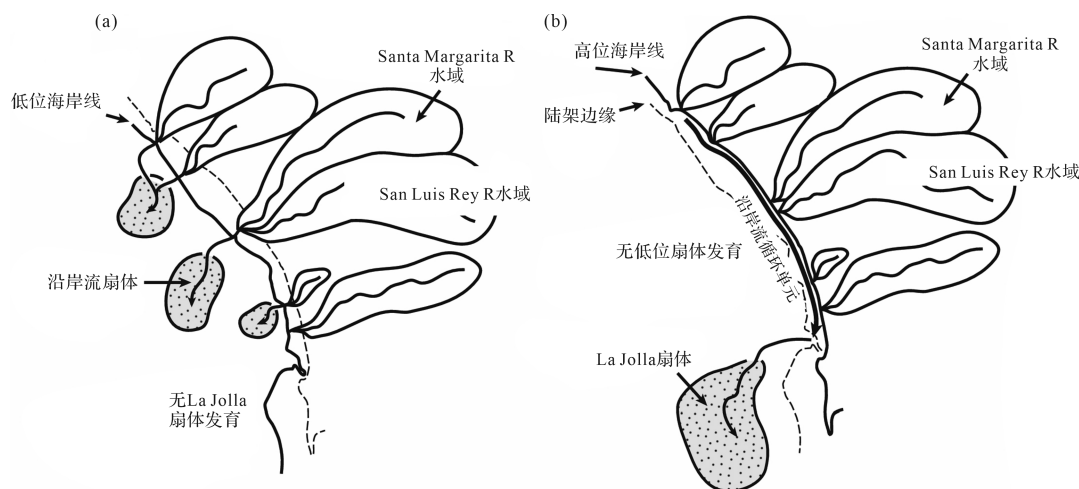


图3 海平面低位和高位时期源—汇系统中陆地—海洋沉积物路径系统示意图^[39]

(a) at lowstand sea levels; (b) at highstand sea levels^[39]

Fig.3 Summaries of land- to deep-sea sediment source-to-sink routing systems

复识别古沟谷与地形坡折、刻画沉积体系类型并预测有利储集砂体的展布。显然,定量刻画源区性质、汇水面积、坡度高差、沟谷规模、沉积类型等要素,建立从源到汇的定量响应关系是最终目的。在源—汇系统定量化约束下的沉积过程模拟,可为有限井控条件下源—汇系统要素定量刻画及耦合关系研究与砂体预测提供了有力支持。

4.1 源—汇收支平衡

近年来,利用源—汇系统要素地貌比例关系预测沉积体发育规模的研究方法愈发受到关注。该研究旨在利用源—汇地貌比例关系,通过对已知源—汇系统要素(如剥蚀区面积等)的地貌参数进行定量测定,来预测未知源—汇系统要素(如海底扇等)的尺寸规模^[28,38,52-53]。对于剥蚀区和搬运通道而言,定量统计参数包括地形高差、汇水面积、地形坡度、沟谷发育规模(宽度、深度、宽深比以及沟谷截面积)。地形高差和地形坡度决定了沉积物搬运的势能,是沉积物大规模搬运的核心驱动力;汇水面积决定了古水流量的大小,从而影响沉积物供给速率;沟谷宽度、深度及宽深比影响沉积物进入盆地之前的搬运方式,沟谷截面积则控制了沉积物输送能力和速率。对于沉积区而言,统计参数包括沉积体系面积、平均厚度及体积。从源—汇系统要素定量分析来看,盆内的沉积体积与源区的地形高差、汇水面积及沟谷截面积等三个参数密切相关,其中地形高差与沉积体的相关性最高,汇水面积次之,沟谷截面积最小^[54]。

以渤海湾盆地沙垒田凸起源—汇系统为例,地形高差和汇水面积越大,形成的沉积体系体积越大;反之地形高差和汇水面积越小,在盆内形成的沉积体系体积越小^[8,54]。地形高差、汇水面积、沟谷截面积与沉积体积4个参数耦合关系可用以下公式表示^[54]:

$$Y=2.7 \times X_1^2 - 3.3 \times 10^{-4} \times X_2^2 - 123.6 \times X_3^2 + 8.3 \times X_1 + 8.9 \times 10^{-2} \times X_2 + 26.2 \times X_3 - 4.1 \quad (1)$$

式中:Y为沉积体系体积(m³);X₁为地形高差(m);X₂为汇水面积(m²);X₃为沟谷截面积(m²);R²=0.62。研究表明,地形高差作用最大,与沉积体积的相关性最高,说明地形高差直接决定了沉积物供给量,高山陡坡易形成大规模的扇三角洲体系;其次是汇水面积与沉积体系的相关性较高,表明大的汇水面积具有较高的沉积物运载能力,可以持续为盆地提供充足的物源供给;最后是沟谷截面积,与沉积体积的相关性较低,说明沟谷通道规模是沉积体系发育的

必要而非充分条件(图4)。

4.2 源—汇系统中的砂体预测

断陷盆地砂体预测中,人们提出了山(有效物源)—沟(搬运通道)—坡(坡折体系)—面(层序界面)耦合控砂的理论观点,认为山—沟—坡—面的有效配置决定了砂体在平面上的分布位置,层序格架和界面决定了砂体发育的有利时期^[7]。山—沟—坡—面耦合控砂理论观点认为:在平面上,发育完整有效的山—沟—坡—面配置关系的区域为有利储集砂体的富集场所;在剖面上,层序界面附近(尤其是低位域沉积期)是有利储集砂体的富集位置。针对复杂陆相断陷盆地的砂体预测,在陆相源—汇系统时空耦合控砂理论指导下,渤海海域古近系砂体预测成功率从40%提高到80%^[17,55],显著提高了陆相断陷盆地砂体预测的成功率。

近期,人们将源—汇控砂原理认识应用于有利砂体和储层预测,提出了源—渠—汇—岩耦合控储的优质储层预测新方法^[29],将“来自于剥蚀区的沉积颗粒经搬运通道输送分散到盆地内沉积下来、并经过成岩埋藏成岩形成岩石”这一系统过程称之为“源—渠—汇—岩系统”。源—渠—汇—岩耦合控储的核心内涵是源—汇系统控域、源—汇沉积控砂、成岩作用控性、源—渠—汇—岩耦合控储。

众所周知,储层质量受构造、沉积、成岩作用综合控制,其中成岩作用为直接控制因素,而构造、沉积作用作为源—汇系统形成的重要因素,对储层发育具有重要的间接控制作用。从源—汇系统耦合模式角度出发,基于钻井、地震、岩心及储层分析资料,可将渤海湾盆地沙垒田凸起及围区源—汇系统分为断裂陡坡型、断裂缓坡型、斜坡型及断槽型四种类型^[8](表2)。发现不同类型源—汇系统的物源供给控制相应的沉积体系发育,进而影响储层的成岩作用与物性特征。比如,断裂缓坡带由于源区高差与汇水面积均大,沿断裂坡折带分布的沉积砂体规模大、范围广,砂岩成分和结构成熟度较高,埋深浅、机械压实作用较弱,次生孔隙发育,为优质储层发育有利区。

5 陆相湖盆沙垒田地区源—汇系统实例分析

渤海湾盆地是我国东部典型的新生代陆内裂谷盆地,整体具有多旋回叠加和多成因机制复合的特征,经历了古近纪断陷、新近纪拗陷两期构造演化阶

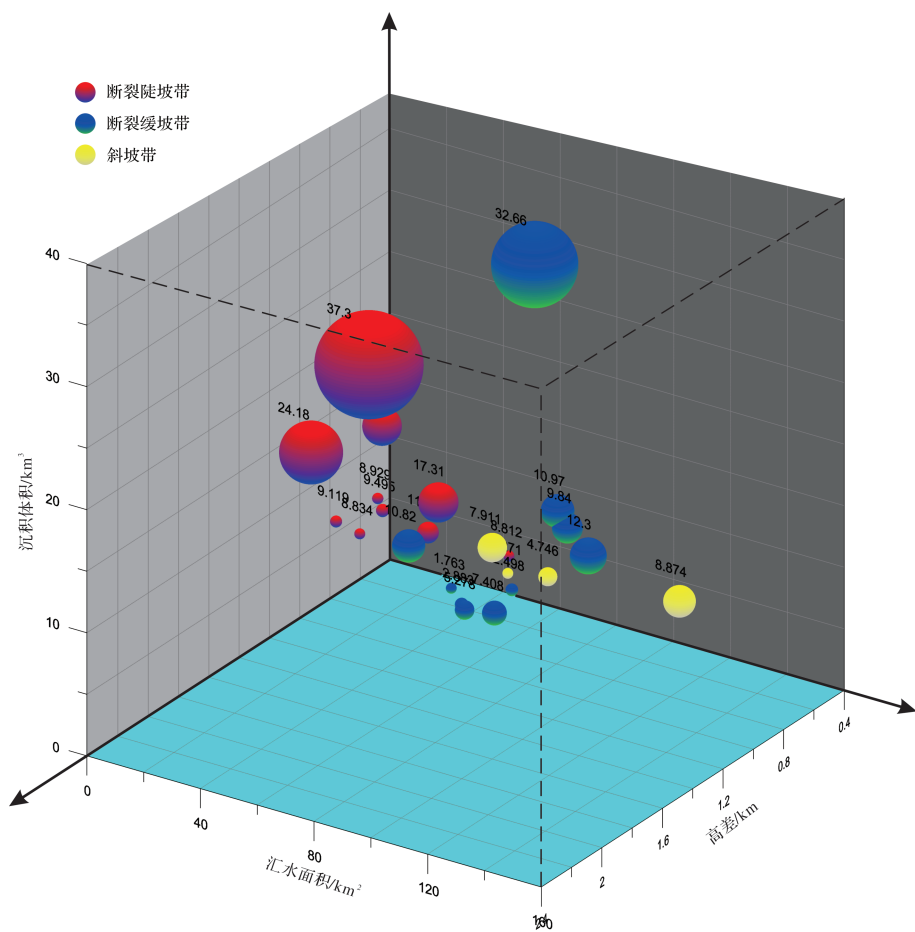


图4 渤海湾盆地沙垒田凸起源—汇系统要素定量关系三维散点图^[54]
Fig.4 3-D scattergram of source-to-sink elements in the Shaleitian uplift, Bohai Bay Basin^[54]

表2 渤海湾盆地沙垒田凸起源—汇系统类型与储层差异对比^[8]

Table 2 Comparisons between source-to-sink and reservoir quality in the Shaleitian uplift, Bohai Bay Basin^[8]

源—汇系统	断裂活动	沉积体系	成岩作用	储层类型
断裂陡坡型	强烈 (生长指数>2)	扇三角洲	压实作用与胶结作用强烈,少量次生孔隙	Ⅱ、Ⅲ类储层为主
断裂缓坡型	中等 (生长指数<2)	扇三角洲 /辫状河三角洲	压实作用中等,次生孔隙发育	Ⅰ类储层为主,同时发育Ⅱ、Ⅲ类储层
斜坡型	无	辫状河三角洲	胶结作用强烈,次生孔隙较少	Ⅱ、Ⅲ类储层为主,少量Ⅳ类储层
断槽型	走滑	扇三角洲	成岩作用差异较大,次生孔隙较为发育	Ⅰ类储层较少,Ⅱ、Ⅲ、Ⅳ类储层较多

段^[54,56]。沙垒田凸起作为渤海海域内古近纪早期出露面积最大的盆内凸起,位于渤海湾盆地西部,平面上呈EW走向展布,总面积约2 300 km²^[5]。沙垒田凸起东侧相邻渤中凹陷,西侧为歧口凹陷,南侧与沙南凹陷衔接,北侧同南堡凹陷相连^[54,57-59],其作为一个重要物源区发育多个汇水单元并向周缘四个凹陷差异供源且控制沉积充填过程(图5)。沙垒田凸起基岩出露岩性组合复杂多样,发育元古界花岗岩、混合花岗岩,古生界碳酸盐岩与中生界火山碎屑岩等(图5a)。

5.1 沙垒田凸起前古近系基岩分布及刻画表征

基于最新的钻井岩心、薄片、锆石等测试资料及三维高精度地震资料,开展沙垒田凸起岩性组成、锆石年龄、地震反射结构及古水系分布等分析,刻画沙垒田凸起前古近系基岩组成及分布^[57],并探讨古近纪早期源—汇系统配置关系(图6)。

应用沉降回剥分析技术恢复了沙垒田凸起区古近系古地理格局(图6a)。其中,沙垒田凸起受中部断裂分隔为东西两段,凸起西段面积约720 km²,

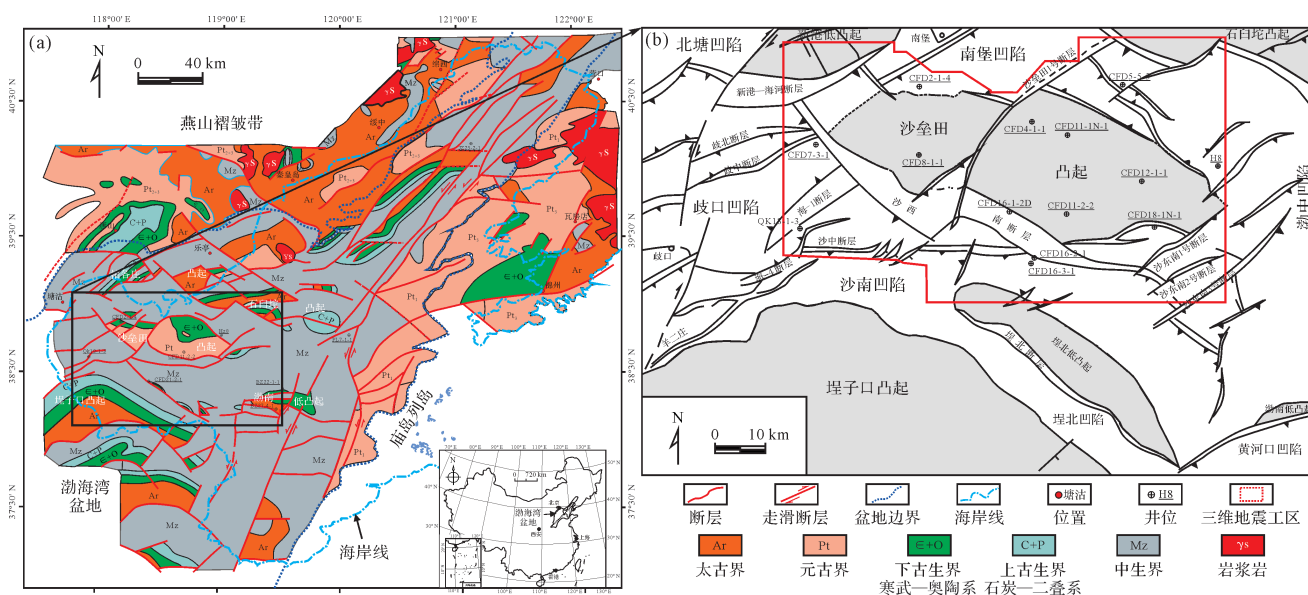


图5 渤海海域前古近纪地质图(a)和沙垒田凸起及其周缘凹陷边界条件(b)

Fig.5 Pre-Paleogene geological map of Bohai Bay

(a) Shaleitian uplift; and (b) surrounding geological units

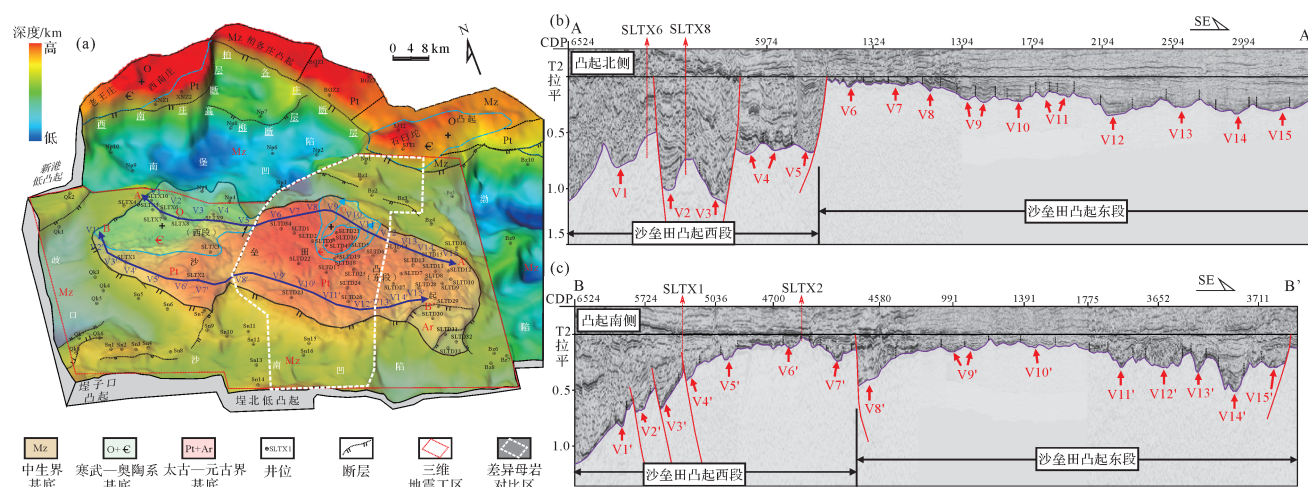


图6 渤海湾盆地沙垒田凸起前古近系基岩分布(a)及南北侧(b,c)搬运体系

Fig.6 Pre-Paleogene bedrock distribution of (a) Shaleitian uplift; (b, c) southern and northern routing systems

呈东南高西北低的格局;凸起东段面积约1 600 km²,呈西北高东南低的格局,且东段西北部较西段东南部高。

(1) 沙垒田凸起前古近纪母岩自南向北依次发育太古界—元古界(Ar+Pt)混合花岗岩或花岗岩、下古生界(O+ε)碳酸盐岩、中生界(Mz)火成岩与火山碎屑岩。中生界火成岩与火山碎屑岩广泛分布于沙垒田凸起围区,且构造位置较低(图6a)。凸起西段奥陶系—寒武系(O+ε)分布于西段北侧,由北向南逐步超覆尖灭;元古界(Pt)混合花岗岩与花岗岩分布于西段相对高地势区。凸起东段母岩以元古界(Pt)混

合花岗岩为主,广泛分布,面积约982 km²;奥陶系—寒武系(O+ε)仅发育于凸起东段北侧局部,呈NE向展布并与古地貌单元中相对低地势区叠合,其北部地层厚,向南侧逐步尖灭,面积约197 km²。

(2) 沙垒田凸起形貌特征差异化发育。其中,凸起东段为西北高东南低的沟岭化地貌,且高势区以NW—SE向为轴线向两侧变缓,其南侧(太古界—元古界母岩)较北侧(元古代—寒武系—奥陶系混合母岩)坡降(垂向高差)大,延伸距离长;凸起西段西南侧(元古界混合花岗岩或花岗岩母岩)受盆缘(边界)断裂控制,表现为山高坡陡,地形差异受断裂影响明

显,北侧(奥陶系—寒武系碳酸盐岩母岩)受系列次级断裂影响,呈山低坡缓;对比沙垒田凸起南北侧搬运体系,西段北侧搬运体系规模大于南侧,凸起东段南侧搬运体系规模大于北侧(图6b,c)。

(3) 沙垒田凸起东段南、北两侧古近纪早期不同母岩区沉积响应存在差异。其中,南侧元古界混合花岗岩(或花岗岩)母岩供源能力强,形成的沉积体数量多、规模大,响应于多期稳定的地震楔形前积反射(延伸长度5~10 km);北侧奥陶系—寒武系碳酸盐岩母岩供源能力弱,形成的沉积体数量少、规模小,无明显地震前积反射。此外,北侧元古界混合花岗岩(或花岗岩)母岩对应沉积体规模较同期奥陶系—寒武系碳酸盐岩母岩对应沉积体规模大(图7)。

整体而言,沙垒田凸起自南向北依次发育太古界—元古界混合花岗岩、奥陶系—寒武系碳酸盐岩与碎屑岩、中生界火山碎屑岩;其中,凸起东段以元古代混合花岗岩为主,西段以奥陶系—寒武系碳酸盐岩为主。联合古地貌形态,指出砂岩富集区与源汇耦合系统相对应,即基岩组成、流域单元、物源通道及边界样式共同控制沉积砂体组成样式与规模。对比分析沙垒田凸起东西段、南北侧各控制要素与沉积砂体间定量关系,指出凸起东段南侧混合花岗岩基底、较大的流域面积与物源通道及斜坡带对应高效大规模源—汇系统^[8]。

5.2 沙垒田凸起始新世硅酸盐岩—碳酸盐岩母岩区源—汇差异响应

源—汇系统框架下优先解析母岩物质组成对沉积体通量的控制作用,即依托沙垒田地区始新世硅酸盐岩—碳酸盐岩母岩区源汇差异响应研究,可实现汇区沉积体的精准预测和刻画,服务硅酸盐岩—碳酸盐岩母岩差异分布下关键层段沉积体表征和预测(图7)。

在硅酸盐岩与碳酸盐岩母岩联合作用下,沙垒田凸起南部与北部始新统沙三段源—汇系统呈现明显差异(图7)。基于BQART模型利用河流输沙量(Q_s)和砂质通量(Q_t)可定量^元泥沙供给通量与沉积体堆积通量。考虑研究区始新世具有亚热带气候特征、中纬度欧亚大陆东岸的年平均气温为15℃^[60],可将研究区BQART模型简化为:

$$Q_s = 0.001 A^{0.7348} R \quad (2)$$

式中: Q_s 以Mt yr⁻¹为单位,A为流域单位面积(km²),R为流域垂向高差(km)。

砂质沉积物通量可表示为:

$$Q_t = H_f \times S_f \times \rho_f \times t^{-1} \quad (3)$$

式中: H_f 为扇三角洲或辫状河三角洲的有效厚度(km), S_f 为扇三角洲或辫状河三角洲的面积(km²), ρ_f 为近端扇叶的体积密度(t/m³), t 为始新世的持续时间(约5.5百万年)。该时期沉积物的体积密度 ρ_f 可由密度测井曲线(DEN)计算;沉积物DEN值介于2.206~2.841 t/m³,平均值为2.540 t/m³。进而,砂质沉积物通量(Q_t ,Mt yr⁻¹)可简化表示为:

$$Q_t = 0.00046 S_f \times H_f \quad (4)$$

据源—汇系统参数定量表征,不同类型母岩差异风化剥蚀导致近源沉积扇体的规模、几何形状和组成存在差异。在有效物源通道供给作用下,沙垒田凸起南部源—汇系统近岸 Q_t/Q_s 值普遍较高(59.78%~88.21%),而北部源—汇系统近岸 Q_t/Q_s 值普遍较低(26.89%~31.14%)。在南部源—汇系统中,大型汇水流域(A)、高汇水高差(R)和高地形坡度通常对应于大规模扇区(S_f)、大厚度(H_f)、中等砂质沉积通量(Q_t)及高 Q_t/Q_s 值;反之北部源—汇系统, Q_t/Q_s 比值相对偏低(图7)。在地处气候温暖湿润的亚热带湖相裂陷盆地中,硅酸盐岩母岩对应 Q_t/Q_s 范围常大于60%,而碳酸盐岩母岩对应 Q_t/Q_s 范围小于30%,混合母岩 Q_t/Q_s 值介于30%~60%。

基于渤海海域沙垒田凸起母岩性质(岩性、时代、分布及出露面积等)研究,可构建不同母岩差异通量响应模型(图8)。母岩性质能有效制约汇水流域形态及水系组合样式,如硅酸盐岩母岩(变质岩或花岗岩母岩)常具地形复杂、高程变化大(坡度大)、多级水系交叉分布等特点;碳酸盐岩母岩常表现出典型的岩溶地貌,与地下河—溶洞群伴生,水系(溪流、河流)发育特征不显著^[61]。母岩性质还可影响汇水流域的风化剥蚀速率^[28],进而影响沉积组成和沉积物通量。硅酸盐岩母岩一般经历物理(机械)风化作用,产出较厚的大规模碎屑物质或颗粒,近岸堆积, Q_t/Q_s 比值较高(>60%),直接影响源—汇系统砂质沉积物的发育和质量(图8a,b)。与之相反,碳酸盐岩母岩主要经历化学风化并形成化学溶解沉积物,提供薄层小尺度孤立沉积物颗粒,并以低 Q_t/Q_s (<30%)值在近岸堆积(图8a,c)。

5.3 沙垒田凸起始新世源—汇系统定量模型

在不同母岩沉积物收支平衡分析的基础上,充分结合层序构型与沉积体系演化相关认识,即选取

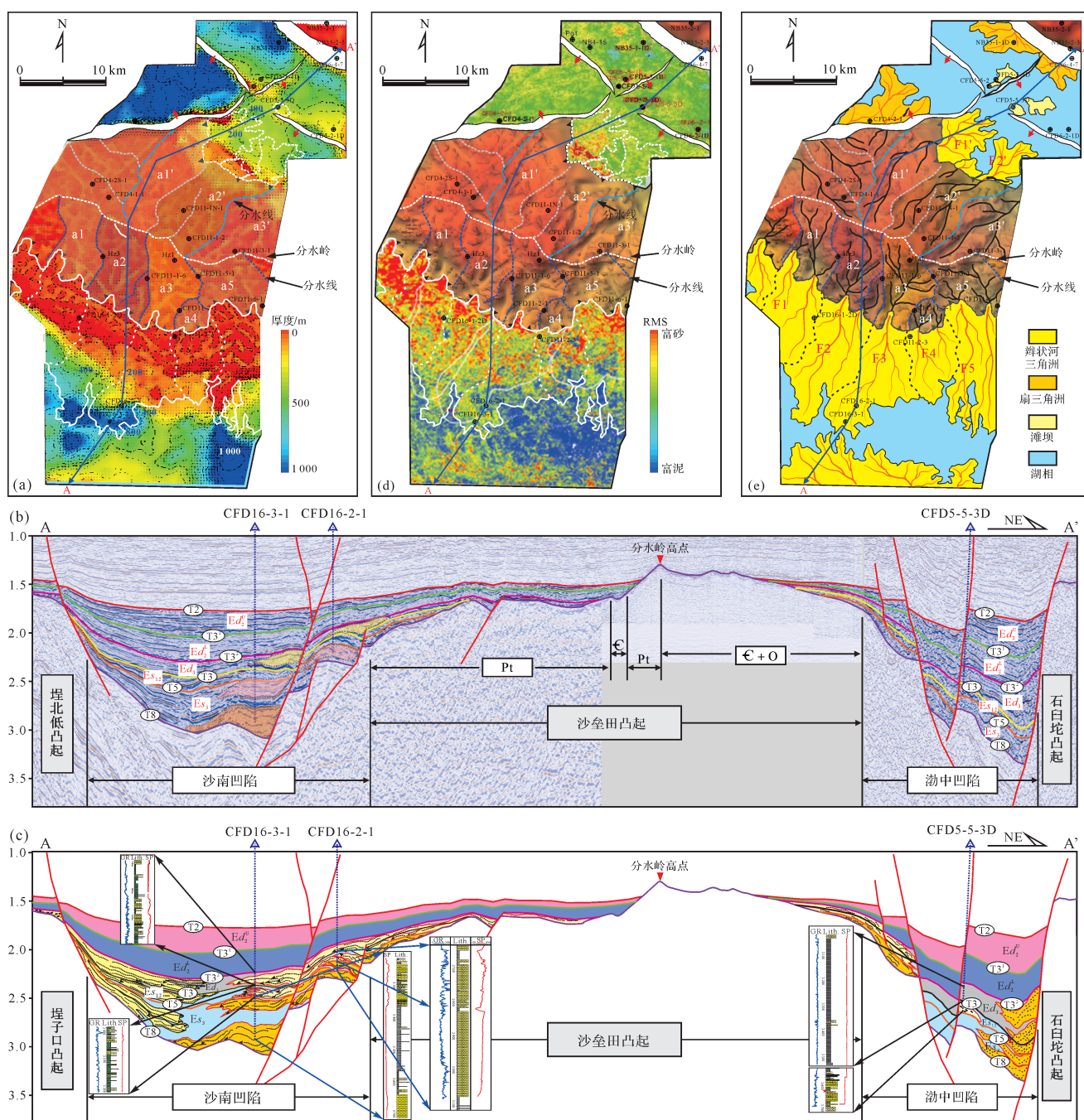


图7 渤海湾盆地沙垒田凸起及周边地区始新统沙河街组厚度(a)、典型过井地层格架(b)、地震相解释剖面图(c)、均方根属性地层切片(d)及沉积耦合响应组合图(e)

Fig.7 (a) Thickness of Eocene Shahejie Formation from in Shaleitian uplift and the surrounding area, Bohai Bay Basin; (b) typical multiple-well cross-section showing sequence framework; (c) seismic section interpretation of facies; (d) root mean square (RMS) stratal slice; (e) sedimentary facies map

母岩成分相对单一的源—汇系统,解剖边界条件及构造幕次对沉积体的控制作用,建立特定边界条件约束下源—汇系统定量模型^[19]。以渤海湾盆地沙垒田凸起始新世陡坡带源—汇系统为例,基于沙河街组三段(沙三段)沉积时期古地貌特征可将母岩区划

分为四个三级流域单元并定量拾取汇水高差(R)与汇水面积(A)地貌参数,确定古沟谷与断槽物源通道的分布及规模。进而利用BQART模型定量计算沙三段不同层序的沉积物通量^[58-59],并应用地震沉积学方法精细刻画、定量表征沙三段层序单元内的扇三

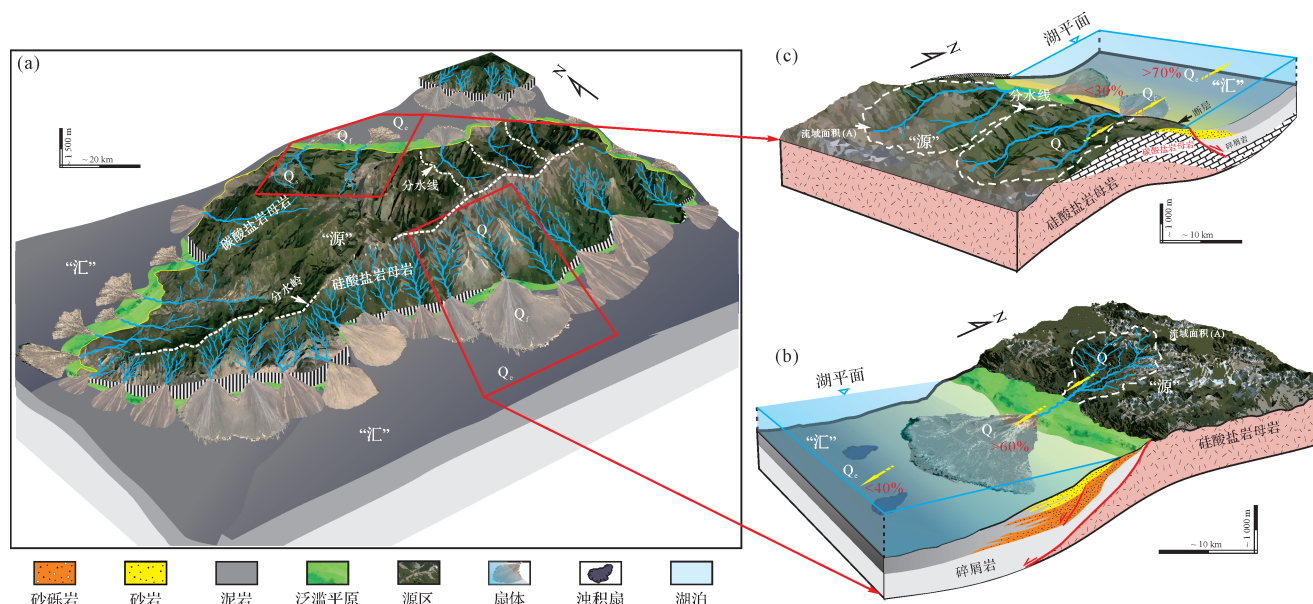


图8 渤海海域沙垒田凸起始新统沙河街组不同母岩源—汇系统响应模型(a), 沙垒田凸起南部硅酸盐岩母岩区(b)与北部碳酸盐岩母岩区(c) Q_1/Q_2 通量响应模型

Fig.8 (a) Source-to-sink model of the Shaleitian uplift in the Eocene Shahejie Formation, Bohai Bay Basin; (b, c) Q_1/Q_2 models of southern silicate rock and northern carbonate rock in the Shaleitian uplift

角洲沉积发育规模与时空演化特征。

基于沙三段地震响应特征和岩石物理关系,发现沉积单元A扇体最为发育,延伸范围大,沉积单元B扇体规模次之,沉积单元C扇体规模最小。在垂向序列上,一个完整裂陷幕内扇三角洲发育规模受控于基准面变化旋回,基准面下降阶段(Es_3^I),扇体快速向盆地方向推进,沉积厚度和范围较大,发育中等规模进积叠置型富砂砾扇三角洲(图9a);基准面快速上升阶段(Es_3^II),扇体向陆迁移、萎缩,发育厚度较薄、小规模退积的孤立型富泥扇三角洲(图9b);基准面缓慢上升至下降阶段(Es_3^III),扇体再次向盆地中心扩张、迁移,沉积范围明显增大,发育中等厚度、大规模进积的叠置型富砂扇三角洲(图9c)。陡坡带完整裂陷幕内源—汇系统各要素关系研究表明,流域单元面积与垂向汇水高差是沉积扇体发育规模的主控因素,断裂陡坡带发育花岗变质岩—古沟谷或断槽与断面组合的物源通道—近源粗粒扇三角洲—浊积扇—湖泊体系耦合的沉积模式(图9d)。

6 未来发展讨论与结论

通过多学科交叉融合,围绕源—汇系统要素及其定量耦合关系、构造—气候—沉积协同机制、物源区重建及定量物源分析、沉积路径和分散系统及物

理与数值模拟等内容开展研究,显著推进了沉积盆地矿产高效勘探开发。未来,应关注下列源—汇系统的主要问题和研究方向。

6.1 加强基于盆地类型和成因的源—汇系统类型和级次划分

沉积盆地成因类型复杂多样,不同成因沉积盆地形成了多样化的源—汇系统要素及其组合,不同类型沉积盆地和不同级次构造活动形成的构造古地貌控制了沉积物分散路径系统和沉积体系发育演化。应倡导基于盆地类型和成因的源—汇系统类型和级次划分,确定源—汇系统类型是定量表征源—汇系统要素及其耦合关系的基础。现有研究表明,可依不同类型物源、沟谷及沉积体系类型划分出不同类型、不同级次或不同组合的源—汇系统。如被动大陆边缘盆地易形成河流平原—陆架三角洲—深海重力流三段式源—汇系统;陆相湖盆多发育陡坡扇三角洲—重力流近物源体系、缓坡近源及轴向的远源三角洲—重力流二段式源—汇系统。

通过现代不同类型沉积盆地的源—汇系统要素研究(考虑盆—山关系和盆地内外供源),识别和表征源—汇系统要素及其控制因素,获取剥蚀地貌和沉积地貌特征和源—汇系统时空演化等信息,建立源—汇系统模型以指导深时源—汇系统的综合研究^[52]。

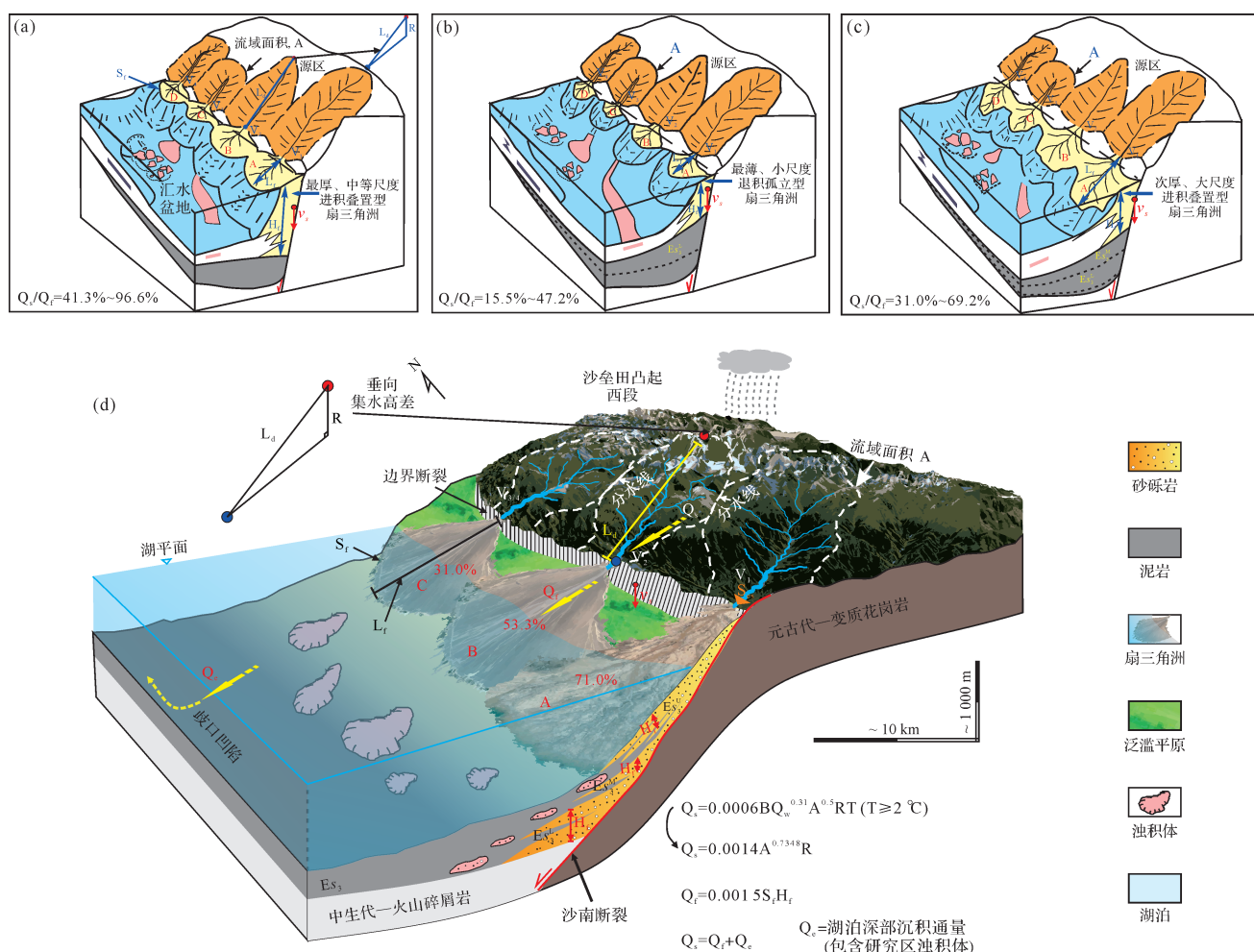


图9 渤海海域沙垒田凸起始新统沙河街组陡坡带完整裂陷幕不同单元源—汇配置关系(a~c, Es_3^L , Es_3^M , Es_3^U)及源—汇系统定量模型(d)

Fig.9 (a-c) Configurations of source-to-sink relationships in Eocene Shahejie Formation(Es_3^L , Es_3^M , Es_3^U); (d) quantitative source-to-sink model of Shaleitian uplift, Bohai Bay Basin

6.2 加强深时源—汇系统综合研究,不断提高源—系统汇要素表征精度

深时源—汇系统研究可知,经历了长时间地质风化、搬运和沉积作用,源—汇系统要素的边界不是原生界限,剥蚀地貌和沉积地貌均发生了不同程度的变化,地质信号发生了叠加改变。在盆地尺度上,利用多种资料(常常钻井资料较少)恢复原始地貌和限定深时源—汇系统还面临着挑战^[62],需要恢复深时汇水区规模、母岩岩性、地貌高差、搬运路径和气候演化,确定汇区盆地结构、构造沉降、沉积类型和体积等。显然,精确的高分辨率地层测年是解决上述问题的有效途径之一。此外,应加强多种测年方法交叉验证,保证地层测年的准确性与一致性,这对明确盆地沉积供给及物源区构造演化具有重要意义。

6.3 加强源—汇系统参数定量研究,建立具有预测功能的源—汇系统要素耦合模型

基于不同规模河流沉积通量收支平衡及其制约因素等定量研究,建立源—汇系统不同要素的定量响应关系,使源—汇系统研究具有更强的预测性和实用性。

沉积物源的性质与物源区的母岩组成、构造作用及气候条件密切相关。沉积物路径系统通过沉积物转换或分散或暂时存储将沉积物源与沉积体系有机联系起来,定量估算沉积物输入、沉积物在不同位置的配分以及潜在沉积物输出往往与区域构造、气候、相对海平面升降和自旋回作用或盆地构造活动密切相关。根据构造和气候条件变化产生的环境信号可有效测定母岩风化产物、搬运和沉积总量^[11]。

造山构造作用和气候变化会造成地表大区域变形和地貌形态变化,是导致沉积物风化、崩塌、剥落并在地表流动的驱动力。尽管揭示塑造山地地貌的构造作用和气候变量是一项富有挑战性的工作,但是基于地貌恢复的高精度估算源汇要素的BQART模型是解释深时路径系统侵蚀厚度、源区物质剥蚀、不同物源相对贡献、确定沉积物汇聚和质量平衡等参数的有效方法之一^[62]。此外,建立基于源—汇系统的定量地层模型也是研究深时源—汇系统要素响应关系的重要发展方向之一。

6.4 不断实现多学科与多方法交叉融合,准确重塑现代和深时源—汇系统

源—汇系统研究过程是极其复杂的,涉及层序地层学、构造地质学、沉积地质学、地球化学、地球物理学等。研究方法也逐渐从反演到正演、由静态至动态、从定性向定量方向发展。依赖于高分辨率三维地震数据的地震沉积学为研究深时源—汇系统不同要素提供了有效手段。通过地质年代法、将今论古法等方法准确地计算物源区剥蚀量,运用三维地震资料精确地恢复地质时期古地貌,测量古地貌参数,建立源—汇系统各要素的定量耦合模型,结合测井、地震属性与反演技术表征砂体三维空间分布,预测富含沉积矿产资源的沉积物体积、分布和质量^[38,62]。加强相关学科和方法之间的联系与验证,提高源—汇系统重塑的准确性是有效预测规模砂体和有利储层的保证。

6.5 深入研究盆山耦合作用,建立具有中国区域地质特色的源—汇系统模型

西太平洋边缘海发育全球最为典型的大规模三段式源—汇系统,也是全球物质交换最为活跃的边缘海系统,是研究源汇要素及其变迁的理想场所。我国南海海域还发育陆架边缘到深海盆地的深时三段式源—汇系统、中东部发育中新世代陆相盆地近物源二段式源—汇系统,也是开展盆山耦合作用、沉积物路径系统的理想场所。因此,多学科、多方法联合开展现代源—汇系统考察与深时源—汇系统对比研究,关注不同沉积盆地、不同母岩区源—汇系统差异性、耦合关系和定量化研究,开展源—汇系统定量化约束下的沉积过程模拟,构建系列砂体预测和指导沉积矿产勘探开发的、具有中国区域地质特点的源—汇系统模型是未来发展方向^[7,63]。

致谢 渤海湾盆地沙垒田地区源—汇系统研究得到了中海油天津分公司科研项目的支持和帮助指导,在此深表谢意!

参考文献(References)

- [1] Allen P A. From landscapes into geological history[J]. *Nature*, 2008, 451(7176): 274-276.
- [2] Sømme T O, Jackson C A L, Vaksdal M. Source-to-sink analysis of ancient sedimentary systems using a subsurface case study from the Møre-Trøndelag area of southern Norway: Part 1-depositional setting and fan evolution[J]. *Basin Research*, 2013, 25(5): 489-511.
- [3] 王成善,林畅松. 中国沉积学近十年来的发展现状与趋势[J]. 矿物岩石地球化学通报, 2021, 40(6): 1217-1229. [Wang Chengshan, Lin Changsong. Development status and trend of sedimentology in China in recent ten years[J]. *Bulletin of Mineralogy, Petrology and Geochemistry*, 2021, 40(6): 1217-1229.]
- [4] 林畅松,夏庆龙,施和生,等. 地貌演化、源—汇过程与盆地分析[J]. 地学前缘, 2015, 22(1): 9-20. [Lin Changsong, Xia Qinglong, Shi Hesheng, et al. Geomorphological evolution, source to sink system and basin analysis[J]. *Earth Science Frontiers*, 2015, 22(1): 9-20.]
- [5] 高抒. 美国《洋陆边缘科学计划2004》述评[J]. 海洋地质与第四纪地质, 2005, 25(1): 119-123. [Gao Shu. Comments on the “NSF Margins Program Science Plans 2004” [J]. *Marine Geology & Quaternary Geology*, 2005, 25(1): 119-123.]
- [6] 李铁刚,曹奇原,李安春,等. 从源到汇:大陆边缘沉积作用[J]. 地球科学进展, 2003, 18(5): 713-721. [Li Tiegang, Cao Qiyan, Li Anchun. Source to sink: Sedimentation in the continental margins[J]. *Advances in Earth Sciences*, 2003, 18(5): 713-721.]
- [7] 徐长贵. 陆相断陷盆地源—汇时空耦合控砂原理:基本思想、概念体系及控砂模式[J]. 中国海上油气, 2013, 25(4): 1-11, 21. [Xu Changgui. Controlling sand principle of source-sink coupling in time and space in continental rift basins: Basic idea, conceptual systems and controlling sand models[J]. *China Offshore Oil and Gas*, 2013, 25(4): 1-11, 21.]
- [8] 李顺利,朱筱敏,李慧勇,等. 源—汇系统要素定量表征及耦合模式:以沙垒田凸起与沙南凹陷沙河街组为例[J]. 中国海上油气, 2017, 29(4): 39-50. [Li Shunli, Zhu Xiaomin, Li Huiyong, et al. Quantitative characterization of elements and coupling mode in source-to-sink system: A case study of the Shahejie Formation between the Shaleitian uplift and Shanan Sag, Bohai Sea[J]. *China Offshore Oil and Gas*, 2017, 29(4): 39-50.]
- [9] 朱红涛,徐长贵,朱筱敏,等. 陆相盆地源—汇系统要素耦合研究进展[J]. 地球科学, 2017, 42(11): 1851-1870. [Zhu Hongtao, Xu Changgui, Zhu Xiaomin, et al. Advances of the source-to-sink units and coupling model research in continental basin[J]. *Earth Science*, 2017, 42(11): 1851-1870.]
- [10] 聂银兰,朱筱敏,董艳蕾,等. 陆相断陷盆地源—汇系统要素

- 表征及研究展望[J]. 地质论评, 2022, 68(5): 1881-1896. [Nie Yinlan, Zhu Xiaomin, Dong Yanlei, et al. Characterization and research prospect of source-to-sink system elements in continental rift basin[J]. Geological Review, 2022, 68(5): 1881-1896.]
- [11] Romans B W, Castelltort S, Covault J A, et al. Environmental signal propagation in sedimentary systems across timescales[J]. Earth-Science Reviews, 2016, 153: 7-29.
- [12] 邵龙义, 王学天, 李雅楠, 等. 深时源—汇系统古地理重建方法评述[J]. 古地理学报, 2019, 21(1): 67-81. [Shao Longyi, Wang Xuetian, Li Yanan, et al. Review on palaeogeographic reconstruction of deep-time source-to-sink systems[J]. Journal of Palaeogeography, 2019, 21(1): 67-81.]
- [13] Blum M, Martin J, Milliken K, et al. Paleovalley systems: Insights from Quaternary analogs and experiments[J]. Earth-Science Reviews, 2013, 116: 128-169.
- [14] Helland-Hansen W, Sømme T O, Martinsen O J, et al. Deciphering earth's natural hourglasses: Perspectives on source-to-sink analysis[J]. Journal of Sedimentary Research, 2016, 86(9): 1008-1033.
- [15] 操应长, 徐琦松, 王健. 沉积盆地“源—汇”系统研究进展[J]. 地学前缘, 2018, 25(4): 116-131. [Cao Yingchang, Xu Qisong, Wang Jian. Progress in “source-to-sink” system research[J]. Earth Science Frontiers, 2018, 25(4): 116-131.]
- [16] 徐长贵, 杜晓峰, 徐伟, 等. 沉积盆地“源—汇”系统研究新进展[J]. 石油与天然气地质, 2017, 38(1): 1-11. [Xu Changgui, Du Xiaofeng, Xu Wei, et al. New advances of the “source-to-sink” system research in sedimentary basin[J]. Oil & Gas Geology, 2017, 38(1): 1-11.]
- [17] 陆威延, 朱红涛, 徐长贵, 等. 源—汇系统级次划分方法及应用[J]. 地球科学, 2020, 45(4): 1327-1336. [Lu Weiyan, Zhu Hongtao, Xu Changgui, et al. Methods and applications of level subdivision of source-to-sink system[J]. Earth Science, 2020, 45(4): 1327-1336.]
- [18] 谈明轩, 朱筱敏, 张自力, 等. 古“源—汇”系统沉积学问题及基本研究方法简述[J]. 石油与天然气地质, 2020, 41(5): 1107-1118. [Tan Mingxuan, Zhu Xiaomin, Zhang Zili, et al. Summary of sedimentological issues and fundamental approaches in terms of ancient “source-to-sink” systems[J]. Oil & Gas Geology, 2020, 41(5): 1107-1118.]
- [19] Tan M X, Scholz C A. Source-to-sink response to high-amplitude lake level rise driven by orbital-scale climate change: An example from the Pleistocene Lake Malawi (Nyasa) Rift, East Africa[J]. Sedimentology, 2021, 68(7): 3494-3522.
- [20] 徐杰, 姜在兴. 碎屑岩物源研究进展与展望[J]. 古地理学报, 2019, 21(3): 379-396. [Xu Jie, Jiang Zaixing. Provenance analysis of clastic rocks: Current research status and prospect[J]. Journal of Palaeogeography (Chinese Edition), 2019, 21(3): 379-396.]
- [21] Pullen A, Ibáñez-Mejía M, Gehrels G E, et al. What happens when $n=1000$? Creating large- n geochronological datasets with LA-ICP-MS for geologic investigations[J]. Journal of Analytical Atomic Spectrometry, 2014, 29(6): 971-980.
- [22] Saylor J E, Sundell K E, Sharman G R. Characterizing sediment sources by non-negative matrix factorization of detrital geochronological data[J]. Earth and Planetary Science Letters, 2019, 512: 46-58.
- [23] Guo R H, Hu X M, Garzanti E, et al. How faithfully do the geochronological and geochemical signatures of detrital zircon, titanite, rutile and monazite record magmatic and metamorphic events? A case study from the Himalaya and Tibet[J]. Earth-Science Reviews, 2020, 201: 103082.
- [24] Chen H H, Wood L J, Gawthorpe R L. Sediment dispersal and redistributive processes in axial and transverse deep-time source-to-sink systems of marine rift basins: Dampier sub-basin, north-west shelf, Australia[J]. Basin Research, 2021, 33(1): 227-249.
- [25] Hovius N. Regular spacing of drainage outlets from linear mountain belts[J]. Basin Research, 1996, 8(1): 29-44.
- [26] Schumm S A, Winkley B R. The character of large alluvial rivers [M]//Schumm S A, Winkley B R. The variability of large alluvial rivers. New York: American Society of Civil Engineers, 1994: 1-9.
- [27] Davidson S K, North C P. Geomorphological regional curves for prediction of drainage area and screening modern analogues for rivers in the rock record[J]. Journal of Sedimentary Research, 2009, 79(10): 773-792.
- [28] Snedden J W, Galloway W E, Milliken K T, et al. Validation of empirical source-to-sink scaling relationships in a continental-scale system: The gulf of Mexico Basin Cenozoic record[J]. Geosphere, 2018, 14(2): 768-784.
- [29] 徐长贵, 龚承林. 从层序地层走向源—汇系统的储层预测之路[J]. 石油与天然气地质, 2023, 44(3): 521-538. [Xu Changgui, Gong Chenglin. Predictive stratigraphy: From sequence stratigraphy to source-to-sink system[J]. Oil & Gas Geology, 2023, 44(3): 521-538.]
- [30] 谈明轩, 朱筱敏, 张自力, 等. 构造掀斜主导的断陷湖盆缓坡层序“源—汇”正演模拟定量研究[J]. 沉积学报, 2022, 40(6): 1481-1493. [Tan Mingxuan, Zhu Xiaomin, Zhang Zili, et al. Source-to-sink quantitative stratigraphic forward modeling on the tilted hanging-wall sequence architecture of a tectonically-driven lacustrine rift basin[J]. Acta Sedimentologica Sinica, 2022, 40(6): 1481-1493.]
- [31] Syvitski J P M, Milliman J D. Geology, geography, and humans battle for dominance over the delivery of fluvial sediment to the coastal ocean[J]. The Journal of Geology, 2007, 115(1): 1-19.
- [32] Zhang J Y, Covault J, Pyrcz M, et al. Quantifying sediment supply to continental margins: Application to the Paleogene Wilcox Group, gulf of Mexico[J]. AAPG Bulletin, 2018, 102(9): 1685-1702.
- [33] Brewer C J, Hampson G J, Whittaker A C, et al. Comparison of methods to estimate sediment flux in ancient sediment routing systems[J]. Earth-Science Reviews, 2020, 207: 103217. .
- [34] Nyberg B, Helland-Hansen W, Gawthorpe R, et al. Assessing

- first-order BQART estimates for ancient source-to-sink mass budget calculations[J]. *Basin Research*, 2021, 33(4): 2435-2452.
- [35] 刘泽, 李三忠, Bukhari S W H, 等. 动态古地貌再造: Badlands 软件在盆地分析中的应用[J]. *古地理学报*, 2020, 22(1): 29-38. [Liu Ze, Li Sanzhong, Bukhari S W H, et al. Reconstruction of dynamic palaeogeomorphology: Application of Badlands software in basin analysis[J]. *Journal of Palaeogeography (Chinese Edition)*, 2020, 22(1): 29-38.]
- [36] Yang X M. Realistic and theoretical 3D modelling of the sedimentation, burial, thermal and tectonic history of the Gippsland Rift Basin[D]. Bentley: Curtin University, 2022.
- [37] Yang X M, Smith G, Gupta R. Basin analysis palaeo-landscape modelling: Testing the critical controls using experimental design constrained by a real 3D geological model, Gippsland Basin, Australia [J]. *Basin Research*, 2023, 35(1), 214-243.
- [38] Sømme T O, Helland-Hansen W, Martinsen O J, et al. Relationships between morphological and sedimentological parameters in source-to-sink systems: A basis for predicting semi-quantitative characteristics in subsurface systems[J]. *Basin Research*, 2009, 21(4): 361-387.
- [39] Covault J A, Romans B W, Graham S A, et al. Terrestrial source to deep-sea sink sediment budgets at high and low sea levels: Insights from tectonically active southern California[J]. *Geology*, 2011, 39(7): 619-622.
- [40] Patruno S, Hampson G J, Jackson C A L, et al. Clinoform geometry, geomorphology, facies character and stratigraphic architecture of a sand-rich subaqueous delta: Jurassic Sognefjord Formation, offshore Norway[J]. *Sedimentology*, 2015, 62(1): 350-388.
- [41] Leeder M R, Seger M J, Stark C P. Sedimentation and tectonic geomorphology adjacent to major active and inactive normal faults, southern Greece[J]. *Journal of the Geological Society*, 1991, 148(2): 331-343.
- [42] Burgess P M, Hovius N. Rates of delta progradation during highstands: Consequences for timing of deposition in deep-marine systems[J]. *Journal of the Geological Society*, 1998, 155(2): 217-222.
- [43] Allen P A, Densmore A L. Sediment flux from an uplifting fault block[J]. *Basin Research*, 2000, 12(3/4): 367-380.
- [44] Allen P A. Time scales of tectonic landscapes and their sediment routing systems[C]//Gallagher K, Jones S J, Wainwright J eds. In *Landscape evolution: Denudation, climate and tectonics over different time and space scales*. Geological Society of London Special Publication 296, London: Geological Society, 2008: 7-28.
- [45] Métivier F, Gaudemer Y. Stability of output fluxes of large rivers in South and East Asia during the last 2 million years: Implications on floodplain processes[J]. *Basin Research*, 1999, 11(4): 293-303.
- [46] Leeder M R, Harris T, Kirkby M J. Sediment supply and climate change: Implications for basin stratigraphy[J]. *Basin Research*, 1998, 10(1): 7-18.
- [47] Vandenbergh J. The relation between climate and river processes, landforms and deposits during the Quaternary[J]. *Quaternary International*, 2002, 91(1): 17-23.
- [48] Goodbred S L. Response of the Ganges dispersal system to climate change: A source-to-sink view since the last interstade[J]. *Sedimentary Geology*, 2003, 162(1/2): 83-104.
- [49] Covault J A, Graham S A. Submarine fans at all sea-level stands: Tectono-morphologic and climatic controls on terrigenous sediment delivery to the deep sea[J]. *Geology*, 2010, 38(10): 939-942.
- [50] 杨江海, 马严. 源—汇沉积过程的深时古气候意义[J]. *地球科学*, 2017, 42(11): 1910-1921. [Yang Jianghai, Ma Yan. Paleoclimate perspectives of source-to-sink sedimentary processes[J]. *Earth Science*, 2017, 42(11): 1910-1921.]
- [51] Lambeck K, Chappell J. Sea level change through the last glacial cycle[J]. *Science*, 2001, 292(5517): 679-686.
- [52] Nyberg B, Helland-Hansen W, Gawthorpe R L, et al. Revisiting morphological relationships of modern source-to-sink segments as a first-order approach to scale ancient sedimentary systems [J]. *Sedimentary Geology*, 2018, 373: 111-133.
- [53] Xu S H, Han J H, Wang Y M, et al. How much systems-tract scale, three-dimensional stratigraphic variability is present in sequence stratigraphy?: An answer from the Middle Miocene Pearl River Mouth Basin[J]. *AAPG Bulletin*, 2020, 104(6): 1261-1285.
- [54] Zhu X M, Li S L, Liu Q H, et al. Source to sink studies between the Shaleitian uplift and surrounding sags: Perspectives on the importance of hinterland relief and catchment area for sediment budget, western Bohai Bay Basin, China[J]. *Interpretation*, 2017, 5(4): ST65-ST84.
- [55] 徐长贵, 杜晓峰, 朱红涛. 陆相断陷盆地源汇系统控砂原理与应用[M]. 北京: 科学出版社, 2020: 1-233. [Xu Changgui, Du Xiaofeng, Zhu Hongtao. Principle and application of source-sink system for sand control in continental faulted basins[M]. Beijing: Science Press, 2020: 1-233.]
- [56] Allen M B, Macdonald D I M, Zhao X, et al. Early Cenozoic two-phase extension and Late Cenozoic thermal subsidence and inversion of the Bohai Basin, northern China[J]. *Marine and Petroleum Geology*, 1997, 14(7/8): 951-972.
- [57] 刘强虎, 朱筱敏, 李顺利, 等. 沙垒田凸起前古近系基岩分布及源—汇过程[J]. *地球科学*, 2016, 41(11): 1935-1949. [Liu Qianghu, Zhu Xiaomin, Li Shunli, et al. Pre-Palaeogene bedrock distribution and source-to-sink system analysis in the Shaleitian uplift[J]. *Earth Science*, 2016, 41(11): 1935-1949.]
- [58] Liu Q H, Zhu H T, Zhu X M, et al. Proportional relationship between the flux of catchment-fluvial segment and their sedimentary response to diverse bedrock types in subtropical lacustrine rift basins[J]. *Marine and Petroleum Geology*, 2019, 107: 351-364.
- [59] Liu Q H, Zhu X M, Zeng H L, et al. Source-to-sink analysis in

- an Eocene rifted lacustrine basin margin of western Shaleitian uplift area, offshore Bohai Bay Basin, eastern China[J]. *Marine and Petroleum Geology*, 2019, 107: 41-58.
- [60] 吴伟. 利用孢粉信息反演辽东湾古近纪气候变化[J]. 西南石油大学学报(自然科学版), 2010, 32(6): 11-15. [Wu Wei. Inverse palaeoclimate of Paleogene in Liao-dong Bay Depression by using palynological data[J]. *Journal of Southwest Petroleum University (Science & Technology Edition)*, 2010, 32(6): 11-15.]
- [61] Eisma D, 孙顺才, Song X, 等. 云南洱海现代沉积研究[J]. 湖泊科学, 2000, 12(1): 25-37. [Eisma D, Sun S C, Song X, et al. Sedimentation in Erhai Lake, Yunnan province, China[J]. *Journal of Lake Sciences*, 2000, 12(1): 25-37.]
- [62] Okwara I C, Hampson G J, Whittaker A C, et al. Source-to-sink mass-balance analysis of an ancient wave-influenced sediment routing system: Middle Jurassic Brent Delta, northern North Sea, offshore UK and Norway[J]. *Basin Research*, 2023, 35(4): 1555-1589.
- [63] 朱筱敏, 陈贺贺, 谈明轩, 等. 从太平洋到喜马拉雅的沉积学新航程: 21届国际沉积学大会研究热点分析[J]. 沉积学报, 2023, 41(1): 126-149. [Zhu Xiaomin, Chen Hehe, Tan Mingxuan, et al. A new journey in sedimentology from the Pacific to the Himalayas: Analysis of research hotpots from the 21st International Sedimentological Congress[J]. *Acta Sedimentologica Sinica*, 2023, 41(1): 126-149.]

Comprehensive Investigation of Deep-time Source-to-sink Systems: Case study of the Shaleitian area

ZHU XiaoMin¹, LIU QiangHu², TAN MingXuan³, LI ShunLi⁴, CHEN HeHe⁵, NIE YinLan¹

1. College of Geosciences, China University of Petroleum(Beijing), Beijing 102249, China

2. School of Earth Resources, China University of Geosciences (Wuhan), Wuhan 430070, China

3. College of Oceanography, Hohai University, Nanjing 210098, China

4. School of Energy Resources, China University of Geosciences (Beijing), Beijing 100083, China

5. School of Ocean Sciences, China University of Geosciences (Beijing), Beijing 100083, China

Abstract: [Significance] Source-to-sink study is a current focal point in sedimentary geology. The reconstruction of source-to-sink systems plays a crucial role in understanding regional tectonics, climate, sea (or lake) level fluctuation, provenance supply, transport pathways and dispersal systems, together with their interrelationships, and the prediction of the presence of large-scale sand bodies. [Progress] The key elements in classifying source-to-sink systems include temporal scale, formation mechanism and hierarchy. The primary research area concerns provenance system, transport pathway and sedimentary system, and research methods mainly include detrital mineral geochronology for quantitative tracing, reconstruction and quantitative analysis of source area geomorphology, analysis of geomorphic scaling relationships, quantitative estimation of sediment flux, and overall characterization based on stratigraphic forward modeling. There are quantitative sediment-budget relationships between different components of the source-to-sink system that can be used to predict the dimensional scale of sand bodies and the distribution of favorable reservoirs. The source-to-sink study of the Shaleitian area indicates that larger catchment relief, larger drainage area, and steeper topography are typically favorable for forming larger and thicker fan bodies. [Conclusions and Prospects] To advance future source-to-sink system studies, it is essential to strengthen the classification of the type and hierarchy of the source-to-sink system based on the type and origin of the basin. This enhances quantitative analysis of source-to-sink parameters and continually improves the precision of the interpretation of the deep-time elements. It is also necessary to build predictive coupled models of these systems to enable effective prediction of the spatiotemporal distribution of sand bodies. It is important to continually achieve cross-disciplinary and multi-method integration, and to establish source-to-sink models related to the distinctive regional geological features of China.

Key words: deep-time source-to-sink system; classification and element characterization; coupled model; Shaleitian uplift; development tendency